

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
MESTRADO EM ENGENHARIA MINERAL

**REAÇÃO ÁLCALI-SILICATO: AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE  
AGREGADOS GRAÚDOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE  
FRENTE A DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO**

**Miguel Sebastião Maia Chaves Arrais**

Recife  
2011

MIGUEL SEBASTIÃO MAIA CHAVES ARRAIS

**REAÇÃO ÁLCALI-SILICATO: AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE  
AGREGADOS GRAÚDOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE  
FRENTE A DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral, na área de concentração de Minerais Industriais.

Orientador:  
Professor DSc. Evenildo Bezerra de Melo

Recife  
2011

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Raquel Cortizo, CRB-4664

A773r

Arrais, Miguel Sebastião Maia Chaves.

Reação álcali-silicato: avaliação do comportamento de agregados graúdos da região metropolitana do Recife frente a diferentes tipos de cimento / Miguel Sebastião Maia Chaves Arrais. - Recife: O Autor, 2011.

ix, 97 folhas, il., gráfs., tabs., figs.

Orientador: Prof. DSc. Evenildo Bezerra de Melo

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2011.

Inclui Referências Bibliográficas e Apêndices.

1. Engenharia Mineral 2. Reação álcali-silicato. 3. Tipo de cimento 4. Reatividade dos agregados. I. Melo, Evenildo Bezerra (orientador). II. Título.

623.26 CDD (22. ed.)

UFPE  
BCTG/2011-113



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA

DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

MIGUEL SEBASTIÃO MAIA CHAVES ARRAIS

## “REAÇÃO ÁLCALI-SILICATO: AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE AGREGADOS GRAÚDOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE FRENTE A DIFERENTES TIPOS DE CIMENTOS”

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Minerais Industriais

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do

Dr. Evenildo Bezerra de Melo, considera o candidato.

**MIGUEL SEBASTIÃO MAIA CHAVES ARRAIS, Aprovado.**

Recife, 03 de Março de 2011.

Dr. EVENILDO BEZERRA DE MELO – Orientador (UFPE)

Dr. MILTON BEZERRA DAS CHAGAS FILHO – Primeiro Examinador Externo (UFCG)

Dr. FELISBELA MARIA DA COSTA OLIVEIRA - Segundo Examinador Interno (UFPE)

Dr. ELDEMAR DE ALBUQUERQUE MENOR – Terceiro Examinador Externo (UFPE)

À minha mãe, Francisca Leopoldina  
de Araújo Chaves Arrais.

## Agradecimentos

Ao orientador, professor Evenildo Bezerra de Melo;

À banca examinadora:

professora Felisbela Maria da Costa Oliveira,

professor Eldemar de Albuquerque Menor

e professor Milton Bezerra das Chagas Filho;

Ao chefe do Departamento de Geologia da UFPE,

professor Virginio Henrique de Miranda Lopes Neuman;

Ao coordenador do LGGM,

professor Valdir do Amaral Vaz Manso;

Ao professor Ronaldo Gomes, da UFG ;

Ao geólogo, Dr. Carlos Campos;

Ao Departamento de Apoio e Controle Técnico

de Furnas Centrais Elétricas S. A., na pessoa do

Dr. Rubens Machado Bittencourt;

Ao pessoal de Furnas Centrais Elétricas S.A.

Dr. Emídio Neto de Souza Lira,

Dra. Elizabeth Batista, e Dorival Tizzo;

À geóloga da CPRM, Maria Angélica Fonseca Sampaio;

A Maurílio e Fidelis, do Laboratório de Laminação da UFPE;

Ao professor Eduardo Falcão e a Elaine dos Santos Silva

do Departamento de Química Fundamental da UFPE;

A Marcelo Gomes, do Laboratório de Tecnologia Mineral/UFPE;

A Sharliane Arruda D’Almeida;

A Voleide e Edna, da Secretaria do PPGEMINAS/UFPE;

Aos colegas do Mestrado: Lamartine, Jaqueline, Renata, Wagner,

Thayse, Lúcia Dely, Viviane, Bruno, João Paulo; Lúcia, Tiago e Rútilo;

Aos colegas do LGGM:

Luis Gonzaga, Natan, Thiago, Elida e Fernando;

A Verônica, Maria Luiza e Maria Laura;

A meu irmão Agostinho e a minhas irmãs

Socorro, Ondina e Alice;

A Carlos Alberto de Alencar Mota;

As minhas tias Maria das Neves Arrais e Graziela Maia Arrais.

## SUMÁRIO

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS                                                        | i         |
| LISTA DE FIGURAS                                                                      | iii       |
| LISTA DE TABELAS                                                                      | vi        |
| RESUMO                                                                                | viii      |
| ABSTRACT                                                                              | ix        |
| <b>INTRODUÇÃO</b>                                                                     | <b>1</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1 - A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO</b>                                          | <b>5</b>  |
| <b>1.1. Definição</b>                                                                 | <b>5</b>  |
| <b>1.2. Histórico</b>                                                                 | <b>6</b>  |
| <b>1.3. Tipos de reações álcali-agregado (RAA)</b>                                    | <b>9</b>  |
| 1.3.1. Reação álcali-sílica                                                           | 10        |
| 1.3.2. Reação álcali-silicato                                                         | 11        |
| 1.3.3. Reação álcali-carbonato                                                        | 12        |
| <b>1.4. Mecanismo de expansão da reação álcali-sílica/silicato (RAS)</b>              | <b>13</b> |
| <b>1.5. Fatores intervenientes na reação álcali-sílica/silicato (RAS) no concreto</b> | <b>26</b> |
| 1.5.1. Álcalis                                                                        | 26        |
| 1.5.2. Sílica reativa                                                                 | 29        |
| 1.5.3. Umidade e Temperatura                                                          | 35        |
| 1.5.4. Adições                                                                        | 37        |
| <b>1.6. Métodos utilizados na investigação da reação álcali-sílica/silicato (RAS)</b> | <b>40</b> |
| 1.6.1. Análise petrográfica                                                           | 42        |
| 1.6.2. Método acelerado das barras de argamassa                                       | 43        |
| 1.6.3. Microscopia eletrônica de varredura                                            | 46        |
| <b>CAPÍTULO 2 – MATERIAIS E MÉTODOS</b>                                               | <b>49</b> |
| <b>2.1. Materiais</b>                                                                 | <b>49</b> |
| 2.1.1. Agregados                                                                      | 49        |
| 2.1.2. Cimentos                                                                       | 50        |
| 2.1.3. Água                                                                           | 53        |
| <b>2.2. Métodos</b>                                                                   | <b>54</b> |
| 2.2.1. Coleta e preparação das amostras de agregados                                  | 55        |
| 2.2.2. Caracterização química dos agregados e cimentos                                | 56        |

|                                                                                                                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.3. Reatividade potencial dos agregados.....                                                                                                                                     | 57        |
| 2.2.3.1. Análise petrográfica.....                                                                                                                                                  | 57        |
| 2.2.3.2. Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.....                                                                                                                 | 57        |
| 2.2.3.3. Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-x.....                                                                                                       | 63        |
| <b>CAPITULO 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                                                                                                                    | <b>65</b> |
| 3.1. Caracterização química dos agregados e cimentos.....                                                                                                                           | 65        |
| 3.1.1. Agregados.....                                                                                                                                                               | 65        |
| 3.1.2. Cimentos.....                                                                                                                                                                | 65        |
| 3.2. Reatividade potencial dos agregados.....                                                                                                                                       | 66        |
| 3.2.1. Análise petrográfica.....                                                                                                                                                    | 66        |
| 3.2.2. Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.....                                                                                                                   | 73        |
| 3.2.2.1. Reatividade potencial dos agregados.....                                                                                                                                   | 73        |
| 3.2.2.2. Avaliação da eficiência das adições pozolânicas nos cimentos.....                                                                                                          | 75        |
| 3.2.2.3. Avaliação do efeito do teor de álcalis dos cimentos nas expansões.....                                                                                                     | 79        |
| 3.2.3. Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-x.....                                                                                                         | 80        |
| <b>CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>                                                                                                                                     | <b>90</b> |
| 4.1. Conclusões.....                                                                                                                                                                | 90        |
| 4.1.1. Potencialidade reativa dos agregados.....                                                                                                                                    | 90        |
| 4.1.2. Eficiência dos cimentos.....                                                                                                                                                 | 91        |
| 4.2. Sugestões.....                                                                                                                                                                 | 91        |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                                                                                                             | <b>93</b> |
| <b>APÊNDICE A – Fichas-técnica dos cimentos utilizados na pesquisa</b>                                                                                                              |           |
| <b>APÊNDICE B – Análises químicas dos cimentos e agregados.</b>                                                                                                                     |           |
| <b>APÊNDICE C – Fichas de caracterização mineralógica e análise petrográfica.</b>                                                                                                   |           |
| <b>APÊNDICE D – Tabelas contendo a evolução das expansões médias percentuais das barras de argamassa obtidas nas idades avaliadas.</b>                                              |           |
| <b>APÊNDICE E – Gráficos contendo a evolução das expansões médias percentuais das barras de argamassa, obtidas nas idades avaliadas, incluindo sempre as idades de 16 e 30 dias</b> |           |



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Å: angstrom ( $10^{-10}$  metros)

µm: micro metro ( $10^{-6}$  metros)

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: óxido de alumínio

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: American Society for Testing and Materials

Ca(OH)<sub>2</sub>: hidróxido de cálcio

Ca<sup>++</sup>: cátion cálcio

CaCO<sub>3</sub>: carbonato de cálcio

CaO: óxido de cálcio

CP I: cimento Portland comum

CP II-E: cimento Portland composto com adição de escória

CP II-F: cimento Portland composto com adição de filler

CP II-Z: cimento Portland composto com adição pozolânica

CP III: cimento Portland de alto forno

CP IV: cimento Portland pozolânico

CP V-ARI: cimento Portland de alta resistência inicial

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

C-K-S-H: silicatos de sódio, potássio e cálcio hidratados

CPRM: Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil

DQF: Departamento de Química Fundamental

EDS: energy dispersive spectrometer x-rays

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: óxido de ferro

K<sup>+</sup>: cátion potássio

K-feldspato: feldspato alcalino

kg: kilograma

K<sub>2</sub>O: óxido de potássio

KOH: hidróxido de potássio

LGGM: Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha

m<sup>3</sup>: metro cúbico

MEV: Microscopia eletrônica de varredura

MPa: mega Pascal

Mg(OH)<sub>2</sub>: hidróxido de magnésio (brucita)

$\text{Mg}^{++}$ : cátion magnésio

$\text{Na}_2\text{O}$ : óxido de sódio

$\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}}$ : equivalente alcalino

$\text{Na}^+$ : cátion sódio

$\text{NaOH}$ : hidróxido de sódio

NBR: norma brasileira regulamentada

$\text{OH}^-$ : ânion hidróxido

PF: perda ao fogo

pH: potencial de hidrogênio

PPGEMINAS: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas

RAA: reação álcali-agregado

RAC: reação álcali-carbonato

RAS: reação álcali-silica/silicato

RI: resíduo insolúvel

RMR: Região Metropolitana do Recife

$\text{SiO}_2$ : óxido de silício (sílica)

Si-OH: grupo silanol

Si-O-Si: ligações do grupo siloxano

UFG: Universidade Federal de Goiás

UFPE: Universidade Federal de Pernambuco

WDS: wavelength dispersive spectrometer x-rays

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 - Bloco de fundação de edifício da RMR afetado por RAS (Andrade, 2006).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 5  |
| Figura 1.2 – Processo de reação álcali-agregado. Adaptado de Valduga (2002).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 14 |
| Figura 1.3 - Esquema apresentado no modelo de Dent-Glasser e Kataoka:<br>a) ionização dos grupos silanol e neutralização pelos íons $\text{Na}^+$ e $\text{K}^+$ ;<br>b) ruptura das pontes siloxano pelos íons hidroxila (Dent-Glasser e Kataoka, 1981).....                                                                                                                                               | 15 |
| Figura 1.4 - Ataque dos álcalis à sílica: a) bem cristalizada; b) mal cristalizada. As estruturas apresentadas são meramente ilustrativas (Dent-Glasser e Kataoka, 1981).....                                                                                                                                                                                                                               | 16 |
| Figura 1.5 - Esquema reacional apresentado por Wang e Gillot:<br>a) estrutura superficial da sílica; b) trocas protônicas entre os grupos silanol e os cátions $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ e $\text{Ca}^{++}$ ; c) ataque dos íons hidroxilas às pontes siloxano internas Si-O-Si; d) trocas protônicas entre os grupos silanol internos e os íons $\text{Na}^+$ e $\text{K}^+$ (Wang e Gillot, 1991)..... | 18 |
| Figura 1.6 - Solubilidade do hidróxido de cálcio em solução alcalina (Greenberg, 1956, citado por Cristino, 2008).....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 19 |
| Figura 1.7 - Representação esquemática do modelo de Poole:<br>a) estrutura da sílica reativa; b) ataque dos íons $\text{OH}^-$ , $\text{Na}^+$ e $\text{K}^+$ à sílica reativa; c) substituição de alguns íons $\text{Na}^+$ e $\text{K}^+$ por íons $\text{Ca}^{++}$ (Poole, 1992).....                                                                                                                    | 21 |
| Figura 1.8 - Representação esquemática da estrutura da sílica não hidratada (Powers e Steinour, 1995a).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 23 |
| Figura 1.9 - Representação esquemática da estrutura da sílica hidratada (Powers, e Steinour, 1995b).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 23 |
| Figura 1.10 - Esquema das etapas envolvidas na transição de gel a colóide (Prezzi et al., 1997).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 25 |
| Figura 1.11 - Concentração de íons na solução dos poros do concreto ao longo do tempo de cura (Kurtis et al., 2002).....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 27 |
| Figura 1.12 - Tetraedro de sílica.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 30 |
| Figura 1.13 - (a) Sílica cristalina e (b) Sílica amorfa (Santos e Brito, 2008).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 31 |
| Figura 1.14 - Influência da quantidade de agregado reativo na expansão.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 32 |
| Figura 2.1 – Mapa de localização com os pontos de coleta das amostras de agregados (adaptado de Barreto, 2010).....                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 50 |
| Figura 2.2 – Deionizador de água do laboratório de Furnas Centrais Elétricas.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 54 |

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.3 - Organograma das etapas experimentais da pesquisa.....                                            | 55 |
| Figura 2.4 – Amostras dos agregados (areia artificial).....                                                   | 58 |
| Figura 2.5 – Amostra de agregado após o peneiramento e secagem em estufa.....                                 | 59 |
| Figura 2.6 - Misturador utilizado na confecção das argamassas.....                                            | 60 |
| Figura 2.7 - Molde utilizado na confecção das barras de argamassa.....                                        | 61 |
| Figura 2.8 - Vistas externa e interna do recipiente para imersão das<br>barras em água destilada.....         | 61 |
| Figura 2.9 - Relógio comparador com barra-padrão e com barra de argamassa pronta para<br>leitura.....         | 62 |
| Figura 2.10 – Vistas externa e interna dos recipientes para imersão das<br>barras em solução de NaOH.....     | 62 |
| Figura 2.11 - Regulador de temperatura dos recipientes de imersão das barras.....                             | 63 |
| Figura 3.1 – Fotomicrografias de amostras do agregado V-1, litotipo V-1.1.....                                | 68 |
| Figura 3.2 – Fotomicrografias de amostras do agregado V-1, litotipo V-1.2.....                                | 69 |
| Figura 3.3 – Fotomicrografias de amostras do agregado V-1, litotipo V-1.3.....                                | 69 |
| Figura 3.4 – Fotomicrografias de amostras do agregado V-2, litotipo V-2.1.....                                | 70 |
| Figura 3.5 – Fotomicrografias de amostras do agregado V-2, litotipo V-2.2.....                                | 70 |
| Figura 3.6 – Fotomicrografias de amostras do agregado I-1, litotipo I-1.1.....                                | 71 |
| Figura 3.7 – Fotomicrografias de amostras do agregado I-1, litotipo I-1.2.....                                | 71 |
| Figura 3.8 – Fotomicrografias de amostras do agregado J-1, litotipo J-1.1.....                                | 72 |
| Figura 3.9 – Fotomicrografias de amostras do agregado J-1, litotipo J-1.2.....                                | 73 |
| Figura 3.10 - Expansões médias das barras confeccionadas com o cimento CP V-ARI.....                          | 74 |
| Figura 3.11 - Expansões médias das barras confeccionadas com os<br>cimentos pozolânicos e o agregado I-1..... | 76 |
| Figura 3.12 - Expansões médias das barras confeccionadas com os<br>cimentos pozolânicos e o agregado J-1..... | 76 |
| Figura 3.13 - Expansões médias das barras confeccionadas com os<br>cimentos pozolânicos e o agregado V-1..... | 77 |

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.14 - Expansões médias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado V-2.....                                      | 78 |
| Figura 3.15 - Relação entre o equivalente alcalino do cimento e as expansões médias das barras.....                                             | 80 |
| Figura 3.16 – Imagens obtidas com MEV e espectros obtidos com EDS da barra moldada com o agregado V-1 em combinação com o cimento CP II-Z.....  | 82 |
| Figura 3.17 - Imagens obtidas com MEV e espectro obtido com EDS da barra moldada com o agregado V-1 em combinação com o cimento CP-IV.....      | 84 |
| Figura 3.18 - Imagens obtidas com MEV e espectros obtidos com EDS da barra moldada com o agregado V-1 em combinação com o cimento CP V-ARI..... | 85 |
| Figura 3.19 – Imagens obtidas com MEV e espectro obtido com EDS da barra moldada com o agregado V-2 em combinação com o cimento CP II-Z.....    | 86 |
| Figura 3.20 – Imagens obtidas com MEV e espectro obtido com EDS da barra moldada com o agregado V-2 em combinação com o cimento CP V-ARI.....   | 87 |
| Figura 3.21 – Imagens obtidas com MEV e espectros obtidos com EDS da barra moldada com o agregado I-1 em combinação com o cimento CP II-Z.....  | 89 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1.1 - Ocorrências de casos de RAA, em estruturas hidráulicas, em diversos países (Kihara et al., 1998).....                                              | 7  |
| Tabela 1.2 – Barragens afetadas por RAA, no Brasil (Andriolo, 2000).....                                                                                        | 8  |
| Tabela 1.3 - Solubilidade dos hidróxidos alcalinos e de cálcio em água (Greenberg, 1956, citado por Cristino, 2008).....                                        | 19 |
| Tabela 1.4 - Raio hidráulico dos íons $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ e $\text{Ca}^{++}$ e energia eletrostática (Greenberg, 1956, citado por Cristino, 2008)..... | 19 |
| Tabela 1.5 - Teores de adições minerais empregados em substituição ao cimento para inibição da RAA (Hasparyk, 2005).....                                        | 39 |
| Tabela 1.6 - Tempo de duração e limites de expansão, adotados em diversos países, para o Método Acelerado (Bellew, 1997).....                                   | 45 |
| Tabela 2.1- Tipos de cimentos produzidos no Brasil e respectivos teores de adições.....                                                                         | 51 |
| Tabela 2.2 - Exigências químicas dos tipos de cimento produzidos no Brasil.....                                                                                 | 51 |
| Tabela 2.3 - Exigências físicas dos tipos de cimento produzidos no Brasil.....                                                                                  | 51 |
| Tabela 2.4 - Exigências mecânicas dos tipos de cimento produzidos no Brasil.....                                                                                | 52 |
| Tabela 2.5 - Características químicas dos cimentos utilizados na pesquisa.....                                                                                  | 53 |
| Tabela 2.6 - Características físicas e mecânicas dos cimentos utilizados na pesquisa.....                                                                       | 53 |
| Tabela 2.7 - Amostras de agregados utilizados no ensaio de expansão.....                                                                                        | 56 |
| Tabela 2.8 - Amostras de fragmentos de rocha utilizados na análise petrográfica.....                                                                            | 56 |
| Tabela 2.9 - Frações granulométricas para o ensaio NBR 15577/08.....                                                                                            | 58 |
| Tabela 2.10 – Identificação das barras de argamassa do método acelerado.....                                                                                    | 59 |
| Tabela 2.11 - Barras de argamassa utilizadas na análise por microscopia eletrônica e EDS...64                                                                   | 64 |
| Tabela 3.1 - Análise química dos agregados.....                                                                                                                 | 65 |
| Tabela 3.2 - Comparação entre as características químicas fornecidas e análises realizadas...66                                                                 | 66 |
| Tabela 3.3 - Resumo das principais características petrográficas das rochas avaliadas.....                                                                      | 67 |
| Tabela 3.4 - Expansões médias aos 30 dias e classificação da potencialidade reativa das barras confeccionadas com o cimento CP V-ARI-RS.....                    | 71 |

Tabela 3.5 - Expansões médias aos 16 dias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado I-1 e verificação da eficiência dos cimentos.....73

Tabela 3.6 - Expansões médias aos 16 dias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado J-1 e verificação da eficiência dos cimentos.....74

Tabela 3.7 - Expansões médias aos 16 dias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado V-1 e verificação da eficiência dos cimentos.....74

Tabela 3.8 - Expansões médias aos 16 dias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado V-2 e verificação da eficiência dos cimentos.....75

## RESUMO

ARRAIS, M. S. M. C. **Reação álcali-silicato: avaliação do comportamento de agregados graúdos da Região Metropolitana do Recife frente a diferentes tipos de cimentos.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, UFPE, Recife, 2011.

A reação álcali-silicato apresenta-se como uma das condicionantes da durabilidade das estruturas de concreto. São reações expansivas internas que se desenvolvem entre os constituintes reativos dos agregados e os íons alcalinos e hidroxilas presentes na solução intersticial do concreto. Constituem uma manifestação patológica para a qual ainda não existe uma solução aceitável, mas apenas alguns métodos de mitigação. A adoção de agregados não reativos tem sido considerada a maneira mais eficiente de evitar a ocorrência da reação, porém nem sempre é possível. Nesse sentido, a utilização de adições pozolânicas nos cimentos utilizado para a confecção de concretos tem se mostrado uma forma mais fácil e eficaz de inibir essas reações. Contudo no Brasil e particularmente em Pernambuco, os estudos realizados sobre a potencialidade reativa de agregados e a capacidade de cimentos pozolânicos na prevenção da reação são recentes e escassos. Então, o presente trabalho surge neste contexto e avaliou o potencial reativo de quatro amostras de agregados graúdos utilizados na confecção de concreto na Região Metropolitana do Recife frente a três tipos de cimentos: CP II-Z, CP IV e CP V-ARI. Para tal adotou-se a metodologia da NBR 15577/2008, incluindo análise petrográfica, determinação de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado e microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectroscopia de raios-x por energia dispersiva. Os resultados da análise petrográfica mostraram que todos os agregados estudados possuem minerais reativos. As expansões medidas no ensaio acelerado confirmaram a potencialidade reativa de três das quatro amostras de agregados. Apenas o cimento CP IV foi eficaz para inibir as expansões deletérias nas barras moldadas com os agregados potencialmente reativos. As observações por MEV/EDS mostraram que em todas as barras de argamassa houve a formação de gel sílico-alcalino, inclusive naquelas moldadas com o cimento CP IV. As maiores expansões ocorreram nas barras confeccionadas com as amostras de agregados provenientes de rochas miloníticas, que apresentaram maior quantidade de quartzo microgranular.

**Palavras-chave:** reação álcali-silicato; tipo de cimento; reatividade dos agregados.



## ABSTRACT

ARRAIS, M. S. M. C. **Reação álcali-silicato: avaliação do comportamento de agregados graúdos da Região Metropolitana do Recife frente a diferentes tipos de cimentos.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, UFPE, Recife, 2011.

The alkali-silicate reaction presents as one of the determinants of the durability of concrete structures. Are internal expansive reactions that develop among the constituents of the reactive aggregate and alkali and hydroxyl ions present in the concrete interstitial solution. They are a pathological manifestation for which there is not an acceptable solution, but only some methods of mitigation. The adoption of non-reactive aggregates has been considered the most effective way to prevent the occurrence of the reaction, but not always possible. In this sense, the use of admixtures in pozzolanic cements used for making concrete has become an easier and more effective to inhibit these reactions. But in Brazil and particularly in Pernambuco, studies on the reactivity potential of aggregates and cement capacity in the prevention of pozzolanic reaction are recent and scarce. So, this work appears in this context and assessed the potential reactivity of four samples of coarse aggregates used in the manufacture of concrete in the metropolitan area of Recife against three types of cements: CP II-Z, CP IV and CP V-ARI. To this end we adopted the methodology of NBR 15577/2008, including petrographic analysis, determination of expansion in mortar bars by the accelerated method and scanning electron microscopy coupled with energy dispersive spectrometer x-rays. The results of petrographic analysis showed that all compounds studied possess reactive minerals. The expansions measured in accelerated tests confirmed the reactivity potential of three of the four samples of households. Only the cement IV CP was effective in inhibiting the deleterious expansions bars molded with potentially reactive aggregates. Observations by SEM / EDS showed that in all the mortar bars were formed from sand-alkaline gel, including those cast with cement CP IV. The major expansions took place in bars made with the aggregate samples from mylonitic rocks, with a major amount of microgranular quartz.

**Keywords:** alkali-silicate reaction, type of cement, aggregate reactivity.

# INTRODUÇÃO

## Contexto e justificativa da pesquisa

Constituído, essencialmente, pela mistura de agregado graúdo (brita), agregado miúdo (areia), aglomerante (cimento) e água, o concreto apresenta-se como uma das substâncias mais versáteis de que se tem conhecimento. Além da grande disponibilidade e baixo custo dos materiais e mão-de-obra para sua produção, a facilidade com que pode ser moldado nas mais variadas formas e dimensões, empresta-lhe o título de material de construção mais usado na engenharia.

Por conseguinte, a larga utilização do concreto o expõe aos mais diferentes tipos de situações ambientais. As interações do meio ambiente com as estruturas de concreto podem ocasionar alterações em suas propriedades, que poderão, por sua vez, comprometer a durabilidade destas estruturas.

As reações álcali-agregado apresentam-se como uma das condicionantes da durabilidade das estruturas de concreto. São reações expansivas internas que se desenvolvem entre os constituintes reativos dos agregados e os íons alcalinos e hidroxilas presentes na solução intersticial do concreto. Constituem uma manifestação patológica para a qual ainda não existe uma solução aceitável, mas apenas alguns métodos de mitigação. Em geral, subdividem-se em dois tipos: reação álcali-sílica e reação álcali-carbonato.

As reações álcali-sílica, que envolvem rochas e minerais contendo fases reativas de sílica são consideradas atualmente a causa de deterioração precoce de um número cada vez maior de estruturas de concreto. Um caso considerado como particular das reações álcali-sílica é a reação álcali-silicato, objeto desta pesquisa. Neste tipo a reação se processa mais lentamente e as fases reativas dos agregados são alguns tipos de silicatos presentes em certos tipos de rochas. É o tipo de reação álcali-agregado que mais comumente ocorre no Brasil.

A recuperação de estruturas comprometidas pelas reações álcali-agregado, quando possível, é cara, complexa e exige estudos detalhados de cada caso. Uma vez instalado o processo reativo, é possível apenas minimizar as expansões futuras.

Os serviços de recuperação, em geral, são caros, pois envolvem procedimentos específicos como injeção, protensão e encamisamento, além de materiais dispendiosos. Daí a importância do conhecimento da potencialidade reativa dos agregados para que se possam adotar as medidas preventivas necessárias.

A adoção de agregados não reativos tem sido considerada a maneira mais eficiente de evitar a ocorrência da reação. Se por questões econômicas isso não for possível, uma boa alternativa é lançar mão de materiais que permitam a neutralização da reatividade como o cimento Portland pozolânico ou o cimento Portland de alto-forno (Tiecher, 2006).

O fenômeno da reação álcali-agregado, apesar de conhecido e estudado desde a década de 1940, ainda não foi totalmente investigado e compreendido pela Engenharia. Segundo informação verbal do geólogo Cláudio Sbrighi, esse é um tema com alto grau de sofisticação e a dificuldade em entender o assunto em sua totalidade existe porque ele abrange conceitos os mais variados, sejam de química, mineralogia, engenharia ou ciência dos materiais.

Historicamente, a ocorrência da reação álcali-agregado esteve relacionada principalmente às obras hidráulicas como barragens, pontes e estruturas portuárias. Nas últimas décadas o interesse pelo assunto aumentou consideravelmente em função do aparecimento de novos casos da manifestação patológica em edifícios, causando, sobretudo, fissuras em estacas e blocos de fundações localizadas em ambientes úmidos.

No Brasil, os estudos envolvendo a reação álcali-agregado, especialmente com relação à potencialidade reativa de agregados, são recentes e escassos. Valduga (2002), avaliou o potencial reativo de 36 amostras de agregados do Estado de São Paulo, concluindo que cerca de 60% das amostras são potencialmente reativas. Tiecher (2006) realizou estudo semelhante na região Sul do Brasil, concluindo que os agregados utilizados para a produção de concreto naquela região tem grande potencial reativo, dependendo do tipo de cimento utilizado.

Na RMR - Região Metropolitana do Recife, a partir do evento relacionado com o Edifício Areia Branca, em 2004, embora a reação álcali-silicato não tenha sido a causa principal do desabamento, constatou-se a sua presença. Esse fato gerou grande preocupação no meio técnico-científico, o que suscitou o desenvolvimento de estudos sobre o problema, especialmente na RMR (Andrade, 2006).

Aliado a este fato percebe-se facilmente que a indústria da construção civil na RMR tem apresentado, nos últimos anos, um elevado índice de crescimento, com a perspectiva de crescimento ainda maior, nos próximos. Portanto, é cada vez mais importante e oportuno o conhecimento, por parte do meio técnico, científico e empresarial, dos materiais utilizados na confecção de concreto, bem como, das medidas preventivas para a correta utilização destes materiais, no sentido de evitar os problemas relacionados com a reação álcali-agregado.

Em função disso, a motivação deste trabalho vem do interesse em estudar tanto os agregados como os cimentos utilizados na produção de concreto na Região Metropolitana do Recife, especialmente no que se refere à potencialidade reativa dos agregados e avaliar o seu comportamento frente a três tipos de cimentos Portland com diferentes teores de adições.

### **Objetivo principal**

Verificar a potencialidade reativa de amostras de agregados graúdos da Região Metropolitana do Recife frente à utilização de três tipos de cimento Portland: CP V-ARI, CP II-Z e CP-IV.

### **Objetivos específicos**

- a) Avaliar o potencial de reatividade dos agregados por meio de análise petrográfica e pela expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, conforme prescrito na norma NBR 15577/2008;
- b) Avaliar a eficiência do teor de pozolanas dos cimentos na inibição da RAS, de acordo com as recomendações da norma NBR 15577/2008;
- c) Observar a morfologia e inferir qualitativamente a composição química de eventuais produtos oriundos da RAS, presentes nas barras moldadas para o ensaio acelerado, através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS), respectivamente.

### **Estrutura da dissertação**

Além desta introdução, onde se contextualiza a pesquisa, justifica-se sua importância e relacionam-se seus objetivos, esta dissertação constitui-se de mais quatro capítulos, a saber:

No primeiro capítulo faz-se uma revisão da literatura envolvendo a reação álcali-agregado, no que se refere à definição, histórico, tipos e características, mecanismo de expansão e alguns fatores intervenientes.

Em seguida, no segundo capítulo, apresenta-se o programa experimental empregado no desenvolvimento da pesquisa, caracterizando-se os materiais e descrevendo-se os procedimentos utilizados na execução das análises e ensaios.

No terceiro capítulo apresentam-se os resultados das análises e ensaios realizados, procedendo-se às discussões e interpretações.

No quarto e último capítulo fazem-se algumas considerações, apresentando-se as conclusões decorrentes da pesquisa e algumas sugestões para novos estudos que possam contribuir para o melhor entendimento da reação álcali-silicato e seus efeitos.

## **CAPÍTULO 1 - A REAÇÃO ALCALI-AGREGADO**

### **1.1. Definição**

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação química de origem interna que pode ocorrer no concreto quando alguns constituintes mineralógicos do agregado reagem com hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, pozolanas, agentes externos, etc.) que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto.

Conforme a composição mineralógica dos agregados envolvidos classifica-se a reação álcali-agregado como: reação álcali-sílica, reação álcali-silicato ou reação álcali-carbonato. As reações álcali-sílica/silicato (RAS) apresentam como produto um gel higroscópico sílico-alcalino que poderá expandir-se na presença de água.

A RAA provoca a deterioração das estruturas de concreto. Essas degradações apresentam enormes dificuldades de recuperação, comprometendo a durabilidade das estruturas afetadas. A manifestação da reação álcali-agregado pode se dar de várias formas, desde expansões, fissurações e movimentações diferenciais nas estruturas, exsudação do gel e redução das resistências à tração e compressão. Na Figura 1.1 apresenta-se um exemplo de manifestação patológica decorrente da RAS em estruturas de concreto.



**Figura 1.1 - Bloco de fundação de edifício da RMR afetado por RAS (Andrade, 2006).**

## 1.2. Histórico da RAA.

As primeiras manifestações deletérias relacionadas com a reação álcali-agregado foram observadas em estruturas de concreto no sul da Califórnia, nas décadas de 20 e 30 do século passado, após a constatação de que as fissuras e expansões observadas não estavam relacionadas a patologias já conhecidas como aquelas decorrentes de congelamento/descongelamento e/ou de corrosão de armaduras.

A reação álcali-agregado foi estudada inicialmente no laboratório de materiais da *Califórnia Division of Highways*, dirigida à época por Thomas Stanton. Em 1940, Stanton publicou os primeiros resultados de seus estudos sobre o que denominou “reação álcali-agregado”, nos quais identificou esse processo como sendo uma reação deletéria que ocorria entre os constituintes do concreto, a sílica do agregado e os álcalis do cimento. Segundo as constatações experimentais de Stanton, a reação era capaz de formar eflorescências brancas, causar expansões e fissurações, fato que causou preocupações no meio técnico e despertou o interesse de pesquisadores, desencadeando várias pesquisas sobre o tema.

Após a descoberta da RAA, vários autores passaram a estudar o mecanismo de expansão da reação, dentre os quais pode-se destacar Hansen (1944), Vivian (1976), Van Aardt e Visser (1977), Dent Glasser e Kataoka (1981), Chatterji et al (1989), Dron (1990), Wang e Gillott (1991), Poole (1992), Deng e Tang (1993), Prezzi et al (1997), Hasparyk (1999). Estudos que contribuíram para o esclarecimento de fatores intervenientes, tais como: o processo químico envolvido, a identificação dos minerais reativos, e as conseqüências para as estruturas afetadas.

A primeira teoria para explicar o mecanismo de expansão do gel, nomeada de pressão osmótica, foi elaborada por Hansen, em 1944. Nela, 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 do concreto (Paulon, 1981).

No período entre 1950 e 1960 o estudo deste fenômeno perdeu forças, retomando-se as pesquisas e ensaios sobre o assunto de forma mais rigorosa na década de 70, quando foram surgindo relatos das anomalias em diversos países.

No mundo, foram diagnosticadas várias estruturas afetadas, desde a descoberta da RAA, podendo ser citados como exemplos as barragens de Val de La Maré (Reino Unido), de Sandouping (China), de La Tuque (Canadá), de Kouga (África do Sul), de Chambon (França), além de trechos da via urbana de Joanesburgo (África do Sul) e da via expressa Hanshin (Japão) (Silveira, 2006). Na Tabela 1.1 apresentam-se os números de casos de RAA registrados em estruturas hidráulicas construídas até 1998, em diversos países, segundo Kihara et al. (1998).

**Tabela 1.1 – Ocorrências de casos de RAA, em estruturas hidráulicas, em diversos países (Kihara et al., 1998).**

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

Trabalho publicado por Paulon (1981) menciona que o primeiro estudo sobre RAA no Brasil data da década de 60, com a construção da barragem de Jupiá, cujo cascalho do rio Paraná tinha a fase reativa calcedônia. Para viabilizar a utilização desse agregado, construiu-se no canteiro de obras de Jupiá uma fábrica de pozolana a partir da argila caulínica disponível na região, que após a calcinação era adicionada ao cimento Portland no teor de 35%. Ainda neste trabalho o autor apresenta o Brasil em quarto lugar, no mundo, em ocorrências de RAA.

Andriolo (2000) relata pelo menos 19 casos confirmados de barragens afetadas por RAA no Brasil, apresentados na Tabela 1.2. Verifica-se que, além das barragens propriamente ditas, a RAA também atinge outras estruturas tais como: casas-de-força, vertedouros e tomadas d'água.



**Tabela 1.2 – Barragens afetadas por RAA, no Brasil (Andriolo, 2000).**

| Nome                  | Estrutura        | Fim da construção | RAA anotada em | Tipo de agregado   |
|-----------------------|------------------|-------------------|----------------|--------------------|
| Billings-Pedras       | Barragem         | 1936              | 1992           | Granito            |
| Furnas                | Barragem         | 1963              | 1976           | Quartzito          |
| Ilha dos Pombos       | Barragem         | 1924              | 1991           | Gnaisse            |
| Jaguará               | Barragem         | 1971              | 1996           | Quartzito/granito  |
| Joannes II            | Barragem         | 1971              | 1988           | Gnaisse            |
| Jurupará              | Barragem         | 1937              | -              | Gnaisse/granito    |
| Mascarenhas de Moraes | Barragem         | 1957              | -              | Quartzito          |
| Moxotó                | Casa de Força    | 1974              | 1980           | Granito-gnaisse    |
| Paulo Afonso I        | Barragem         | 1955              | 1978           | Granito-gnaisse    |
| Paulo Afonso II       | Barragem         | 1962              | 1978           | Granito-gnaisse    |
| Paulo Afonso III      | Barragem         | 1973              | 1978           | Granito-gnaisse    |
| Paulo Afonso IV       | Barragem         | 1979              | 1985           | Granito-gnaisse    |
| Pedro Beicht          | Barragem         | 1932              | 1991           | Granito-gnaisse    |
| Peti                  | Barragem         | 1945              | 1964           | Gnaisse            |
| Porto Colômbia        | Vertedouro       | 1973              | 1985           | Cascalho e basalto |
| Sá Carvalho           | Barragem         | 1951              | -              | Gnaisse            |
| Tapacurá              | Barragem         | 1975              | 1990           |                    |
| Traição               | Usina elevatória | 1940              | 1980           | Milonito           |
| Túnel 6               | Tomada d'água    | 1974              | 1989           | Granito-gnaisse    |

Hasparyk (2005), estudou as características e propriedades de testemunhos de concreto, coletados na Usina Hidrelétrica de Furnas, afetados pela RAA e o comportamento desta através da investigação do gel exsudado. Estudou, ainda, o agregado (quartzito) proveniente da região da usina hidrelétrica, através de análises microscópicas, ensaios de expansão em argamassas e concretos, e propriedades de concretos moldados em laboratório. Os resultados indicaram que o agregado mostrou-se bastante reativo. Mostraram ainda que, tanto nos testemunhos quanto nos corpos-de-prova moldados, houve reflexos negativos nas propriedades dos concretos devido à RAA, especialmente no módulo de elasticidade. O gel exsudado foi caracterizado como um silicato de potássio hidratado com grande potencialidade para expandir.

Silva (2007), em pesquisa mais recente, estudou algumas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas de concretos afetados pela reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do Complexo Hidrelétrico Paulo Afonso/Chesf, concluindo que, apesar de terem sido fabricados há décadas, os concretos apresentam potencial reativo elevado, porém as estruturas se apresentam pouco deterioradas. A propriedade mecânica mais sensível aos efeitos da RAA foi o módulo de elasticidade.

Estudos envolvendo, especificamente, a reatividade potencial de agregados e a eficiência de cimentos e adições minerais para inibir a RAA, foram desenvolvidos em algumas regiões do Brasil, destacando-se os trabalhos de: Hasparyk (1999); Valduga (2002), no Estado de São Paulo; Tiecher (2006), na Região Sul; Souza (2007), na Paraíba; Andrade (2006), Andrade *et al.* (2006), Andrade e Rego Silva (2007), e Prado (2008), em Pernambuco.

O estudo de Andrade (2006) na RMR constatou a ocorrência de RAA em elementos estruturais de fundações de cerca de oito edifícios urbanos, com idades entre três e vinte e um anos, fato que chamou a atenção do meio técnico em todo o mundo. As principais características eram: lençol freático raso, presença de fases reativas nos agregados (quartzo com extinção ondulante e microgranular) e disponibilidade de álcalis.

Ao mesmo tempo, Andrade *et al.* (2006) avaliaram o potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA de agregados miúdos e graúdos comercializados na RMR.

Posteriormente, Andrade e Rego Silva (2007) elaboraram um diagnóstico do potencial de reatividade de agregados da RMR e adjacências e do potencial de inibição de reação álcali-agregado com o uso de cimentos e adições minerais disponíveis na região.

A pesquisa de Prado (2008) avaliou as características microestruturais de amostras de agregados graúdos, com relação à RAA, produzidos a partir de rochas provenientes de pedreiras próximas a zonas de cisalhamento e falhas da porção leste do Estado de Pernambuco.

### **1.3. Tipos de reações álcali-agregado (RAA)**

Segundo a literatura, a reação álcali-agregado tem sido comumente dividida em três tipos, em função da composição mineralógica dos agregados que reagem com os álcalis dissolvidos nos poros do concreto, a saber:

- Reação álcali-sílica;
- Reação álcali-silicato;
- Reação álcali-carbonato.

### 1.3.1. Reação álcali-sílica

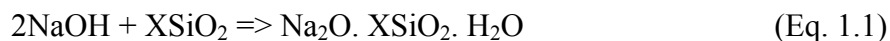
De acordo com a norma NBR 15577/2008, é o tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo. Constituem exemplos de sílica reativa: opala, tridimita, cristobalita, vidro vulcânico, entre outros.

Farny e Kosmatka (1997) simplificam didaticamente o mecanismo da RAS em dois processos:

1º processo: álcalis + sílica reativa  $\Rightarrow$  produto reativo de gel

2º processo: produto reativo de gel + umidade  $\Rightarrow$  expansão

Uma possível reação para explicar o fenômeno consta em estudos de Tang *et al.* (2000), representada pela Equação 1.1.:



A reatividade da sílica depende principalmente da sua cristalinidade. A sílica amorfa constitui-se a forma mais desordenada e reativa, estando presente na opala, calcedônia e vidros naturais e artificiais. A tridimita e a cristobalita são formas cristalinas metaestáveis.

Da análise bibliográfica realizada neste trabalho, conclui-se que a reação ocorre apenas na presença de quantidades suficientes dos seus componentes. Assim, as condições ótimas para o seu desenvolvimento são a existência no concreto de quantidades suficientes de álcalis, sílica potencialmente reativa e água. Apenas na presença dos três reagentes e em determinadas proporções se desenvolve a reação.

É a forma mais freqüentemente encontrada de reação álcali-agregado e a que acontece mais rapidamente, sendo responsável pelo maior número de casos no mundo (Kihara *et al.* 1998).

### 1.3.2. Reação álcali-silicato

É um tipo específico da reação álcali-silica em que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas. Os silicatos reativos mais comuns são o quartzo tensionado por processos tectônicos e os minerais da classe dos filossilicatos presentes em ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos, entre outros (NBR 15577/08).

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

Na reação álcali-silicato os minerais reativos normalmente tem retículo cristalino deformado. O quartzo está entre esses minerais, pois devido a tensões de origem geológica, na maioria das vezes apresenta o retículo deformado, sendo que a deformação do quartzo reflete-se sob a forma de extinção ondulante. A presença de quartzo microcristalino também potencializa a reação, além da presença de cristais de silicatos deformados. Neste sentido, Wigun (1995) destaca que a reação devido à presença de quartzo microcristalino e deformado resulta em expansões mais lentas do que as causadas pela reação álcali-sílica.

Rochas que apresentam quartzo com ângulo de extinção ondulante não necessariamente serão reativas. A reatividade depende de outros fatores aliados, tais como a textura, tamanho dos grãos e microfissuração (Amo e Perez, 2001).

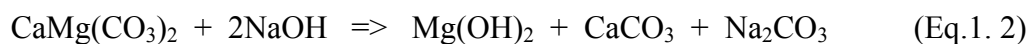
É o tipo de RAA que mais ocorre no Brasil. A maior parte das barragens que apresentam este tipo de reação, no país, foram construídas com agregados provenientes de rochas de composição quartzo-feldspáticas como granitos, granodioritos, gnaisses e migmatitos, com ocorrências distribuídas por vasta área territorial. Isto justifica a grande ocorrência de reação álcali-silicato (Valduga, 2002).

Como a reação álcali-silicato é considerada um subtipo de reação álcali-sílica, ambas serão denominadas no presente estudo por reação álcali-sílica e serão abreviadas pela sigla RAS.

### 1.3.3. Reação álcali-carbonato

É o tipo de reação álcali-agregado em que participam os álcalis e agregados rochosos carbonáticos. A forma mais conhecida de deterioração do concreto é devida à desdolomitização da rocha e conseqüente enfraquecimento da ligação pasta-agregado. Não há a formação de gel expansivo, mas de compostos cristalizados como brucita, carbonatos alcalinos, carbonato cálcico e silicato magnésiano. Como a reação regenera os hidróxidos alcalinos, a desdolomitização terá continuidade até que a dolomita tenha reagido por completo ou a fonte de álcalis se esgote (NBR 15577/08).

A expansibilidade deste tipo de processo, embora a cristalinidade e a taxa Ca/Mg da dolomita influenciem bastante na reação, tem como fatores decisivos o tamanho dos cristais dolomíticos, sua distribuição na matriz e o grau de compactação da matriz envolvente (Tang *et al.*, 2000). Essa reação química não produz gel expansivo. A expansão é devida ao processo de desdolomitização, que modifica o arranjo da textura do calcário e causa aumento de volume. A reação dá lugar à formação de brucita,  $Mg(OH)_2$ . Segundo o autor, este processo pode ser explicado pela reação representada na Equação 1.2.:



Se ao invés de hidróxido de sódio nos reagentes houver presença de hidróxido de potássio, haverá formação de carbonato de potássio no lugar de carbonato de sódio.

Os estudos realizados por Tang *et al.* (1994) provaram 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.

Pelo fato de haver a regeneração do hidróxido alcalino no processo da reação álcali-carbonato provavelmente a adição de pozolanas não seja capaz de inibir a expansão provocada por esse fenômeno já que sempre haverá álcalis para reagir com os agregados potencialmente reativos. Contudo, concretos produzidos com escoria granulada de alto forno poderão inibir a reação devido à redução de permeabilidade (Fontoura, 1999).

Silveira (2006), ressalta que agregados provenientes de rochas carbonáticas também podem desenvolver reações do tipo álcali-sílica/silicato, quando possuírem silicatos em sua composição. Com relação a essa afirmação há que se destacar que nas rochas carbonáticas sedimentares apenas diagenizadas, com exceção das argilas, há pobreza em silicatos, porém nas metamorfizadas aparecem as micas, filossilicatos hidratados.

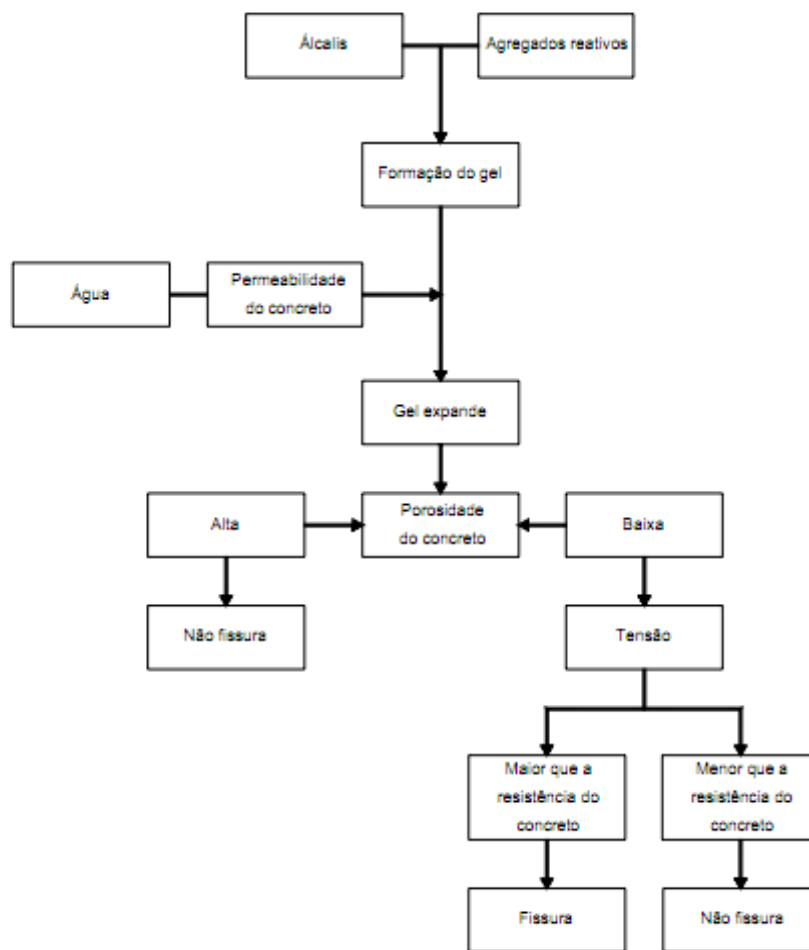
No Brasil, apesar de não ter sido divulgado oficialmente nenhum caso, sabe-se que existem obras construídas com calcários sabidamente reativos, como o de um caso ocorrido em barragem, segundo Silveira (2006), em que foi constatada a presença de RAC.

#### **1.4. Mecanismo de expansão da reação álcali-silica/silicato (RAS)**

Embora não exista um consenso e conhecimento completo do mecanismo da RAS, sabe-se que o resultado mais comum é a presença de hidróxidos, principalmente de Ca e Si, de modo que a reação ocorre, essencialmente, devido ao ataque de íons alcalinos e hidroxilas, presentes na solução intersticial do concreto, a certas formas de sílica reativa, com uma estrutura mais ou menos desordenada, e por isso instável num meio de elevado pH.

A reação produz um gel higroscópico alcalino que absorve água e expande, originando tensões internas no concreto que provocam sua fissuração. Os géis de sílica são os produtos que se encontram em todas as estruturas degradadas por RAS, em geral, localizados ao redor dos agregados, nas fissuras e nos poros da pasta de cimento (Fournier e Bérubé, 1993).

O diagrama constante no trabalho de Valduga (2002) e apresentado na Figura 1.2, mostra as diversas etapas do processo da reação desde a formação do gel até a fissuração.



**Figura 1.2 – Processo de reação álcali-agregado. Adaptado de Valduga (2002).**

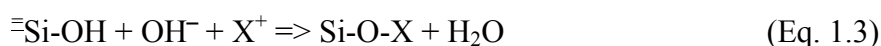
Segundo Hasparyk (2005) as duas principais teorias propostas para explicar os mecanismos de expansão do gel proveniente da RAS são a teoria da pressão osmótica, desenvolvida por Hansen, e a teoria da adsorção desenvolvida por Vivian, sendo esta última a mais aceita atualmente.

Os modelos mais difundidos na literatura sobre a teoria da adsorção desenvolvida por Vivian são os de Dent Glasser e Kataoka (1981), Dron (1990), Wang e Gillot (1991), Poole (1992), Chatterji et al (1989) e Prezzi et al (1997). Estes modelos estão apresentados no trabalho de Cristino (2008), conforme segue:

## Modelo de Dent Glasser e Kataoka

Segundo o modelo de Dent Glasser e Kataoka (1981), quando o meio onde a sílica se encontra é alcalino, íons hidroxilas que penetram na estrutura da sílica atacam as ligações siloxano, Si-O-Si, quebrando a sua estrutura. Ao mesmo tempo íons alcalinos migram para o interior para manter a eletroneutralidade, e como eles tendem a formar esferas solvatadas por atração da água, a sua presença aumenta a tendência para absorver água. A sílica é então convertida em um polieletrólito que sendo menos rígido nas suas ligações pode expandir-se e absorver mais liquido. Desta forma, mais íons hidroxilas atingem o interior e o processo continua inevitavelmente até a formação do gel.

Esquemáticamente pode-se representar a RAS através das Equações 1.3 e 1.4, onde  $X^+$  representa os íons  $Na^+$  ou  $K^+$ :



Inicialmente, ocorre uma reação de neutralização dos grupos silanol ácidos, Si-OH, pelos íons hidroxilas e álcalis, seguida da ruptura das pontes siloxano, Si-O-Si (Figura 1.3).

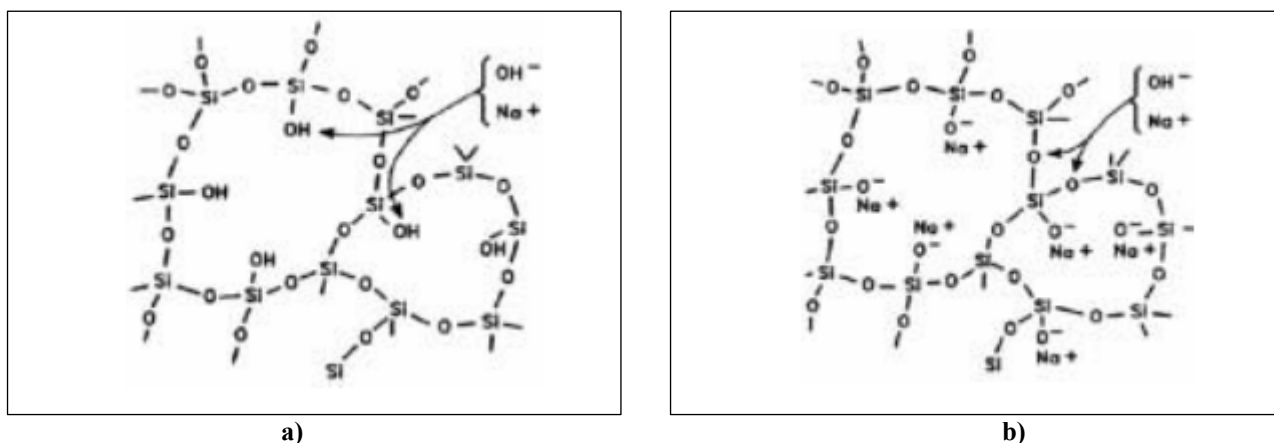


Figura 1.3 – Esquema apresentado no modelo de Dent-Glasser e Kataoka: a) ionização dos grupos silanol e neutralização pelos íons  $Na^+$  e  $K^+$ ; b) ruptura das pontes siloxano pelos íons hidroxila (Dent-Glasser e Kataoka, 1981).



A velocidade do ataque depende da concentração dos hidróxidos alcalinos na solução intersticial e da estrutura da sílica. Quando a sílica é bem cristalizada o ataque dos íons hidroxilas dá-se somente na superfície externa, sendo que este processo é lento, e poucos íons de sílica passam para a fase fluida. Ao contrário, quando a sílica é amorfa permite a penetração generalizada dos íons hidroxilas e dos íons alcalinos ( $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$ ) (Figura 1.4).

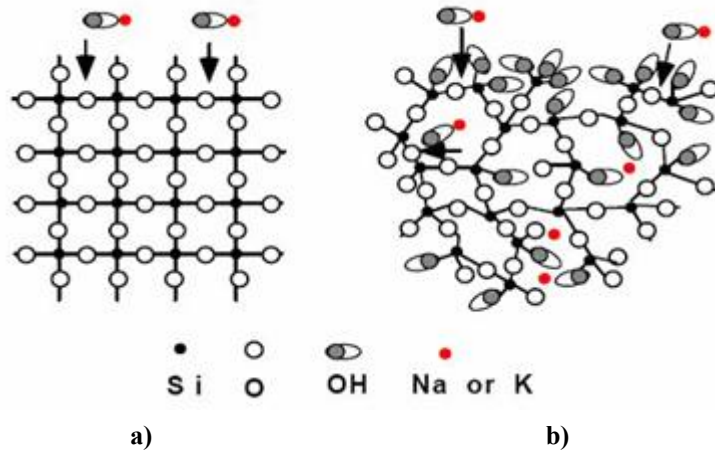
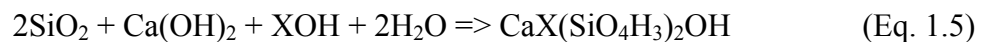


Figura 1.4 – Ataque dos álcalis à sílica: a) bem cristalizada; b) mal cristalizada. As estruturas apresentadas são meramente ilustrativas (Dent-Glasser e Kataoka, 1981).

### Modelo de Dron

O modelo de Dron (1990), assim como a maioria dos outros modelos, baseia-se na teoria de Dent Glasser e Kataoka. Os estudos realizados por este autor permitiu-lhe desenvolver uma hipótese na qual a RAS poderá ser traduzida pela reação global, onde X representa os íons alcalinos, na Equação 1.5:

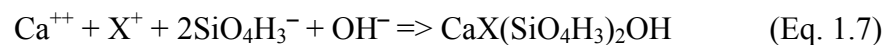


Esta reação se desenvolve em três etapas:

- Inicialmente ocorre um ataque dos íons hidroxilas às pontes siloxano à superfície do grão de sílica reativo, acompanhado pela adsorção química dos íons alcalinos, segundo a reação apresentada pela Equação 1.6:



- Em seguida, o hidróxido de cálcio dissocia-se nos seus íons  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{OH}^-$  e estes difundem-se em direção às zonas de menores concentrações
- O encontro dos íons silicatos e cálcio num meio ácido, rico em íons alcalinos e hidroxilas leva à precipitação de silicatos de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , e  $\text{Ca}^{++}$  hidratados (CKSH), conforme Equação 1.7.:



Como este composto é relativamente insolúvel, a concentração local de íons cálcio e/ou silicatos diminui para um nível bastante baixo. Devido esta diminuição estabelece-se um gradiente de concentração que sustenta a difusão dos íons alcalinos (Dron e Brivot, 1993).

No momento de sua formação os produtos vão exercendo uma pressão que se designa pressão de cristalização. Esta pressão está diretamente ligada à sobresaturação do meio, ou seja, quanto maior a sobresaturação do meio, maior será a pressão de cristalização (Divet, 2001).

### **Modelo de Wang e Gillott**

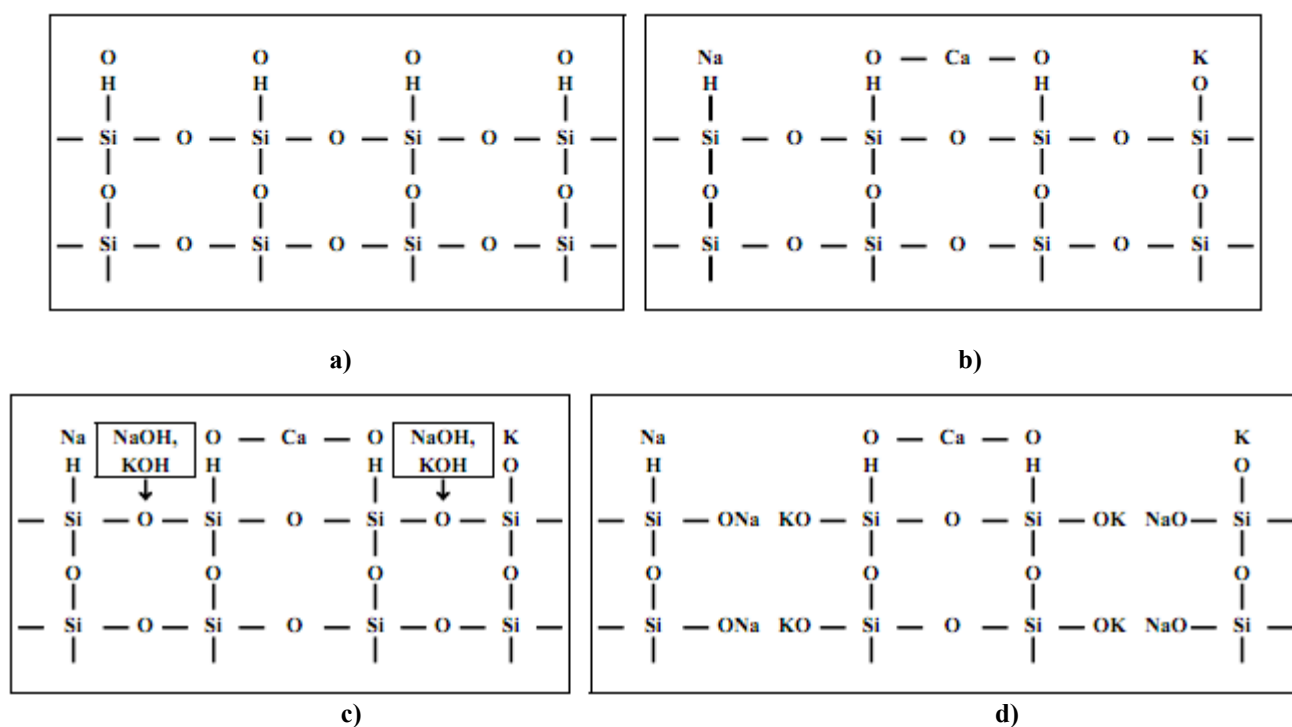
Wang e Gillott (1991) também dão ênfase ao efeito do hidróxido de cálcio. A descrição do mecanismo se inicia com a representação da estrutura superficial da opala que apresenta grupos silanol (Figura 1.5-a).

Os íons  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  contidos na solução intersticial atacam os grupos silanol presentes na superfície da sílica favorecendo a troca protônica entre eles (Figura 1.5-b).

Os íons alcalinos podem trocar diretamente prótons, produzindo deste modo géis de silicatos de sódio e potássio hidratados (KSH). No entanto, os íons cálcio na solução podem de igual modo trocar diretamente prótons com os grupos silanol, ou trocar com os íons alcalinos que foram anteriormente adsorvidos na superfície da sílica formando silicatos de sódio, potássio e cálcio hidratados (CKSH). Nesta fase inicial, os compostos estão principalmente localizados na superfície do agregado e não são responsáveis pela expansão (Wang e Gillott, 1991).

Quando a concentração do hidróxido de cálcio é suficientemente elevada para permitir o ataque às pontes siloxano, formam-se grupos silanol internos (Figura 1.5-c).

Ao mesmo tempo em que os grupos silanol internos são criados, cátions difundem-se para as zonas reacionais e trocam prótons com os novos grupos silanol criados. Os grupos álcali-sílica têm uma grande afinidade por água e, portanto, um complexo coloidal expansivo álcali-sílica (CKSH) é produzido, capaz de adsorver água até o surgimento de uma pressão que conduz à expansão (Figura 1.5-d).



**Figura 1.5 – Esquema reacional apresentado por Wang e Gillot: a) estrutura superficial da sílica; b) trocas protônicas entre os grupos silanol e os cátions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^{++}$ ; c) ataque dos íons hidroxilas às pontes siloxano internas Si-O-Si; d) trocas protônicas entre os grupos silanol internos e os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  (Wang e Gillot, 1991).**

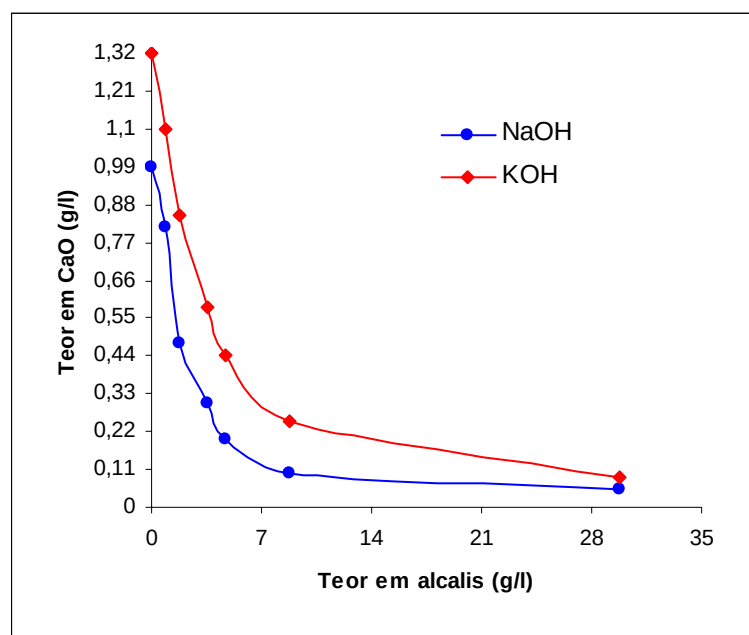
Os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  difundem-se para as zonas reacionais primeiro que os íons  $\text{Ca}^{++}$ , devido a dois fatores:

- A solubilidade de NaOH e de KOH é maior do que a de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , isto é, os íons alcalinos ficam mais rapidamente disponíveis para a reação de troca protônica (Tabela 1.3). Além disto, quando os álcalis e o cálcio estão no mesmo sistema, a solubilidade do hidróxido de cálcio fica grandemente suprimida pelo efeito do íon comum, segundo o qual para diminuir a solubilidade de um sal agrega-se um dos íons (Figura 1.6).

- Os raios dos íons alcalinos são menores do que o raio do íon  $\text{Ca}^{++}$ , difundindo-se mais facilmente pelo agregado (Tabela 1.4).

**Tabela 1.3 – Solubilidade dos hidróxidos alcalinos e de cálcio em água (Greenberg, 1956, citado por Cristino, 2008).**

| Hidróxidos                          | Solubilidade (g/100g de $\text{H}_2\text{O}$ ) |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     | 0°C                                            | 1°C   | 20°C  | 30°C  | 40°C  | 60°C  | 80°C  | 90°C  | 100°C |
| <b>NaOH</b>                         | -                                              | 98    | 109   | 119   | 129   | 174   | -     | -     | -     |
| <b>KOH</b>                          | 95,7                                           | 103   | 112   | 126   | 134   | 154   | -     | -     | 178   |
| <b><math>\text{Ca(OH)}_2</math></b> | 0,189                                          | 0,182 | 0,173 | 0,160 | 0,141 | 0,121 | 0,086 | 0,076 | 0,077 |



**Figura 1.6 – Solubilidade do hidróxido de cálcio em solução alcalina (Greenberg, 1956, citado por Cristino, 2008).**

Greenberg (1956, citado por Cristino, 2008) demonstrou que a dissociação dos grupos de Si-O-Na é mais forte que a dos grupos Si-O-Ca. Isto acontece porque as ligações dos grupos Ca-O reúnem uma energia eletrostática maior que a das ligações dos grupos Na-O e K-O (Tabela 1.4).

**Tabela 1.4 – Raio dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^{++}$  e energia eletrostática (Greenberg, 1956, citado por Cristino, 2008)**

| Cátions          | Raio iônico (Å) | Energia eletrostática ( $Z_1.Z_2/d$ ) |
|------------------|-----------------|---------------------------------------|
| $\text{Na}^+$    | 3,3             | 0,21                                  |
| $\text{K}^+$     | 3,1             | 0,22                                  |
| $\text{Ca}^{++}$ | 4,2             | 0,26                                  |

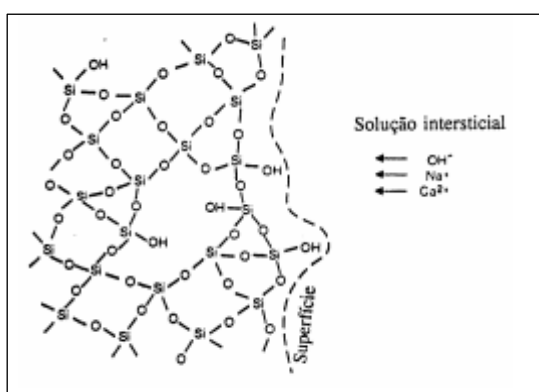
## Modelo de Poole

O mecanismo proposto por Poole (1992) reconstrói o modelo de Dent-Glasser e Kataoka aumentando uma etapa com a intervenção dos íons cálcio. O modelo sugere a quebra das ligações siloxano adjacentes aos grupos silanol ( $\text{SiOH}$ ), distorcendo a estrutura da sílica e reduzindo a estabilidade local da rede.

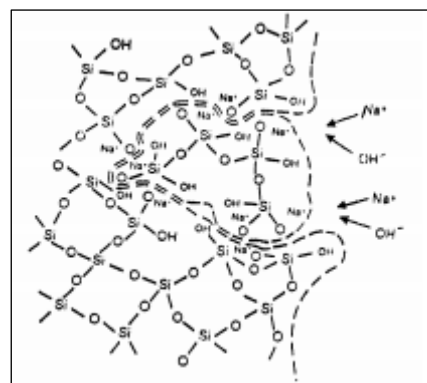
À medida que as ligações siloxano quebram, água e íons alcalinos penetram na estrutura formando novas ligações. Quanto mais aberta se encontrar a estrutura e quanto maior for o estado de hidratação mais rapidamente ela é atacada.

Os íons cálcio devido a sua dupla carga positiva, e a sua capacidade de adsorver grandes quantidades de moléculas de água, tendem a permanecer próximo da superfície do gel em desenvolvimento como uma fase CSH, que é menos solúvel em solução alcalina do que os géis de sódio e potássio.

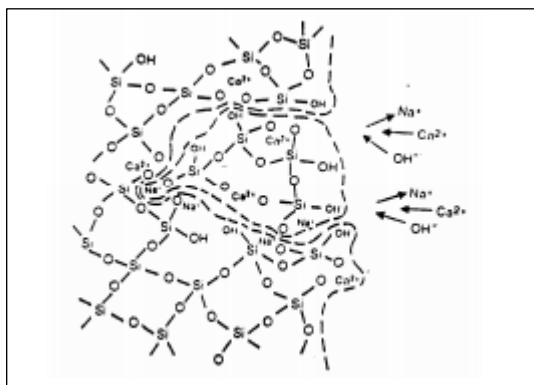
No concreto, as soluções intersticiais são principalmente constituídas por soluções fortemente concentradas em hidróxidos de sódio e de potássio, porém os íons cálcio encontram-se também disponíveis. À medida que um gel se expande por absorção de água a rede abre-se o suficiente para permitir a penetração dos íons cálcio, onde podem substituir os íons alcalinos regenerando-os e permitindo que a reação continue (Figura 1.7a,b,c)



a)



b)



c)

**Figura 1.7 – Representação esquemática do modelo de Poole. a) estrutura da sílica reativa; b) ataque dos íons  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  à sílica reativa; c) substituição de alguns íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  por íons  $\text{Ca}^{++}$  (Poole, 1992).**

### Modelo de Chatterji

O modelo proposto por Chatterji e colaboradores (Chatterji et al., 1989) começa com o ataque dos íons hidroxilas à sílica acompanhada pelos íons alcalinos provenientes de sais de sódio e de potássio na forma solvatada por moléculas de água. A velocidade de penetração é determinada pelo tamanho dos íons solvatados; os íons alcalinos por serem menores penetram mais facilmente do que os íons cálcio no agregado.

No caso da presença simultânea de hidróxido de cálcio e de sais de sódio e de potássio, os íons alcalinos e hidroxilas penetram no grão reativo deixando os íons cálcio e hidroxila na fase líquida. A velocidade deste processo é determinada pela concentração local de sais de sódio e de hidróxido de cálcio; quanto maior for essa concentração maior será a velocidade de penetração.

A penetração dos álcalis e dos íons hidroxilas causam uma quebra na estrutura Si-O-Si do grão de sílica reativo abrindo desta forma caminho para nova penetração de íons hidratados e moléculas de água. Ao mesmo tempo uma parte de sílica é dissolvida tornando-se livre para migrar para fora do grão ou até mesmo por entre o grão.

A velocidade de migração da sílica para fora do grão é diretamente proporcional à concentração local de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , pois este será o fator determinante para a penetração dos íons alcalinos e hidroxilas, por ser a principal fonte dos íons hidroxilas importantes no ataque ao grão reativo.

Para estes autores o  $\text{Ca(OH)}_2$  desempenha pelo menos três papéis importantes :

- Acelera a penetração dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{OH}^-$  e das moléculas de água no grão reativo;
- Promove a penetração preferencial de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$  e das moléculas de água num meio de sais de sódio e de potássio;
- Impede a difusão dos íons silicatos do grão reativo para fora do grão reagindo com estes para formar géis CSH (silicatos de cálcio hidratados) ou CKSH (silicatos alcalinos de cálcio hidratados).

### **Modelo de Prezzi *et al.***

Prezzi *et al.* (1997), propuseram um modelo para a expansão do gel baseando-se no conceito da dupla camada eletrônica.

Em todas as formas de sílica, a unidade estrutural básica é um íon de silício  $\text{Si}^{4+}$  ligado a quatro oxigênios, sendo este arranjo um tetraedro. Uma partícula de sílica cristalina constitui um tetraedro ligado pelos seus vértices, sendo cada vértice ocupado por um oxigênio comum a dois tetraedros.

No interior da rede cristalina, a valência de cada íon é satisfeita, isto é quatro íons oxigênio para cada íon silício, e dois íons silício para cada íon oxigênio. No entanto para que a composição química de toda a estrutura seja  $\text{SiO}_2$ , o tetraedro à superfície do cristal não está completo. O íon oxigênio da superfície está ligado a apenas um íon silício, deixando assim uma carga positiva insatisfeita. Similarmente, cada íon silício à superfície possui a falta de um íon oxigênio e transporta uma carga positiva insatisfeita (Figura 1.8).

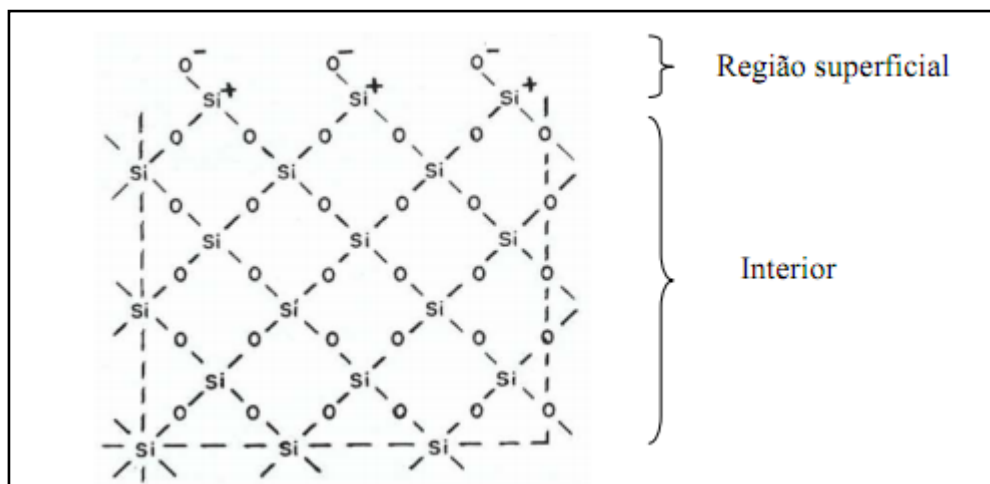


Figura 1.8 – Representação esquemática da estrutura da sílica não hidratada (Powers e Steinour, 1995<sup>a</sup>, citados em Prezzi et al., 1997).

Na presença de uma mistura aquosa, as cargas insatisfeitas da superfície da sílica são neutralizadas pelos íons  $\text{OH}^-$  e  $\text{H}^+$ ; o íon  $\text{OH}^-$  junta-se ao íon silício e o íon  $\text{H}^+$  ao oxigênio. (Figura 1.9).

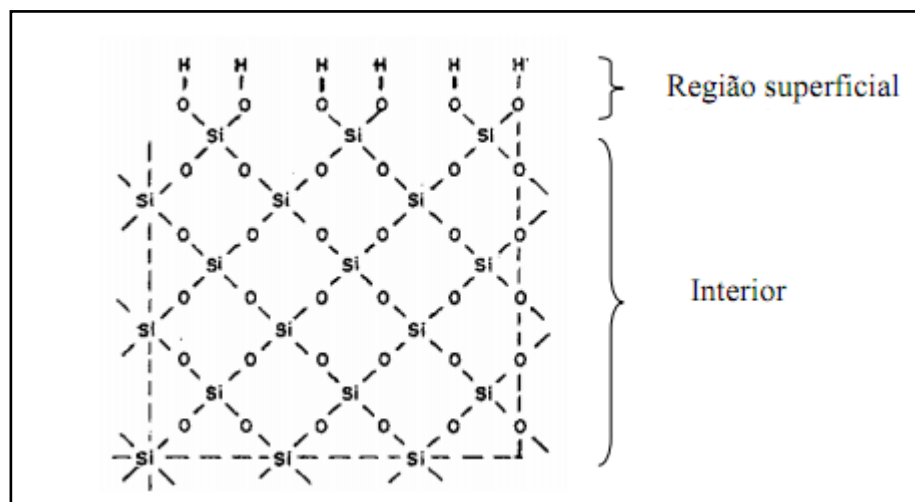


Figura 1.9 – Representação esquemática da estrutura da sílica hidratada (Powers e Steinour, 1995<sup>b</sup>, citados em Prezzi et al., 1997).

O resultado desta neutralização é uma superfície de grupos silanol. A água mantida desta forma pode ser considerada com água adsorvida visto que a sua quantidade é proporcional à área superficial da sílica e não a sua área total.



O íon  $H^+$  ligado ao oxigênio possui uma ligação mais fraca que a ligação entre os grupos hidroxila como um todo. Deste modo a ionização em meio aquoso libera alguns dos hidrogênios produzindo um caráter ligeiramente ácido à superfície da sílica, segundo Powers e Steinour (1995), citados em Prezzi et al. (1997).

Na presença de hidróxido de sódio e de potássio, os prótons são substituídos pelos íons alcalinos e estes, ao contrario dos prótons, não conseguem formar fortes ligações com o oxigênio e são muito mais facilmente hidratados. Como resultado, os íons alcalinos são ionizados e forma-se uma suspensão coloidal com partículas de sílica possuindo uma forte carga negativa e os cátions formando uma dupla camada eletrônica de contra íons.

No caso de um meio alcalino contendo apenas  $XOH$  (onde  $X = Na^+$  ou  $K^+$ ), a reação de formação da dupla camada eletrônica pode ser traduzida pela Equação 1.8.:

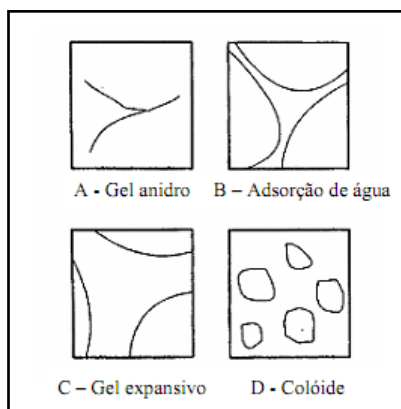


Após os grupos hidroxila à superfície da sílica terem sido neutralizados, ainda existe um excesso de hidróxidos de sódio e de potássio, assim as ligações internas  $Si-O-Si$  são atacadas pelos íons hidroxila. Estes são adsorvidos quimicamente, aumentando o número de coordenação do átomo de silício, enfraquecendo desta forma a ligação  $Si-O$  tornando-a instável e provocando a passagem de íons de silício para a solução, até ser atingido o equilíbrio entre o excesso de cargas à superfície do grão de sílica e a quantidade de íons de silício liberados.

As partículas coloidais de sílica e a solução alcalina intersticial do concreto formarão inicialmente uma suspensão coloidal e posteriormente agregar-se-ão para uma forma de gel ou coagular-se-ão como precipitado dependendo da disponibilidade do solvente.

Este gel apresenta-se inicialmente numa forma seca, onde dominam as forças de Van der Waals. As partículas deste gel encontram-se muito próximas umas das outras. Quando as partículas começam a hidratar-se, uma primeira monocamada de água adsorvida aumenta a distância entre elas. À medida que mais camadas de água são adsorvidas na superfície das partículas, as forças atrativas de Van der Waals começam a enfraquecer devido ao contínuo aumento da distância entre elas e as forças repulsivas começam a se desenvolver.

Quando a água penetra nos poros, a concentração da solução intersticial diminui e a largura da dupla camada eletrônica aumenta, aumentando também as forças repulsivas, o gel expande-se. À medida que mais água entra, é atingido um ponto onde o potencial de repulsão domina constantemente formando um sistema coloidal estável. Na Figura 1.10 apresenta-se um esquema das etapas deste processo.



**Figura 1.10 – Esquema das etapas envolvidas na transição de gel a colóide (Prezzi, et al., 1997).**

Chega um momento em que não há espaço disponível para acomodar os produtos, enquanto que estes continuam a adsorver água, aumentando a tensão e o gel tentando encontrar espaço. Atingida a tensão máxima permitida pelo concreto, desenvolvem-se as microfissuras. Como resultado, a capacidade do gel de adsorver água aumenta uma vez que as microfissuras oferecem mais espaço para acomodar o gel. Consequentemente as microfissuras vão aumentando de tamanho e cada vez mais abrindo caminho para entrada de mais água e para saída do gel. Uma vez exposto ao ar o gel facilmente carbonata e precipitados brancos começam a aparecer na superfície do concreto (Prezzi *et al.*, 1997; Rodrigues *et al.*, 1999).

Van Aardt e Visser (1977) estudaram a reação de feldspatos e folhelhos argilosos com os álcalis e desenvolveram uma teoria para explicar o mecanismo da reação álcali-silicato (Solution Theory). De acordo com os autores, na presença de umidade a aderência desenvolvida nas primeiras idades entre o agregado e a pasta de cimento, contendo  $\text{Ca(OH)}_2$ , influencia a reação deste com feldspato do agregado. Além disso, a cal que poderá penetrar no agregado também reagirá, fazendo com que sejam liberados álcalis sob a forma de KOH e NaOH e/ou silicatos de sódio e de potássio, sendo que o silicato de sódio é liberado sob a forma de gel parcialmente solúvel em água.

Quando os álcalis chegarem a uma determinada concentração, os silicatos de cálcio tenderão a se dissolver em silicato de sódio e potássio, formando um vidro (gel), contendo sódio, potássio e sílica em torno do agregado. Esse gel é parcialmente solúvel em água e pode expandir conforme a presença desta.

Gillott (1986) salienta 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.

### **1.5. Fatores intervenientes na reação álcali-sílica/silicato (RAS) no concreto**

Diversos fatores interferem na RAA em concretos, alguns relacionados com os materiais constituintes do concreto, outros com a ação do meio ambiente e outros com os agentes inibidores da reação, como por exemplo, as adições minerais. Em relação à RAS especificamente, é necessário que ocorra conjuntamente a presença suficientemente elevada de álcalis, sílica reativa nos agregados e umidade (Lopes, 2004, citado por Santos e Brito, 2008).

#### **1.5.1. Álcalis**

Os álcalis que se encontram no concreto têm, na sua maioria, origem no cimento, embora possam provir de outros constituintes ou condições de exposição. Assim podem contribuir no fornecimento de álcalis alguns minerais dos agregados e o contato com a água do mar (Fernandes, 2005, citado por Santos e Brito, 2008). Destacando-se que a tendência da água, quando permeia o meio silicático é carrear os álcalis, principalmente Na e K, tornando-se ácida e subsequentemente, salinizar à medida que se neutraliza.

No cimento, a presença de álcalis resulta do processo de calcinação do clínquer do cimento. Os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  são vaporizados devido às altas temperaturas dos fornos de produção. À medida que o clínquer é transportado através do forno, dá-se a condensação dos mesmos, criando uma camada superficial de álcalis. Alguns álcalis permanecem na superfície do clínquer, enquanto que outros se encontram dentro da sua estrutura (Peterson et al., 2000).

Quando acontece a hidratação do concreto, os álcalis de superfície encontram-se rapidamente mais disponíveis, enquanto que os outros se mostram disponíveis ao longo do processo. Na Figura 1.11, mostra-se a concentração de íons da solução intersticial do concreto ao longo do tempo de cura, onde é visível que os álcalis são predominantes na solução aquosa que preenche a matriz de cimento (Kurtis *et al.*, 2002).

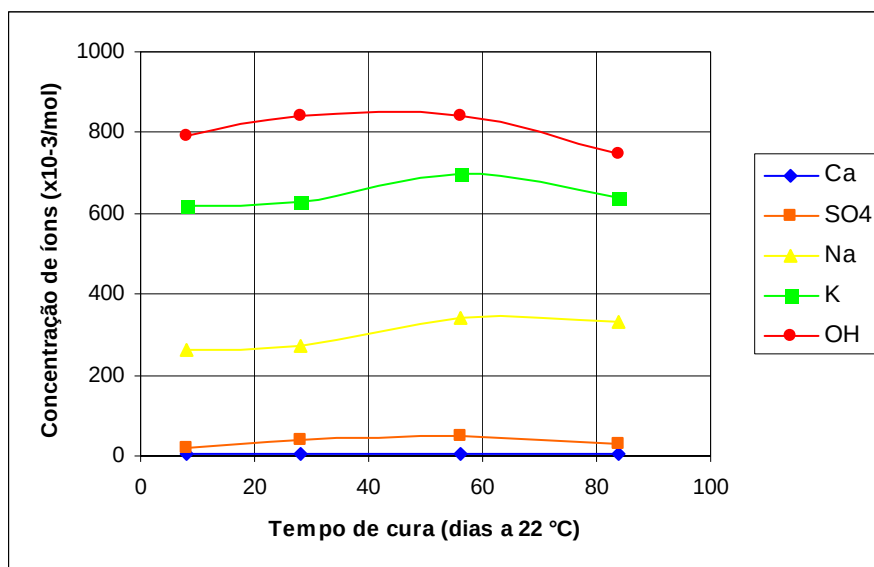


Figura 1.11 – Concentração de íons na solução dos poros do concreto ao longo do tempo de cura (Kurtis *et al.*, 2002).

Segundo Hobbs (1988) a quantidade total de álcalis no cimento *Portland* varia de 0,3% a 1,3%, sendo, por convenção, calculada a partir do óxido de sódio equivalente, através da Equação 1.9:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658(\text{K}_2\text{O}) \quad (\text{Eq. 1.9})$$

O valor 0,658 da expressão é obtido pela razão entre as massas dos dois óxidos.

Os álcalis são apenas parcialmente incorporados nos produtos de hidratação do cimento e são facilmente solúveis na água dos poros, o que faz com que a concentração de hidroxilas aumente, incrementando igualmente o pH da solução de cerca de 12,4 para um valor entre 13 e 14 (Lopes, 2004, citado por Santos e Brito, 2008). Para Hobbs (1988), no concreto com um elevado teor de álcalis, o pH varia entre 13,5 e 13,9, enquanto que no concreto com baixo teor de álcalis varia entre 12,7 e 13,1.

De modo a prevenir a ocorrência de RAS, ignorando os álcalis que surgem no concreto por outras fontes que não o cimento, a ASTM C 150/05 sugere que valores de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}}$  inferiores a 0,6 no cimento poderão prevenir o aparecimento de reações. Por outro lado, outros autores como, por exemplo, Prince e Perami, 1993 consideram que, utilizando agregados reativos no concreto, o cimento tenha de conter somente 0,3 a 0,4% de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}}$  para minimizar o risco de reação (Fernandes, 2005, citado por Santos e Brito, 2008).

Não contabilizando a introdução de álcalis através de outras fontes que não o cimento pode-se efetuar uma relação para a quantidade de álcalis no concreto. Assim, o conteúdo de álcalis no concreto é função do nível de álcalis no cimento e do conteúdo de cimento no concreto. A Equação 1.10 traduz o conteúdo de álcalis no concreto (A), em massa por unidade de volume (Fernandes, 2005, citado em Santos e Brito, 2008).

$$A = C \cdot a / 100 \quad (\text{Eq. 1.10})$$

Onde:

- A - conteúdo em álcalis no concreto ( $\text{kg/m}^3$ )
- C - teor de álcalis do cimento (%)
- a - conteúdo de cimento no concreto ( $\text{kg/m}^3$ )

O limite máximo sugerido de álcalis no concreto, incluindo os álcalis do cimento, das adições, dos agregados e de outras fontes, é de 3 kg de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}}$  por metro cúbico de concreto, exceto em estruturas vulneráveis (*Concrete Society*, 1987; Fernandes, 2005, citados em Santos e Brito, 2008).

Para quantidades semelhantes de álcalis, ocorrem variações significativas de expansibilidade. As diferenças podem atribuir-se, segundo Foradaba (2005), a:

- Diferentes velocidades na liberação de álcalis no cimento
- Variações na relação sódio/potássio dos cimentos
- Diferentes velocidades no desenvolvimento da força expansiva

A quantidade de álcalis poderá, no entanto, não ser um critério determinante para o desenvolvimento de RAS, mas o fator principal parece residir na solubilização do agregado sob o ataque dos íons  $\text{OH}^-$  (Prince e Perami, 1993; Fernandes, 2005, citados em Santos e Brito, 2008).

A contribuição dos álcalis dos agregados para a quantidade total de álcalis do concreto tem sido estudada por diversos investigadores, sobretudo a partir da década de 80, após se ter denotado que, embora com o elevado teor em álcalis do cimento encontrado em estruturas afetadas pela reação, este não preenchia a totalidade dos álcalis do concreto.

A utilização de cimentos com baixos teores em álcalis, para minimizar o risco de RAS no concreto, não é assim condição suficiente para que a reação não ocorra, pois também os agregados poderão dar a sua contribuição para o aumento do teor de álcalis.

Um estudo realizado por Constantiner e Diamond (2003), citado em Santos e Brito, 2008, teve por objetivo analisar a contribuição dos agregados para os álcalis da solução. Os investigadores fizeram argamassas com cimentos de reduzido teor em álcalis e agregados com feldspato, verificando uma liberação de álcalis para a solução existente nos poros quando os feldspatos e possivelmente outros minerais se encontravam envolvidos por pasta de cimento.

Trabalhos recentes, de Bérubé *et al.* (2002, 2004a,b, citados em Santos e Brito, 2008), confirmam que são liberadas quantidades significativas de álcalis ativos ao longo do tempo para a solução intersticial do concreto. A contribuição encontrada, especialmente elevada em agregados graníticos, foi considerada responsável pelo aparecimento de casos de degradação do concreto devido à RAS em estruturas onde foi utilizado cimento com teor em álcalis inferior ao limite máximo estabelecido.

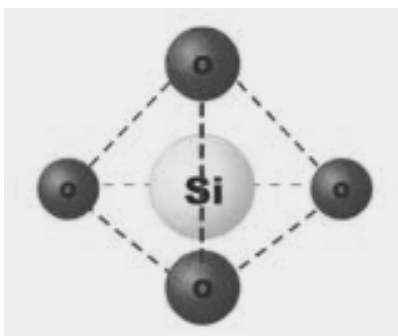
#### 1.5.2. Sílica reativa

Os agregados utilizados no fabrico do concreto não devem ser reativos em meios fortemente alcalinos. Deste modo, diminui-se a possibilidade de formação de um gel expansivo que se desenvolve quando alguns tipos de rochas e minerais reagem com os hidróxidos alcalinos da solução intersticial do concreto (Santos e Brito, 2008)

Os minerais silicosos com estruturas amorfas e desordenadas, como a opala, calcedônia e ágata e o vidro natural altamente silicoso (obsidiana), destacam-se como sendo particularmente susceptíveis ao ataque dos álcalis. As sílicas cristalinas polimorfas, como a tridmita e a cristobalita, também possuem elevado potencial reativo (Lopes, 2004, citado por Santos e Brito, 2008).

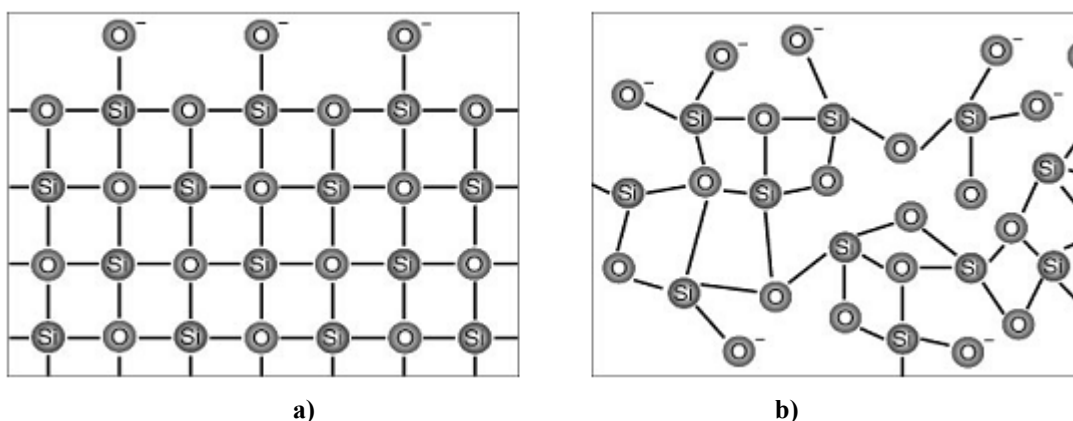
Segundo Kurtis et al. (2002), qualquer agregado que tenha sílica na sua constituição tem potencial para participar na RAS. O quartzo, embora altamente cristalino, possui na sua superfície ligações Si-O polarizadas negativamente, possibilitando a reação expansiva.

Powers e Steinour (1995), citados em Prezzi *et al.* (1997) descrevem a unidade estrutural básica da sílica ( $\text{SiO}_2$ ) como sendo um íon  $\text{Si}^{4+}$  rodeado por quatro íons  $\text{O}^{2-}$ , com disposição em tetraedros, como apresentado na Figura 1.12. Os tetraedros de sílica estão ligados entre si pelos seus vértices. Cada vértice está ocupado por um oxigênio comum a dois tetraedros.



**Figura 1.12 – Tetraedro de sílica.**

A estrutura interna dos tetraedros na forma cristalina apresenta-se com formas orientadas, com estes ligados de modo a criar uma rede tridimensional orientada, enquanto que nas formas amorfas é formada uma rede aleatória, com estrutura interna desordenada (Fernandes, 2005, citado por Santos e Brito, 2008). Na Figura 1.13, apresenta-se um esquema das estruturas nas suas formas cristalinas e amorfas.



**Figura 1.13 – (a) Sílica cristalina e (b) Sílica amorfa (Santos e Brito, 2008).**

A estrutura da sílica não-hidratada apresenta-se com as cargas neutralizadas e equilibrada interiormente, enquanto que na sílica hidratada, em superfície, o íon oxigênio está ligado somente a um íon de silício, ficando uma carga negativa desequilibrada, conforme mostrado anteriormente na Figura 1.9. Na superfície dos cristais, o tetraedro não fica completo e as cargas negativas do oxigênio e positivas do silício não são compensadas. O íon  $H^+$  combina-se com o  $O^{2-}$  na presença de água, enquanto que o íon hidroxila  $OH^-$  se combina com o  $Si^{4+}$ , completando deste modo o tetraedro e formando uma superfície com grupos OH.

A ligação mais fraca do íon hidrogênio com o oxigênio, relativamente ao grupo OH, potencializa a produção de íons  $H^+$  livres por ionização em meio aquoso. A liberação de algum hidrogênio durante a ionização torna a superfície das partículas de sílica um ácido fraco.

Existe um conjunto de rochas e minerais que são considerados potencialmente reativos. Os mais citados na literatura são os minerais de sílica (opala, calcedônia, cristobalita, tridimita, quartzo cripto e microcristalino e quartzo deformado e recristalizado).

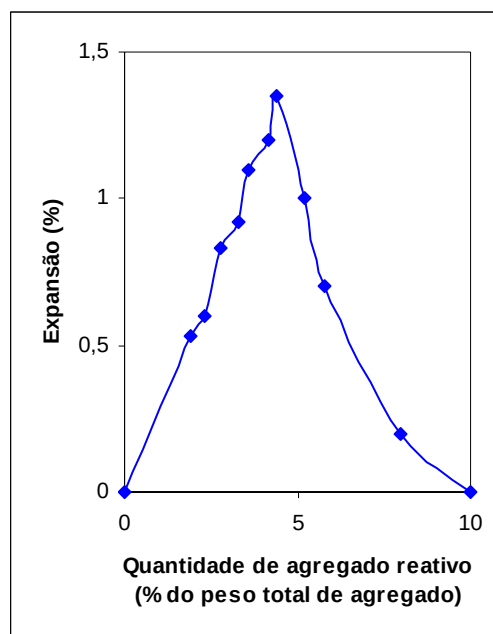
Além dos minerais que foram citados, também podem apresentar potencialidade reativa as rochas que contêm quartzo fortemente deformado ( grauvacas, filitos, xistos, gnaisses, milonitos, quartzitos); rochas vítreas (riolitos, andesitos) e alguns vidros artificiais; chert, ardósias e alguns tipos de calcários (Santos e Brito, 2008).



As formas de sílica analisadas ao microscópio e identificadas como reativas apresentam uma malha cristalina defeituosa. A opala, a calcedônia e o jaspe são considerados os polimorfos mais reativos aos álcalis com uma baixa cristalinidade. A instabilidade do quartzo da mirmequita e a sua baixa cristalinidade fazem com que também deva ser considerada na avaliação da reatividade potencial, aumentando esta com a diminuição da cristalinidade (Fernandes, 2005, citado em Santos e Brito, 2008).

A análise da RAS não assegura ainda relacionar quantidade de determinado constituinte reativo, magnitude da RAS e expansão resultante. Para quantificar a proporção de sílica reativa, na quantidade total de agregado, a que corresponde uma expansão máxima, utiliza-se o termo “conteúdo péssimo” ou “efeito péssimo” (Fernandes, 2005, citado em Santos e Brito, 2008). Assim existe um “conteúdo péssimo” para cada agregado que se define como o teor crítico de material reativo presente num agregado ou mistura de agregados que pode originar uma expansão máxima.

Comparando-se as expansões que ocorrem, quando se alteram as proporções de agregado reativo, verifica-se uma expansão máxima para uma determinada proporção. A Figura 1.14 permite observar a variação de expansão consoante a quantidade de agregado reativo (Santos e Brito, 2008).



**Figura 1.14 – Influência da quantidade de agregado reativo na expansão (Santos e Brito, 2008).**

Da análise do gráfico, verifica-se que, até a uma determinada porcentagem, a expansão aumenta com o aumento de quantidade de agregado, até que chega a um ponto a partir do qual, embora aumentando a quantidade de agregado reativo, a expansão diminui. O pico de expansão é o efeito péssimo no exemplo apresentado (Santos e Brito, 2008).

O aumento ou diminuição da expansão relativamente à concentração de constituinte reativo é variável. Como exemplo disso, em algumas rochas como os quartzitos, a expansão aumenta progressivamente com o aumento dos constituintes reativos dos agregados (Santos e Brito, 2008).

No caso de existir uma concentração de constituinte reativo que conduz à máxima expansão, semelhante ao que acontece nos agregados fortemente reativos como a opala, a expansão já decresce rapidamente para concentrações mais altas ou mais baixas do material, com porcentagens de teor péssimo normalmente inferiores a 10%. Este valor pode atingir 100% nos agregados pouco reativos (Taylor, 1997 citado por Santos e Brito, 2008). Quando a proporção de sílica reativa é superior ao “conteúdo péssimo”, a concentração de íons hidroxilas não é suficiente para manter a reação e a expansão decresce.

O “conteúdo péssimo” representa a proporção do agregado para a qual se desenvolve a máxima produção de gel, considerando que a expansão está relacionada com a quantidade de gel produzida pela reação e com as suas propriedades. Assim o “efeito péssimo” significa também que se pode considerar a utilização de agregados com sílica fortemente reativa no concreto sem que por isso ocorram alterações devido à reação com os álcalis (Fernandes, 2005, citado por Santos e Brito, 2008).

Embora a reatividade dos polimorfos de sílica esteja assumida, o mesmo não acontece na definição de reatividade de um conjunto de minerais comuns que mostram indícios de deformação, ressaltando-se o caso em que a deformação reduza a granulometria dos minerais constituintes (Santos e Brito, 2008, citando Fernandes, 2005).

A granulometria dos agregados também se tem mostrado um fator que influencia a RAS. Existem alguns casos em que a expansão e fissuração do concreto se realizam na presença de agregados reativos com um tamanho compreendido entre 1 e 5 mm (fração fina do agregado), apesar de que, ocorra casos, em que a reação se desenvolva em agregados grossos (Metha, 1986; Foradaba, 2005).

Considerando que a redução da granulometria determina o aumento da superfície específica, qualquer agregado precisa ser considerado sob esse aspecto, pois a expansão é um efeito da reatividade. Neste sentido afirma Foradaba (2005): a quantidade de sílica reativa depende da superfície específica do agregado, pelo que, quanto maior a relação superfície/volume, mais quantidade de sílica estará disponível (Santos e Brito, 2008).

No caso da fração de areia comprovou-se experimentalmente que a expansão do concreto é tanto maior quanto menor o tamanho da partícula, até a um diâmetro aproximado de 75  $\mu\text{m}$ . Para valores menores, a reação desenvolve-se de forma mais dispersa e sem grandes expansões, o que não produz tensões internas e conseqüente fissuração (Metha, 1986; Foradaba, 2005). Eis, pois, um exemplo da limitação da granulometria mais fina como fator catalisador da reação e expansão (Santos e Brito, 2008).

Andrade *et al.* (2006) investigaram o potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA de agregados miúdos e graúdos comercializados na RMR.

No estudo de Andrade *et al.* (2006) foram utilizadas 05 amostras de jazidas distintas de areias naturais e 12 amostras de agregados graúdos de pedreiras da referida região. O potencial de reatividade dos materiais foi avaliado por meio de análises petrográficas, ensaios em barras de argamassa pelo método acelerado – ASTM C-1260/05 e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para o ensaio ASTM C-1260/05 foi escolhido como cimento *Portland* de referência um cimento CP II-F, sem adição mineral capaz de inibir a RAA. Os resultados diagnosticaram potenciais de reatividade bastante variados, identificando, especificamente, 03 amostras de agregados graúdos e 01 amostra de areia com reatividade mais elevada. As análises petrográficas mostraram que a maioria dos agregados continha grãos de quartzo que apresentaram elevada extinção ondulante, quartzo microcristalino e feldspatos alcalinos. O ensaio acelerado se apresentou eficiente para avaliar o comportamento das rochas frente à RAA. As análises ao MEV confirmaram a formação de produtos de RAA.

Prado (2008) avaliou as características microestruturais de amostras de agregados graúdos produzidos a partir de rochas provenientes de pedreiras próximas a zonas de cisalhamento e falhas da porção leste do Estado de Pernambuco situada geologicamente na Província Borborema.

O estudo de Prado (2008) buscou correlacionar o grau de deformação dessas características microestruturais com a reatividade álcali-agregado. A reatividade das amostras foi avaliada através de análises petrográficas e de ensaios de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada a espectroscopia de raios-x por comprimento de onda dispersivo (WDS) foram utilizadas para observação e identificação do gel sílico-alcálico, produto da reação. As amostras analisadas mostraram que a maior reatividade está relacionada à presença de quartzo microcristalino proveniente da recristalização dinâmica. Também foi verificada a importância do quartzo com desenvolvimento de subgrão, e em menor grau o quartzo com extinção ondulante. As texturas mirmequíticas e pertíticas não evidenciaram influência no aumento da reatividade. Os ensaios de expansão foram coerentes com as análises petrográficas. Foi observada a presença do gel sílico-alcálico recobrando a superfície de poros e agregados.

#### 1.5.3. Umidade e Temperatura

A RAS só ocorre na presença de quantidades suficientes de seus componentes. A água, com diversas origens, desde a água livre no interior do concreto à contribuição exterior, é um dos componentes necessários à reação no intervalo de 75% a 90%.

No desenvolvimento da RAS a água transporta os cátions alcalinos, originalmente sob a forma de óxidos. Sua ionização parcial origina os ânions hidroxilas OH<sup>-</sup>, dando surgimento aos hidróxidos de Na, K e Ca, cujas concentrações passa do estado solução ao gel, resultando em absorção e formação do gel sílico-alcálico. O gel pode em alguns casos expandir e criar pressão entre a pasta endurecida e os agregados (Fernandes, 2005, citado por Santos e Brito, 2008). O aumento de umidade pode conduzir a expansões elevadas do gel e aumento de volume que provocam fissuras no concreto.

O efeito duplo da água na RAS foi comentado por Larive (1998), citado em Santos e Brito (2008) afirmando o autor que, por um lado, a água influencia a velocidade de expansão no momento de formação dos produtos da reação sendo considerado um agente reativo, enquanto que, por outro lado, assegura o transporte das diferentes espécies reativas sendo considerado um meio reacional.

A exposição à umidade é frequente nos concretos, embora estejam mais vulneráveis, segundo Fernandes (2005, citado em Santos e Brito, 2008), nas estruturas:

- Expostas a ambientes quentes e úmidos;
- Submetidas a ciclos de molhagem e secagem;
- Em contato com o solo saturado.

Os concretos de baixa qualidade, menos densos e mais porosos, acabam por secar mais rapidamente e estão menos sujeitos à RAS do que os concretos de alta qualidade em ambiente úmido (TR 3, 2003, citado em Santos e Brito, 2008).

Os valores críticos de umidade relativa apontados pela literatura para o desenvolvimento da RAS devem se situar no intervalo de 80% a 85%, segundo Fournier e Bérubé (1993), embora Olafsson (1986), citado em Santos e Brito, 2008, tenha verificado que o valor limite de 80% de umidade relativa diminui com o aumento da temperatura. O autor observou expansões consideráveis em ensaios realizados com valores de 70% de umidade relativa a 38 °C.

Larive (1997), citado por Santos e Brito (2008), verificou em seus experimentos que a exposição do concreto, com produtos reativos, a condições de umidade elevada apenas provoca expansão durante o tempo de reação, ou seja, a influência da água sobre o aumento das deformações é limitada pelo processo de formação dos produtos da reação.

Um dos fatores mais agressivos no desenvolvimento das RAS é o calor. As condições secas durante o dia e frias durante a noite permitem por vezes a condensação da água nas superfícies expostas de concreto acelerando as RAS (TR 3, 2003, citado por Santos e Brito, 2008).

Em condições de umidade, a RAS desenvolve-se mais rapidamente a temperaturas elevadas, embora possa estabilizar mais cedo (Olafsson, 1986; TR 3, 2003, citados em Santos e Brito, 2008). A uma temperatura mais baixa, a expansão torna-se mais lenta, mas a reação prolonga-se por mais tempo.

Nos ensaios de laboratório, é utilizada uma temperatura maior ou igual a 38 °C para acelerar a expansão em corpos de prova analisados. O efeito de diferentes temperaturas pode criar variações nas expansões do concreto (TR 3, 2003, citado em Santos e Brito, 2008).

Vários ensaios foram realizados no concreto para determinar a influência da temperatura na reação álcali-agregado (Larive, 1997; Capra *et al.*, 1995; Diamond, 1989 citados por Santos e Brito, 2008). A análise dos resultados indica que a influência da temperatura na cinética da reação é significativa, verificando-se que para temperaturas de 40 °C, a expansão e o consumo de álcalis ocorre mais depressa, embora influenciando pouco a magnitude da reação (Lopes, 2004, citado por Santos e Brito, 2008).

Apesar da velocidade da reação e formação do gel aumentar com a temperatura, a sua viscosidade diminui, permitindo dissolver-se com mais facilidade nas fissuras e poros do concreto, dissipando em parte a expansão (Foradaba, 2005).

#### 1.5.4. Adições

O uso de adições vem sendo uma pratica comum em concretos de estruturas sujeitas à RAA, principalmente as adições minerais, em especial , pozolânicas. O mecanismo de ação das adições minerais na prevenção do desencadeamento da RAA esta relativamente claro. As pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento e diminui o pH da solução dos poros, o que acaba por inibir a reação.

Quando não é possível evitar o uso de agregados contendo constituintes reativos, uma maneira de prevenir ou minimizar o risco de RAA nos concretos é a utilização de adições minerais ao cimento ou ao concreto a ser confeccionado. A partir do conhecimento da potencialidade reativa de uma rocha recomendam-se ensaios com uso de adições para verificação da capacidade de inibição de reações expansivas através dessas adições.

Adições minerais são materiais silicosos finamente moídos, oriundos de fontes artificiais ou naturais que, quando adicionados ao cimento *Portland* ou diretamente ao concreto, produzem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto aumentando sua inércia aos ataques químicos, decorrentes, por exemplo, de águas sulfatadas e RAA. Por conseguinte, aumentando sua durabilidade (Metha e Monteiro, 1994).

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 escoria de alto forno e cinza de casca de arroz. Estes são considerados aditivos minerais artificiais, que são geralmente subprodutos industriais secundários, podendo necessitar ou não de algum processamento (Metha e Monteiro, 1994)

Existem ainda as adições minerais naturais, materiais processados com o propósito de produzir pozolanas. Metha e Monteiro (1994) citam os vidros vulcânicos, argilas ou folhelhos calcinados, tufos vulcânicos e argilas diatomáceas, sendo que apenas os dois primeiros são usados como inibidores de RAA, ainda assim em pequena escala.

As adições podem reduzir a permeabilidade do concreto, pelo aumento da superfície específica. Além de reduzir os hidróxidos alcalinos presentes nas soluções dos poros do concreto, e consumir o hidróxido de cálcio através das reações pozolânicas, auxiliando desta forma no controle da RAA.

Ferraris (2000), citado em Valduga (2002), resume o processo de inibição da seguinte forma: a sílica contida nessas adições reage mais rápido com os íons hidroxila do que a sílica contida nos agregados. Conseqüentemente, 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. Esta explicação está de acordo com ob (1984), o qual afirma que no mecanismo de combate à RAA com o uso de adições minerais, a sílica contida nessas adições reage mais rapidamente com os álcalis presentes, antes mesmo da sílica reativa dos agregados. Esta reação não é prejudicial, pois os produtos não aumentam de volume.

Estudos de Paulon et al. (1982) avaliaram o efeito de pozolanas brasileiras na inibição da RAA e constataram uma significativa redução das expansões provocadas pela reação álcali-silca, devido à substituição de 30% do cimento por pozolana.

Hasparyk *et al.* (2000) realizaram um experimento a fim de avaliar a eficiência de diferentes teores de sílica ativa e cinza de casca de arroz em substituição ao cimento, na expansão de barras de argamassa para dois tipos de agregados, o quartzito e o basalto.

Observou-se que para se atingir expansões de mesma magnitude nas amostras fabricadas, tanto com diferentes agregados quanto com um mesmo agregado, foram necessários diferentes teores de cada adição.

Na Tabela 1.5, mostram-se alguns tipos de adições e respectivos teores capazes de inibir a RAA, sugeridos por Hasparyk (2005).

**Tabela 1.5 – Teores de adições minerais empregados em substituição ao cimento para inibição da RAA (Hasparyk, 2005).**

| <b>Adições minerais/pozolânicas</b> | <b>Teores de adições (%)</b> |
|-------------------------------------|------------------------------|
| Sílica ativa                        | 10 a 15                      |
| Cinza de casca de arroz amorfa      | > 12                         |
| Metacaulim                          | 10 a 25                      |
| Pozolana natural                    | 20 a 30                      |
| Cinza volante                       | 25 a 50                      |
| Escória de alto-forno moída         | 40 a 65                      |

Andrade e Rego Silva (2007) elaboraram um diagnóstico do potencial de reatividade dos agregados e do potencial de inibição de RAA com o uso de cimentos e adições minerais disponíveis na RMR.

Na primeira parte deste estudo os autores utilizaram os agregados que se apresentaram mais reativos no trabalho de Andrade *et al.* (2006) para comparar com testemunhos de concretos retirados de fundações de diversos edifícios da RMR. As investigações constataram cerca de 20 casos de RAS em edifícios de diversas idades. Os autores concluíram que existe uma forte correlação entre as características petrográficas dos agregados graúdos usados nestes concretos e daqueles mais reativos, fornecidos pelas pedreiras. Estes agregados provêm de rochas que sofreram maior ou menor intensidade de metamorfismo, apresentando texturas miloníticas ou cataclásticas, possuindo quartzo deformado com extinção ondulante, microcristalino e recristalizado.



Na segunda parte do trabalho os autores avaliaram o potencial de inibição de cimentos e adições minerais disponíveis na RMR, através de ensaios para determinação de expansões em barras de argamassa pelo método acelerado. Além de outras de outras adições minerais, foram avaliados dois cimentos com diferentes teores de pozolana.

Quanto à capacidade de inibição da RAS, um dos cimentos pozolânicos, com teor de 40%, se mostrou eficiente para os agregados mais reativos, sendo razoável afirmar que também teriam um comportamento satisfatório para os demais, menos reativos.

Para o outro cimento, com teor de 25% de pozolana, apesar da redução dos níveis de expansão para os dois agregados mais reativos, os valores obtidos indicaram que os concretos produzidos com este cimento ainda correm risco de expansão deletéria, bem como, não foi possível tirar alguma conclusão, da combinação deste cimento com os demais agregados não reativos.

Segundo Urhan (1987), nem todas as adições são benéficas e existem limites de teores para cada tipo de adição. Ultrapassados esses limites o efeito pode até ser reverso. Para um determinado teor de álcalis do cimento, existe um consumo específico, teor péssimo, de material pozolânico capaz de produzir o gel da reação a um nível máximo. É necessário, entretanto, que investigações sejam realizadas a fim de se conhecer a eficiência de cada material pozolânico e determinar-se a adição ótima para um certo agregado reativo. Caso contrário, ao invés de se estar prevenindo as expansões, pode-se estar provocando um efeito inverso.

## **1.6. Métodos utilizados na investigação da reação álcali-silica/silicato**

Como resultado dos problemas causados nas estruturas de concreto devido a RAA em todo mundo, foi dada maior importância à investigação prévia dos materiais a serem empregados na construção, no tocante a seu potencial reativo, a fim de evitar o desenvolvimento da reação.

Nas décadas de 40 e 50 do século passado, alguns testes foram desenvolvidos para identificar a reatividade do agregado e da combinação cimento-agregado.

Nos idos de 1990 novos testes foram elaborados, talvez devido ao aparecimento de casos de obras executadas com agregados considerados não reativos, segundo a metodologia em vigor da época. Cada teste tem suas limitações, apresentando vantagens e desvantagens, como pode ser observado nas descrições dos ensaios adiante.

Em toda investigação acerca da reatividade do agregado deve ser lembrado que um único teste ou uma combinação deles nem sempre fornecerá uma indicação definitiva sobre o desempenho do agregado na prática. O que ocorre na maioria dos casos é adoção de um conjunto de ensaios de laboratório, buscando a sua mútua complementação a fim de identificar o potencial reativo dos agregados.

Vários tipos de métodos de ensaios são encontrados na literatura existente sobre o assunto. Em geral podem ser classificados em dois tipos:

- Métodos que avaliam apenas os agregados: análise petrográfica, método químico, método Osipov e método das rochas carbonáticas;
- Métodos que avaliam apenas as combinações cimento/agregado através de amostras de concreto e argamassa: método das barras de argamassa (ASTM C 227/03), método acelerado (ASTM C 1260/05; NBR 15577/08), método acelerado Sul-Africano - NBRI, método dos prismas de concreto para reação RAS (ASTM C 1293/06; NBR 15577/08), método dos prismas de concreto para RAC (ASTM C 1105/95).

Além desses métodos existem outras técnicas que auxiliam na identificação dos produtos da reação, destacando-se a difração de raios-X e a microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de raios-X por energia dispersiva - EDS ou por comprimento de onda dispersivo - WDS, que permitem a visualização e a determinação da composição química desses produtos.

Nos subitens a seguir, serão comentados apenas os métodos de ensaio e técnicas laboratoriais utilizados nesta dissertação.

### 1.6.1. Análise petrográfica

Compreende a observação macroscópica e microscópica de amostras de rochas constituintes dos agregados que estão sendo avaliados quanto ao seu potencial reativo. A observação microscópica realiza-se através do microscópio óptico de luz transmitida, com dupla polarização e sistema conoscópico.

Fornece informações importantes, tais como: composição mineralógica, arranjo estrutural, textura, forma e granulação dos componentes minerais, contribuindo para a identificação de fases deletérias.

A metodologia para realização da análise petrográfica encontra-se estabelecida nas normas ASTM C 295/03 e NBR 15577/08.

Segundo a norma NBR 15577/08, a análise petrográfica é o primeiro passo na investigação do potencial reativo do agregado, sendo realizada em lâminas delgadas, com espessura aproximada de 30  $\mu\text{m}$ , preparadas com amostras do mineral e ou rocha que constituem o agregado.

Deve ser realizada por pessoa qualificada, de preferência um petrógrafo, com formação e experiência para aplicar as técnicas de reconhecimento das propriedades características de minerais e rochas, descrever e classificar as amostras.

Os procedimentos para a execução da análise devem seguir os métodos usuais de análise petrográfica, relacionados a seguir:

- Examinar macroscopicamente a amostra e classificá-la quanto ao tipo;
- Avaliar as propriedades físico-mecânicas da amostra, classificando-a com relação à integridade: muito coerente, coerente, pouco coerente, friável;
- Registrar a cor e textura da rocha: maciça, foliada, bandada ou outra;
- Examinar a seção delgada no microscópio óptico e registrar as seguintes características: textura, granulação, composição mineralógica;

estado e potencialidade de alteração da rocha, presença e quantificação de fases deletérias, quartzo com extinção ondulante, quartzo microgranular, intercrescimentos, alterações, marcadores de deformação, estado microfissural, natureza e classificação petrográfica da rocha.

Após a análise petrográfica da rocha procede-se à classificação do agregado com relação ao potencial reativo em: potencialmente inócuo ou potencialmente reativo.

A efetividade da análise petrográfica depende fundamentalmente da representatividade das amostras, da abrangência e exatidão das informações fornecidas ao petrógrafo com relação à fonte e ao uso pretendido do material, bem como, da experiência e habilidade do petrógrafo em correlacionar esses dados com as informações das análises.

A análise petrográfica e a caracterização mineralógica isoladas não são suficientes para avaliar se um agregado irá causar expansão deletéria, isto deverá ser comprovado por outros ensaios em combinação com o cimento, como reatividade em barras de argamassa ou concreto.

#### 1.6.2. Método acelerado das barras de argamassa

Esse método, inicialmente desenvolvido por Oberholster e Davies (1986), ficou conhecido como método Sul Africano ou NBRI (*National Building Research Institute*). Posteriormente foi normatizado pela norma ASTM C 1260/05. No Brasil, o método foi estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, através da norma NBR 15577/08.

É semelhante ao método das barras (ASTM C 227/03) porém como foi desenvolvido para avaliar mais rapidamente a RAS, ficou usualmente conhecido como “método acelerado”, sendo atualmente o método mais difundido e utilizado no Brasil e no mundo.

O objetivo deste método é investigar o potencial de reatividade do agregado através da variação do comprimento de barras de argamassa confeccionadas com agregado (fração areia), cimento e água, moldadas, com uma relação água/cimento fixa de 0,47, nas dimensões 25 mm x 25 mm x 285 mm. Após a desmoldagem as barras são imersas em água a 80 °C, realizando-se a primeira leitura do comprimento das barras, em relógio comparador, após 24 horas. Em seguida, são submersas em uma solução de NaOH, 1N, a 80 °C, realizando-se leituras periódicas do comprimento das barras. Os resultados de expansão são avaliados após 16 dias, contados a partir da data de moldagem das barras.

A norma ASTM C 1260/05 sugere uma classificação para a potencialidade do agregado, conforme os seguintes limites de expansão:

- Expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias indicam um comportamento inócuo do agregado;
- Expansões entre 0,10% e 0,20% aos 16 dias indicam possibilidade do agregado possuir comportamento tanto inócuo como deletério;
- Expansões superiores a 0,20% aos 16 dias indicam agregado potencialmente reativo.

No caso de expansões compreendidas entre os limites de 0,10% e 0,20%, sugere-se levar o ensaio até aos 28 dias de idade e realizar investigações adicionais para confirmar se a expansão é devida a RAS.

A metodologia da NBR 15577/08, para avaliação da reatividade potencial de agregados, estabelece que quando for necessário conhecer o potencial reativo dos agregados a serem utilizados, devem ser realizadas a caracterização mineralógica e análise petrográfica associadas aos ensaios de determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, e caso se deseje a confirmação da inocuidade do agregado para uso em concreto, recomenda que se realize o ensaio de longa duração em prismas de concreto.

A determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, prescrita na NBR 15577/08, segue os mesmos parâmetros da ASTM C 1260/05, com pequenas diferenças quanto ao controle da temperatura, que deve iniciar-se com  $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  e atingir  $(80 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  num período de  $(6 \pm 2)$  horas. Determina que sejam efetuadas leituras nas idades de 16 e 30 dias, contados a partir da moldagem, e pelo menos três leituras intermediárias em cada período. Porém, a classificação do agregado quanto à potencialidade reativa é feita considerando-se apenas um limite de expansão de 0,19% aos 30 dias, para avaliações preliminares, utilizando-se cimento-padrão. Desta forma, a classificação laboratorial do agregado quanto a RAA segue o seguinte:

- Para expansões inferiores a 0,19% aos 30 dias, o agregado pode ser considerado potencialmente inócuo;
- Para expansões iguais ou superiores a 0,19% aos 30 dias, o agregado é considerado potencialmente reativo.

Quando o objetivo é avaliar a eficiência de materiais cimentícios inibidores da RAS, como, por exemplo, cimentos com adições pozolânicas, a norma NBR 15577/08 estabelece os seguintes limites de expansão para determinação da potencialidade reativa do agregado:

- Expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias, comprovada a mitigação;
- Expansões iguais ou superiores a 0,10% aos 16 dias, não comprovada a mitigação.

Os limites de expansão e o tempo de duração da análise dos agregados no método acelerado não são unânimes, de modo que esses parâmetros foram adaptados de acordo com os agregados existentes em diversos países que adotaram a norma, conforme mostra a Tabela 1.6.

**Tabela 1.6 – Tempo de duração e limites de expansão, adotados em diversos países, para o Método Acelerado (Bellew, 1997).**

| País           | Idade (dias) | Limite de expansão (%) |
|----------------|--------------|------------------------|
| África do Sul  | 12           | 0,11                   |
| Itália         | 12           | 0,10                   |
| Austrália      | 10-22        | 0,10                   |
| Canadá         | 14           | 0,15                   |
| Estados Unidos | 14           | 0,10                   |
| Noruega        | 14           | 0,15                   |
| Argentina      | 28           | -                      |

Berubé e Frenette (1994) realizaram vários estudos de reatividade potencial em agregados, variando alguns o tipo de solução (KOH, NaCl, água) e temperatura de 38°C, além dos parâmetros da ASTM C 1260/05, concluindo que a solução de NaOH é a mais adequada para o ensaio, mas questionam a temperatura de 80°C como muito severa.

Segundo Silva (2007), devido à severidade do ambiente a que as amostras são submetidas, agregados que não possuem histórico de desempenho reativo podem ser classificados como potencialmente reativos por este método. Por outro lado, agregados que apresentam um comportamento mais lento com relação à reação, como gnaisses graníticos, muitas vezes não são detectados como reativos quando se executa o ensaio apenas até os 16 dias, ou até mesmo até os 30 dias.

Apesar disto, Moranville-Regourd, citada em Valduga, 2002, em seus estudos para estabelecer a validade do método acelerado NBRI, concluiu que os produtos de reação encontrados em barras de argamassa, submetidas a ensaios acelerados utilizando solução de NaOH, na concentração 1N e temperatura de 80°C, possuem composição química e morfologia similares àqueles formados em estruturas de concreto de campo.

#### 1.6.3. Microscopia eletrônica de varredura

A técnica MEV é rotineiramente utilizada para gerar imagens de alta resolução das formas dos objetos e para mostrar variações espaciais na composição química. Além disso, identifica fases por meio de análises químicas qualitativas.

No processo de interação do feixe eletrônico com a matéria, os sinais de maior interesse para formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia de superfície da amostra e são responsáveis pelas imagens de alta resolução, enquanto que os elétrons retroespalhados fornecem imagens características de variação de composição.

Os componentes do microscópio eletrônico de varredura são apresentados a seguir:

- Fonte: O canhão de elétrons gera o feixe que percorre a coluna.
- Conjunto de lentes condensadoras e objetivas: as lentes controlam o diâmetro do feixe e o direciona até a amostra.
- Conjunto de aberturas: as aberturas são orifícios de escala micrométrica que alteram as propriedades dos elétrons quando da passagem do feixe.
- Mecanismos de controle da posição da amostra quanto à posição (x, y, z, altura) e orientação (inclinação e rotação).
- Área de interação a amostra com o feixe: a partir da interação diferentes sinais são gerados e processados.
- Sistema de alto vácuo: o vácuo impede que os elétrons interajam com partículas gasosas e comprometam a análise.

Na microscopia eletrônica de varredura, o contraste forma-se devido ao número atômico e à topografia da amostra. Regiões da amostra com átomos de maior número atômico emitem mais sinais de retroespalhamento e aparecem mais claras na imagem. Já o contraste devido à topografia permite a visualização da forma, formato e textura dos objetos e é dependente dos coeficientes de retroespalhamento e de elétrons secundários.

Diversos equipamentos podem ser acoplados ao MEV como detectores, já que muitas são as informações derivadas da interação entre o feixe primário e amostra, mas a espectroscopia de [energia dispersiva de raios-X](#) - EDS e a espectroscopia de [comprimento de onda dispersivo](#) de raios-X - WDS são as técnicas mais comumente empregadas, que atuam separando os feixes de raios-X característicos.

O detector de EDS contém um cristal combinado de silício e lítio que absorve a energia dos raios-x característicos por ionização e produz elétrons livres no cristal. Este se torna condutivo e gera corrente elétrica de intensidade proporcional aos raios-x característicos do elemento.



O espectro de EDS é construído ao se plotar valores de intensidade de raios-x versus energia. Os picos correspondem aos diferentes elementos presentes na amostra. Geralmente os picos são de fácil resolução, no entanto muitos elementos produzem múltiplos picos. Pode ocorrer a sobreposição de picos de energia, particularmente aqueles relativos a raios-x de diferentes níveis de energia (K, L e M) de diferentes elementos. Neste caso, é preciso separar os picos com métodos de deconvolução ou simplesmente considerar o elemento coerente com a amostra.

A técnica WDS está baseada nas propriedades ondulatórias dos raios-x característicos e na lei de difração de Bragg. Ao incidir sobre um cristal de espaçamento interplanar conhecido, o raio-X é difratado e, de acordo com o ângulo de incidência  $\theta$ , o comprimento de onda do raio-x característico é calculado.

A microscopia eletrônica de varredura vem sendo largamente utilizada na análise da microestrutura de concretos e argamassas, inclusive na análise de produtos da hidratação do cimento e produtos de ataques de agentes agressivos, entre eles os produtos de reação alcali-agregado.

Constitui-se uma técnica auxiliar, quando outro tipo de ensaio já tenha sido realizado, que possibilita a visualização dos produtos da reação e, através da espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) ou de comprimento de onda dispersivo de raios-X (WDS), consegue-se aferir qualitativamente e semiquantitativamente a composição química desses produtos.

Esse método permite, portanto, a análise, identificação e classificação dos diversos tipos de géis formados na RAA. Também é possível identificar-se as bordas de reação na interface da pasta de cimento com o agregado, e a presença de gel álcali-silicoso disperso na argamassa, nos poros e fissuras do agregado.

## **CAPÍTULO 2 – MATERIAIS E MÉTODOS**

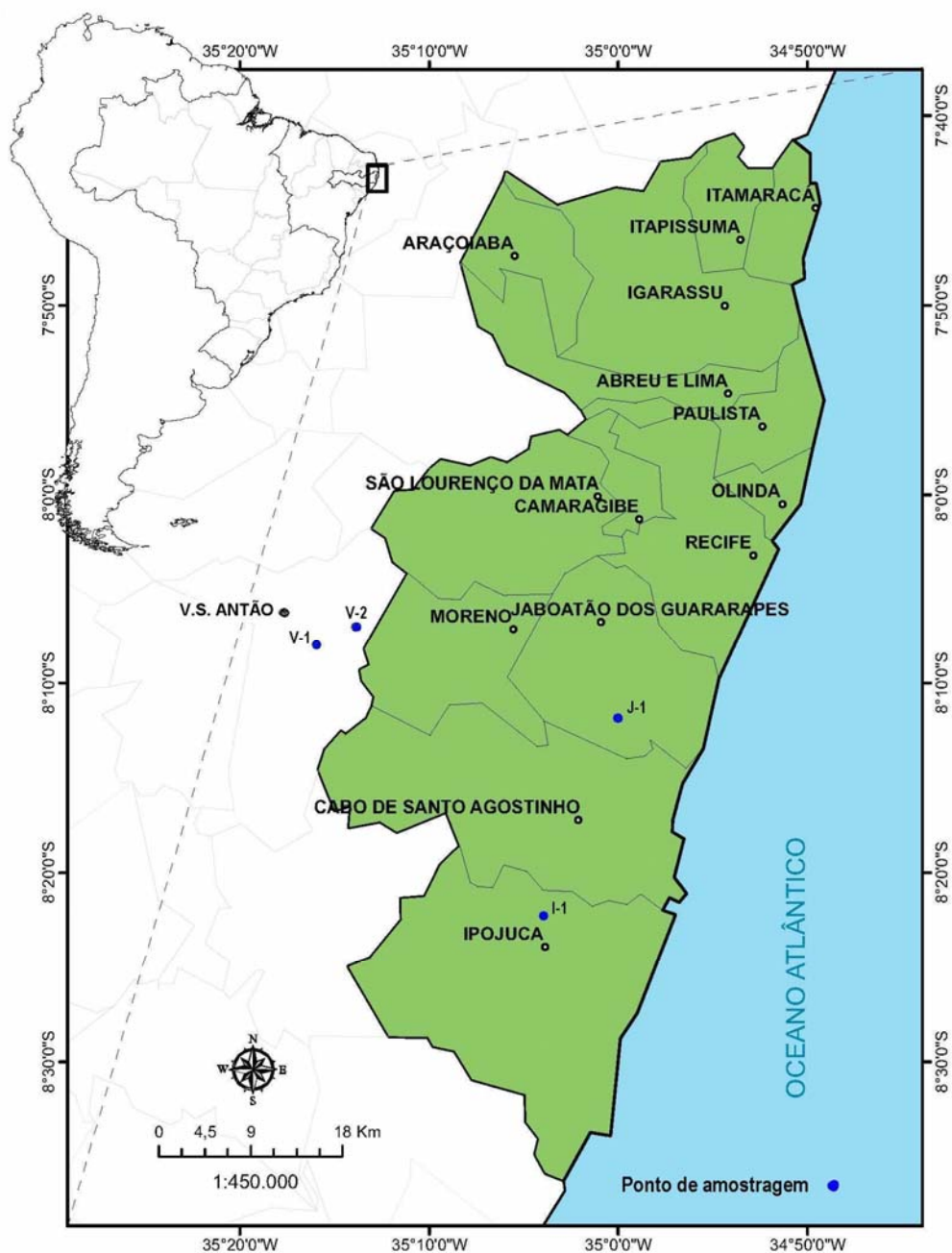
Tendo em vista o objetivo da pesquisa, o programa experimental foi elaborado com a finalidade de avaliar o comportamento, com relação a RAA, de quatro amostras de agregados graúdos provenientes de pedreiras localizadas na RMR, frente a três diferentes tipos de cimento *Portland*.

### **2.1. Materiais**

#### **2.1.1. Agregados**

As amostras de agregados graúdos utilizados no presente estudo são provenientes de quatro pedreiras localizadas na Região Metropolitana do Recife. Essas pedreiras produzem essencialmente britas, largamente utilizadas na confecção de concreto. Dentre as quatro, uma localiza-se no município de Ipojuca, outra no município de Jaboatão dos Guararapes e duas no município de Vitória de Santo Antão, conforme apresentado na Figura 2.1.

As pedreiras de onde foram coletadas as amostras de agregados foram selecionadas levando-se em conta, além da sua capacidade de produção, o potencial de utilização conforme a proximidade das áreas economicamente mais importantes da região, como os centros urbanos e o Porto de Suape. A localização dos pontos de amostragem em relação ao traço estrutural da zona de cisalhamento do Lineamento Pernambuco, que representa um marco de deformação frágil-ruptil foi considerada como referência na avaliação da potencialidade reativa dos agregados.



**Figura 2.1: Mapa de localização com os pontos de coleta das amostras de agregados (adaptado de Barreto, 2010).**

### 2.1.2. Cimentos

O critério para escolha dos diferentes tipos de cimentos foi o teor de adições pozolânicas presentes, tendo em vista que essas adições, quando utilizadas em proporções adequadas, podem inibir a RAA. Naturalmente a sua difusão no mercado foi um outro fator considerado.

Três tipos de cimentos *Portland* com diferentes teores de adições foram utilizados neste estudo, a saber: CP II-Z, CP IV e CP V-ARI. A escolha desses cimentos baseia-se nas normas brasileiras que determinam os teores de adições e outras características químicas, físicas e mecânicas dos cimentos produzidos no Brasil, conforme as Tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4.

**Tabela 2.1- Tipos de cimentos produzidos no Brasil e respectivos teores de adições**

| Tipo de Cimento Portland | Sigla    | Composição (% em massa) |                       |                     |                      | Norma Brasileira |
|--------------------------|----------|-------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|------------------|
|                          |          | Clínquer + gesso        | Escoria de alto-forno | Material pozolânico | Material carbonático |                  |
| Comum                    | CP I     | 100                     | 0                     |                     |                      | NBR 5732         |
|                          | CP I-S   | 99-95                   | 1-5                   |                     |                      |                  |
| Composto                 | CP II-E  | 94-56                   | 6-34                  | -                   | 0-10                 | NBR 11578        |
|                          | CP II-Z  | 94-76                   | -                     | 6-14                | 0-10                 |                  |
|                          | CP II-F  | 94-90                   | -                     |                     | 6-10                 |                  |
| Alto-forno               | CP III   | 65-25                   | -                     | 35-70               | 0-5                  | NBR 5735         |
| Pozolânico               | CP IV    | 85-45                   | -                     | 15-50               | 0-5                  | NBR 5736         |
| Alta Res. Inic.          | CP V-ARI | 100-95                  | *                     | *                   | 0-5                  | NBR 5733         |

**Tabela 2.2 - Exigências químicas dos tipos de cimentos produzidos no Brasil.**

| Tipos    | Resíduo insolúvel RI (%) | Perda ao fogo (%) | MgO (%) | SO <sub>3</sub> (%) | CO <sub>2</sub> (%) |
|----------|--------------------------|-------------------|---------|---------------------|---------------------|
| CP I     | ≤ 1,0                    | ≤ 2,0             | ≤ 6,5   | ≤ 4,0               | ≤ 1,0               |
| CP I-S   | ≤ 5,0                    | ≤ 4,5             | ≤ 6,5   | ≤ 4,0               | ≤ 3,0               |
| CP II-E  | ≤ 2,5                    | ≤ 6,5             | ≤ 6,5   | ≤ 4,0               | ≤ 5,0               |
| CP II-Z  | ≤ 16,0                   | ≤ 6,5             | ≤ 6,5   | ≤ 4,0               | ≤ 5,0               |
| CP II-F  | ≤ 2,5                    | ≤ 6,5             | ≤ 6,5   | ≤ 4,0               | ≤ 5,0               |
| CP III   | ≤ 1,5                    | ≤ 4,5             | -       | ≤ 4,0               | ≤ 3,0               |
| CP IV    | -                        | ≤ 4,5             | ≤ 6,5   | ≤ 4,0               | ≤ 3,0               |
| CP V-ARI | ≤ 1,0                    | ≤ 4,5             | ≤ 6,5   | *                   | ≤ 3,0               |

**Tabela 2.3 - Exigências físicas dos tipos de cimento produzidos no Brasil.**

| Tipo/classe                   |    | Finura    |                             | Tempo de pega (h) |      | Expansibilidade (mm) |          |
|-------------------------------|----|-----------|-----------------------------|-------------------|------|----------------------|----------|
|                               |    | # 200 (%) | Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | Início            | Fim  | A frio               | A quente |
| CP I<br>CP I-S                | 25 | ≤ 12,0    | ≥ 2400                      | ≥ 1               | ≤ 10 | ≤ 5,0                | ≤ 5,0    |
|                               | 32 | ≤ 12,0    | ≥ 2600                      | ≥ 1               | ≤ 10 | ≤ 5,0                | ≤ 5,0    |
|                               | 40 | ≤ 10,0    | ≥ 2800                      | ≥ 1               | ≤ 10 | ≤ 5,0                | ≤ 5,0    |
| CP II-E<br>CP II-Z<br>CP II-F | 25 | ≤ 12,0    | ≥ 2400                      | ≥ 1               | ≤ 10 | ≤ 5,0                | ≤ 5,0    |
|                               | 32 | ≤ 12,0    | ≥ 2600                      | ≥ 1               | ≤ 10 | ≤ 5,0                | ≤ 5,0    |
|                               | 40 | ≤ 10,0    | ≥ 2800                      | ≥ 1               | ≤ 10 | ≤ 5,0                | ≤ 5,0    |
| CP III                        |    | ≤ 8,0     | -                           | ≥ 1               | ≤ 12 | ≤ 5,0                | ≤ 5,0    |
| CP IV                         |    | ≤ 6,0     | -                           | ≥ 1               | ≤ 12 | ≤ 5,0                | ≤ 5,0    |
| CP V-ARI                      |    | ≤ 6,0     | ≥ 3000                      | ≥ 1               | ≤ 10 | ≤ 5,0                | ≤ 5,0    |

**Tabela 2.4 - Exigências mecânicas dos tipos de cimento mais consumidos no Brasil.**

| Tipo/classe                   |    | Resistência à compressão |                 |                 |                  |
|-------------------------------|----|--------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
|                               |    | 1 dia<br>(MPa)           | 3 dias<br>(MPa) | 7 dias<br>(MPa) | 28 dias<br>(MPa) |
| CP I<br>CP I-S                | 25 | -                        | $\geq 8,0$      | $\geq 15,0$     | $\geq 25,0$      |
|                               | 32 | -                        | $\geq 10,0$     | $\geq 20,0$     | $\geq 32,0$      |
|                               | 40 | -                        | $\geq 15,0$     | $\geq 25,0$     | $\geq 40,0$      |
| CP II-E<br>CP II-Z<br>CP II-F | 25 | -                        | $\geq 8,0$      | $\geq 15,0$     | $\geq 25,0$      |
|                               | 32 | -                        | $\geq 10,0$     | $\geq 20,0$     | $\geq 32,0$      |
|                               | 40 | -                        | $\geq 15,0$     | $\geq 25,0$     | $\geq 40,0$      |
| CP III                        | 25 | -                        | $\geq 8,0$      | $\geq 15,0$     | $\geq 25,0$      |
|                               | 32 | -                        | $\geq 10,0$     | $\geq 20,0$     | $\geq 32,0$      |
|                               | 40 | -                        | $\geq 12,0$     | $\geq 23,0$     | $\geq 40,0$      |
| CP IV                         | 25 | -                        | $\geq 8,0$      | $\geq 15,0$     | $\geq 25,0$      |
|                               | 32 | -                        | $\geq 10,0$     | $\geq 20,0$     | $\geq 32,0$      |
| CP V-ARI                      |    | $\geq 14$                | $\geq 24,0$     | $\geq 34,0$     | -                |

O cimento CP V-ARI foi escolhido e indicado como referência por que, além de conter baixo teor de adições, apresenta evolução mais rápida dos processos de hidratação, fato este muito importante na realização de ensaios acelerados.

O cimento CP II-Z foi escolhido por ser um dos mais consumidos na região e para se verificar se quantidade de adição é suficiente para inibir a reação.

O cimento CP IV foi escolhido por ser bastante consumido na região e conter um elevado teor de adições.

Na Tabela 2.5 apresentam-se as características químicas e na Tabela 2.6 as características físicas e mecânicas dos cimentos utilizados na pesquisa, conforme fichas-técnica fornecidas pelos fabricantes e constantes no Apêndice A desta dissertação.

**Tabela 2.5 - Características químicas dos cimentos utilizados na pesquisa.**

| Características avaliadas (%)      | Tipos de cimento Portland |                            |                     |                           |                     |                           |
|------------------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
|                                    | CP II Z                   |                            | CP IV               |                           | CP V ARI            |                           |
|                                    | Resultado fornecido       | Exigências da NBR 11578/91 | Resultado fornecido | Exigências da NBR 5736/91 | Resultado fornecido | Exigências da NBR 5737/91 |
| SiO <sub>2</sub>                   | 24,06                     |                            | 34,03               |                           | -                   |                           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 4,87                      |                            | 5,25                |                           | -                   |                           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T) | 2,39                      |                            | 2,15                |                           | -                   |                           |
| MgO                                | 4,44                      | ≤ 6,5                      | 3,95                | ≤ 6,5                     | -                   | ≤ 6,5                     |
| CaO                                | 52,89                     |                            | 34,03               |                           | -                   |                           |
| Na <sub>2</sub> O                  | 0,13                      |                            | 0,26                |                           | -                   |                           |
| K <sub>2</sub> O                   | 1,68                      |                            | 1,35                |                           | -                   |                           |
| SO <sub>3</sub>                    | 3,03                      | ≤ 4,0                      | 2,53                | ≤ 4,0                     | 3,31                | ≤ 3,5                     |
| CO <sub>2</sub>                    | 4,31                      | ≤ 5,0                      | 2,79                | ≤ 3,0                     | -                   | ≤ 3,0                     |
| CaO livre                          | 0,83                      |                            | 0,71                |                           | 1,47                |                           |
| Perda ao fogo                      | 5,61                      | ≤ 6,5                      | 4,13                | ≤ 4,5                     | 3,94                | ≤ 4,5                     |
| Resíduo insolúvel                  | 15,04                     | ≤ 16,0                     | 27,20               | -                         | 1,32                | ≤ 1,0                     |

**Tabela 2.6 - Características físicas e mecânicas dos cimentos utilizados**

| Características avaliadas             | Tipos de cimento Portland |                            |                     |                           |                     |                           |
|---------------------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
|                                       | CP II Z                   |                            | CP IV               |                           | CP V ARI            |                           |
|                                       | Resultado Fornecido       | Exigências da NBR 11578/91 | Resultado fornecido | Exigências da NBR 5736/91 | Resultado fornecido | Exigências da NBR 5737/91 |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) | 3,01                      | -                          | 2,91                | -                         | 3,12                | -                         |
| Finura – resíduo na # 75µm            | 4,2                       | ≤ 12                       | 2,8                 | ≤ 8                       | 0,15                | < 6                       |
| Finura Blaine (m <sup>2</sup> /kg)    | 471                       | ≥ 260                      | 527                 | -                         | 415                 | > 300                     |
| Tempo início de pega (h:min)          | 03:38                     | ≥ 1,0                      | 03:35               | ≥ 1                       | 2:24                | > 1                       |
| Tempo fim de pega (h:min)             | 04:38                     | ≤ 10                       | 04:35               | ≤ 12                      | 3:26                | < 10                      |
| Expansibilidade a quente (mm)         | 0,5                       | ≤ 5                        | 0,4                 | ≤ 5                       | 0,49                | < 5                       |
| Res. à compressão 1 dia (MPa)         | 13,6                      | -                          | 11,4                | -                         | 19,84               | > 14                      |
| Res. à compressão 3 dias (MPa)        | 23,4                      | ≥ 10                       | 21,6                | ≥ 10                      | 29,81               | > 24                      |
| Res. à compressão 7 dias (MPa)        | 29,1                      | ≥ 20                       | 27,4                | ≥ 20                      | 38,57               | > 34                      |
| Res. à compressão 28 dias (MPa)       | 38,8                      | ≥ 32                       | 38,7                | ≥ 32                      | 47,41               | -                         |

### 2.1.3. Água

Na mistura da argamassa para confecção das barras pelo método acelerado utilizou-se água deionizada (Figura 2.2), conforme recomendações da norma NBR 15577/08, fornecida pelo laboratório de Furnas Centrais Elétricas, onde os ensaios foram realizados.



**Figura 2.2 – Deionizador de água do laboratório de Furnas Centrais Elétricas.**

## **2.2. Métodos**

A pesquisa foi planejada e desenvolvida em três etapas. Na primeira procederam-se à coleta e preparação das amostras de agregados e a aquisição dos diferentes tipos de cimentos. Na segunda realizou-se a caracterização química dos agregados e cimentos, a análise petrográfica dos agregados e os ensaios para determinação da reatividade potencial dos agregados e avaliação da eficiência dos cimentos, pelo método acelerado das barras de argamassa. Na terceira e última etapa realizaram-se as análises por MEV e EDS.

Na Figura 2.3, na página seguinte, apresenta-se um organograma das etapas experimentais da pesquisa.

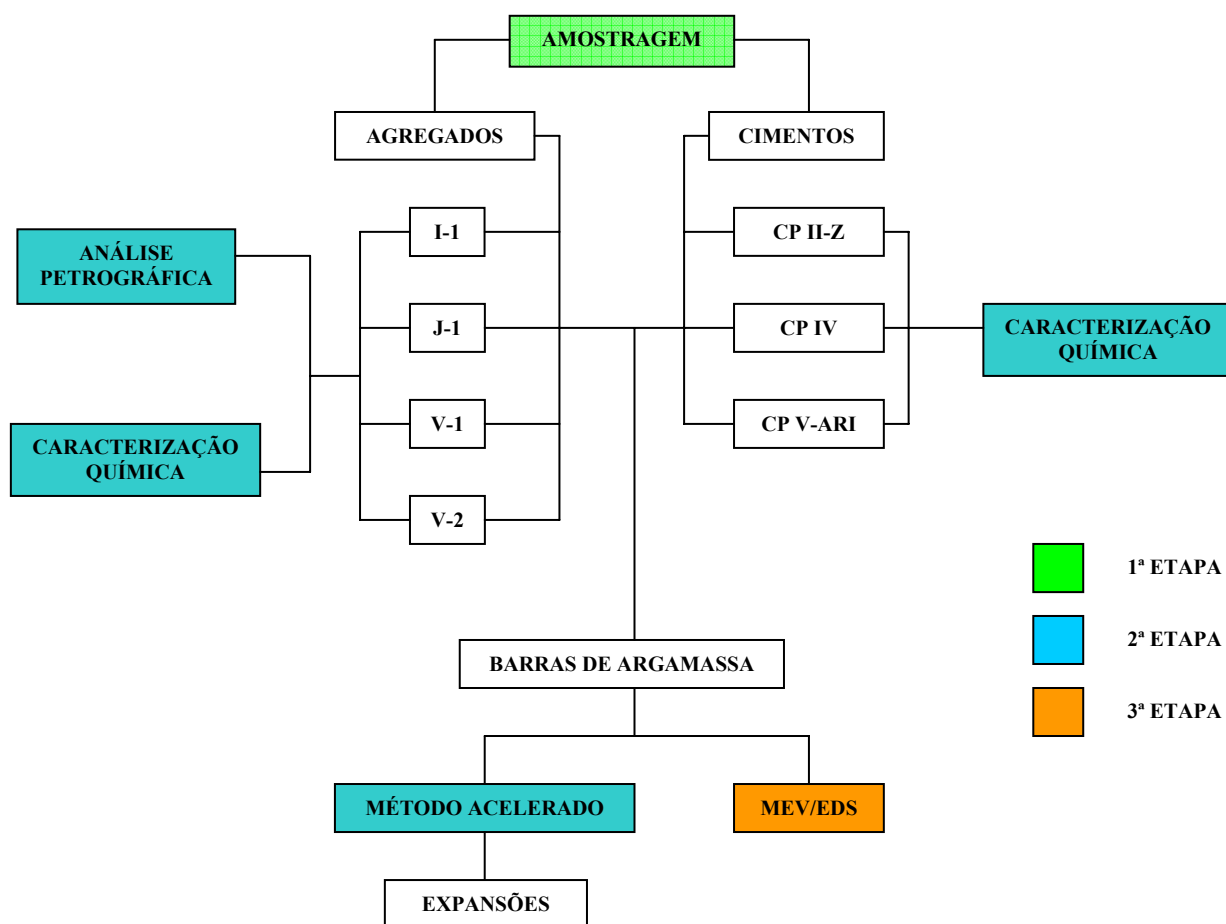


Figura 2.3 - Organograma das etapas experimentais da pesquisa.

### 2.2.1. Coleta e preparação das amostras de agregados

As amostras de agregados graúdos foram coletadas, por profissional habilitado, nos pátios de estocagem das pedreiras selecionadas. Também foram coletados fragmentos de rochas nas frentes de lavra para a verificação das características macroscópicas das rochas e confecção de lâminas delgadas. Levando-se em conta que, em todas as pedreiras, o agregado é uma mescla das diferentes feições que constituem a rocha, buscou-se a uniformidade da coleta e homogeneização do material, observando-se os diversos aspectos texturais, estruturais e mineralógicos, de modo que a amostra coletada fosse representativa do conjunto de feições existentes no maciço rochoso.

As amostras de agregados graúdos destinados à confecção das barras de argamassa para o ensaio acelerado foram identificadas de acordo com o local de procedência, conforme mostrado na Tabela 2.7.



**Tabela 2.7 – Amostras de agregados utilizados no ensaio de expansão.**

| <b>Amostra</b> | <b>Município</b>        | <b>Tipo de agregado</b> |
|----------------|-------------------------|-------------------------|
| I-1            | Ipojuca                 | Brita                   |
| J-1            | Jaboatão dos Guararapes | Brita                   |
| V-1            | Vitória de Santo Antão  | Brita                   |
| V-2            | Vitória de Santo Antão  | Brita                   |

As amostras de fragmentos de rochas utilizados na análise petrográfica também foram identificadas segundo o local de procedência, porém levando-se em conta a existência de mais de uma feição no maciço rochoso, conforme se apresenta na Tabela 2.8.

**Tabela 2.8 – Amostras de fragmentos de rocha utilizados na análise petrográfica.**

| <b>Amostra</b> | <b>Município</b>        | <b>Tipo</b>        |
|----------------|-------------------------|--------------------|
| I-1.1          | Ipojuca                 | Fragmento de rocha |
| I-1.2          | Ipojuca                 | Fragmento de rocha |
| J-1.1          | Jaboatão dos Guararapes | Fragmento de rocha |
| J-1.2          | Jaboatão dos Guararapes | Fragmento de rocha |
| V-1.1          | Vitória de Santo Antão  | Fragmento de rocha |
| V-1.2          | Vitória de Santo Antão  | Fragmento de rocha |
| V-1.3          | Vitória de Santo Antão  | Fragmento de rocha |
| V-2.1          | Vitória de Santo Antão  | Fragmento de rocha |
| V-2.2          | Vitória de Santo Antão  | Fragmento de rocha |

O quarteamento e redução das dimensões das amostras de agregados realizaram-se no Laboratório de Tecnologia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, conforme o prescrito na NBR 15577/08, utilizando-se inicialmente um moinho de mandíbulas e posteriormente um moinho de rolos. Cada uma das amostras foi quarteada e reduzida à granulometria aproximada de agregado miúdo (areia de brita), com diâmetro menor que 4,8 mm. Em seguida as amostras foram embaladas e remetidas para o laboratório de Furnas Centrais Elétricas, onde foram realizados os ensaios de expansão.

### **2.2.2. Caracterização química dos agregados e cimentos**

As amostras de agregados e de cimentos foram analisadas quimicamente no *Activation Laboratories Ltd - ACTLABS*, localizado na cidade de Ancaster, província de Ontário, Canadá, através do método de análise FUS-ICP – Fusão/Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado. Os resultados dessas análises encontram-se no Apêndice B.

### **2.2.3. Reatividade potencial dos agregados**

O potencial reativo dos agregados foi avaliado, seguindo as recomendações da NBR 15577/08, através da análise petrográfica dos agregados e pela determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, confeccionadas a partir da combinação dos diversos tipos de agregados com os diferentes tipos de cimento. Utilizou-se ainda a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios-x por energia dispersiva, em algumas das barras de argamassa, especialmente para identificação dos produtos da reação.

#### **2.2.3.1 . Análise petrográfica**

O preparo das lâminas delgadas foi realizado no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da UFPE, obedecendo ao prescrito na norma NBR 15577/08. A confecção das lâminas delgadas consiste no corte de um fragmento da rocha que é colado em uma lâmina de vidro e em seguida é desbastado e polido até atingir uma espessura de aproximadamente 30  $\mu\text{m}$ . O processo se completa com a colagem de uma lamínula por cima da seção delgada com a finalidade de proteger a superfície da rocha e melhorar a observação ao microscópio petrográfico.

As análises petrográficas foram realizadas no Laboratório de Petrologia da CPRM-SUREG Recife, pela geóloga DSc. Maria Angélica Fonseca Sampaio, através da observação das lâminas delgadas no microscópio óptico de luz transmitida, de dupla polarização, com sistema conoscópico, conforme o prescrito na norma NBR 15577/08.

#### **2.2.3.2. Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**

A determinação das expansões em barras de argamassa pelo método acelerado foi realizada no Departamento de Controle e Apoio Técnico de Furnas Centrais Elétricas, localizado em Aparecida de Goiânia – GO.

Inicialmente as amostras reduzidas à granulometria de areia, mostradas na Figura 2.4, foram peneiradas e fracionadas em um conjunto de peneiras, conforme o estabelecido na norma NBR 15577/08 e apresentado na Tabela 2.9.



**Figura 2.4 – Amostras dos agregados (areia artificial).**

**Tabela 2.9 – Frações granulométricas para o ensaio acelerado.**

| Peneira com abertura de malha (mm) |        | Quantidade de material |       |
|------------------------------------|--------|------------------------|-------|
| Passante                           | Retido | %                      | g     |
| 4,75                               | 2,36   | 10                     | 99,0  |
| 2,36                               | 1,18   | 25                     | 247,5 |
| 1,18                               | 0,60   | 25                     | 247,5 |
| 0,60                               | 0,30   | 25                     | 247,5 |
| 0,30                               | 0,15   | 15                     | 148,5 |

As frações separadas no peneiramento, conforme mostrado na Figura 2.5, foram lavadas em água corrente para remoção do pó aderido e partículas finas do agregado, e postas para secar em estufa. Imediatamente após a secagem, foram pesadas e homogeneizadas para em seguida serem utilizadas no preparo das argamassas.



**Figura 2.5 – Amostra de agregado após o peneiramento e secagem em estufa.**

As argamassas foram preparadas utilizando-se uma parte de cimento para 2,25 partes de agregado, em massa, e uma relação água/cimento igual a 0,47. A quantidade de agregado constante na Tabela 2.9 é aquela suficiente para o ensaio de cada combinação cimento-agregado, sendo recomendado o mínimo de três barras de argamassa por cada combinação. De modo que para a confecção de cada conjunto de três barras foram utilizadas as seguintes quantidades de materiais: 990g de agregado, 440g de cimento e 206,8g de água.

Atendendo a recomendação da norma, para cada combinação cimento-agregado foram moldadas três barras de argamassa, resultando num total de 36 corpos-de-prova, tendo em vista que foram avaliados 04 tipos de agregado e 03 tipos de cimento. A identificação das barras de argamassa, conforme a combinação cimento-agregado, encontra-se na Tabela 2.10.

**Tabela 2.10 – Identificação das barras de argamassa do método acelerado**

| Agregado | Cimento  | Barras nº |     |     |
|----------|----------|-----------|-----|-----|
| V-1      | CP II-Z  | 322       | 323 | 324 |
| V-1      | CP IV    | 325       | 326 | 327 |
| V-1      | CP V-ARI | 328       | 329 | 330 |
| V-2      | CP II-Z  | 331       | 332 | 333 |
| V-2      | CP IV    | 334       | 335 | 336 |
| V-2      | CP V-ARI | 337       | 338 | 339 |
| I-1      | CP II-Z  | 340       | 341 | 342 |
| I-1      | CP IV    | 343       | 344 | 345 |
| I-1      | CP V-ARI | 346       | 347 | 348 |
| J-1      | CP II-Z  | 349       | 350 | 351 |
| J-1      | CP IV    | 352       | 353 | 354 |
| J-1      | CP V-ARI | 355       | 356 | 357 |

A mistura dos materiais para o preparo das argamassas foi realizada em um misturador mecânico, mostrado na Figura 2.6, obedecendo-se a seguinte seqüência de operações, conforme especificado na norma:

- 1) Colocação na cuba de toda a quantidade de água e acionamento do misturador;
- 2) Adição do cimento com o misturador em velocidade baixa, durante 30s;
- 3) Adição do agregado (frações previamente homogeneizadas), ainda em velocidade baixa, durante 30s;
- 4) Após a colocação do agregado, em velocidade alta, misturar os materiais durante 30s;
- 5) Desligamento do misturador durante 1min e 30s. Nos primeiros 15s retirar a argamassa que ficou aderida às paredes e à pá do misturador e recolocar no interior da cuba. No restante do tempo deixar a argamassa em repouso na cuba, coberta com um pano limpo e úmido;
- 6) Acionamento do misturador, em velocidade alta, por mais 1 min.



**Figura 2.6 - Misturador utilizado na confecção das argamassas.**

A moldagem das barras de argamassa foi realizada utilizando-se moldes de acordo com o especificado na norma NBR 15577, de modo a se obter barras prismáticas, de seção quadrada, com 25 mm de lado e 285 mm de comprimento (Figura 2.7). No centro das extremidades das barras foram colocados pinos metálicos para que as leituras fossem realizadas adequadamente no relógio comparador.



**Figura 2.7 - Molde utilizado na confecção das barras de argamassa.**

A colocação da argamassa nos moldes foi feita em duas camadas uniformemente distribuídas, e adensadas com 20 golpes de soquete por camada. Em seguida as barras foram estocadas em câmara úmida durante 24 horas. Após esse período, foram desmoldadas e identificadas com grafite.

A seguir as barras foram submersas em um recipiente com água destilada (Figura 2.8), por um período de 24 horas, em banho termorregulador, à temperatura inicialmente de  $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , aumentando gradativamente até alcançar  $80 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 2.8 - Vistas externa e interna do recipiente para imersão das barras em água destilada.**

Decorrido este período, as barras foram removidas uma a uma do recipiente com água destilada, retirado o excesso de água com uma toalha e levadas a um relógio comparador (Figura 2.9), com precisão de milésimo de milímetro, onde se procedeu à leitura zero, inicial de cada barra.

Esse processo foi realizado, para cada barra, conforme recomendado na norma NBR 15577,  $15s \pm 5s$  após a retirada das barras da solução, a fim de evitar sua retração devido à diferença de temperatura entre a solução e o ambiente.



**Figura 2.9 - Relógio comparador com barra-padrão e com barra de argamassa pronta para leitura.**

Em seguida, as barras foram submersas em um recipiente com solução de NaOH ( $1N \pm 0,01N$ ), mostrada na Figura 2.10, preparada com água deionizada, previamente aquecida a temperatura de  $80^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ , e colocadas em banho termorregulador (Figura 2.11) . Além da leitura zero, idade de 2 dias, foram realizadas leituras aos 16 dias e aos 30 dias, contados a partir da moldagem, em todas as barras, e quatro leituras intermediárias em cada período. As fichas onde se fez o registro das leituras e expansões constam no Apêndice C.



**Figura 2.10 – Vistas externa e interna dos recipientes para imersão das barras em solução de NaOH.**



**Figura 2.11 - Regulador de temperatura dos recipientes de imersão das barras.**

A expansão de cada barra de argamassa numa determinada idade representa a diferença entre o seu comprimento na idade considerada e seu comprimento inicial (leitura zero), expressa em porcentagem do comprimento efetivo da medida, com aproximação de 0,001%.

A expansão numa determinada idade é a media das expansões das três barras de argamassa correspondentes, calculada com aproximação de 0,01%.

#### 2.2.3.3. Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-x

As observações por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e as análises por espectroscopia de raios-x por energia dispersiva (EDS) foram realizadas na Central Analítica do Departamento de Química Fundamental da Universidade Federal de Pernambuco.

As avaliações foram realizadas em fragmentos das barras de argamassas ensaiadas pelo método acelerado que apresentaram as maiores expansões com o cimento de referência CP V-ARI, com o objetivo de verificar a presença do gel sílico-alcalino, embora também tenham sido avaliados fragmentos moldados com o cimento CP II-Z e CP IV para avaliar possíveis diferenças na composição dos géis. Dessa forma, escolheram-se as barras com as respectivas combinações agregado/cimento, conforme se apresenta na Tabela 2.11.



**Tabela 2.11 – Barras de argamassa utilizadas na análise por microscopia eletrônica e EDS.**

| <b>Barra nº</b> | <b>Agregado</b> | <b>Cimento</b> | <b>Expansão aos 30 dias</b> |
|-----------------|-----------------|----------------|-----------------------------|
| 324             | V-1             | CP II-Z        | 0,387                       |
| 325             | V-1             | CP IV          | 0,156                       |
| 328             | V-1             | CP V-ARI       | 0,337                       |
| 332             | V-2             | CP II-Z        | 0,334                       |
| 337             | V-2             | CP V-ARI       | 0,319                       |
| 340             | I-1             | CP II-Z        | 0,236                       |

Os fragmentos foram retirados preferencialmente do centro das barras, imersos em acetona para retirada da água dos poros e em seguida foram estocados juntamente com sílica gel em recipientes fechados, até o momento da observação microscópica.

Antes da observação no MEV, os fragmentos passaram por uma câmara de vácuo, onde além da retirada do ar, receberam uma metalização, através de uma nevoa de ouro, com o objetivo de melhorar a condutividade elétrica na superfície das amostras.

Após a metalização as amostras foram levadas ao MEV onde se efetuou a leitura topográfica dos fragmentos e a identificação de compostos com morfologias semelhantes às descritas na literatura como características dos produtos da RAS.

Entre essas características podem-se citar as mais comuns, que são as formações maciças lisas e gretadas, em geral, sobre o agregado, nos poros da pasta de cimento e na interface entre o agregado e a pasta, as quais foram citadas por Hasparyk (1999), Silveira (2001), Valduga (2002), dentre outros autores.

Nas imagens identificadas como produto da reação, selecionaram-se alguns pontos e janelas onde se procederam as microanálises através de espectroscopia de raios-x por energia dispersiva (EDS), com o objetivo de se verificar os elementos químicos presentes.

## CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1. Caracterização química dos agregados e cimentos

#### 3.1.1. Agregados

Na Tabela 3.1 encontram-se os resultados obtidos da caracterização química dos agregados utilizados na confecção das barras de argamassa do ensaio acelerado.

**Tabela 3.1. Análise química dos agregados.**

| Características Avaliadas (%)      | Agregados |       |       |       |
|------------------------------------|-----------|-------|-------|-------|
|                                    | I-1       | J-1   | V-1   | V-2   |
| SiO <sub>2</sub>                   | 59,88     | 59,58 | 68,35 | 67,52 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 14,71     | 13,76 | 13,85 | 13,25 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T) | 7,73      | 6,76  | 3,82  | 4,14  |
| MnO                                | 0,13      | 0,10  | 0,06  | 0,08  |
| CaO                                | 4,75      | 4,92  | 2,03  | 2,21  |
| Na <sub>2</sub> O                  | 3,00      | 2,93  | 3,00  | 3,06  |
| K <sub>2</sub> O                   | 3,83      | 4,78  | 4,77  | 4,35  |
| TiO <sub>2</sub>                   | 1,17      | 1,70  | 0,60  | 0,59  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>      | 0,58      | 1,49  | 0,32  | 0,27  |
| PF                                 | 0,89      | 0,71  | 0,96  | 1,00  |

Analisando-se os valores apresentados na Tabela 3.1, observa-se que nos quatro litotipos utilizados na pesquisa predominam os óxidos de silício (SiO<sub>2</sub>) e de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Os agregados V-1 e V-2 apresentaram os maiores teores de sílica, indicando rochas leucocráticas, graníticas.

Os agregados I-1 e J-1, por sua vez, também apresentaram teores elevados de sílica e alumínio, porém apresentaram teores mais elevados de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO, CaO e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, indicando rochas de características leucocráticas a mesocráticas.

#### 3.1.2. Cimentos

Na Tabela 3.2 encontram-se os resultados obtidos da caracterização química dos cimentos utilizados na confecção das barras de argamassa do ensaio acelerado. Incluiu-se também na referida tabela aqueles resultados fornecidos pelos fabricantes, para que se pudesse fazer uma avaliação comparativa entre eles.

Neste sentido há que se destacar apenas uma grande diferença no teor de Na<sub>2</sub>O, especialmente no caso do cimento CP II-Z-RS, em que o teor obtido na análise é mais de quatro vezes superior àquele fornecido pelo fabricante. Isto se reflete consideravelmente no valor do equivalente alcalino ( $E.A = K_2O + 0,658Na_2O$ ). Assim, dos valores obtidos nas análises, verifica-se que o equivalente alcalino do cimento CP II-Z-RS é cerca de uma vez e meia superior ao do CP IV-RS, e quase três vezes maior do que o do CP V-ARI-RS.

**Tabela 3.2 – Comparação entre as características químicas fornecidas e análises realizadas.**

| Características avaliadas (%)      | Tipos de cimento Portland |                   |                     |                   |                     |                   |
|------------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
|                                    | CP II Z                   |                   | CP IV               |                   | CP V ARI            |                   |
|                                    | Resultado fornecido       | Resultado Actlabs | Resultado fornecido | Resultado Actlabs | Resultado fornecido | Resultado Actlabs |
| SiO <sub>2</sub>                   | 24,06                     | 25,31             | 34,03               | 39,45             | -                   | 20,14             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 4,87                      | 5,92              | 5,25                | 7,27              | -                   | 4,90              |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T) | 2,39                      | 2,43              | 2,15                | 2,20              | -                   | 3,19              |
| MgO                                | 4,44                      | 3,92              | 3,95                | 3,12              | -                   | 2,53              |
| CaO                                | 52,89                     | 53,00             | 34,03               | 40,77             | -                   | 64,76             |
| Na <sub>2</sub> O                  | 0,13                      | 0,59              | 0,26                | 0,39              | -                   | 0,11              |
| K <sub>2</sub> O                   | 1,68                      | 1,84              | 1,35                | 1,36              | -                   | 0,7               |
| SO <sub>3</sub>                    | 3,03                      | -                 | 2,53                | -                 | 3,31                | -                 |
| CO <sub>2</sub>                    | 4,31                      | -                 | 2,79                | -                 | -                   | -                 |
| CaO livre                          | 0,83                      | -                 | 0,71                | -                 | 1,47                | -                 |
| Perda ao fogo                      | 5,61                      | 6,34              | 4,13                | 5,11              | 3,94                | 3,71              |
| RI                                 | 15,04                     | -                 | 27,20               | -                 | 1,32                | -                 |
| Eq. alcalino                       | 1,76                      | 2,23              | 1,52                | 1,61              | -                   | 0,77              |

Obs: Segundo a NBR 5736, o teor de material pozzolânico deve ser determinado pelo ensaio de RI.

Através dos valores do resíduo insolúvel (RI) indicados na Tabela 3.2, pode-se estimar que os teores de pozolana dos cimentos CP II-Z-RS E CP IV-RS correspondem, aproximadamente a 15% e 27%, respectivamente, segundo a norma NBR 5736.

### 3.2. Reatividade potencial dos agregados

#### 3.2.1. Análise petrográfica

As características petrográficas das rochas que compõem os agregados graúdos utilizados nesta pesquisa encontram-se nas fichas de análise petrográfica constantes no Apêndice D, e apresentam-se de forma resumida na Tabela 3.3.

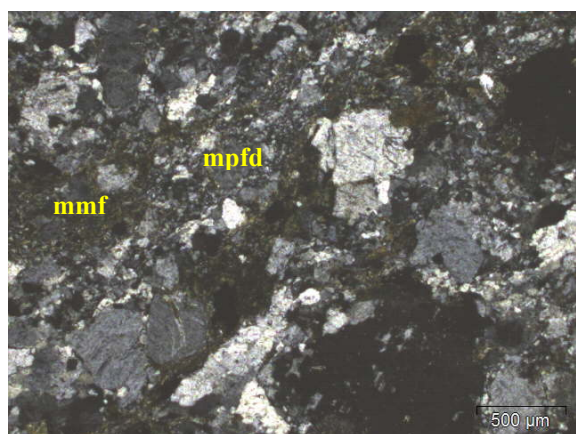
Tabela 3.3- Resumo das principais características petrográficas das rochas avaliadas.

| Amostra | Local                   | Características Microscópicas                                                      |                                                               |                                                         |                                         |                             |                                |                             |                        |                  |               |                                                    |                         |
|---------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|---------------|----------------------------------------------------|-------------------------|
|         |                         | Composição mineralógica                                                            |                                                               | Estrutura                                               | Textura                                 | Granulação                  | Alteração                      | Ângulo ext. ond. do quartzo | Quartzo micro-granular | Micro-fissuração | Tipo de rocha | Classificação Petrográfica                         | Reatividade Potencial   |
|         |                         | Principal                                                                          | Subordinada                                                   |                                                         |                                         |                             |                                |                             |                        |                  |               |                                                    |                         |
| I-1.1   | Ipojuca                 | quartzo<br>k-feldspato<br>plagioclásio                                             | anfólio<br>titanita<br>opacos<br>zircão                       | suavemente foliada                                      | mirmequítica, porfítica                 | fina, submilimétrica        | sericitização, saussuritização | moderado 15° a 30°          | >15%                   | ausente          | meta-máfica   | migmatito                                          | Potencialmente reati vo |
| I-1.2   | Ipojuca                 | quartzo<br>k-feldspato<br>plagioclásio                                             | anfólio<br>biotita<br>titanita<br>opacos                      | foliada/ bandada                                        | mirmequítica, perfitica, anti perfitica | fina a média 0,5 a 1,0 cm   | retrometamorfismo              | moderado 15° a 30°          | 5% a 15%               | moderada         | meta-máfica   | biotita-anfólio ortognaisse monzonítico-granítico  | Potencialmente reati vo |
| J-1.1   | Jaboatão dos Guararapes | quartzo<br>k-feldspato<br>plagioclásio                                             | biotita, anfólio, titanita, opacos, zircão, alanita           | foliada/ bandada/ porfítica                             | mirmequítica perfitica anti perfitica   | fina a média 1,0 a 5,0 mm   | sericitização saussuritização  | moderado 15° a 30°          | < 5%                   | moderada         | meta-máfica   | biotita ortognaisse granodiorítico                 | Potencialmente reati vo |
| J-1.2   | Jaboatão dos Guararapes | quartzo<br>k-feldspato<br>plagioclásio                                             | biotita, titanita, alanita, epidoto, zircão, opacos           | foliada/ bandada/ porfítica                             | mirmequítica, perfitica, anti perfitica | média a grossa 0,5 a 1,5 cm | sericitização saussuritização  | elevado > 30°               | < 5%                   | forte            | meta-máfica   | biotita ortognaisse monzonítico-granítico          | Potencialmente reati vo |
| V-1.1   | Vitória de Santo Antão  | matriz milonítica/filonítica, porfiroblastos feldspáticos                          | biotita residual, titanita, alanita, epidoto, opacos, granada | milonítica/ micro-porfiroblástica                       | mirmequítica, perfitica                 | fina a média                | sericitização saussuritização  | elevado > 30°               | > 15%                  | forte            | meta-máfica   | milonito micro-porfiroblástico                     | Potencialmente reati vo |
| V-1.2   | Vitória de Santo Antão  | matriz milonítica porfiroblastos feldspáticos, bandas micro granulares de quartzo  | biotita, titanita, opacos, alanita, epidoto                   | foliada/ bandada/ protomilonítica/ porfiroblástica      | mirmequítica perfitica                  | média a grossa              | sericitização saussuritização  | elevado > 30°               | > 15%                  | forte            | meta-máfica   | ortognaisse leucocrático/granítico protomilonítico | Potencialmente reati vo |
| V-1.3   | Vitória de Santo Antão  | matriz milonítica, porfiroblastos feldspáticos, bandas micro granulares de quartzo | biotita, titanita, opacos, alanita, epidoto, zircão           | foliada/ bandada/ protomilonítica/ microporfiroblástica | mirmequítica perfitica anti perfitica   | fina a média                | sericitização saussuritização  | elevado > 30°               | > 15%                  | forte            | meta-máfica   | biotita ortognaisse protomilonítico                | Potencialmente reati vo |
| V-2.1   | Vitória de Santo Antão  | horblenda biotita plagioclásio                                                     | quartzo, microclina, titanita, opacos, epidoto, matriz        | foliada/ grássica bandada                               | ausente                                 | fina submilimétrica         | saussuritização                | < 15°                       | < 5%                   | ausente          | meta-máfica   | biotita-anfólio ortognaisse quartzo-diorítico      | Potencialmente reati vo |
| V-2.2   | Vitória de Santo Antão  | quartzo k-feldspato plagioclásio                                                   | milonítica, biotita, opacos, apatita, zircão                  | foliada/ bandada/ protomilonítica                       | mirmequítica perfitica                  | fina submilimétrica         | sericitização saussuritização  | moderado 15° a 30°          | 5 a 15%                | ausente          | meta-máfica   | ortognaisse protomilonítico monzonítico-granítico  | Potencialmente reati vo |

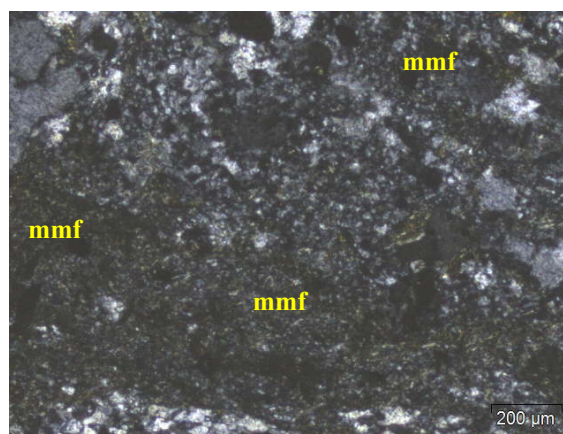
De acordo com as análises petrográficas, a maioria dos litotipos que constituem os agregados avaliados se classificam como rochas metamórficas, ortoderivadas, leucocráticas, de filiação granítica, constituídas essencialmente por quartzo, álcali-feldspato e plagioclásio.

Dos resultados apresentados na Tabela 3.3 observa-se que todos os agregados avaliados apresentam minerais e/ou texturas potencialmente reativas no que se refere à reação álcali-silicato, como por exemplo: quartzo deformado, com extinção ondulante, quartzo microcristalino, intercrescimentos (mirmequita, pertita e antipertita), granulação, alterações e microfissurações. Entretanto, levando-se em conta a combinação dessas características, obtidas na análise petrográfica, é possível inferir-se uma maior ou menor tendência de reatividade de um determinado agregado.

Desta forma, o agregado V-1 apresenta uma maior tendência à reatividade tendo em vista que os litotipos que o constituem: V-1.1 (Figura 3.1), V-1.2 (Figura 3.2) e V-1.3 (Figura 3.3), além de apresentarem todas as características potencialmente reativas, algumas delas se apresentam em grau elevado: estrutura milonítica, texturas mirmequíticas, pertíticas e antipertíticas, granulação predominantemente fina a média, saussuritização e sericitização de feldspatos, forte microfissuração, quantidade de quartzo deformado superior a 15%, com elevado ângulo de extinção e quantidade de quartzo microgranular superior a 15%.



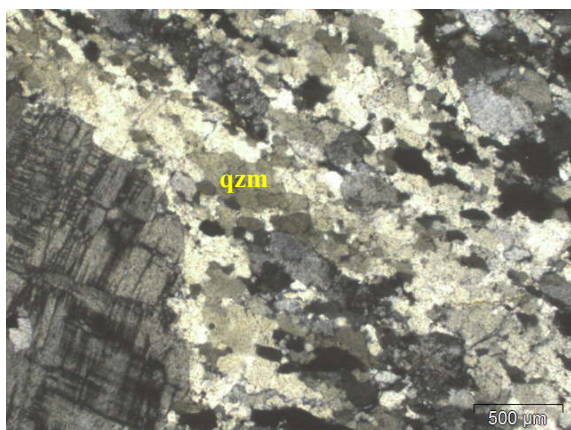
**a) Aspecto foliado/bandado da rocha milonítica V-1.1 mostrando alternância rítmica da matriz milonítica/filonítica (mmf) com microporfiroblastos feldspáticos (mpfd). Nicóis cruzados. 20X.**



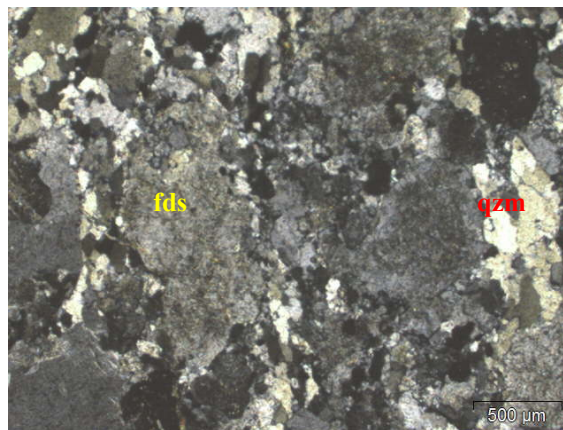
**b) Aspecto da matriz milonítica/filonítica (mmf); os cristais estão cisalhados e triturados, dificultando a identificação dos minerais. Nicóis cruzados. 40X.**

**Figura 3.1 – Fotomicrografias de amostra do agregado V-1, litotipo V-1.1.**



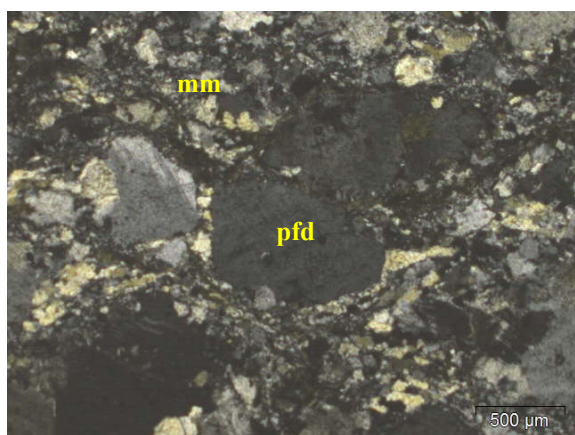


a) Bandas orientadas na direção da foliação gnaissícamilonítica, constituídas de quartzo microgranular (qzm) deformado, exibindo forte extinção ondulante. Nicóis cruzados. 20X.

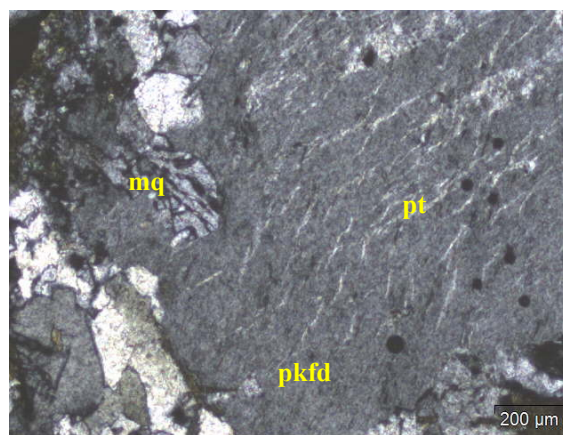


b) Aspecto intemperizado dos porfiroblastos de plagioclásio. As bandas de quartzo microgranular (qzm) estão inalteradas e os feldspatos, localmente, sericitizados (fds). Nicóis cruzados. 20X.

**Figura 3.2 – Fotomicrografias de amostra do agregado V-1, litotipo V-1.2.**



a) Aspecto textural do litotipo V-1.3, mostrando bandamento gnáissico, com alternância de matriz milonítica (mm) e porfiroblastos feldspáticos (pfd) Todos orientados na direção da foliação gnáissica/milonítica. Nicóis cruzados. 20X.

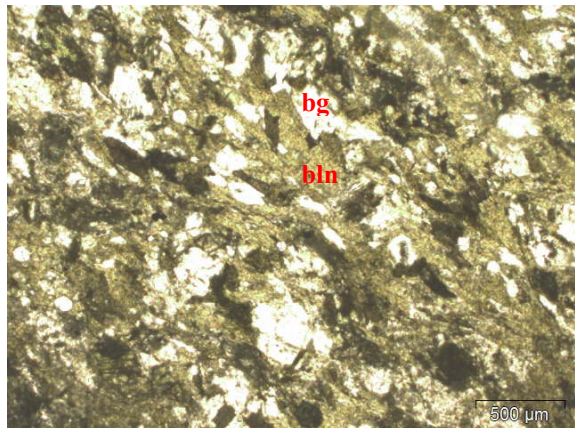


b) Microcristal de plagioclásio exibindo textura mirmequítica (mq), incluso, próximo à borda de cristal porfiroblástico de k-feldspato (pkfd) com exsolução pertítica (pt). Nicóis cruzados. 40X.

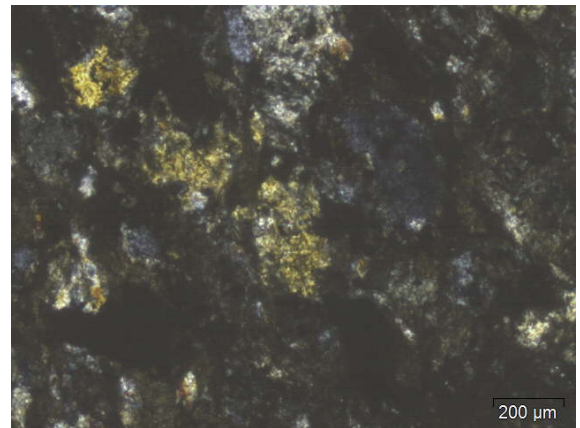
**Figura 3.3 – Fotomicrografias de amostra do agregado V-1, litotipo V-1.3.**

O agregado V-2, constituído pelos litotipos V-2.1 (Figura 3.4) e V-2.2 (Figura 3.5), também apresenta uma acentuada tendência à reatividade. Apesar de um dos seus constituintes, o litotipo V.2.1, ter apresentado poucas características potencialmente reativas, inclusive com quantidade de quartzo deformado e microgranular inferiores a 5%, este litotipo representa quantitativamente apenas cerca de 20% do total da amostra V-2.

Por outro lado, o litotipo V-2.2, que representa 80% do total da amostra V-2, além de apresentar estrutura milonítica, texturas de intercrescimentos, alterações do anfibólio e dos feldspatos, quantidade de quartzo deformado superior a 15%, com ângulo de extinção ondulante entre 15° e 30°, quantidade de quartzo microgranular entre 5% e 15%, ainda apresenta granulação submilimétrica, que favorece ainda mais a reatividade.

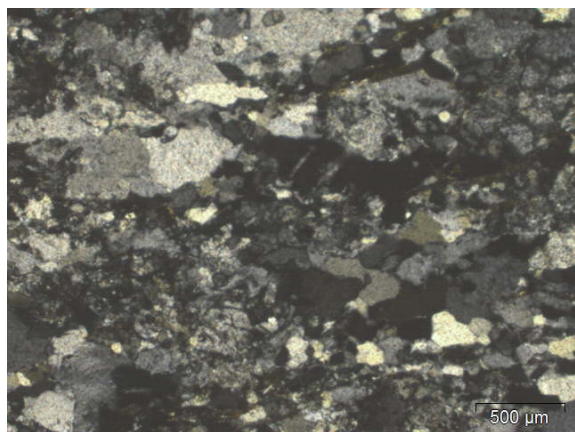


**a)** Alternância de bandas lepidonematoblásticas (bln) (biotita+ anfibólio) com bandas granoblásticas (bg) (quartzo + k-feldspato + plagioclásio) do orto gnaiss quartzo-diorítico. Observe-se a granulação fina, submilimétrica. Nicóis paralelos. 20X.

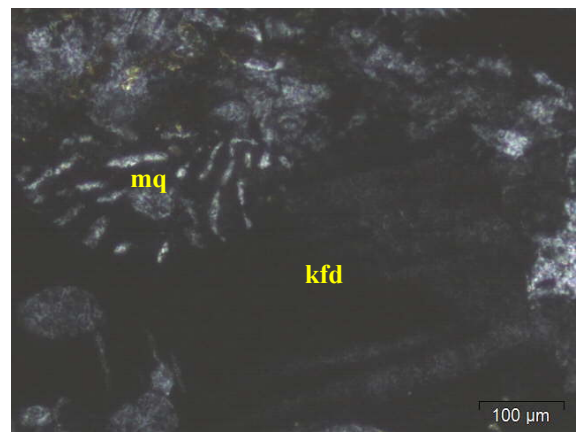


**b)** Aspecto intemperizado (saussuritizado) do orto gnaiss quartzo-diorítico. Nicóis cruzados 40X.

**Figura 3.4 – Fotomicrografias de amostra do agregado V-2, litotipo V-2.1.**



**a)** Aspecto geral do ortogneiss leucocrático, exibindo bandamento gnáissico e textura granoblástica alongada. Granulação fina. Nicóis cruzados. 20X.



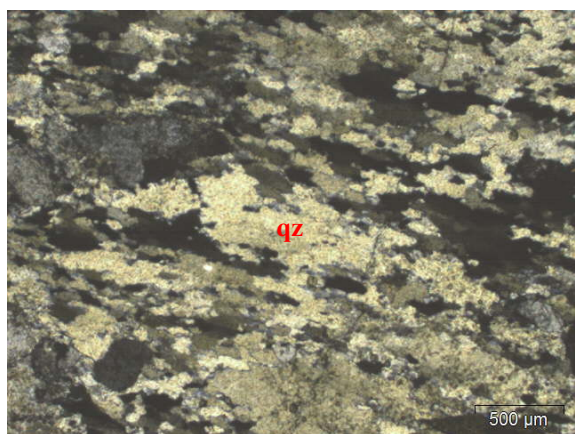
**b)** Plagioclásio exibindo textura mirmequítica (mq) próximo à borda de um cristal de k-feldspato (kfd). Nicóis cruzados. 20X.

**Figura 3.5 – Fotomicrografias de amostra do agregado V-2, litotipo V-2.2.**

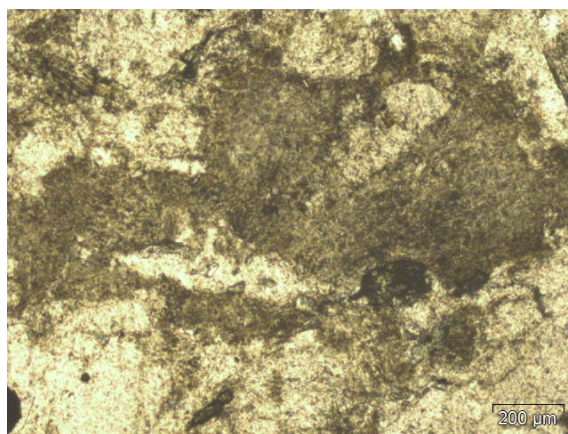


O agregado I-1, constituído pelos litotipos I-1.1 (Figura 3.6) e I-1.2 (Figura 3.7), embora não apresente todas características potencialmente reativas acima referidas, é o que apresenta a maior quantidade de quartzo. Deste, mais de 15% encontra-se deformado, com ângulo de extinção entre 15° e 30°.

No litotipo I-1.1 mais de 15% do quartzo apresenta-se sob a forma microgranular, observam-se ainda texturas de intercrescimentos mirmequíticos, e poiquilíticos, e alterações em plagioclásios; No litotipo I-1.2 o percentual de quartzo microgranular varia de 5% a 15%, observa-se a presença de texturas mirmequíticas, pertíticas e antipertíticas, além de alterações de anfibólios (retrometamorfismo) e microfissuração moderada.

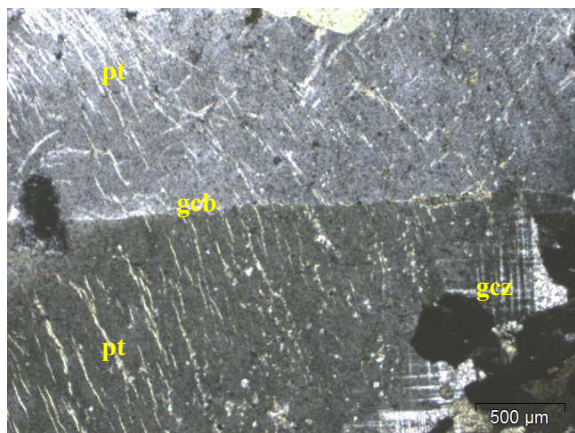


a) Quartzo (qz) anedral, deformado, mostrando extinção ondulante moderada, orientado na direção da foliação da rocha granodiorítica. Nicóis cruzados. 20X.

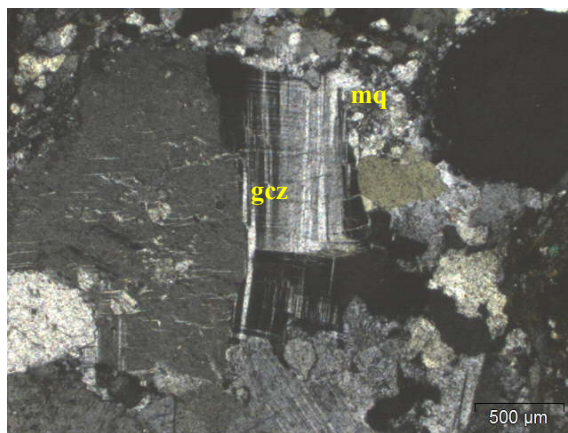


b) Aspecto do estado de alteração dos feldspatos plagioclásios, fortemente saussuritizados e Sericitizados. Nicóis paralelos. 40X.

**Figura 3.6 – Fotomicrografias de amostra do agregado I-1, litotipo I-1.1.**



a) Fenocristal porfirítico de k-feldspato, mostrando geminação Carlsbad (gcb) combinada com geminação cruzada (gcz), e exsolução pertítica (pt). Nicóis cruzados. 20X.



b) Cristal de k-feldspato exibindo geminação cruzada (gcz) e moderada fissuração. No cristal de plagioclásio, à direita, observe-se a textura mirmequítica (mq). Nicóis cruzados.

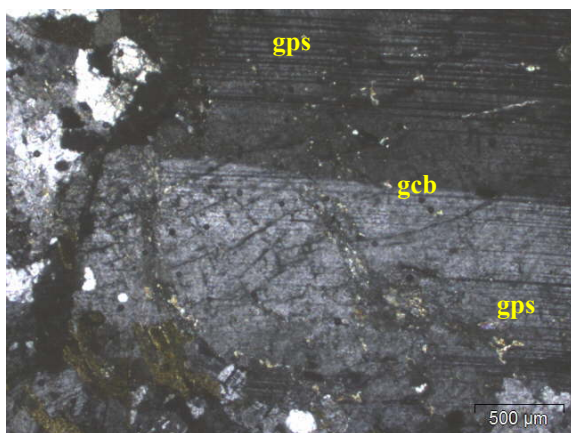
**Figura 3.7 – Fotomicrografias de amostra do agregado I-1, litotipo I-1.2.**



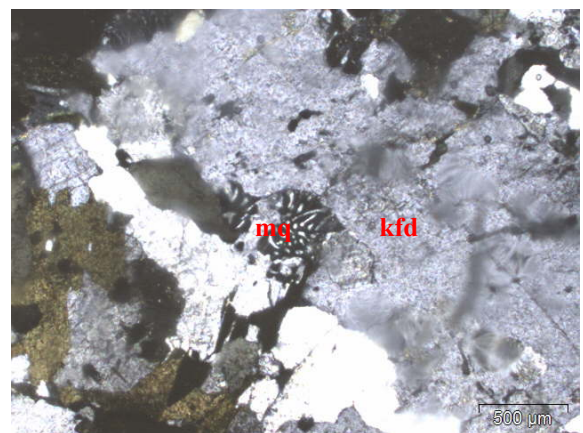
O agregado J-1 é o que apresenta a menor tendência à reatividade, visto que os litotipos que o constituem: J-1.1 (Figura 3.8) e J-1.2 (figura 3.9) apresentam menos características de potencialidade reativa, destacando-se a quantidade de quartzo microgranular inferior a 5%. Apesar do ângulo de extinção ondulante situar-se entre moderado ( $15^\circ$  a  $30^\circ$ ), no litotipo J-1.1 a elevado ( $>30^\circ$ ) no litotipo J-1.2, a quantidade de quartzo deformado em ambos é inferior a 15%.

Ambos apresentam texturas mirmequíticas, pertíticas e antipertíticas, e alterações dos feldspatos (saussuritização e sericitização). No litotipo J-1.2, que representa cerca de 50% da amostra a microfissuração é forte, porém a granulação é média a grossa. No outro litotipo J-1.1, onde a granulação situa-se entre fina a média, a microfissuração apresenta-se moderada.

Do ponto de vista petrográfico, levando-se em conta principalmente o conteúdo de quartzo microgranular, pode-se sugerir que o agregado J-1 é o menos potencialmente reativo quando comparado com as outras amostras.

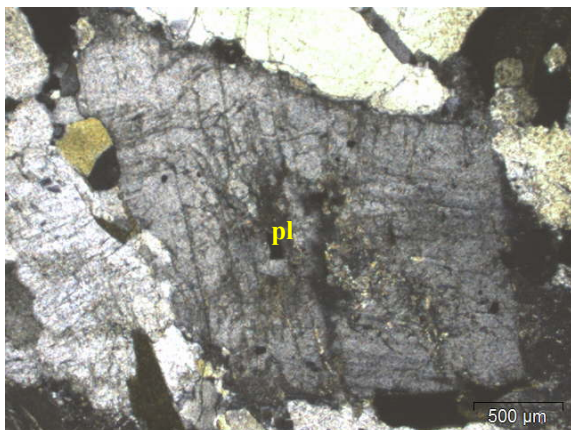


a) Cristal de plagioclásio exibindo combinação de geminação polissintética (gps) com geminação Carlsbad (gcb), sericitização e microfissuração. Nicóis cruzados. 20X.

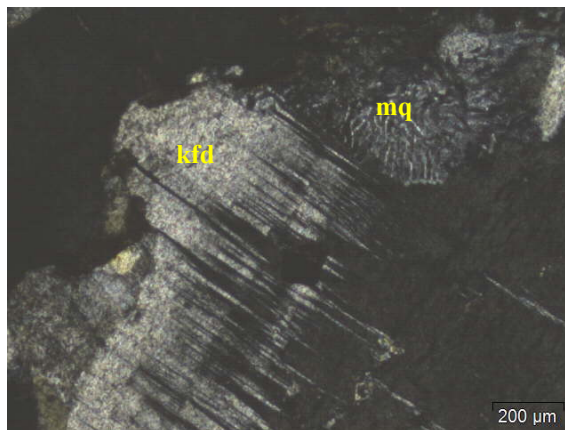


b) Microcristal de plagioclásio exibindo textura mirmequítica (mq) incluso em cristal maior de k-feldspato (kfd). Nicóis cruzados. 20X.

**Figura 3.8 – Fotomicrografias de amostra do agregado J-1, litotipo J-1.1.**



a) Cristal de plagioclásio (pl) saussuritizado, exibindo forte microfissuração e formas subédricas. Nicóis cruzados. 20X.



b) cristal submilimétrico de plagioclásio exibindo textura mirmequítica (mq), adjacente a cristal milimétrico de k-feldspato (kfd). Nicóis cruzados. 40X.

**Figura 3.9 – Fotomicrografias de amostra do agregado J-1, litotipo J-1.2.**

### 3.2.2. Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado

#### 3.2.2.1. Reatividade potencial dos agregados

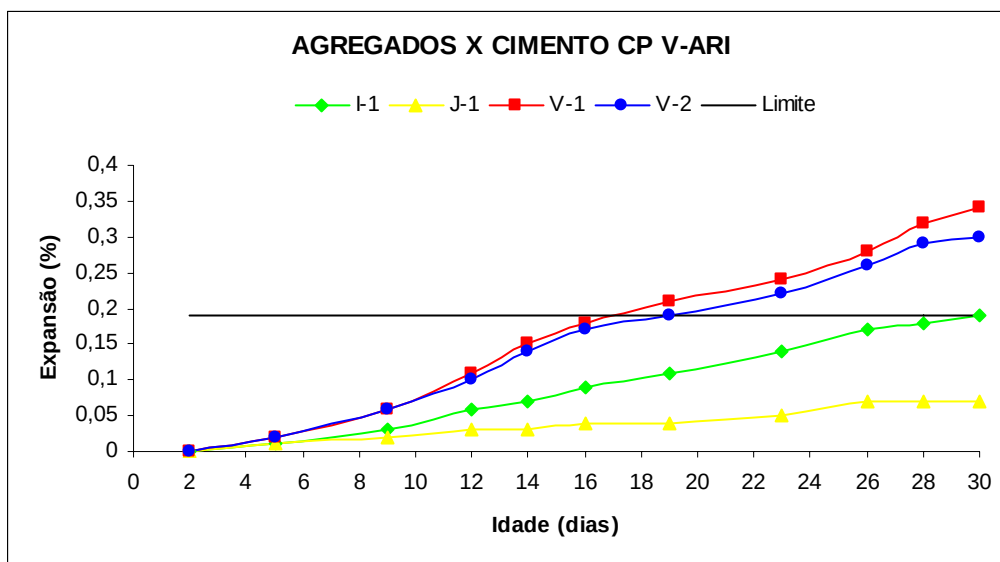
Conforme as recomendações da norma NBR 15577/08, os ensaios foram realizados combinando inicialmente todos os quatro tipos de agregados com o cimento de referência CP V-ARI.

Os resultados obtidos com esses ensaios foram analisados através dos gráficos constantes no Apêndice E, que relacionam a porcentagem média de expansão das barras de argamassa ao longo do tempo, salientando-se que as expansões foram calculadas em relação à leitura de referência, inicial, ou seja, quando os prismas ainda não tinham sido expostos à solução de NaOH.

Seguindo o prescrito na norma NBR 15577/08, os agregados graúdos foram classificados conforme os seguintes critérios:

- Potencialmente inócuo: expansões inferiores a 0,19% aos 30 dias;
- Potencialmente reativo: expansões iguais ou superiores a 0,19% aos 30 dias.

No gráfico da Figura 3.10 apresentam-se os resultados das expansões das combinações dos quatro agregados graúdos com o cimento de referência CP V-ARI.



**Figura 3.10 – Expansões médias das barras confeccionadas com o cimento CP V-ARI.**

Na Tabela 3.4 apresentam-se as expansões médias, aos 30 dias, das barras de argamassa confeccionadas com o cimento de referência CP V-ARI.

**Tabela 3.4 – Expansões médias aos 30 dias e classificação da potencialidade reativa das barras confeccionadas com o cimento CP V-ARI.**

| Cimento  | Agregado | Expansão (%)<br>30 dias | Classificação         |                        |
|----------|----------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
|          |          |                         | Potencialmente inócuo | Potencialmente reativo |
| CP V-ARI | I-1      | 0,19                    |                       | X                      |
|          | J-1      | 0,07                    | X                     |                        |
|          | V-1      | 0,34                    |                       | X                      |
|          | V-2      | 0,30                    |                       | X                      |

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 3.10 e na Tabela 3.4 indicam que apenas a amostra do agregado J-1 foi classificada como potencialmente inócua. Sendo o CP V-ARI um cimento básico, praticamente sem nenhum teor de adição, e levando-se em conta os resultados das análises petrográficas, era de se esperar que as amostras ensaiadas com esse cimento fossem classificadas como potencialmente reativas. O fato da amostra J-1 ter sido classificada como potencialmente inócua, confirma a tendência para menor reatividade desta amostra, indicada na análise petrográfica.

Por outro lado, os resultados de expansão para as amostras dos agregados V-1 e V-2 confirmam a tendência para maior reatividade destas amostras, inferida na análise petrográfica.

A amostra do agregado I-1 que apresentou valor limítrofe de expansão (0,19%), foi classificada como potencialmente reativa, obedecendo ao critério adotado pela norma, e também confirmando a tendência de potencialidade reativa indicada na análise petrográfica.

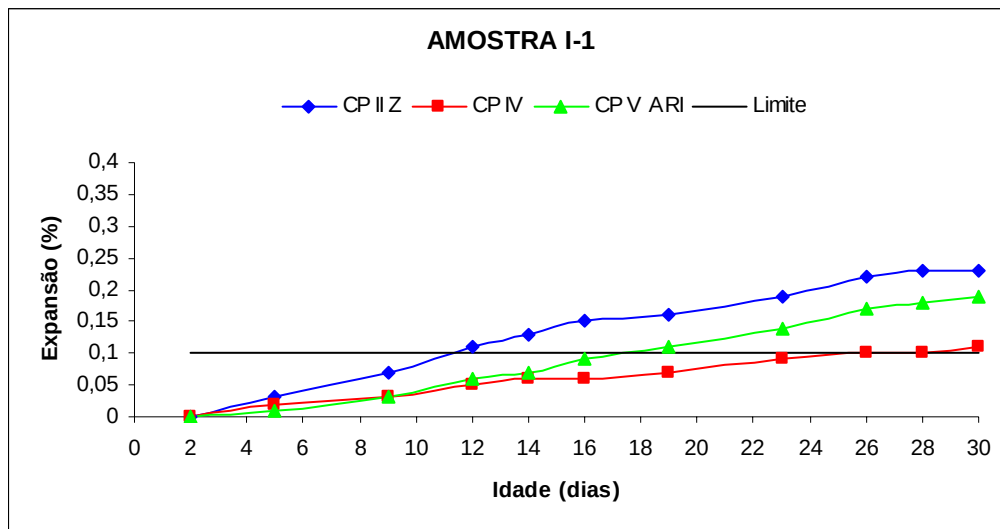
#### 3.2.2.2. Avaliação da eficiência das adições pozolânicas nos cimentos

A avaliação da eficiência dos cimentos contendo adições pozolânicas utilizados nesta pesquisa foi realizada conforme os critérios recomendados pela norma NBR 15577/08. Porém, levando-se em conta o objetivo da pesquisa, optou-se por utilizar todas as amostras e não apenas aquelas consideradas mais reativas, com a finalidade de evidenciar-se o comportamento de cada um dos cimentos com relação aos agregados, bem como sua eficiência em inibir a RAS de acordo com os limites da NBR 15577/2008.

Conforme mencionado no item 1.6.2 do Capítulo 1, os critérios para determinação da eficiência de materiais inibidores da reação, recomendados pela norma NBR 15577/08 são os seguintes:

- Quando as expansões obtidas no ensaio acelerado em barras de argamassa forem iguais ou superiores a 0,10% aos 16 dias, não está comprovada a mitigação, e serão necessários novos ensaios de forma a atender a esse limite, podendo-se optar por uma ou mais das alternativas seguintes: utilizar outro tipo de cimento *Portland* apropriado para inibir a reação; incorporar ou aumentar teores de adições; trocar o agregado.
- Quando as expansões obtidas no ensaio acelerado em barras de argamassa for inferior a 0,10% aos 16 dias, a mitigação está comprovada.

No gráfico da Figuras 3.11 e na Tabela 3.5, apresentam-se os resultados das expansões das barras de argamassa confeccionadas com as combinações do agregado I-1 com o cimento de referência CP V-ARI e com os cimentos contendo adições pozolânicas (CP II-Z e CP IV).

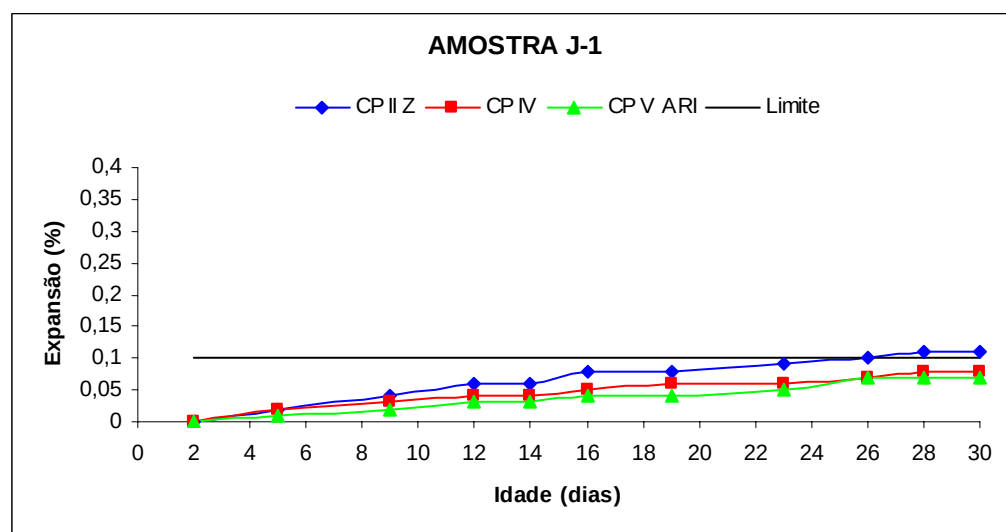


**Figura 3.11 - Expansões médias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado I-1.**

**Tabela 3.5 - Expansões médias aos 16 dias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado I-1 e verificação da eficiência dos cimentos.**

| Agregado | Cimento  | Expansão (%)<br>16 dias | Eficiência |                |
|----------|----------|-------------------------|------------|----------------|
|          |          |                         | Comprovada | Não Comprovada |
| I-1      | CP V-ARI | 0,09                    | X          |                |
|          | CP II-Z  | 0,15                    |            | X              |
|          | CP IV    | 0,06                    | X          |                |

No gráfico da Figuras 3.12 e na Tabela 3.6, apresentam-se os resultados das expansões das barras de argamassa confeccionadas com as combinações do agregado J-1 com o cimento de referência CP V-ARI e com os cimentos contendo adições pozolânicas (CP II-Z e CP IV).

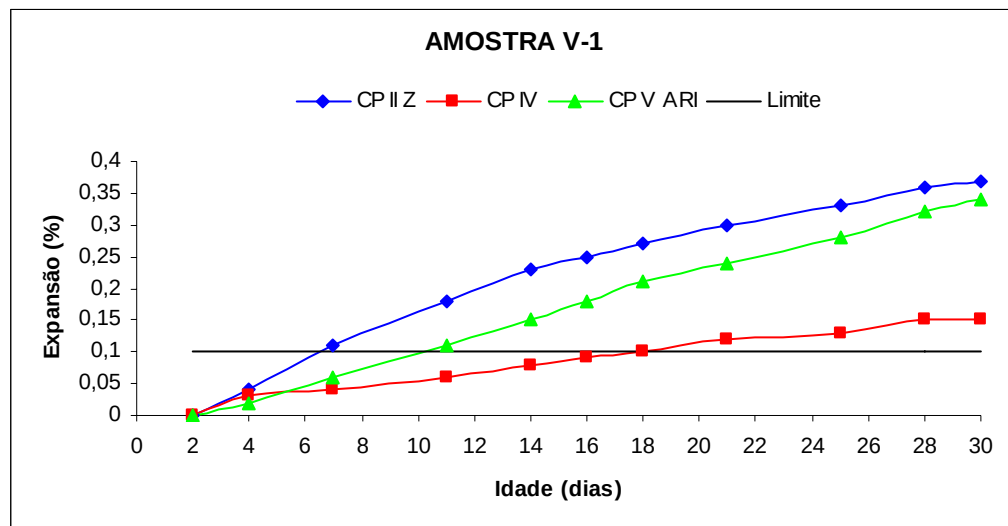


**Figura 3.12 - Expansões médias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado J-1.**

**Tabela 3.6 - Expansões médias aos 16 dias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado J-1 e verificação da eficiência dos cimentos.**

| Agregado | Cimento  | Expansão (%)<br>16 dias | Eficiência |                |
|----------|----------|-------------------------|------------|----------------|
|          |          |                         | Comprovada | Não Comprovada |
| J-1      | CP V-ARI | 0,04                    | X          |                |
|          | CP II-Z  | 0,08                    | X          |                |
|          | CP IV    | 0,05                    | X          |                |

No gráfico da Figuras 3.13 e na Tabela 3.7, apresentam-se os resultados das expansões das barras de argamassa confeccionadas com as combinações do agregado V-1 com o cimento de referência CP V-ARI e com os cimentos contendo adições pozolânicas (CP II-Z e CP IV).



**Figura 3.13- Expansões médias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado V-1.**

**Tabela 3.7 - Expansões médias aos 16 dias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado V-1 e verificação da eficiência dos cimentos.**

| Agregado | Cimento  | Expansão (%)<br>16 dias | Eficiência |                |
|----------|----------|-------------------------|------------|----------------|
|          |          |                         | Comprovada | Não Comprovada |
| V-1      | CP V-ARI | 0,18                    |            | X              |
|          | CP II-Z  | 0,25                    |            | X              |
|          | CP IV-RS | 0,09                    | X          |                |

No gráfico da Figuras 3.14 e na Tabela 3.8, apresentam-se os resultados das expansões das barras de argamassa confeccionadas com as combinações do agregado I-1 com o cimento de referência CP V-ARI e com os cimentos contendo adições pozolânicas (CP II-Z e CP IV).

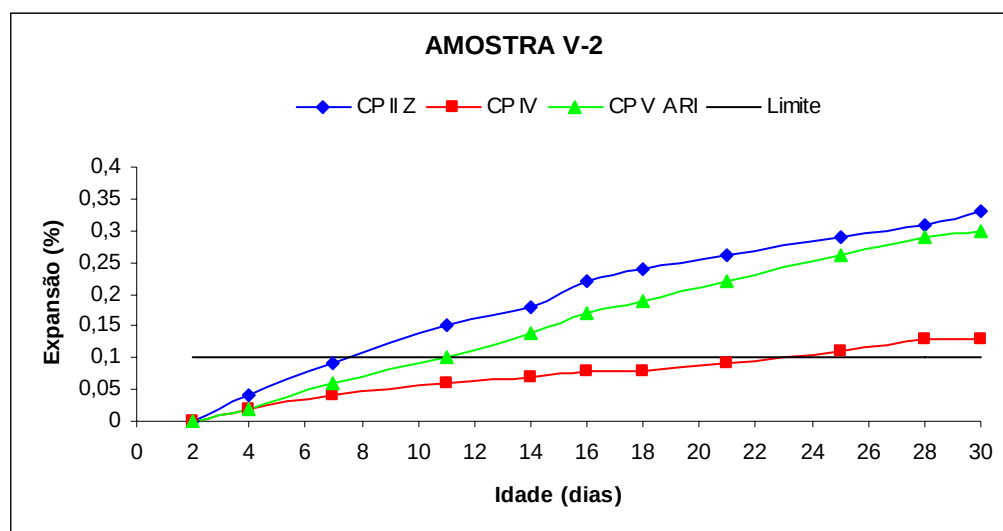


Figura 3.14 - Expansões médias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado V-2.

Tabela 3.8 - Expansões médias aos 16 dias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado V-2 e verificação da eficiência dos cimentos.

| Agregado | Cimento  | Expansão (%)<br>16 dias | Eficiência |                |
|----------|----------|-------------------------|------------|----------------|
|          |          |                         | Comprovada | Não Comprovada |
| V-2      | CP V-ARI | 0,17                    |            | X              |
|          | CP II-Z  | 0,22                    |            | X              |
|          | CP IV    | 0,08                    | X          |                |

Analisando-se as informações dos gráficos e tabelas verifica-se que apenas o cimento CP IV teve eficiência comprovada, em inibir as expansões decorrentes da RAS, quando utilizado com todos os tipos de agregados. Estes resultados altamente satisfatórios devem-se ao teor de adição pozolânica, de 27%, conforme o resíduo insolúvel obtido da Tabela 2.5, indicando que os concretos confeccionados com a combinação deste cimento com estes agregados não apresentam risco de expansão deletéria, quando usados em condições de campo. Por outro lado, os resultados indicam que o cimento CP II-Z, com aproximadamente 15 % de pozolana, não se mostrou eficaz na inibição da reação quando utilizado com os agregados classificados como reativos. Entretanto, mostrou-se eficaz quando utilizado com o agregado J-1, ratificando a inocuidade deste material, determinada anteriormente pelo ensaio de expansão com o cimento de referência.

O fato de não se mostrar capaz de inibir a reação, quando utilizado com agregados reativos, pode indicar que o teor de adição pozolânica presente no cimento CP II-Z não é capaz de garantir um comportamento inócuo dos agregados no concreto, sendo para isso necessários teores mais elevados desta adição.

Quando comparado com o CP IV, com teor mais elevado de pozolana e que resultou em expansões muito menores, o CP II-Z mostrou-se muito menos eficiente, evidenciando mais uma vez que o seu teor de adição pozolânica não é suficiente para inibir a RAS em todos os tipos de agregados estudados. Há que se destacar que o desempenho deste cimento ficou abaixo até mesmo do cimento de referência CP V-ARI. Logo, além da hipótese de que o teor de pozolana utilizado no CP II-Z não é suficiente para inibir a reação, há que se averiguar sobre o tipo de pozolana utilizado neste cimento com relação ao cimento CP IV. Outro ponto a ser verificado é a questão do tempo de cura e o teor de álcalis do cimento.

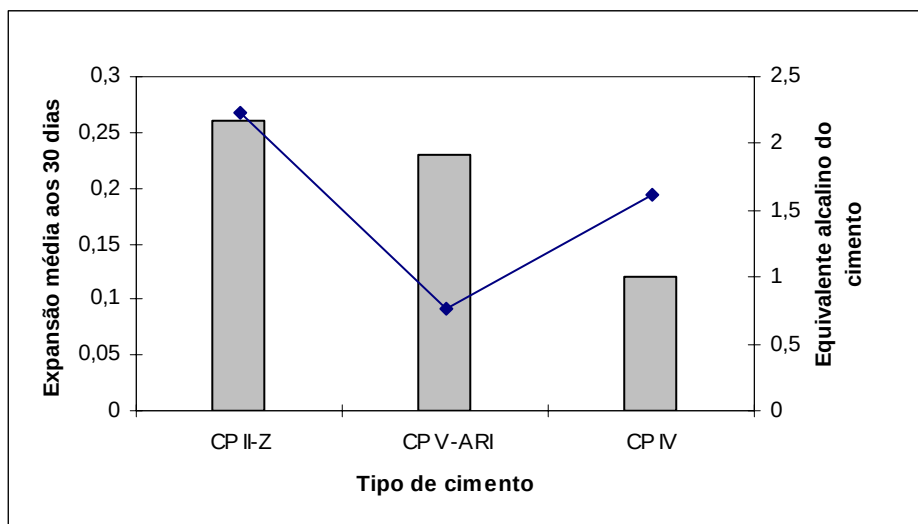
#### 3.2.2.3. Avaliação do efeito do teor de álcalis dos cimentos nas expansões

Sabe-se que quando se trata de um ensaio acelerado, em que as barras são imersas em uma solução altamente alcalina (1M de NaOH), o equivalente alcalino do cimento provavelmente não exerce influencia nas expansões, pois os álcalis da solução é que reagirão mais intensamente com os minerais dos agregados. Neste sentido Jensen et al. (1982) salientam que quando há adição de sais alcalinos com o intuito de se acelerar a álcali-reatividade das rochas, deve-se considerar a interferência da facilidade de migração desses sais aceleradores, pois a magnitude das expansões dependerá da migração dos álcalis. Então amostras confeccionadas com os mesmos agregados reativos podem desenvolver diferentes magnitudes de expansões.

Ao avaliar os equivalentes alcalinos de cada cimento (Tabela 3.2), verifica-se que o maior teor é encontrado no CP II-Z (2,23), seguido do CP IV (1,61%) e o menor no CP V-ARI (0,77%), conforme se observa na Figura 3.15. Embora não exista uma correlação direta entre o valor dos equivalentes alcalinos dos cimentos e respectivas expansões, verifica-se que o cimento CP II-Z-RS, cujas barras apresentaram as maiores expansões é o que possui o maior equivalente alcalino.



Essa constatação, embora se tenha que considerar a agressividade da solução alcalina utilizada no ensaio, pode evidenciar que, além do teor insuficiente de adição pozolânica, o elevado teor de álcalis do cimento CP II-Z, pode estar influenciando na incapacidade do cimento em inibir a reação.



**Figura 3.15 - Relação entre o equivalente alcalino do cimento e as expansões médias das barras.**

### 3.2.3. Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-x

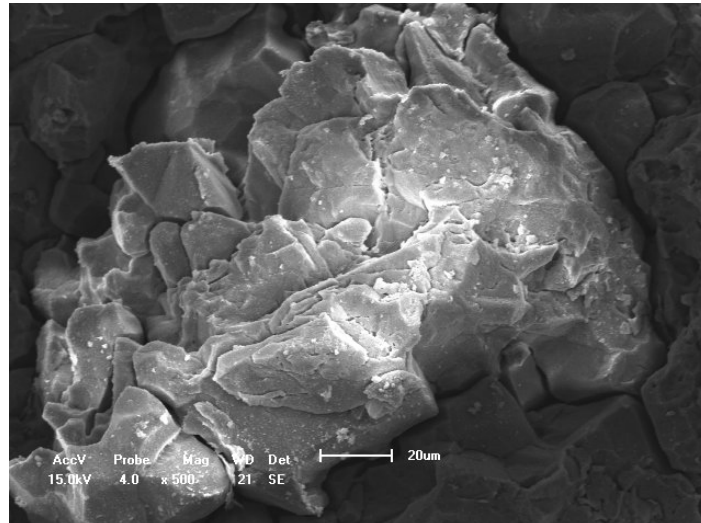
Conforme mencionado no capítulo anterior, foram observadas ao MEV e analisadas por EDS as barras que apresentaram as maiores expansões com os diversos tipos de cimento. As análises foram realizadas em fragmentos das barras em seu estado natural e não em lâminas delgadas com seção polida. A adoção dessa metodologia permite obterem-se imagens topográficas dos produtos da reação, sem alterar sua morfologia, porém, pode comprometer a análise química realizada por EDS, levando a resultados menos precisos.

As análises de EDS foram realizadas em pontos ou em janelas, conforme o grau de homogeneidade da imagem. Como não houve a padronização de uma determinada região para análise, os resultados apresentaram-se bastante variados. A presença do ouro (Au) em todos os espectros apresentados está relacionada com a metalização das amostras.

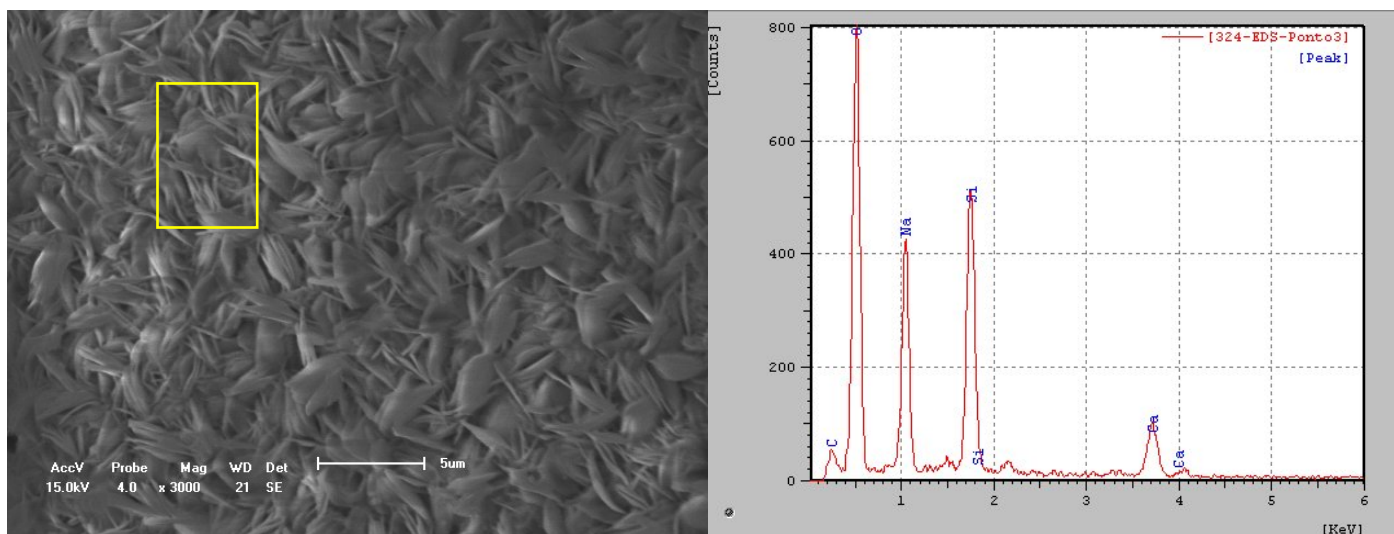
A voltagem foi fixada em 15 kV, porém não se padronizou a ampliação das imagens tendo em vista que a visualização dos produtos ocorria segundo uma ampla variação de aumentos, conforme a procedência dos fragmentos.

Conforme referido no item 2.2.3.3 do capítulo anterior, foram selecionadas para as análises em questão amostras de fragmentos de barras de argamassa moldadas com as seguintes combinações de agregado:cimento: V-1:CP II-Z; V-1:CP IV; V-1:CP V-ARI; V-2:CP II-Z; V-2:CP V-ARI e I-1:CP II-Z, considerando-se as maiores expansões observadas. Nenhuma barra moldada com o agregado J-1 foi selecionada para essas análises, levando-se em conta a inocuidade do material, já comprovada nas análises anteriores, petrografia e expansão, e a disponibilidade para se realizarem as observações no MEV.

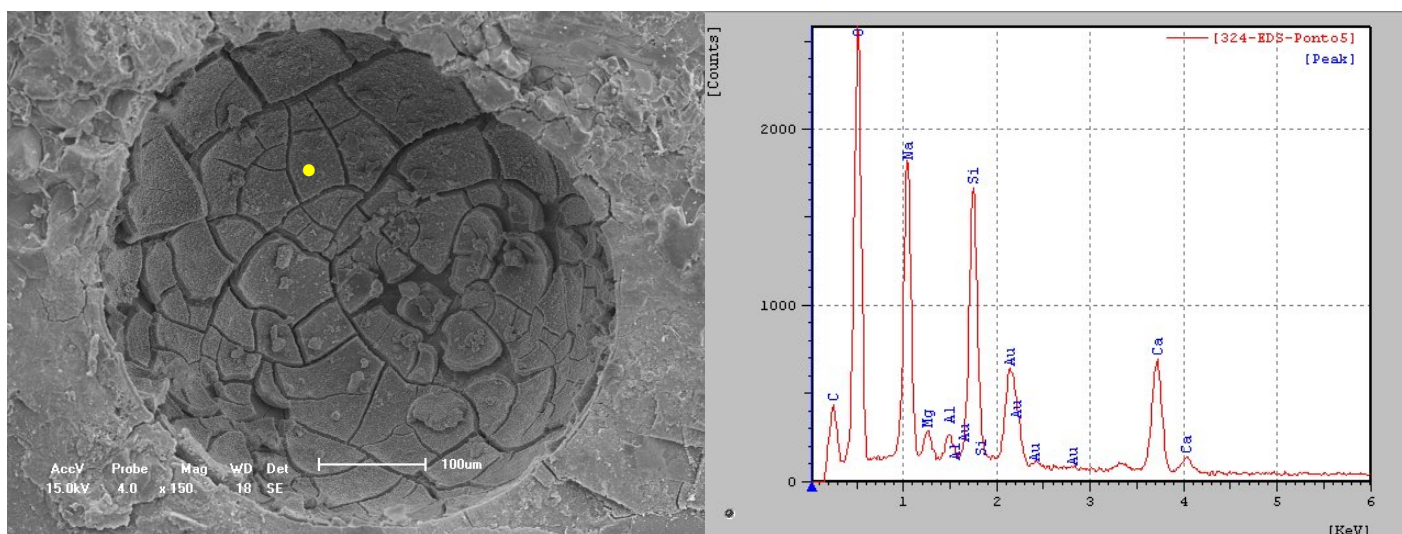
Na Figura 3.16 apresentam-se imagens observadas no MEV e espectros obtidos com EDS referentes aos fragmento de barra moldada com o agregado V-1 em combinação com o cimento CP II-Z.



**a) Gel maciço sobre a pasta.**



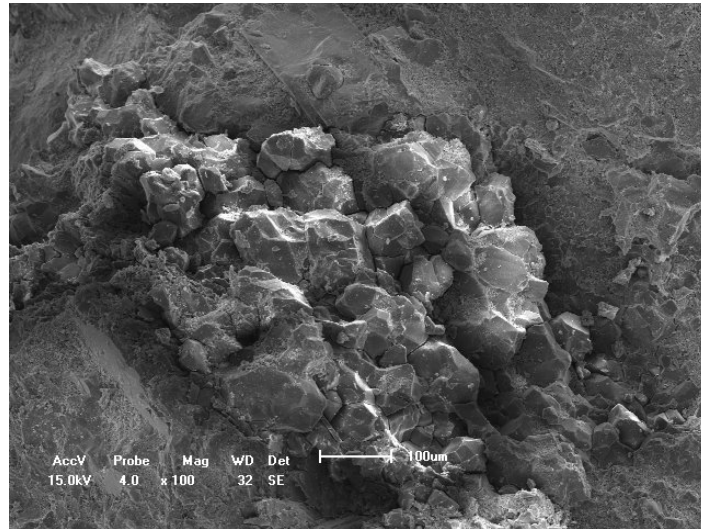
b) ampliação da imagem em (a): produto semicristalizado da RAS e respectivo espectro EDS, na janela.



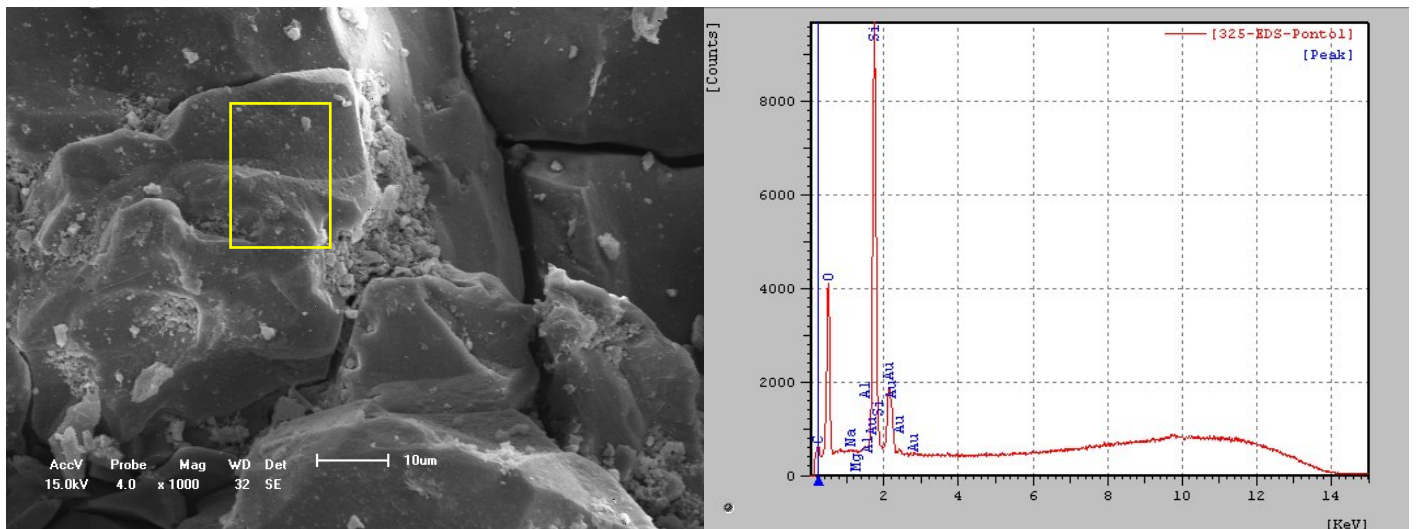
c) Gel gretado revestindo poro de grandes dimensões e respectivo espectro EDS, no ponto.

**Figura 3.16 – Imagens obtidas com MEV e espectros obtidos com EDS da barra moldada com o agregado V-1 em combinação com o cimento CP II-Z.**

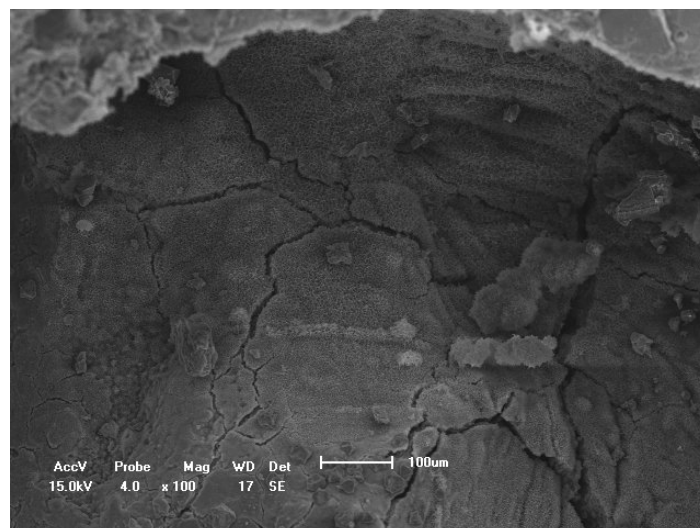
Na Figura 3.17 apresentam-se imagens observadas no MEV e espectros obtidos com EDS referentes ao fragmento da barra moldada com o agregado V-1 em combinação com o cimento CP IV.



a) Gel maciço na interface pasta/agregado.

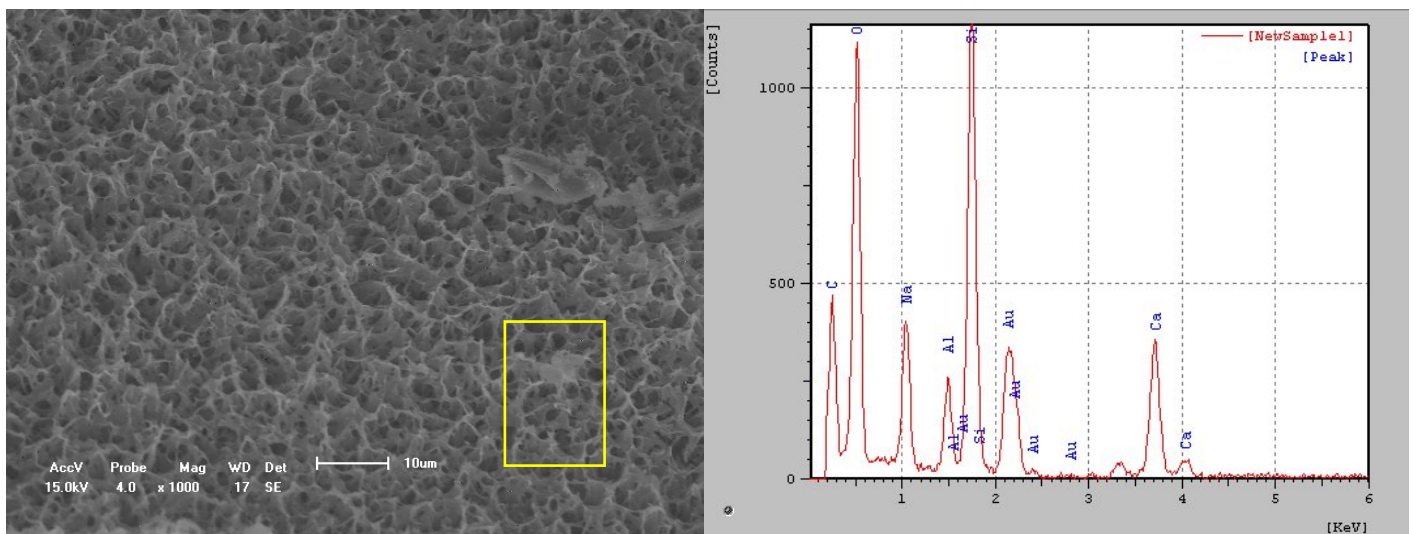


b) Ampliação da imagem em (a) e respectivo espectro EDS, na janela.



c) Gel fendado preenchendo poro.

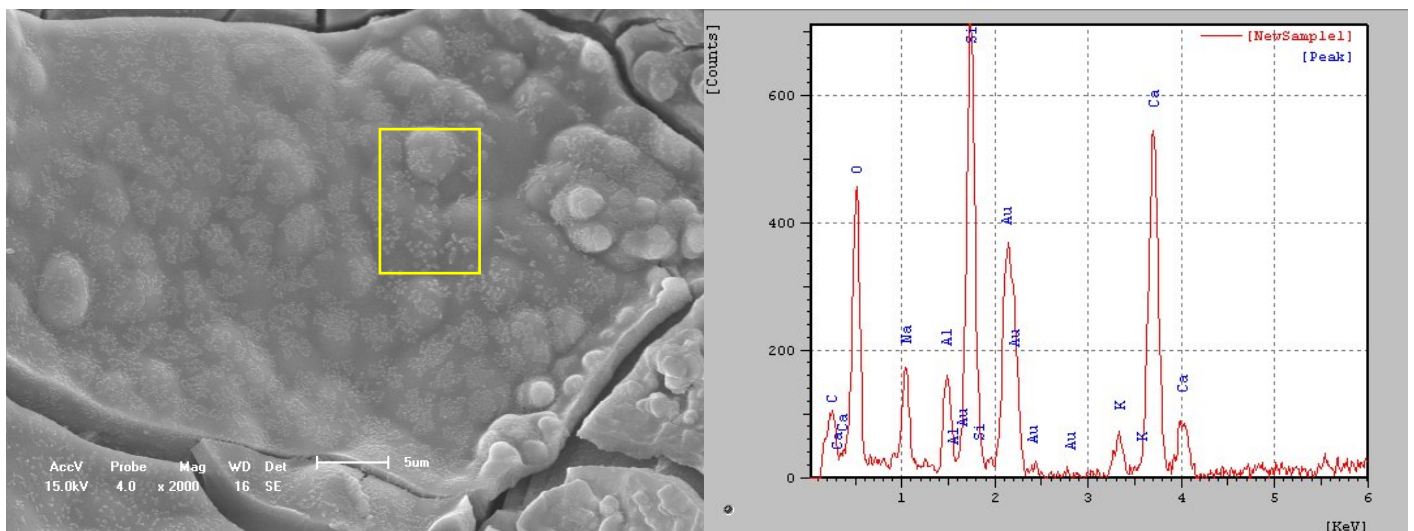




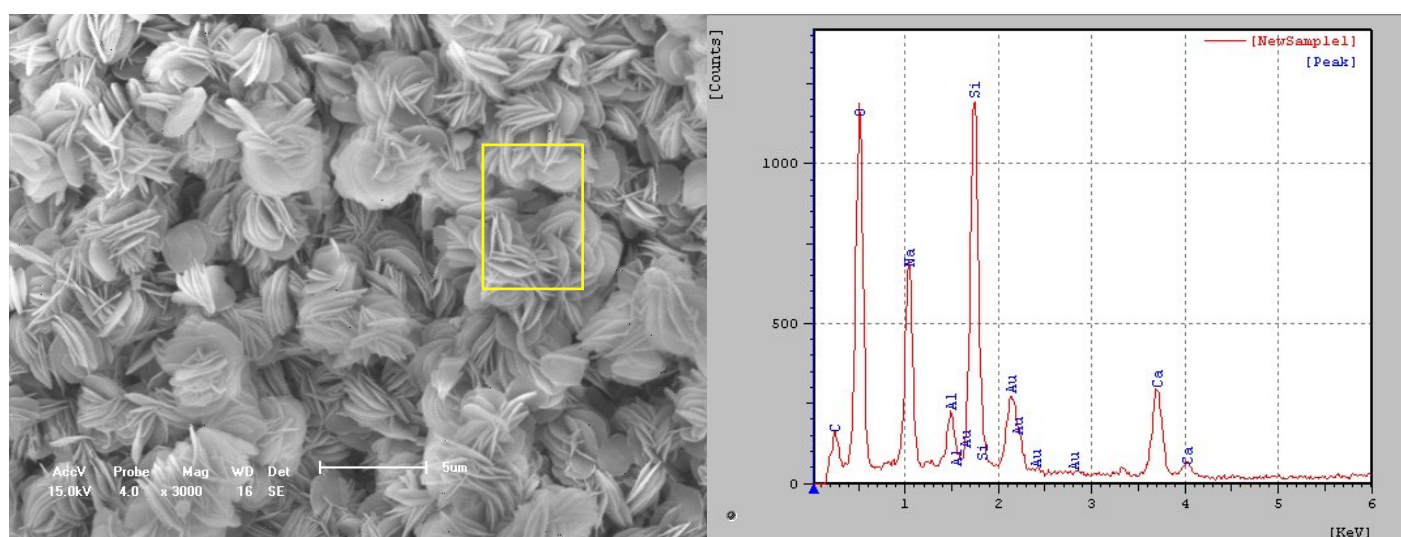
d) Ampliação da imagem em (c) e respectivo espectro EDS, na janela.

**Figura 3.17 - Imagens obtidas com MEV e espectro obtido com EDS da barra moldada com o agregado V-1 em combinação com o cimento CP-IV.**

Na Figura 3.18 apresentam-se imagens observadas no MEV e espectros obtidos com EDS referentes ao fragmento de barras moldada com o agregado V-1 em combinação com o cimento CP V ARI.



a) Gel maciço gretado sobre o agregado e espectro EDS, na janela.



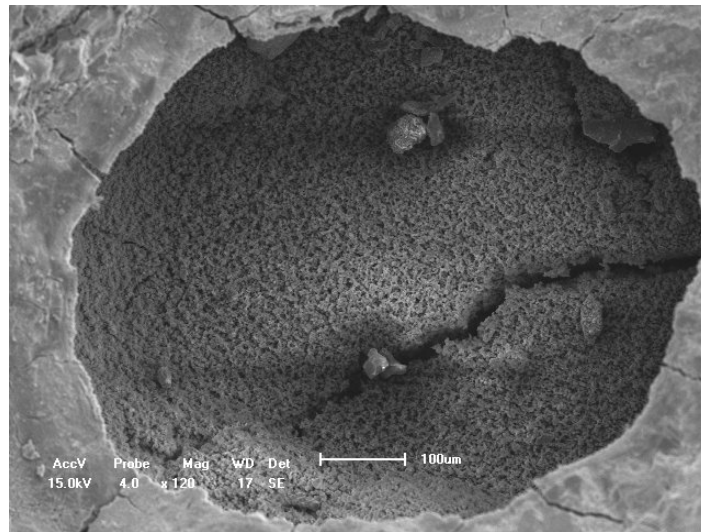
**b) Produto semicristalizado da RAS e respectivo espectro EDS, na janela.**

**Figura 3.18 - Imagens obtidas com MEV e espectros obtidos com EDS da barra moldada com o agregado V-1 em combinação com o cimento CP V-ARI.**

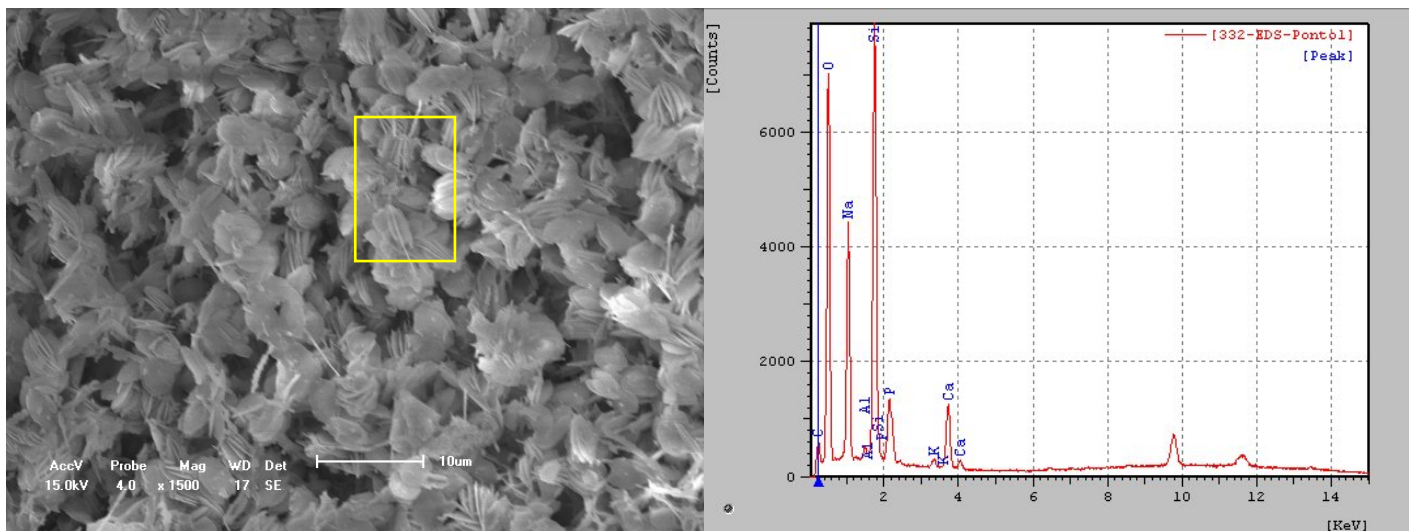
Observando-se as imagens das Figuras 3.16; 3.17 e 3.18, verifica-se que houve a formação do gel sílico-alcalino em todos os fragmentos avaliados das barras moldadas com o agregado V-1, inclusive no fragmento da barra moldada com o cimento CP IV, que apresentou expansão menor do que 0,10% aos 16 dias, limite adotado pela NBR 15577 para atestar a eficiência do cimento. Em todos os fragmentos foram visualizados produtos tanto disseminados quanto preenchendo poros. Entretanto, vale ressaltar que no fragmento moldado com o cimento CP IV os produtos expansivos foram visualizados preferencialmente nos poros, através de grandes aumentos, e em menor quantidade.

Os espectros apresentados nas Figuras 3.16(b, c); 3.17(b, d) e 3.18(a,b) constataam, em todas as morfologias, características da RAS, observadas, a presença dos principais constituintes do gel sílico-alcalino, com predomínio de Si, Ca e Na, e em menor quantidade o K.

Na Figura 3.19 apresentam-se imagens observadas no MEV e espectro obtido com EDS referentes ao fragmento da barra moldada com o agregado V-2 em combinação com os cimentos CP II-Z.



**a) Produto semicristalizado preenchendo poro.**

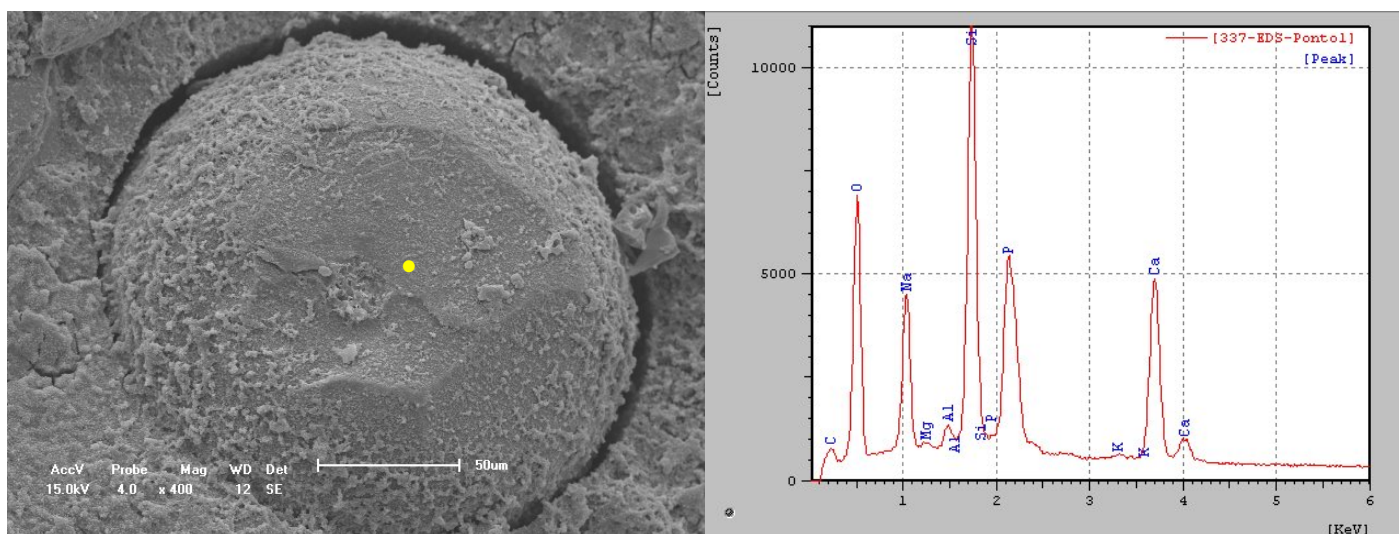


**b) Ampliação da imagem em (a) e respectivo espectro EDS, na janela.**

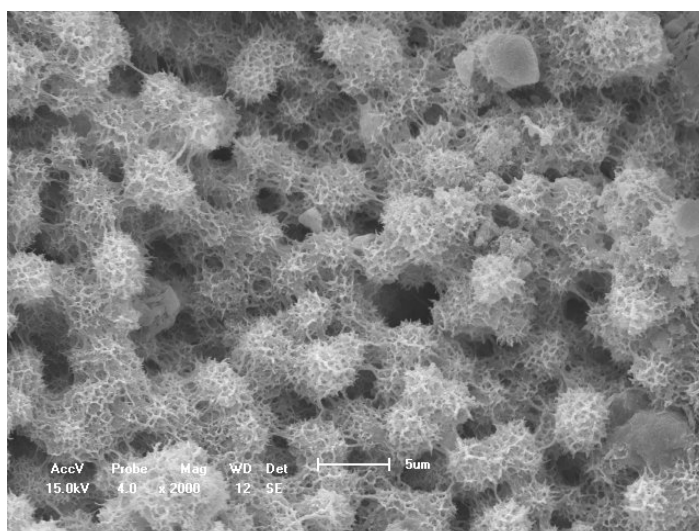
**Figura 3.19 – Imagens obtidas com MEV e espectro obtido com EDS da barra moldada com o agregado V-2 em combinação com o cimento CP II-Z.**

Na Figura 3.20 apresentam-se imagens observadas no MEV e espectro obtido com EDS referentes ao fragmento da barras moldada com o agregado V-2 em combinação com os cimentos CP V ARI.





a) Fragmento moldado com CP V-ARI: gel rendado preenchendo poro na interface agregado/pasta e respectivo espectro EDS, no ponto.



b) Ampliação da imagem em (a).

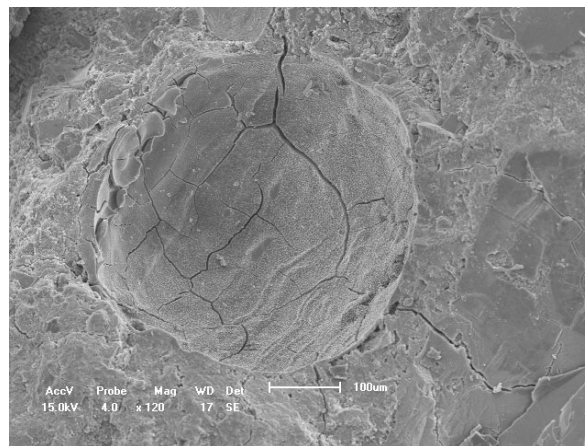
Figura 3.20 – Imagens obtidas com MEV e espectro obtido com EDS da barra moldada com o agregado V-2 em combinação com o cimento CP V-ARI.

Conforme as imagens das Figuras 3.19 e 3.20, verifica-se a presença de produtos da RAS nos dois fragmentos, de barras moldadas com o agregado V-2, analisados. Tanto no fragmento moldado com o cimento CP II-Z quanto no fragmento moldado com o cimento CP V-ARI, os produtos se apresentam preferencialmente preenchendo poros, embora também ocorram disseminados sobre a pasta e sobre o agregado, porém em menor quantidade.

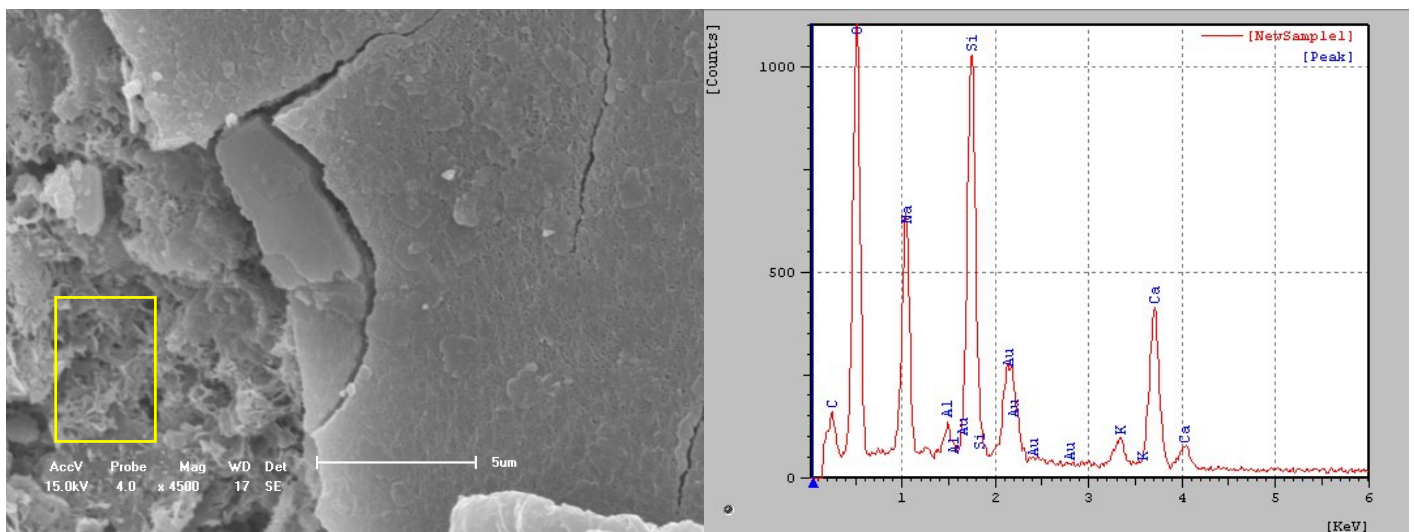


Os dois espectros EDS das Figuras 3.19(b) e 3.20(a) mostram a presença dos principais constituintes do gel sílico-alcalino, sendo que no fragmento moldado com o cimento CP II-Z observa-se maior quantidade de Na, enquanto que no fragmento moldado com o CP V-ARI predomina o Ca. Em ambos espectros nota-se a presença de P, que pode estar associado ao agregado.

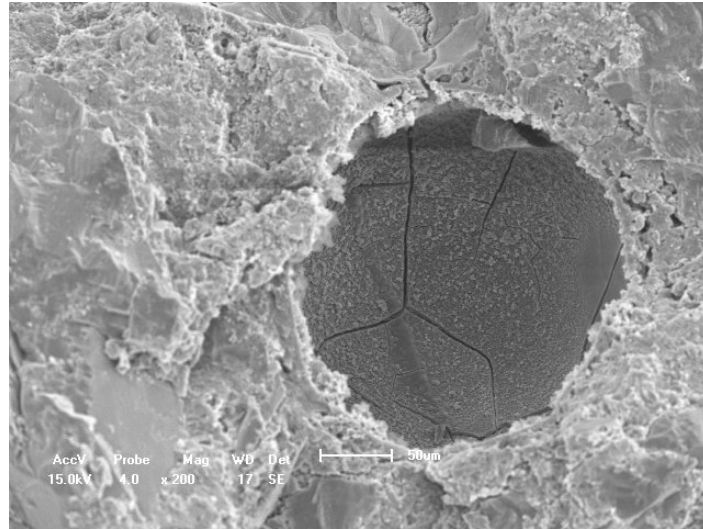
Na Figura 3.21 apresentam-se imagens observadas no MEV e espectros obtidos com EDS referentes ao fragmento da barra moldada com o agregado I-1 em combinação com o cimento CP II-Z.



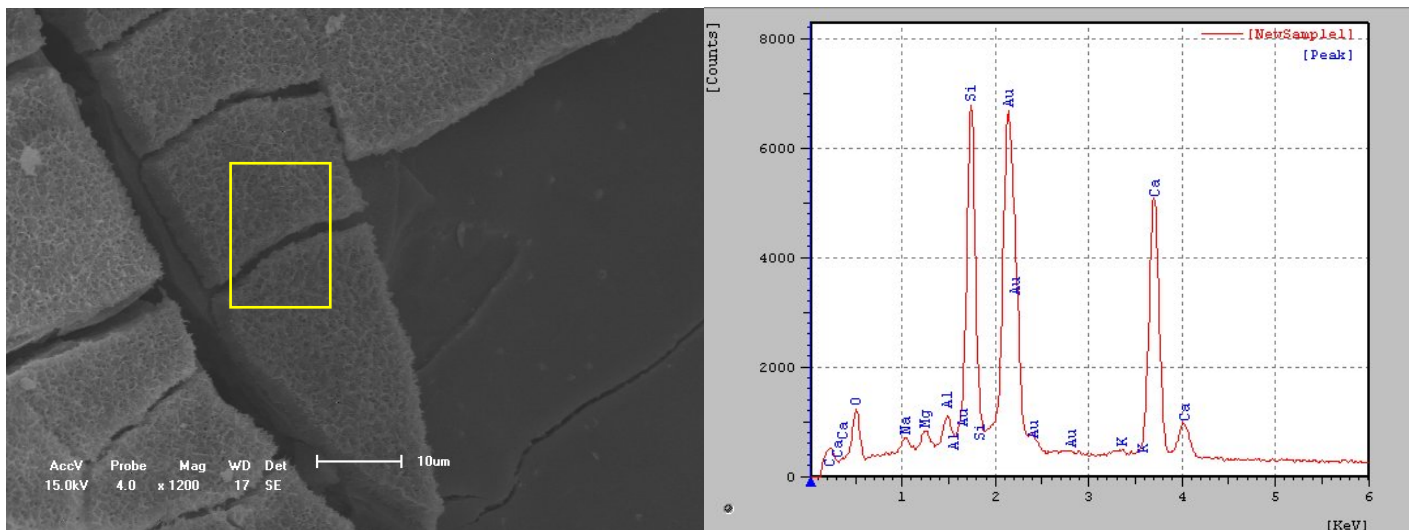
**a) Gel gretado preenchendo poro da pasta entre grãos do agregado.**



**b) Ampliação da imagem (a) e respectivo espectro EDS, na janela.**



c) Produto da RAS preenchendo poro na interface pasta/agregado.



d) Ampliação da imagem em (c) e respectivo espectro EDS, na janela.

**Figura 3.21 – Imagens obtidas com MEV e espectros obtidos com EDS da barra moldada com o agregado I-1 em combinação com o cimento CP II-Z.**

Nesse fragmento proveniente da barra moldada com o agregado I-1 e o cimento CP II-Z foi mais difícil visualizar os produtos da RAS, tendo-se observado sua presença apenas em poros na interface entre a pasta e o agregado, conforme mostrado na Figura 3.21 (a) e (c).

Os dois espectros EDS indicam a presença dos constituintes do gel silico-alcalino, embora a composição se apresente bastante variada de um espectro para o outro.

## CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 4.1. Conclusões

Os métodos utilizados no presente trabalho mostraram-se eficientes na avaliação da potencialidade reativa dos agregados e da eficiência dos cimentos, especialmente o método acelerado em barras de argamassa que confirmou as informações decorrentes da análise petrográfica. A microscopia eletrônica de varredura e a espectroscopia de raios-x revelaram-se importantes ferramentas na pesquisa, visto que as imagens e espectros confirmaram a reatividade dos agregados pela visualização dos produtos da reação.

As principais conclusões extraídas dos resultados desta pesquisa apresentam-se a seguir, ressaltando-se que são válidas apenas para as condições e materiais estudados.

#### 4.1.1. Potencialidade reativa dos agregados

A caracterização mineralógica e a análise petrográfica revelaram que:

- Todas as amostras dos agregados são provenientes de rochas metamórficas, de origem plutônica;
- De modo geral, as rochas que compõem as amostras de agregados constituem-se essencialmente de quartzo, k-feldspato e plagioclásio;
- Todas as amostras de agregados apresentaram características mineralógicas potencialmente reativas.

O ensaio de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, moldadas com o cimento básico CP V-ARI:

- Confirmou a potencialidade reativa das amostras dos agregados V-1, V-2 e I-1 e classificou a amostra do agregado J-1 como potencialmente inócua;
- Mostrou que as amostras de agregados mais potencialmente reativos são provenientes das rochas miloníticas;
- O agregado potencialmente inócua provém de rocha gnáissica.

#### 4.1.2. Eficiência dos cimentos

O ensaio de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, moldadas com os cimentos compostos com adições pozolânicas revelou que:

- Os corpos-de-prova moldados com o cimento CP IV apresentaram as menores expansões;
- Os corpos de prova moldados com o cimento CP II-Z apresentaram as maiores expansões;
- O cimento CP IV se mostrou possivelmente eficaz para inibir as expansões decorrentes da RAS em todos os corpos-de-prova, moldados com todos os agregados;
- O cimento CP II-Z se mostrou possivelmente eficaz para inibir as expansões decorrentes da RAS apenas no corpo-de-prova moldado com o agregado J-1;
- A quantidade de pozolana, cerca de 15%, adicionada ao cimento CP II-Z não é suficiente para inibir as expansões decorrentes da RAS;
- O equivalente alcalino do cimento CP II-Z pode estar contribuindo para o desencadeamento da RAS.

As imagens da microscopia eletrônica e os espectros de raios-x por EDS:

- Mostraram que os produtos da RAS se formaram em todas as amostras observadas.
- Confirmaram a reatividade das amostras dos agregados, mesmo nos corpos-de-prova onde as expansões não foram significativas.
- Apresentaram produtos da reação de morfologia variada, com predominância de gel na forma maciça gretada, preenchendo poros.

#### 4.2. Sugestões

A seguir listam-se algumas sugestões para trabalhos futuros no sentido de aprofundar o estudo e esclarecer algumas questões relacionadas ao estudo da RAS, no estado de Pernambuco:

- O estudo e mapeamento dos agregados do estado de Pernambuco, no que se refere a RAS.
- Aprofundar o estudo da contribuição dos álcalis por parte do cimento e dos agregados e a influência desta contribuição no desenvolvimento da RAS.
- Proceder à análise quantitativa da composição química dos corpos de prova, antes de serem submetidos à solução alcalina, para verificar com maior precisão o efeito dos álcalis do cimento.
- Realizar o ensaio acelerado com os mesmos agregados estudados, utilizando-se como cimento de referência o CP I, para comparar o efeito da RAS nos corpos de prova moldados com este cimento e aquele observado nos corpos-de-prova moldados com o CP V-ARI, que apresenta menor tempo de pega.
- Verificar o efeito da porosidade dos corpos-de-prova nas expansões.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 5732/91- EB 1:Cimento Portland Comum*. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 5733/91- EB 2: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial* . Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 5735/91 - EB 208: Cimento Portland de Alto-forno*. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 5736/91- EB 758: Cimento Portland Pozolânico*. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 11578/91: Cimento Portland Composto*. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 15577/08: Agregados – Reatividade Álcali-agregado. Partes1, 2, 3, 4e 5*. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

AMO, D. G.; PEREZ, C. B. Diagnosis of the alkali-silica reactivity potential by means of digital image analysis of aggregate thin sections. *Cement and Concrete Research*, v.31, p.1449-1454, 2001.

ANDRADE, T. Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na região metropolitana do Recife. In: II Simpósio sobre Reação Álcali-agregado em Estruturas de Concreto, Rio de Janeiro. *Anais...Rio de Janeiro*: IBRACON/CBGB, 2006.

ANDRADE, T. & REGO SILVA, J. J. *Diagnóstico do potencial de reatividade dos agregados e do potencial de inibição de RAA com uso de cimentos e de adições minerais disponíveis na RMR*. Relatório Técnico, Recife, 2006.

ANDRADE, T.; REGO SILVA, J. J.; HASPARYK, N. P.; SILVA, C. M. Investigação do potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA dos agregados miúdos e graúdos comercializados na região metropolitana do Recife. In: Simpósio sobre Reação Álcali-agregado em Estruturas de Concreto, Rio de Janeiro. *Anais...Rio de Janeiro*: IBRACON/CBGB, 2006.

ANDRIOLO, F. R. *AAR dams affected in Brazil- report on the current situation*. In: International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, 11, 2000, Quebec. *Anais...Quebec*, 2000. p.1243-1252.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – American Society for Testing and Materials. *ASTM C-150/05: Standard specification for Portland cement*. Philadelphia, 2005.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – American Society for Testing and Materials. *ASTM C-227/03: Standard test method for potential alkaly reativity of cement-aggregate combinations (mortar-bar method)*. Philadelphia, 2003.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – American Society for Testing and Materials. *ASTM C-295/03: Standard for guide of aggregate for concrete*. Philadelphia, 2003.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – American Society for Testing and Materials. *ASTM C-1105/95: Standard test method for lenght change of concrete due to alkali carbonate rock reaction*. Philadelphia, 1995.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – American Society for Testing and Materials. *ASTM C-1260/05: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)*. Philadelphia, 2005.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – American Society for Testing and Materials. *ASTM C-1293/06: Standard test method for concrete aggregates by determination of lenght change of concrete due to alkali silica reaction*. Philadelphia, 2006.

BARRETO, E. P. Instrumentos de ordenamento territorial aplicados à revisão do plano diretor de mineração. 2010. p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Recife, 2010.

BELLEW, G. P. E. A critical review of ultra acelerated tests for alkali-silica reactivity. *Cement and concrete composites*. v.19. p.403-414, 1997.

BÉRUBÉ, M. A.; FRENETTE, J. Testing concrete for AAR in NaOH and NaCl solutions at 38°C and 80°C. *Cement and concrete composites*. v. 16, n. 1, p. 189-198, 1994.

CHATTERJI, S.; CHRISTENSEN, P. Studies of alkali-silica reaction. Part 7. Modelling and Expansion. *Cement and Concrete Research*, v. 20, n. 5, p. 285-290, 1989.

CRISTINO, A. F. R. A. *Inibição das reações químicas expansivas internas no betão. Controlo da penetração de água e modificação das propriedades expansivas dos produtos de reacção*. Dissertação (Mestrado em química analítica aplicada) – Faculdade de Ciências. Universidade de Lisboa. 218p. Lisboa, 2008.

DENG, M. & TANG, M. Mechanism of dedolomitization and expansion of dolomitic rocks. *Cement and Concrete Research*. v.23, n. 6, p. 1397-1408, 1993.

DENT GLASSER, L. S. & KATAOKA, N. The chemistry of alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*. v. 11, n. 3, p. 1-9, 1981.

DIAMOND, S. Alkali-aggregate reaction (PCC). In: *Reports-Feel free to download*, 1984. Disponível em <http://www.this.is/ergo/reports/Chapter3.pdf>. Acesso em: 10/01/2010.

DIVET, L. *Les reactions sulfatiques internes: les diferentes sources de sulfates, les mecanismes e les facteurs determinants*. Seminário Luso-Frances – Degradação de estruturas por reacções expansivas de origem interna, LNEC/LCPC. 2001.

DRON, R. Thermodynamique de la réaction alcali-silice. *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*. n. 166, p 55-59, 1990.

DRON, R.; BRIVOT, F. Thermodynamic and kinetic approach to the alkali-silica reaction. Part 2: Experiment. *Cement and Concrete Research*. v. 23, p. 93-100, 1993.

FARNY, J. A. & KOSMATKA, S. H. Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete. *Concrete Information Series*. n. 1071, 24p, 1997.

FONTOURA, J. T. F. Investigações sobre a reação álcali-agregado: metodologias e ensaios. In: *Simpósio sobre Reatividade Álcali-agregado em Estruturas de Concreto*. Goiânia, 1997. Relatório Final, Parte II, Tema I, p. 65-80. 1999.

FORADABA, J. S. *Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón*. Tese. Departamento de Construção. Escola Superior Técnica de Caminhos, Canais e Portos de Barcelona. Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, 124p. 2005.

FOURNIER, B. & BÉRUBÉ, M. A. General notions on alkali-aggregate reactions. In: *Petrography and Alkali-Aggregate Reactivity*, CANMET, Ottawa, p. 7-69, 1993.

GILLOTT, J. E. Alkali-reactivity problems with emphasis on Canadian aggregates. *Engineering Geology*. v. 23, p. 29-43, 1986.

HASPARYK, N. P. *Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado: efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa*. 1999. 257f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

HASPARYK, N. P. *Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado*. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia)-Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

HASPARYK, N. P. MONTEIRO, P. J. M. CARASEK, H. Effect of sílica fume and rice husk on alkali-silica reaction. *ACI Materials Journal*, v.7, n. 4, p.486-492, 2000.

HOBBS, D. W. *Alkali-silica reaction in concrete*. London: Ed. Thomas Telford Ltda, 1988.

KIHARA, Y.; SBRIGHI, C. N.; KUPERMAN, S. C. Reação álcali-agregado: visão atual e situação brasileira. In: *Simpósio sobre durabilidade do concreto*, 1998. São Paulo. *Anais...*, São Paulo: IBRACON/USP, 1998.

KURTIS, K. E.; COLLINS, C. L.; MONTEIRO, P. J. M. The surface chemistry of the alkali-silica reaction: a critical evaluation and x-ray microscopy, *Concrete Science and Engineering*. v.4, 2002.

METHA, P. K. *Concrete. Structure, properties and materials*. Englewood Cliffs, NJ Prentice-Hall, 1986.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 3. São Paulo: Editora PINI, 1994.

OBERHOLSTER, R. E.; DAVIES, G. An accelerated method for testing the potential alkali-reactivity of siliceous aggregate. *Cement and Concrete Research*. v. 16, n. 2, p. 181-189, 1986.



PAULON, V. A. *Reações álcali-agregado em concreto*. 1981. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PAULON, V. A.; SAAD, M. N. A. ANDRADE, W. P. Properties of mass concrete containing an active pozzolan made from clay. *Concrete International*, p. 59-65, 1982.

PETERSON, M. G.; ULM, F.-J. Chemoplasticity of the alkali-silica reaction: modelling of stress-induced anisotropy. *Report, Department of Civil & Environmental Engineering*. Massachusetts, 2000.

POOLE, A. B. Alkali-silica reactivity mechanisms of gel formation and expansion. *9<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, London. v.2, p. 782-789, 1992.

PRADO, A. G. Avaliação petrográfica e experimental de agregados graúdos afetados por deformação tectônica, desenvolvimento de minerais de alteração e texturas de exsolução. 2008. 101p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Recife, 2007.

PREZZI, M.; MONTEIRO, J. P. M. & SPOSITO, G. The alkali-silica reaction, Part I: use of the double-layer theory to explain the behavior of reaction-product gels. *ACI Materials Journal*, v. 94, n. 1, p. 10-17, 1997.

PRINCE, W. & PERAMI, R. Mise en évidence du rôle essentiel des ions  $\text{OH}^-$  dans les réactions alkali-silice. *Cement and Concrete Research*. v. 23, n. 5, p. 1121-1129, 1993.

RODRIGUES, F.; MONTEIRO, P. SPOSITO, G. The surface charge density of sílica and its effect on expansive pressure. *Cement and Concrete Research*. v. 29, p. 527-530, 1999.

SANTOS, M. B.; BRITO, J. O panorama nacional das reacções álcalis-sílica em betões. *Engenharia civil. UM*. n.32, 2008.

SILVA, P. N. *Reação álcali-agregado nas usinas do complexo Paulo Afonso/CHESF. Influencia da reação nas propriedades do concreto*. 2007. 220p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

SILVEIRA, A. L. Z. P. *Estudo da reação álcali-agregado em rochas carbonáticas*. 2006. 202f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SOUZA, J. L. F. *Estudo de durabilidade de concretos e argamassas através de RAA em agregados convencionais da região de Campina Grande e alternativos em concreções lateríticas Sapé-PB e Jacumã-PB*. 2007. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, 2007.

STANTON, T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. v. 66. p. 1781-1811. 1940.

TANG, M.; DENG, M. & XU, Z. Comparison between alkali-silica reaction and alkali-carbonate reaction. In: *International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, 11, 2000, Québec. *Anais...* Québec, 2000. p. 109-118, 2000.

TANG, M.; DENG, M.; LON, X.; HAN, S. Studies on alkali-carbonate reaction. *Materials Journal*. Jan-Feb, 1994, p. 95-104, 1994.

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

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

VALDUGA, L. *Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativos do Estado de São Paulo*. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002.

VAN AARDT, J. H. P. & VISSER, S. Calcium hydroxide attack on feldspats and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions. *Cement and Concrete Research*, v. 7, n. 6, p. 643-648, 1977.

VIVIAN, H. E. Alkalies in cement and concrete. In: *The effect of alkalies on the properties of concrete*, 3, 1976, London. *Proceedings...* London: Cement and Concrete Association, set. p.9-25, 1976.

WANG, H. & GILLOTT, J. E. Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hidroxide. *Cement and Concrete Research*, v. 21, p. 647-654, 1991.

WIGUN, B. J. Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks their use for predicting alkali aggregate reactivity in concrete. *Engineering Geology*. v.40, p. 195-214, 1995.

**APÊNDICE A – Fichas-técnicas dos cimentos.**



Certificado Nº 011/10

Cliente:

Produto: Cimento Portland Composto com Pozolana

Tipo: CII-Z

Classe: 32

Local da coleta: Unidade de Carregamento na Fábrica em Golana - PE

Data de expedição: Média de resultados Ano: 2010

Att:

**1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA**

| Ensaio                                             | Resultados (%) | Limites da NBR 11578/91 |
|----------------------------------------------------|----------------|-------------------------|
| Perda ao Fogo - PF                                 | 5,61           | ≤ 6,5%                  |
| Óxido de Silício - SiO <sub>2</sub>                | 24,06          | ***                     |
| Óxido de Alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,87           | ***                     |
| Óxido de Ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 2,39           | ***                     |
| Óxido de Cálcio Total - CaO                        | 52,89          | ***                     |
| Óxido de Magnésio - MgO                            | 4,44           | ≤ 6,5%                  |
| Anidrido Sulfúrico - SO <sub>3</sub>               | 3,03           | ≤ 4,0%                  |
| Óxido de Sódio - Na <sub>2</sub> O                 | 0,13           | ***                     |
| Óxido de Potássio - K <sub>2</sub> O               | 1,68           | ***                     |
| Anidrido Carbônico - CO <sub>2</sub>               | 4,31           | ≤ 5,0%                  |
| Resíduo Insolúvel - RI                             | 15,04          | ≤ 16,0%                 |
| Óxido de Cálcio Livre - CaO Livre                  | 0,83           | ***                     |

**2 - ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS**

| Ensaio                                             | Resultados | Limites da NBR 11578/91    |
|----------------------------------------------------|------------|----------------------------|
| Finura - Resíduos na peneira de 75µm (%)           | 4,2        | ≤ 12,0%                    |
| Finura - Resíduos na peneira de 44µm (%)           | 15,2       | ***                        |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )              | 3,01       | ***                        |
| Área específica - Blaine (m <sup>2</sup> /kg)      | 471        | ≥ 260 (m <sup>2</sup> /kg) |
| Água da pasta de consistência normal (%)           | 28,0       | ***                        |
| Tempo de início de pega (h:min)                    | 03h38      | ≥ 1 h                      |
| Tempo de fim de pega (h:min)                       | 04h38      | ≤ 10 h (facultativo)       |
| Expansibilidade de Le Chatelier a quente (mm)      | 0,5        | ≤ 3 mm                     |
| Resistência à compressão na idade de 1 dia (MPa)   | 13,6       | ***                        |
| Resistência à compressão na idade de 3 dias (MPa)  | 23,4       | ≥ 10 MPa                   |
| Resistência à compressão na idade de 7 dias (MPa)  | 29,1       | ≥ 10 MPa                   |
| Resistência à compressão na idade de 28 dias (MPa) | 38,8       | ≥ 32 MPa                   |

Itapessoca, 17 maio de 2011

José Glaucio R. Uchôa  
Gerente GeralRegina Salvador  
Gestora da Qualidade

Assistência Técnica a Clientes - Eng.º Alexandre Tavares

Fone: (071) 3626.8500 Ramal: 8502 Telefax: (071) 3626.8503

E-mail: [awtavares@nassau.com.br](mailto:awtavares@nassau.com.br)

**CIMENTO NASSAU****Itapessoca Agro-Industrial S.A.**

Sistema de Qualidade Certificado pela ISO-9001:2008

Certificado Nº 012/10

Cliente:  
Produto: Cimento Portland Pozolânico, Resistente a Sulfatos  
Tipo: CP IV  
Classe: 32  
Local da coleta: Unidade de Carregamento na Fábrica em Golana - PE  
Data de expedição: Média de resultados Ano: 2010

Att:

**1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA**

| Ensaio                                             | Resultados (%) | Limites da NBR 5736/91 |
|----------------------------------------------------|----------------|------------------------|
| Perda ao Fogo - PF                                 | 4,13           | ≤ 4,5%                 |
| Óxido de Silício - SiO <sub>2</sub>                | 34,03          | ***                    |
| Óxido de Alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,25           | ***                    |
| Óxido de Ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 2,15           | ***                    |
| Óxido de Cálcio Total - CaO                        | 45,53          | ***                    |
| Óxido de Magnésio - MgO                            | 3,95           | ≤ 6,5%                 |
| Anidrido Sulfúrico - SO <sub>3</sub>               | 2,53           | ≤ 4,0%                 |
| Óxido de Sódio - Na <sub>2</sub> O                 | 0,26           | ***                    |
| Óxido de Potássio - K <sub>2</sub> O               | 1,35           | ***                    |
| Anidrido Carbônico - CO <sub>2</sub>               | 2,79           | ≤ 3,0%                 |
| Resíduo Insolúvel - RI                             | 27,20          | ***                    |
| Óxido de Cálcio Livre - CaO Livre                  | 0,71           | ***                    |

**2 - ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS**

| Ensaio                                             | Resultados | Limites da NBR 5736/91   |
|----------------------------------------------------|------------|--------------------------|
| Finura - Resíduos na peneira de 75µm (%)           | 2,8        | ≤ 5,0%                   |
| Finura - Resíduos na peneira de 44µm (%)           | 14,2       | ***                      |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )              | 2,91       | ***                      |
| Área específica - Blaine (m <sup>2</sup> /kg)      | 527        | *** (m <sup>2</sup> /kg) |
| Água da pasta de consistência normal (%)           | 28,6       | ***                      |
| Tempo de início de pega (h:min)                    | 03h35      | ≥ 1 h                    |
| Tempo de fim de pega (h:min)                       | 04h35      | ≤ 12 h (facultativo)     |
| Expansibilidade de Le Chatelier a quente (mm)      | 0,4        | ≤ 5 mm                   |
| Resistência à compressão na idade de 1 dia (MPa)   | 11,4       | ***                      |
| Resistência à compressão na idade de 3 dias (MPa)  | 21,6       | ≥ 10 MPa                 |
| Resistência à compressão na idade de 7 dias (MPa)  | 27,4       | ≥ 20 MPa                 |
| Resistência à compressão na idade de 28 dias (MPa) | 38,7       | ≥ 32 MPa                 |

Itapessoca, 17 maio de 2011

José Glaucio R. Uchôa  
Gerente GeralRegina Salvador  
Gestora da Qualidade

Assistência Técnica a Clientes - Eng.º Alexandre Tavares

Fone: (071) 3626.5502 Ramal: 5502 Telefax: (071) 3626.5502

E-mail: [awt@nassau.com.br](mailto:awt@nassau.com.br)

Certificado da Qualidade - Satisfação do Cliente

ENSAIOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO CIMENTO CP V ARI R5

Março-10

| Dia      | Composição Química |        |         |               | Resistência à Compressão |             |             |             | Finura               |                |           |           | Expandibilidade | Fogo         |           | Consist.   |
|----------|--------------------|--------|---------|---------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|----------------|-----------|-----------|-----------------|--------------|-----------|------------|
|          | P. Fogo (%)        | Ri (%) | SO3 (%) | CaO Livre (%) | 01 Dia MPa               | 03 Dias MPa | 07 Dias MPa | 28 Dias MPa | Massa Espec. (g/cm3) | Blaine (cm2/g) | # 325 (%) | # 200 (%) | Quente (mm)     | Início (min) | Fim (min) | Normal (%) |
| 01/03/10 | 3,23               | 1,09   | 3,29    | 1,21          | 19,42                    | 29,85       | 37,91       | 47,82       | 3,12                 | 4.110          | 2,80      | 0,10      | 0,33            | 140          | 200       | 29,70      |
| 02/03/10 | 3,89               | 1,21   | 3,25    | 1,29          | 19,80                    | 29,72       | 37,54       | 47,71       | 3,12                 | 4.100          | 2,00      | 0,10      | 0,33            | 145          | 210       | 29,80      |
| 03/03/10 | 3,87               | 1,19   | 3,40    | 1,26          | 19,47                    | 29,47       | 38,37       | 47,44       | 3,12                 | 4.240          | 2,00      | 1,00      | 0,50            | 145          | 205       | 29,80      |
| 04/03/10 | 4,18               | 1,35   | 3,49    | 1,38          | 19,67                    | 30,02       | 37,91       | 48,43       | 3,12                 | 4.100          | 1,80      | 0,10      | 0,33            | 150          | 210       | 29,80      |
| 05/03/10 | 4,05               | 1,39   | 3,55    | 1,44          | 19,90                    | 30,05       | 38,03       | 47,44       | 3,10                 | 4.180          | 1,90      | 0,10      | 0,50            | 145          | 205       | 29,80      |
| 06/03/10 |                    |        |         |               |                          |             |             |             |                      |                |           |           |                 |              |           |            |
| 07/03/10 |                    |        |         |               |                          |             |             |             |                      |                |           |           |                 |              |           |            |
| 08/03/10 | 3,78               | 1,31   | 3,44    | 1,44          | 19,57                    | 29,93       | 38,26       | 48,17       | 3,11                 | 4.090          | 2,30      | 0,10      | 0,65            | 145          | 205       | 29,90      |
| 09/03/10 | 4,17               | 1,35   | 3,31    | 1,61          | 19,80                    | 29,57       | 38,13       | 47,72       | 3,11                 | 3.990          | 2,20      | 0,10      | 0,65            | 140          | 200       | 29,80      |
| 10/03/10 | 3,19               | 1,28   | 3,52    | 2,07          | 19,54                    | 29,77       | 37,74       | 48,38       | 3,11                 | 4.180          | 2,20      | 0,10      | 0,50            | 140          | 200       | 29,80      |
| 11/03/10 | 4,04               | 1,35   | 3,44    | 1,90          | 19,85                    | 30,23       | 38,17       | 48,23       | 3,11                 | 4.280          | 2,60      | 0,15      | 0,50            | 140          | 205       | 30,00      |
| 12/03/10 | 4,00               | 1,52   | 3,30    | 1,61          | 20,12                    | 29,97       | 38,27       | 48,52       | 3,11                 | 4.300          | 2,20      | 0,10      | 0,65            | 145          | 210       | 29,80      |
| 13/03/10 |                    |        |         |               |                          |             |             |             |                      |                |           |           |                 |              |           |            |
| 14/03/10 |                    |        |         |               |                          |             |             |             |                      |                |           |           |                 |              |           |            |
| 15/03/10 | 3,89               | 1,47   | 3,21    | 1,32          | 19,80                    | 29,77       | 38,11       | 48,72       | 3,11                 | 4.180          | 2,00      | 0,10      | 0,33            | 150          | 210       | 29,80      |
| 16/03/10 | 4,04               | 1,31   | 3,18    | 0,97          | 19,55                    | 29,58       | 38,20       | 47,49       | 3,11                 | 4.130          | 2,20      | 0,10      | 0,50            | 145          | 205       | 29,90      |
| 17/03/10 | 3,79               | 0,89   | 2,84    | 0,88          | 19,25                    | 29,42       | 38,38       | 47,80       | 3,13                 | 4.110          | 2,00      | 0,10      | 0,50            | 145          | 205       | 29,80      |
| 18/03/10 | 4,07               | 1,23   | 3,30    | 1,15          | 19,17                    | 29,45       | 38,46       | 48,67       | 3,13                 | 4.050          | 2,00      | 0,10      | 0,33            | 140          | 205       | 29,70      |
| 19/03/10 | 4,05               | 1,35   | 3,21    | 1,72          | 19,87                    | 29,55       | 38,35       | 48,89       | 3,13                 | 4.180          | 2,40      | 0,10      | 0,65            | 145          | 205       | 29,80      |
| 20/03/10 |                    |        |         |               |                          |             |             |             |                      |                |           |           |                 |              |           |            |
| 21/03/10 |                    |        |         |               |                          |             |             |             |                      |                |           |           |                 |              |           |            |
| 22/03/10 | 4,38               | 1,47   | 3,29    | 2,07          | 20,12                    | 29,97       | 38,07       | 48,71       | 3,13                 | 4.020          | 1,90      | 0,10      | 0,50            | 145          | 200       | 29,80      |
| 23/03/10 | 3,92               | 1,22   | 3,27    | 1,84          | 20,37                    | 29,95       | 38,40       | 47,39       | 3,13                 | 4.070          | 1,90      | 0,10      | 0,65            | 140          | 200       | 29,70      |
| 24/03/10 | 3,78               | 0,94   | 3,40    | 1,14          | 20,20                    | 29,92       | 38,23       | 47,07       | 3,13                 | 4.140          | 2,40      | 0,10      | 0,50            | 140          | 205       | 29,70      |
| 25/03/10 | 3,85               | 1,15   | 3,37    | 1,43          | 19,90                    | 30,27       | 38,58       | 48,55       | 3,13                 | 4.110          | 2,60      | 0,15      | 0,50            | 145          | 205       | 29,80      |
| 26/03/10 | 4,50               | 1,59   | 3,35    | 1,90          | 20,37                    | 29,45       | 38,75       | 47,05       | 3,12                 | 4.380          | 2,10      | 0,10      | 0,50            | 140          | 210       | 30,00      |
| 27/03/10 |                    |        |         |               |                          |             |             |             |                      |                |           |           |                 |              |           |            |
| 28/03/10 |                    |        |         |               |                          |             |             |             |                      |                |           |           |                 |              |           |            |
| 29/03/10 | 4,31               | 1,58   | 3,27    | 1,72          | 20,10                    | 29,92       | 40,67       | 48,86       | 3,12                 | 4.210          | 2,20      | 0,15      | 0,33            | 150          | 210       | 30,00      |
| 30/03/10 | 3,79               | 1,52   | 3,27    | 1,09          | 20,05                    | 29,55       | 38,92       | 47,37       | 3,12                 | 4.190          | 2,00      | 0,10      | 0,50            | 145          | 210       | 30,00      |
| 31/03/10 | 4,00               | 1,51   | 3,08    | 1,25          | 20,40                    | 30,22       | 40,57       | 48,29       | 3,12                 | 4.140          | 2,10      | 0,10      | 0,50            | 140          | 210       | 30,00      |

Controle Estatístico

|        | R1    | R2    | R7      | R28  |        |        |        |       |      |         |      |       |      |      |      |       |
|--------|-------|-------|---------|------|--------|--------|--------|-------|------|---------|------|-------|------|------|------|-------|
| MÉDIA  | 3,94  | 1,32  | 3,31    | 1,47 | 19,84  | 29,81  | 38,57  | 47,41 | 3,12 | 4.147   | 2,15 | 0,15  | 0,49 | 144  | 205  | 29,84 |
| DESVIO | 0,31  | 0,19  | 0,15    | 0,33 | 0,33   | 0,26   | 0,54   | 0,62  | 0,01 | 89,02   | 0,23 | 0,19  | 0,12 | 3,44 | 3,79 | 0,10  |
| ABNT   | ≤ 6,5 | ≤ 1,0 | 3,5-4,0 |      | ≤ 11,0 | ≤ 24,0 | ≤ 34,0 |       |      | ≤ 3.000 |      | ≤ 8,0 | ≤ 5  | ≤ 60 |      |       |

## **APÊNDICE B – Análises químicas dos cimentos e agregados.**

|                        |         |         |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Report Date: 9/13/2010 |         |         |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| <b>Analyte Symbol</b>  | SiO2    | Al2O3   | Fe2O3(T) | MnO     | MgO     | CaO     | Na2O    | K2O     | TiO2    | P2O5    | LOI     | Total   |
| <b>Unit Symbol</b>     | %       | %       | %        | %       | %       | %       | %       | %       | %       | %       | %       | %       |
| <b>Detection Limit</b> | 0.01    | 0.01    | 0.01     | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.01    | 0.005   | 0.01    |         | 0.01    |
| <b>Analysis Method</b> | FUS-ICP | FUS-ICP | FUS-ICP  | FUS-ICP | FUS-ICP | FUS-ICP | FUS-ICP | FUS-ICP | FUS-ICP | FUS-ICP | FUS-ICP | FUS-ICP |
| CP II Z                | 25,31   | 5,92    | 2,43     | 0,02    | 3,92    | 53      | 0,59    | 1,84    | 0,235   | 0,49    | 6,34    | 100,1   |
| CP IV                  | 39,45   | 7,27    | 2,2      | 0,02    | 3,12    | 40,77   | 0,39    | 1,36    | 0,251   | 0,33    | 5,11    | 100,3   |
| CP V ARI               | 20,14   | 4,9     | 3,19     | 0,03    | 2,53    | 64,76   | 0,11    | 0,7     | 0,327   | 0,17    | 3,71    | 100,6   |
| I-1                    | 59,88   | 14,71   | 7,73     | 0,13    | 3,11    | 4,75    | 3       | 3,83    | 1,169   | 0,58    | 0,89    | 99,77   |
| J-1                    | 59,58   | 13,76   | 6,76     | 0,1     | 1,83    | 4,92    | 2,93    | 4,78    | 1,703   | 1,47    | 0,71    | 98,53   |
| V-1                    | 68,35   | 13,85   | 3,82     | 0,06    | 1,04    | 2,03    | 3       | 4,77    | 0,598   | 0,32    | 0,96    | 98,81   |
| V-2                    | 67,52   | 13,25   | 4,14     | 0,08    | 1,85    | 2,21    | 3,06    | 4,35    | 0,588   | 0,27    | 1       | 98,31   |



**APÊNDICE C – Fichas de caracterização mineralógica e análise petrográfica.**

## FICHA DE ANÁLISE PETROGRÁFICA DE AGREGADOS GRAÚDOS

| IDENTIFICAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Amostra: I-1.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Tipo: Fragmento de rocha                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Propriedades físico-mecânicas: Rocha muito coerente                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Cor: Cinza médio                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Textura: Fanerítica, equigranular, granulação fina, suavemente porfirítica (fenocristais de plagioclásio)                                                                                                                                                                                                                                         |
| Estrutura: Suavemente foliada                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Composição mineralógica:<br>Principal: Quartzo: 40%<br>Plagioclásio: 40%<br>Alcali-feldspato (microclina): 12%<br>Subordinada: Anfibólio: 3%<br>Titanita: 3%<br>Outros: 2% (opacos, zircão, apatita, minerais de alteração: epidoto, calcita, argila, sericita)<br>Deletérios: Quartzo deformado: 30%<br>Quartzo microgranular (< 0,15 mm): > 15% |
| Estado de alteração: Alterada; saussuritização e sericitização (sericita sódica derivada de alteração do plagioclásio)                                                                                                                                                                                                                            |
| Granulação: Submilimétrica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Ângulo de extinção ondulante do quartzo: 15° a 30°                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Porcentagem de quartzo microgranular: > 15%                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Texturas potencialmente reativas: Mirmequítica (intercrescimento vermiforme do quartzo dentro do plagioclásio)                                                                                                                                                                                                                                    |
| Microfissuração: Ausente. Os grãos por serem pequenos não se fissuram devido ao esforço na rocha.                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Tipo de rocha: Migmatítica (rocha intermediária entre ígnea e metamórfica)                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Classificação petrográfica: Migmatito; mesossoma cinzento, de protólito granodiorítico, a anfibólio                                                                                                                                                                                                                                               |
| Reatividade potencial álcali-agregado: Potencialmente reativo                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

## FICHA DE ANÁLISE PETROGRÁFICA DE AGREGADOS GRAÚDOS

| IDENTIFICAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Amostra: I-1.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Tipo: Fragmento de rocha                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Propriedades físico-mecânicas: Rocha muito coerente                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Cor: Cinza médio                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Textura: Fanerítica, inequigranular, porfírica, fina a média                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Estrutura: Foliada, bandada (gnáissica)                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Composição mineralógica:<br>Principal: Alkali-feldspato (microclina): 25%<br>Quartzo: 20%<br>Plagioclásio: 20%<br>Subordinada: Anfibólio verde: 20%<br>Biotita: 5%<br>Titanita: 4%<br>Opacos: 4%<br>Outros: 2% (epidoto, zircão, apatita)<br>Deletérios: Quartzo deformado: >15%<br>Quartzo microgranular (< 0,15 mm): 5% a 15% |
| Estado de alteração: Pouco alterada; retrometamorfismo: anfibólio alterando para biotita, clorita e epidoto                                                                                                                                                                                                                     |
| Granulação: Milimétrica; fenocristais porfíricos medem entre 0,5 cm e 1,0 cm                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Ângulo de extinção ondulante do quartzo: 15° a 30°                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Porcentagem de quartzo microgranular: 5% a 15%                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Texturas potencialmente reativas: intercrescimentos mirmequíticos, pertíticos e antipertíticos                                                                                                                                                                                                                                  |
| Microfissuração: Moderada                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Tipo de rocha: Metamórfica                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Classificação petrográfica: biotita-anfibólio-ortognaisse de protólito monzogranítico                                                                                                                                                                                                                                           |
| Reatividade potencial álcali-agregado: Potencialmente reativo                                                                                                                                                                                                                                                                   |

## FICHA DE ANÁLISE PETROGRÁFICA DE AGREGADOS GRAÚDOS

| IDENTIFICAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Amostra: J-1.1                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Tipo: Fragmento de rocha                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Propriedades físico-mecânicas: Rocha muito coerente                                                                                                                                                                                                                                            |
| CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Cor: Cinza                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Textura: Rocha metaplutonica, granodiorítica, inequigranular, fina a média, porfírica                                                                                                                                                                                                          |
| Estrutura: Foliada; bandada (gnáissica)                                                                                                                                                                                                                                                        |
| CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Composição mineralógica:<br>Principal: Plagioclásio: 30%<br>Quartzo: 20%<br>Alcali-feldspato: 15%<br>Biotita: 30%<br>Subordinada: Anfibólio: 3%<br>Outros: 2% (titanita, opacos, alanita, apatita e zircão)<br>Deletérios: Quartzo deformado: > 15%<br>Quartzo microgranular (< 0,15 mm): < 5% |
| Estado de alteração: Alterada; saussuritização e sericitização                                                                                                                                                                                                                                 |
| Granulação: Milimétrica (1,0 a 5,0 mm)                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Ângulo de extinção ondulante do quartzo: 15° a 30°                                                                                                                                                                                                                                             |
| Porcentagem de quartzo microgranular: < 5%                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Texturas potencialmente reativas: intercrescimentos mirmequíticos, pertíticos e antipertíticos                                                                                                                                                                                                 |
| Microfissuração: Moderada                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Tipo de rocha: Metamórfica                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Classificação petrográfica: Biotita-ortognaisse de protólito granodiorítico                                                                                                                                                                                                                    |
| Reatividade potencial álcali-agregado: Potencialmente inócuo                                                                                                                                                                                                                                   |

## FICHA DE ANÁLISE PETROGRÁFICA DE AGREGADOS GRAÚDOS

| IDENTIFICAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Amostra: J-1.2                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Tipo: Fragmento de rocha                                                                                                                                                                                                                                               |
| Propriedades físico-mecânicas: Rocha muito coerente                                                                                                                                                                                                                    |
| CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                          |
| Cor: Cinza                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Textura: rocha metaplutônica, inequigranular, porfírica, média a grossa (fenocristais de feldspato medem de 0,5cm a 1,5cm)                                                                                                                                             |
| Estrutura: Foliada; bandada (gnáissica)                                                                                                                                                                                                                                |
| CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                          |
| Composição mineralógica:<br>Principal: Plagioclásio: 25%<br>Alcali-feldspato: 25%<br>Quartzo: 20%<br>Biotita: 25%<br>Subordinada: Titanita: 3%<br>Outros: 2% (alanita, zircão, opacos)<br>Deletérios: Quartzo deformado: 20%<br>Quartzo microgranular (< 0,15 mm): <5% |
| Estado de alteração: Alterada; saussuritização e sericitização                                                                                                                                                                                                         |
| Granulação: média a grossa (0,5cm a 1,5cm); a maioria dos cristais de quartzo medem entre 0,30 mm e 0,90 mm                                                                                                                                                            |
| Ângulo de extinção ondulante do quartzo: > 30°                                                                                                                                                                                                                         |
| Porcentagem de quartzo microgranular: < 5%                                                                                                                                                                                                                             |
| Texturas potencialmente reativas: intercrescimentos mirmequíticos, pertíticos e antipertíticos                                                                                                                                                                         |
| Microfissuração: Forte                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Tipo de rocha: Metamórfica                                                                                                                                                                                                                                             |
| Classificação petrográfica: Biotita-ortognaisse, porfiroclástico, médio a grosso, de protólito monzogranítico porfírico médio a grosso.                                                                                                                                |
| Reatividade potencial álcali-agregado: Potencialmente inócuo                                                                                                                                                                                                           |

## FICHA DE ANÁLISE PETROGRÁFICA DE AGREGADOS GRAÚDOS

| IDENTIFICAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Amostra: V-1.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Tipo: Fragmento de rocha                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Propriedades físico-mecânicas: Rocha muito coerente                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Cor: Cinza-escuro                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Textura: Matriz milonítica dominante (cerca de 60% da rocha), cominuída (cisalhada), com micro-porfiroblastos de feldspáticos, medindo até 0,5 cm de tamanho.                                                                                                                                                        |
| Estrutura: a matriz da rocha e os porfiroblastos feldspáticos encontram-se alternados em estrutura foliada/bandada                                                                                                                                                                                                   |
| CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Composição mineralógica:<br>Principal: Matriz milonítica/filonítica: 60%<br>Porfiroblastos feldspáticos: 35%<br>Subordinada: Minerais máficos remanescentes: 5% (biotita residual, titanita, alanita, epidoto, opacos e granada)<br>Deletérios: Quartzo deformado: > 15%<br>Quartzo microgranular (< 0,15 mm): > 15% |
| Estado de alteração: Alterada; saussuritização e sericitização                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Granulação: fina a média                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Ângulo de extinção ondulante do quartzo: > 30°                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Porcentagem de quartzo microgranular: > 15%                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Texturas potencialmente reativas: Intercrescimentos mirmequíticos e pertíticos                                                                                                                                                                                                                                       |
| Microfissuração: Forte                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Tipo de rocha: Metamórfica dinâmica (alta pressão)                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Classificação petrográfica: Milonito microporfiroblástico                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Reatividade potencial álcali-agregado: potencialmente reativo                                                                                                                                                                                                                                                        |

## FICHA DE ANÁLISE PETROGRÁFICA DE AGREGADOS GRAÚDOS

| IDENTIFICAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Amostra: V-1.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Tipo: Fragmento de rocha                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Propriedades físico-mecânicas: Rocha muito coerente                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Cor: Rocha leucocrática, de filiação granítica, rosa-claro com bandas cinza                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Textura: porfiroblástica, protomilonítica, quartzosa                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Estrutura: foliada/bandada (gnáissica)/ protomilonítica, porfiroblástica, bandas quartzosas microgranulares recristalizadas                                                                                                                                                                                                                |
| CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Composição mineralógica:<br>Principal: Matriz milonítica: 20%<br>Porfiroblastos feldspáticos (microclina e plagioclásio): 40%<br>Bandas microgranulares de quartzo: 35%<br>Subordinada: Minerais máficos: 5% (biotita, titanita, opacos, alanita, epidoto)<br>Deletérios: Quartzo deformado: 35%<br>Quartzo microgranular (< 0,15 mm): 35% |
| Estado de alteração: Pouco alterada saussuritização nos plagioclásios; fraca sericitização nos alcali-Feldspatos                                                                                                                                                                                                                           |
| Granulação: média a grossa (porfiroblastos medem de 0,5 a 1,5 cm de comprimento)                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Ângulo de extinção ondulante do quartzo: > 30°                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Porcentagem de quartzo microgranular: 35%                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Texturas potencialmente reativas: Intercrescimentos mirmequíticos e pertíticos                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Microfissuração: Forte                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Tipo de rocha: metamórfica, metaplutônica granítica, félsica, dinâmica (alta pressão)                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Classificação petrográfica: ortogneisse leucocrático, granítico, bandado, foliado, protomilonítico, porfiroblástico médio a grosso                                                                                                                                                                                                         |
| Reatividade potencial álcali-agregado: Potencialmente reativo                                                                                                                                                                                                                                                                              |

## FICHA DE ANÁLISE PETROGRÁFICA DE AGREGADOS GRAÚDOS

| IDENTIFICAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Amostra: V-1.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Tipo: Fragmento de rocha                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Propriedades físico-mecânicas: Rocha muito coerente                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Cor: Rocha leucocrática, de filiação granítica, cinza, alternando com bandas rosadas                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Estrutura: Foliada/gnáissica, microporfiroblástica, protomilonítica                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Composição mineralógica:<br>Principal: Matriz milonítica 30%<br>Porfiroblastos feldspáticos (microclina e plagioclásio): 40%<br>Bandas microgranulares de quartzo: 20%<br>Subordinada: Máficos: 10% (biotita, titanita, opacos, alanita, epidoto, zircão)<br>Deletérios: Quartzo deformado: 20%<br>Quartzo microgranular (< 0,15 mm): 20 % |
| Estado de alteração: Medianamente alterada                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Granulação: Fina a média                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Ângulo de extinção ondulante do quartzo: >30°                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Porcentagem de quartzo microgranular: 20%                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Texturas potencialmente reativas: Intercrescimentos mirmequíticos, pertíticos e antipertíticos                                                                                                                                                                                                                                             |
| Microfissuração: Forte                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Tipo de rocha: Metamórfica, metaplutônica granítica, dinâmica (alta pressão)                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Classificação petrográfica: Biotita-ortogneisse bandado, protomilonítico, microporfiroblástico granítico                                                                                                                                                                                                                                   |
| Reatividade potencial álcali-agregado: Potencialmente reativo                                                                                                                                                                                                                                                                              |



## FICHA DE ANÁLISE PETROGRÁFICA DE AGREGADOS GRAÚDOS

| IDENTIFICAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Amostra: V-2.1                                                                                                                                                                                                                                           |
| Tipo: Fragmento de mão                                                                                                                                                                                                                                   |
| Propriedades físico-mecânicas: Rocha muito coerente                                                                                                                                                                                                      |
| CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                            |
| Cor: Cinza escuro                                                                                                                                                                                                                                        |
| Estrutura: Foliada/bandada (gnáissica), alternando bandas lepidomematoblásticas com bandas Granoblásticas                                                                                                                                                |
| CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                            |
| Composição mineralógica:<br>Principal: Horblenda: 33%<br>Plagioclásio: 30%<br>Biotita: 25%<br>Subordinada: Quartzo: 8%<br>Microclina: 2%<br>Outros: 2% (titanita, opacos, epidoto)<br>Deletérios: Quartzo deformado: < 5%<br>Quartzo microgranular: < 5% |
| Estado de alteração: Alterada; saussuritização: tanto a horblenda quanto o plagioclásio estão alterando para epidoto                                                                                                                                     |
| Granulação: Fina, submilimétrica                                                                                                                                                                                                                         |
| Ângulo de extinção ondulante do quartzo: < 15°                                                                                                                                                                                                           |
| Porcentagem de quartzo microgranular: < 5%                                                                                                                                                                                                               |
| Texturas potencialmente reativas: Ausente                                                                                                                                                                                                                |
| Microfissuração: Ausente                                                                                                                                                                                                                                 |
| Tipo de rocha: Metamórfica, metaplutônica, mesocrática                                                                                                                                                                                                   |
| Classificação petrográfica: biotita-anfibólio-ortognaisse quartzo-diorítico                                                                                                                                                                              |
| Reatividade potencial álcali-agregado: Potencialmente inócuo                                                                                                                                                                                             |

## FICHA DE ANÁLISE PETROGRÁFICA DE AGREGADOS GRAÚDOS

| IDENTIFICAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Amostra: V-2.2                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Tipo: fragmento de rocha                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente                                                                                                                                                                                                                              |
| CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Cor: Cinza claro com bandas rosadas alternadas com bandas cinza-escuras                                                                                                                                                                                                          |
| Estrutura: Foliada/bandada; bandas granoblásticas alongadas, protomilonítica                                                                                                                                                                                                     |
| CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Composição mineralógica:<br>Principal: Quartzo: 20%<br>Alcali-feldspato: 25%<br>Plagioclásio: 25%<br>Subordinada: Matriz milonítica: 20%<br>Máficos: 10% (biotita, opacos, apatita, zircão)<br>Deletérios: Quartzo deformado: 15%<br>Quartzo microgranular (< 0,15 mm): 5% a 15% |
| Estado de alteração: Pouco alterada                                                                                                                                                                                                                                              |
| Granulação: fina, submilimétrica                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Ângulo de extinção ondulante do quartzo: 15° a 30°                                                                                                                                                                                                                               |
| Porcentagem de quartzo microgranular: 5% a 15%                                                                                                                                                                                                                                   |
| Texturas potencialmente reativas: intercrescimentos mirmequíticos e pertíticos                                                                                                                                                                                                   |
| Microfissuração: Ausente                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Tipo de rocha: metamórfica, metaplutônica, granítica                                                                                                                                                                                                                             |
| Classificação petrográfica: Biotita-ortogneise, fino, leucocrático, protomilonítico, de protólito monzo-granítico                                                                                                                                                                |
| Reatividade potencial álcali-agregado: Potencialmente reativo                                                                                                                                                                                                                    |

**APÊNDICE D – Tabelas contendo a evolução das expansões médias percentuais das barras de argamassa obtidas nas idades avaliadas.**

| OS:                                 | Ensaio: | Data:      | Temperatura da sala de leitura |                       |                     |                             | Barra padrão (mm): |                                |
|-------------------------------------|---------|------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|
|                                     |         |            | Temp. água (°C): 23            |                       | Temp. sala (°C): 23 | Umidade: 53                 |                    |                                |
| 86                                  | 07-2010 | 26/04/2010 |                                |                       |                     |                             | 294,0              |                                |
| Agregado:                           |         | Registro:  | Rel. A/C:                      | Relação A/C - Equiv.: |                     | Consistência (%):           | Traço:             | Temp. da sala de leitura (°C): |
| Areia artificial - 1 vitória - (VI_ |         | 03459.10   | 0,47                           | -                     |                     | -                           | 1:2,25             |                                |
| Cimento:                            |         | Registro:  | Aditivo:                       | Registro:             | (%):                | Temp. da solução NaOH (°C): |                    | 23 +/- 2                       |
| CP II Z 32 -RS                      |         | 03456.10   | -                              | -                     | -                   | 80 +/- 2                    |                    |                                |
| Mat. Cimentício:                    |         | Registro:  | (%):                           | Executado:            |                     | Conferido:                  |                    | Responsável:                   |
| -                                   |         | -          | -                              | Tizzo/Danilo          |                     | Álvaro                      |                    |                                |
|                                     |         |            |                                |                       |                     |                             |                    | Elizabeth                      |

| Data da<br>Leitura | Idade<br>(dias) | Barra nº |       |       | Média individual das Idades das Leituras (mm) |       |       | Média das expansões (%)<br>das leituras (mm) |
|--------------------|-----------------|----------|-------|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------|
|                    |                 | 322      | 323   | 324   |                                               |       |       |                                              |
| 28/04/2010         | 2               | 4,055    | 2,856 | 3,010 | -                                             | -     | -     | -                                            |
| 30/04/2010         | 4               | 4,140    | 2,954 | 3,112 | 0,034                                         | 0,039 | 0,040 | 0,04                                         |
| 03/05/2010         | 7               | 4,320    | 3,120 | 3,276 | 0,105                                         | 0,105 | 0,106 | 0,11                                         |
| 07/05/2010         | 11              | 4,495    | 3,312 | 3,470 | 0,175                                         | 0,181 | 0,183 | 0,18                                         |
| 10/05/2010         | 14              | 4,608    | 3,425 | 3,592 | 0,219                                         | 0,226 | 0,231 | 0,23                                         |
| 12/05/2010         | 16              | 4,666    | 3,482 | 3,670 | 0,242                                         | 0,248 | 0,262 | 0,25                                         |
| 14/05/2010         | 18              | 4,720    | 3,530 | 3,707 | 0,264                                         | 0,267 | 0,277 | 0,27                                         |
| 17/05/2010         | 21              | 4,787    | 3,600 | 3,780 | 0,290                                         | 0,295 | 0,306 | 0,30                                         |
| 21/05/2010         | 25              | 4,869    | 3,692 | 3,874 | 0,323                                         | 0,332 | 0,343 | 0,33                                         |
| 24/05/2010         | 28              | 4,932    | 3,763 | 3,956 | 0,348                                         | 0,360 | 0,375 | 0,36                                         |
| 26/05/2010         | 30              | 4,960    | 3,794 | 3,984 | 0,359                                         | 0,372 | 0,387 | 0,37                                         |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
| Leituras Iniciais  |                 | 3,387    | 2,687 | 2,847 |                                               |       |       |                                              |

**OBS:**

| OS:                                              | Ensaio: | Data:                   | Temperatura da sala de leitura |                            |                     |                                         | Barra padrão (mm):        |                                |
|--------------------------------------------------|---------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
|                                                  |         |                         | Temp. água (°C): 23            |                            | Temp. sala (°C): 23 |                                         |                           | Umidade: 53                    |
| 86                                               | 08-2010 | 26/04/2010              |                                |                            |                     |                                         | 294,0                     |                                |
| Agregado:<br>Areia artificial - 1 vitória - (VI) |         | Registro:<br>03459-2010 | Rel. A/C:<br>0,47              | Relação A/C - Equiv.:<br>- |                     | Consistência (%):<br>-                  | Traço:<br>1:2,25          | Temp. da sala de leitura (°C): |
| Cimento:<br>CP IV 32 RS                          |         | Registro:<br>03457.10   | Aditivo:<br>-                  | Registro:<br>-             | (%):<br>-           | Temp. da solução NaOH (°C):<br>80 +/- 2 |                           |                                |
| Mat. Cimentício:<br>-                            |         | Registro:<br>-          | (%):<br>-                      | Executado:<br>Tizzo/Danilo |                     | Conferido:<br>Álvaro                    | Responsável:<br>Elizabeth |                                |

| Data da<br>Leitura | Idade<br>(dias) | Barra nº |       |       | Média individual das Idades das Leituras (mm) |       |       | Média das expansões (%)<br>das leituras (mm) |
|--------------------|-----------------|----------|-------|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------|
|                    |                 | 325      | 326   | 327   |                                               |       |       |                                              |
| 28/04/2010         | 2               | 2,766    | 2,390 | 4,104 | -                                             | -     | -     | -                                            |
| 30/04/2010         | 4               | 2,830    | 2,455 | 4,168 | 0,025                                         | 0,026 | 0,025 | 0,03                                         |
| 03/05/2010         | 7               | 2,866    | 2,500 | 4,200 | 0,040                                         | 0,044 | 0,038 | 0,04                                         |
| 07/05/2010         | 11              | 2,916    | 2,546 | 4,250 | 0,060                                         | 0,062 | 0,058 | 0,06                                         |
| 10/05/2010         | 14              | 2,964    | 2,626 | 4,297 | 0,079                                         | 0,094 | 0,077 | 0,08                                         |
| 12/05/2010         | 16              | 2,990    | 2,656 | 4,322 | 0,089                                         | 0,106 | 0,087 | 0,09                                         |
| 14/05/2010         | 18              | 3,020    | 2,676 | 4,342 | 0,101                                         | 0,113 | 0,094 | 0,10                                         |
| 17/05/2010         | 21              | 3,048    | 2,702 | 4,400 | 0,112                                         | 0,124 | 0,117 | 0,12                                         |
| 21/05/2010         | 25              | 3,092    | 2,713 | 4,425 | 0,129                                         | 0,128 | 0,127 | 0,13                                         |
| 24/05/2010         | 28              | 3,136    | 2,756 | 4,468 | 0,147                                         | 0,145 | 0,144 | 0,15                                         |
| 26/05/2010         | 30              | 3,158    | 2,780 | 4,480 | 0,156                                         | 0,155 | 0,149 | 0,15                                         |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
| Leituras Iniciais  |                 | 2,606    | 2,226 | 3,941 |                                               |       |       |                                              |

**OBS:**

| OS:                                 | Ensaio: | Data:      | Temperatura da sala de leitura |                       |                     |                             | Barra padrão (mm): |                                |
|-------------------------------------|---------|------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|
|                                     |         |            | Temp. água (°C): 23            |                       | Temp. sala (°C): 23 |                             |                    | Umidade: 53                    |
| 86                                  | 09-2010 | 26/04/2010 |                                |                       |                     |                             | 294,0              |                                |
| Agregado:                           |         | Registro:  | Rel. A/C:                      | Relação A/C - Equiv.: |                     | Consistência (%):           | Traço:             | Temp. da sala de leitura (°C): |
| Areia artificial - 1 vitória - (VI_ |         | 03459.10   | 0,47                           | -                     |                     | -                           | 1:2,25             |                                |
| Cimento:                            |         | Registro:  | Aditivo:                       | Registro:             | (%):                | Temp. da solução NaOH (°C): |                    | 23 +/- 2                       |
| CP V ARI- RS                        |         | 03458.10   | -                              | -                     | -                   | 80 +/- 2                    |                    |                                |
| Mat. Cimentício:                    |         | Registro:  | (%):                           | Executado:            |                     | Conferido:                  |                    | Responsável:                   |
| -                                   |         | -          | -                              | Tizzo                 |                     | Álvaro                      |                    | Elizabeth                      |

| Data da<br>Leitura | Idade<br>(dias) | Barra nº |       |       | Média individual das Idades das Leituras (mm) |       |       | Média das expansões (%)<br>das leituras (mm) |
|--------------------|-----------------|----------|-------|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------|
|                    |                 | 328      | 329   | 330   |                                               |       |       |                                              |
| 28/04/2010         | 2               | 2,260    | 2,915 | 3,755 | -                                             | -     | -     | -                                            |
| 30/04/2010         | 4               | 2,318    | 2,968 | 3,790 | 0,023                                         | 0,021 | 0,014 | 0,02                                         |
| 03/05/2010         | 7               | 2,422    | 3,077 | 3,900 | 0,064                                         | 0,064 | 0,058 | 0,06                                         |
| 07/05/2010         | 11              | 2,565    | 3,190 | 4,025 | 0,121                                         | 0,109 | 0,107 | 0,11                                         |
| 10/05/2010         | 14              | 2,656    | 3,294 | 4,136 | 0,157                                         | 0,150 | 0,151 | 0,15                                         |
| 12/05/2010         | 16              | 2,727    | 3,370 | 4,204 | 0,185                                         | 0,181 | 0,178 | 0,18                                         |
| 14/05/2010         | 18              | 2,798    | 3,430 | 4,270 | 0,213                                         | 0,204 | 0,204 | 0,21                                         |
| 17/05/2010         | 21              | 2,872    | 3,520 | 4,358 | 0,243                                         | 0,240 | 0,239 | 0,24                                         |
| 21/05/2010         | 25              | 2,980    | 3,622 | 4,465 | 0,286                                         | 0,281 | 0,282 | 0,28                                         |
| 24/05/2010         | 28              | 3,074    | 3,722 | 4,557 | 0,323                                         | 0,320 | 0,318 | 0,32                                         |
| 26/05/2010         | 30              | 3,110    | 3,766 | 4,590 | 0,337                                         | 0,338 | 0,331 | 0,34                                         |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
| Leituras Iniciais  |                 | 2,115    | 2,763 | 3,591 |                                               |       |       |                                              |

**OBS:**

| OS:                                 | Ensaio: | Data:      | Temperatura da sala de leitura |                       |                     |                             | Barra padrão (mm): |                                |
|-------------------------------------|---------|------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|
|                                     |         |            | Temp. água (°C): 23            |                       | Temp. sala (°C): 23 | Umidade: 53                 |                    |                                |
| 86                                  | 10-2010 | 26/04/2010 | 294,0                          |                       |                     |                             |                    |                                |
| Agregado:                           |         | Registro:  | Rel. A/C:                      | Relação A/C - Equiv.: |                     | Consistência (%):           | Traço:             | Temp. da sala de leitura (°C): |
| Areia artificial - 2 vitória - (V2) |         | 03460.10   | 0,47                           | -                     |                     | -                           | 1:2,25             |                                |
| Cimento:                            |         | Registro:  | Aditivo:                       | Registro:             | (%):                | Temp. da solução NaOH (°C): |                    | 23 +/- 2                       |
| CP II Z 32 - RS                     |         | 03456.10   | -                              | -                     | -                   | 80 +/- 2                    |                    |                                |
| Mat. Cimentício:                    |         | Registro:  | (%):                           | Executado:            |                     | Conferido:                  |                    | Responsável:                   |
| -                                   |         | -          | -                              | Tizzo                 |                     | Álvaro                      |                    | Elizabeth                      |

| Data da<br>Leitura | Idade<br>(dias) | Barra nº |       |       | Média individual das Idades das Leituras (mm) |       |       | Média das expansões (%)<br>das leituras (mm) |
|--------------------|-----------------|----------|-------|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------|
|                    |                 | 331      | 332   | 333   |                                               |       |       |                                              |
| 28/04/2010         | 2               | 4,915    | 1,495 | 2,010 | -                                             | -     | -     | -                                            |
| 30/04/2010         | 4               | 5,005    | 1,590 | 2,102 | 0,036                                         | 0,038 | 0,037 | 0,04                                         |
| 03/05/2010         | 7               | 5,132    | 1,720 | 2,234 | 0,086                                         | 0,089 | 0,089 | 0,09                                         |
| 07/05/2010         | 11              | 5,292    | 1,880 | 2,390 | 0,150                                         | 0,153 | 0,151 | 0,15                                         |
| 10/05/2010         | 14              | 5,290    | 1,980 | 2,484 | 0,149                                         | 0,192 | 0,188 | 0,18                                         |
| 12/05/2010         | 16              | 5,448    | 2,116 | 2,550 | 0,212                                         | 0,246 | 0,214 | 0,22                                         |
| 14/05/2010         | 18              | 5,500    | 2,166 | 2,602 | 0,232                                         | 0,266 | 0,235 | 0,24                                         |
| 17/05/2010         | 21              | 5,547    | 2,177 | 2,654 | 0,251                                         | 0,271 | 0,256 | 0,26                                         |
| 21/05/2010         | 25              | 5,627    | 2,228 | 2,736 | 0,283                                         | 0,291 | 0,288 | 0,29                                         |
| 24/05/2010         | 28              | 5,694    | 2,302 | 2,805 | 0,309                                         | 0,320 | 0,315 | 0,31                                         |
| 26/05/2010         | 30              | 5,736    | 2,336 | 2,842 | 0,326                                         | 0,334 | 0,330 | 0,33                                         |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
| Leituras Iniciais  |                 | 4,745    | 1,331 | 1,844 |                                               |       |       |                                              |

**OBS:**

| OS:                                 | Ensaio: | Data:      | Temperatura da sala de leitura |                       |                     |                             | Barra padrão (mm): |                                |
|-------------------------------------|---------|------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|
|                                     |         |            | Temp. água (°C): 23            |                       | Temp. sala (°C): 23 |                             |                    | Umidade: 53                    |
| 86                                  | 11-2010 | 26/04/2010 |                                |                       |                     |                             | 294,0              |                                |
| Agregado:                           |         | Registro:  | Rel. A/C:                      | Relação A/C - Equiv.: |                     | Consistência (%):           | Traço:             | Temp. da sala de leitura (°C): |
| Areia artificial - 2 vitória - (V2) |         | 03460.10   | 0,47                           | -                     |                     | -                           | 1:2,25             |                                |
| Cimento:                            |         | Registro:  | Aditivo:                       | Registro:             | (%):                | Temp. da solução NaOH (°C): |                    | 23 +/- 2                       |
| CP IV 32 - RS                       |         | 03457.10   | -                              | -                     | -                   | 80 +/- 2                    |                    |                                |
| Mat. Cimentício:                    |         | Registro:  | (%):                           | Executado:            |                     | Conferido:                  |                    | Responsável:                   |
| -                                   |         | -          | -                              | Tizzo                 |                     | Álvaro                      |                    | Elizabeth                      |

[illegible]

**OBS:**



| OS:                                 | Ensaio: | Data:      | Temperatura da sala de leitura |                       |                     |                             | Barra padrão (mm): |                                |
|-------------------------------------|---------|------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|
|                                     |         |            | Temp. água (°C): 23            |                       | Temp. sala (°C): 23 |                             |                    | Umidade: 53                    |
| 86                                  | 12-2010 | 26/04/2010 |                                |                       |                     |                             | 294,0              |                                |
| Agregado:                           |         | Registro:  | Rel. A/C:                      | Relação A/C - Equiv.: |                     | Consistência (%):           | Traço:             | Temp. da sala de leitura (°C): |
| Areia artificial - 2 vitória - (V2) |         | 03460.10   | 0,47                           | -                     |                     | -                           | 1:2,25             |                                |
| Cimento:                            |         | Registro:  | Aditivo:                       | Registro:             | (%):                | Temp. da solução NaOH (°C): |                    | 23 +/- 2                       |
| CP V ARI - RS                       |         | 03458-10   | -                              | -                     | -                   | 80 +/- 2                    |                    |                                |
| Mat. Cimentício:                    |         | Registro:  | (%):                           | Executado:            |                     | Conferido:                  |                    | Responsável:                   |
| -                                   |         | -          | -                              | Tizzo                 |                     | Álvaro                      |                    | Elizabeth                      |

[illegible]

**OBS:**

| OS:                                | Ensaio: | Data:      | Temperatura da sala de leitura |                       |                     |                             | Barra padrão (mm): |                                |
|------------------------------------|---------|------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|
|                                    |         |            | Temp. água (°C): 23            |                       | Temp. sala (°C): 23 | Umidade: 53                 |                    |                                |
| 86                                 | 13-2010 | 28/04/2010 | 294,0                          |                       |                     |                             |                    |                                |
| Agregado:                          |         | Registro:  | Rel. A/C:                      | Relação A/C - Equiv.: |                     | Consistência (%):           | Traço:             | Temp. da sala de leitura (°C): |
| Areia artificial - 3 ipojuca - (I) |         | 03461.10   | 0,47                           | -                     |                     | -                           | 1:2,25             |                                |
| Cimento:                           |         | Registro:  | Aditivo:                       | Registro:             | (%):                | Temp. da solução NaOH (°C): |                    | 23 +/- 2                       |
| CP II Z 32 - RS                    |         | 03456.10   | -                              | -                     | -                   | 80 +/- 2                    |                    |                                |
| Mat. Cimentício:                   |         | Registro:  | (%):                           | Executado:            |                     | Conferido:                  |                    | Responsável:                   |
| -                                  |         | -          | -                              | Tizzo                 |                     | Álvaro                      |                    | Elizabeth                      |

| Data da<br>Leitura | Idade<br>(dias) | Barra n° |       |       | Média individual das Idades das Leituras (mm) |       |       | Média das expansões (%)<br>das leituras (mm) |
|--------------------|-----------------|----------|-------|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------|
|                    |                 | 340      | 341   | 342   |                                               |       |       |                                              |
| 30/04/2010         | 2               | 2,545    | 2,130 | 2,600 | -                                             | -     | -     | -                                            |
| 03/05/2010         | 5               | 2,630    | 2,212 | 2,650 | 0,034                                         | 0,033 | 0,020 | 0,03                                         |
| 07/05/2010         | 9               | 2,740    | 2,320 | 2,740 | 0,077                                         | 0,075 | 0,056 | 0,07                                         |
| 10/05/2010         | 12              | 2,838    | 2,412 | 2,870 | 0,116                                         | 0,112 | 0,107 | 0,11                                         |
| 12/05/2010         | 14              | 2,882    | 2,456 | 2,920 | 0,134                                         | 0,129 | 0,127 | 0,13                                         |
| 14/05/2010         | 16              | 2,922    | 2,500 | 2,968 | 0,150                                         | 0,147 | 0,146 | 0,15                                         |
| 17/05/2010         | 19              | 2,964    | 2,540 | 2,994 | 0,166                                         | 0,163 | 0,156 | 0,16                                         |
| 21/05/2010         | 23              | 3,041    | 2,606 | 3,083 | 0,197                                         | 0,189 | 0,192 | 0,19                                         |
| 24/05/2010         | 26              | 3,100    | 2,662 | 3,142 | 0,220                                         | 0,211 | 0,215 | 0,22                                         |
| 26/05/2010         | 28              | 3,130    | 2,690 | 3,172 | 0,232                                         | 0,222 | 0,227 | 0,23                                         |
| 28/05/2010         | 30              | 3,140    | 2,700 | 3,188 | 0,236                                         | 0,226 | 0,233 | 0,23                                         |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
| Leituras Iniciais  |                 | 2.369    | 1.948 | 2.413 |                                               |       |       |                                              |

**OBS:**

| OS:                                | Ensaio: | Data:      | Temperatura da sala de leitura |                       |                     |                             | Barra padrão (mm): |                                |
|------------------------------------|---------|------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|
|                                    |         |            | Temp. água (°C): 23            |                       | Temp. sala (°C): 23 | Umidade: 53                 |                    |                                |
| 86                                 | 14-2010 | 28/04/2010 |                                |                       |                     |                             | 294,0              |                                |
| Agregado:                          |         | Registro:  | Rel. A/C:                      | Relação A/C - Equiv.: |                     | Consistência (%):           | Traço:             | Temp. da sala de leitura (°C): |
| Areia artificial - 3 ipojuca - (I) |         | 03461.10   | 0,47                           | -                     |                     | -                           | 1:2,25             |                                |
| Cimento:                           |         | Registro:  | Aditivo:                       | Registro:             | (%):                | Temp. da solução NaOH (°C): |                    | 23 +/- 2                       |
| CP IV 32 - RS                      |         | 03457.10   | -                              | -                     | -                   | 80 +/- 2                    |                    |                                |
| Mat. Cimentício:                   |         | Registro:  | (%):                           | Executado:            |                     | Conferido:                  |                    | Responsável:                   |
| -                                  |         | -          | -                              | Tizzo                 |                     | Álvaro                      |                    | Elizabeth                      |

| Data da<br>Leitura | Idade<br>(dias) | Barra nº |       |       | Média individual das Idades das Leituras (mm) |       |       | Média das expansões (%)<br>das leituras (mm) |
|--------------------|-----------------|----------|-------|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------|
|                    |                 | 343      | 344   | 345   |                                               |       |       |                                              |
| 30/04/2010         | 2               | 2,560    | 1,073 | 1,700 | -                                             | -     | -     | -                                            |
| 03/05/2010         | 5               | 2,614    | 1,130 | 1,754 | 0,021                                         | 0,023 | 0,021 | 0,02                                         |
| 07/05/2010         | 9               | 2,645    | 1,154 | 1,783 | 0,034                                         | 0,032 | 0,033 | 0,03                                         |
| 10/05/2010         | 12              | 2,675    | 1,183 | 1,818 | 0,046                                         | 0,044 | 0,047 | 0,05                                         |
| 12/05/2010         | 14              | 2,712    | 1,202 | 1,890 | 0,060                                         | 0,051 | 0,075 | 0,06                                         |
| 14/05/2010         | 16              | 2,714    | 1,206 | 1,894 | 0,061                                         | 0,053 | 0,077 | 0,06                                         |
| 17/05/2010         | 19              | 2,724    | 1,230 | 1,906 | 0,065                                         | 0,062 | 0,082 | 0,07                                         |
| 21/05/2010         | 23              | 2,772    | 1,285 | 1,924 | 0,084                                         | 0,084 | 0,089 | 0,09                                         |
| 24/05/2010         | 26              | 2,810    | 1,327 | 1,944 | 0,099                                         | 0,101 | 0,097 | 0,10                                         |
| 26/05/2010         | 28              | 2,828    | 1,340 | 1,958 | 0,106                                         | 0,106 | 0,102 | 0,10                                         |
| 28/05/2010         | 30              | 2,840    | 1,354 | 1,970 | 0,111                                         | 0,112 | 0,107 | 0,11                                         |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
| Leituras Iniciais  |                 | 2.405    | 0.908 | 1.538 |                                               |       |       |                                              |

**OBS:**

| OS:                                | Ensaio: | Data:      | Temperatura da sala de leitura |                       |                     |                             | Barra padrão (mm): |                                |
|------------------------------------|---------|------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|
|                                    |         |            | Temp. água (°C): 23            |                       | Temp. sala (°C): 23 |                             |                    | Umidade: 53                    |
| 86                                 | 15-2010 | 28/04/2010 |                                |                       |                     |                             | 294,0              |                                |
| Agregado:                          |         | Registro:  | Rel. A/C:                      | Relação A/C - Equiv.: |                     | Consistência (%):           | Traço:             | Temp. da sala de leitura (°C): |
| Areia artificial - 3 ipojuca - (I) |         | 03461.10   | 0,47                           | -                     |                     | -                           | 1:2,25             |                                |
| Cimento:                           |         | Registro:  | Aditivo:                       | Registro:             | (%):                | Temp. da solução NaOH (°C): |                    | 23 +/- 2                       |
| CP V ARI - RS                      |         | 03458.10   | -                              | -                     | -                   | 80 +/- 2                    |                    |                                |
| Mat. Cimentício:                   |         | Registro:  | (%):                           | Executado:            |                     | Conferido:                  |                    | Responsável:                   |
| -                                  |         | -          | -                              | Tizzo                 |                     | Álvaro                      |                    | Elizabeth                      |

| Data da<br>Leitura | Idade<br>(dias) | Barra nº |       |       | Média individual das Idades das Leituras (mm) |       |       | Média das expansões (%)<br>das leituras (mm) |
|--------------------|-----------------|----------|-------|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------|
|                    |                 | 346      | 347   | 348   |                                               |       |       |                                              |
| 30/04/2010         | 2               | 1,920    | 2,748 | 2,606 | -                                             | -     | -     | -                                            |
| 03/05/2010         | 5               | 1,940    | 2,775 | 2,630 | 0,008                                         | 0,011 | 0,010 | 0,01                                         |
| 07/05/2010         | 9               | 2,000    | 2,836 | 2,700 | 0,032                                         | 0,035 | 0,037 | 0,03                                         |
| 10/05/2010         | 12              | 2,066    | 2,894 | 2,756 | 0,058                                         | 0,058 | 0,060 | 0,06                                         |
| 12/05/2010         | 14              | 2,100    | 2,920 | 2,793 | 0,071                                         | 0,068 | 0,074 | 0,07                                         |
| 14/05/2010         | 16              | 2,145    | 2,962 | 2,838 | 0,089                                         | 0,085 | 0,092 | 0,09                                         |
| 17/05/2010         | 19              | 2,192    | 3,000 | 2,888 | 0,108                                         | 0,100 | 0,112 | 0,11                                         |
| 21/05/2010         | 23              | 2,268    | 3,093 | 2,977 | 0,138                                         | 0,137 | 0,147 | 0,14                                         |
| 24/05/2010         | 26              | 2,335    | 3,160 | 3,043 | 0,165                                         | 0,163 | 0,173 | 0,17                                         |
| 26/05/2010         | 28              | 2,362    | 3,190 | 3,076 | 0,175                                         | 0,175 | 0,187 | 0,18                                         |
| 28/05/2010         | 30              | 2,386    | 3,212 | 3,096 | 0,185                                         | 0,184 | 0,194 | 0,19                                         |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
| Leituras Iniciais  |                 | 1,752    | 2,580 | 2,443 |                                               |       |       |                                              |

**OBS:**

| OS:                                        | Ensaio: | Data:                 | Temperatura da sala de leitura |                            |                     |                                         | Barra padrão (mm):        |                                                |
|--------------------------------------------|---------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|
|                                            |         |                       | Temp. água (°C): 23            |                            | Temp. sala (°C): 23 | Umidade: 53                             |                           |                                                |
| 86                                         | 16-2010 | 28/04/2010            |                                |                            |                     |                                         | 294,0                     |                                                |
| Agregado:<br>Areia artificial (4) Jaboatão |         | Registro:<br>03462.10 | Rel. A/C:<br>0,47              | Relação A/C - Equiv.:<br>- |                     | Consistência (%):<br>-                  | Traço:<br>1:2,25          | Temp. da sala de leitura (°C):<br><br>23 +/- 2 |
| Cimento:<br>CP II Z 32 - RS                |         | Registro:<br>03456.10 | Aditivo:<br>-                  | Registro:<br>-             | (%):<br>-           | Temp. da solução NaOH (°C):<br>80 +/- 2 |                           |                                                |
| Mat. Cimentício:<br>-                      |         | Registro:<br>-        | (%):<br>-                      | Executado:<br>Tizzo        |                     | Conferido:<br>Álvaro                    | Responsável:<br>Elizabeth |                                                |

| Data da<br>Leitura | Idade<br>(dias) | Barra nº |       |       | Média individual das Idades das Leituras (mm) |       |       | Média das expansões (%)<br>das leituras (mm) |
|--------------------|-----------------|----------|-------|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------|
|                    |                 | 349      | 350   | 351   |                                               |       |       |                                              |
| 30/04/2010         | 2               | 2,777    | 1,767 | 1,598 | -                                             | -     | -     | -                                            |
| 03/05/2010         | 5               | 2,837    | 1,798 | 1,674 | 0,024                                         | 0,012 | 0,030 | 0,02                                         |
| 07/05/2010         | 9               | 2,883    | 1,840 | 1,710 | 0,042                                         | 0,029 | 0,044 | 0,04                                         |
| 10/05/2010         | 12              | 2,926    | 1,892 | 1,775 | 0,059                                         | 0,050 | 0,070 | 0,06                                         |
| 12/05/2010         | 14              | 2,945    | 1,902 | 1,783 | 0,067                                         | 0,054 | 0,073 | 0,06                                         |
| 14/05/2010         | 16              | 2,975    | 1,938 | 1,819 | 0,079                                         | 0,068 | 0,088 | 0,08                                         |
| 17/05/2010         | 19              | 2,982    | 1,950 | 1,828 | 0,081                                         | 0,073 | 0,091 | 0,08                                         |
| 21/05/2010         | 23              | 3,027    | 1,967 | 1,840 | 0,099                                         | 0,079 | 0,096 | 0,09                                         |
| 24/05/2010         | 26              | 3,060    | 2,003 | 1,870 | 0,112                                         | 0,094 | 0,108 | 0,10                                         |
| 26/05/2010         | 28              | 3,075    | 2,012 | 1,875 | 0,118                                         | 0,097 | 0,110 | 0,11                                         |
| 28/05/2010         | 30              | 3,080    | 2,027 | 1,888 | 0,120                                         | 0,103 | 0,115 | 0,11                                         |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
| Leituras Iniciais  |                 | 2,594    | 1,552 | 1,418 |                                               |       |       |                                              |

**OBS:**

| OS:                           | Ensaio: | Data:      | Temperatura da sala de leitura |                       |                     |                             | Barra padrão (mm): |                                |
|-------------------------------|---------|------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|
|                               |         |            | Temp. água (°C): 23            |                       | Temp. sala (°C): 23 | Umidade: 53                 |                    |                                |
| 86                            | 17-2010 | 28/04/2010 | 294,0                          |                       |                     |                             |                    |                                |
| Agregado:                     |         | Registro:  | Rel. A/C:                      | Relação A/C - Equiv.: |                     | Consistência (%):           | Traço:             | Temp. da sala de leitura (°C): |
| Areia artificial (4) Jaboatão |         | 03462.10   | 0,47                           | -                     |                     | -                           | 1:2,25             |                                |
| Cimento:                      |         | Registro:  | Aditivo:                       | Registro:             | (%):                | Temp. da solução NaOH (°C): |                    | 23 +/- 2                       |
| CP IV 32 - RS                 |         | 03457.10   | -                              | -                     | -                   | 80 +/- 2                    |                    |                                |
| Mat. Cimentício:              |         | Registro:  | (%):                           | Executado:            |                     | Conferido:                  |                    | Responsável:                   |
| -                             |         | -          | -                              | Tizzo                 |                     | Álvaro                      |                    |                                |
|                               |         |            |                                |                       |                     |                             |                    | Elizabeth                      |

| Data da<br>Leitura | Idade<br>(dias) | Barra nº |       |       | Média individual das Idades das Leituras (mm) |       |       | Média das expansões (%)<br>das leituras (mm) |
|--------------------|-----------------|----------|-------|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------|
|                    |                 | 352      | 353   | 354   |                                               |       |       |                                              |
| 30/04/2010         | 2               | 1,855    | 2,168 | 1,882 | -                                             | -     | -     | -                                            |
| 03/05/2010         | 5               | 1,912    | 2,222 | 1,940 | 0,023                                         | 0,021 | 0,023 | 0,02                                         |
| 07/05/2010         | 9               | 1,940    | 2,250 | 1,970 | 0,034                                         | 0,033 | 0,035 | 0,03                                         |
| 10/05/2010         | 12              | 1,960    | 2,270 | 1,990 | 0,042                                         | 0,040 | 0,043 | 0,04                                         |
| 12/05/2010         | 14              | 1,970    | 2,272 | 2,000 | 0,046                                         | 0,041 | 0,047 | 0,04                                         |
| 14/05/2010         | 16              | 1,994    | 2,296 | 2,022 | 0,055                                         | 0,051 | 0,056 | 0,05                                         |
| 17/05/2010         | 19              | 2,000    | 2,298 | 2,026 | 0,058                                         | 0,052 | 0,057 | 0,06                                         |
| 21/05/2010         | 23              | 2,019    | 2,321 | 2,052 | 0,065                                         | 0,061 | 0,067 | 0,06                                         |
| 24/05/2010         | 26              | 2,044    | 2,347 | 2,078 | 0,075                                         | 0,071 | 0,078 | 0,07                                         |
| 26/05/2010         | 28              | 2,054    | 2,357 | 2,088 | 0,079                                         | 0,075 | 0,082 | 0,08                                         |
| 28/05/2010         | 30              | 2,063    | 2,364 | 2,097 | 0,083                                         | 0,078 | 0,085 | 0,08                                         |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
| Leituras Iniciais  |                 | 1,690    | 1,996 | 1,758 |                                               |       |       |                                              |

**OBS:**

| OS:                                        | Ensaio: | Data:                 | Temperatura da sala de leitura |                            |                     |                                         | Barra padrão (mm):        |                                |
|--------------------------------------------|---------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
|                                            |         |                       | Temp. água (°C): 23            |                            | Temp. sala (°C): 23 |                                         |                           | Umidade: 53                    |
| 86                                         | 18-2010 | 28/04/2010            |                                |                            |                     |                                         | 294,0                     |                                |
| Agregado:<br>Areia artificial Jaboatão (4) |         | Registro:<br>03462.10 | Rel. A/C:<br>0,47              | Relação A/C - Equiv.:<br>- |                     | Consistência (%):<br>-                  | Traço:<br>1:2,25          | Temp. da sala de leitura (°C): |
| Cimento:<br>CP V ARI -RS                   |         | Registro:<br>03458.10 | Aditivo:<br>-                  | Registro:<br>-             | (%):<br>-           | Temp. da solução NaOH (°C):<br>80 +/- 2 |                           |                                |
| Mat. Cimentício:<br>-                      |         | Registro:<br>-        | (%):<br>-                      | Executado:<br>Tizzo        |                     | Conferido:<br>Álvaro                    | Responsável:<br>Elizabeth |                                |

| Data da<br>Leitura | Idade<br>(dias) | Barra n° |       |       | Média individual das Idades das Leituras (mm) |       |       | Média das expansões (%)<br>das leituras (mm) |
|--------------------|-----------------|----------|-------|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------|
|                    |                 | 355      | 356   | 357   |                                               |       |       |                                              |
| 30/04/2010         | 2               | 1,850    | 2,877 | 2,320 | -                                             | -     | -     | -                                            |
| 03/05/2010         | 5               | 1,866    | 2,890 | 2,336 | 0,006                                         | 0,005 | 0,006 | 0,01                                         |
| 07/05/2010         | 9               | 1,894    | 2,918 | 2,360 | 0,017                                         | 0,016 | 0,016 | 0,02                                         |
| 10/05/2010         | 12              | 1,919    | 2,937 | 2,388 | 0,027                                         | 0,024 | 0,027 | 0,03                                         |
| 12/05/2010         | 14              | 1,934    | 2,946 | 2,400 | 0,033                                         | 0,027 | 0,032 | 0,03                                         |
| 14/05/2010         | 16              | 1,958    | 2,970 | 2,432 | 0,043                                         | 0,037 | 0,044 | 0,04                                         |
| 17/05/2010         | 19              | 1,964    | 2,976 | 2,438 | 0,045                                         | 0,039 | 0,047 | 0,04                                         |
| 21/05/2010         | 23              | 1,995    | 3,012 | 2,453 | 0,058                                         | 0,054 | 0,053 | 0,05                                         |
| 24/05/2010         | 26              | 2,029    | 3,045 | 2,477 | 0,071                                         | 0,067 | 0,062 | 0,07                                         |
| 26/05/2010         | 28              | 2,042    | 3,050 | 2,488 | 0,076                                         | 0,069 | 0,067 | 0,07                                         |
| 28/05/2010         | 30              | 2,050    | 3,060 | 2,498 | 0,079                                         | 0,073 | 0,071 | 0,07                                         |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
|                    |                 |          |       |       |                                               |       |       |                                              |
| Leituras Iniciais  |                 | 1,683    | 2,707 | 2,151 |                                               |       |       |                                              |

**OBS:**

**APÊNDICE E – Gráficos contendo a evolução das expansões médias percentuais das barras de argamassa, obtidas nas idades avaliadas, incluindo sempre as idades de 16 e 30 dias.**



