

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Ana Carolina Kamura de Lucca**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: EFEITO DO  
USO DE CINZA VOLANTE**

Porto Alegre  
junho 2010

**ANA CAROLINA KAMURA DE LUCCA**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: EFEITO  
DO USO DE CINZA VOLANTE**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin**  
**Coorientadora: Fernanda Macedo Pereira**

Porto Alegre  
junho 2010

**ANA CAROLINA KAMURA DE LUCCA**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: EFEITO  
DO USO DE CINZA VOLANTE**

Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de julho de 2010

Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. pela USP  
Orientadora

Profa. Fernanda Macedo Pereira  
Dra. pela UFRGS  
Coorientadora

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Ana Paula Kirchheim (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)**  
Dra. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

**Profa. Fernanda Macedo Pereira (Cientec/Ulbra)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Francieli Tiecher Bonsembiante (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

À minha mãe e ao meu pai por acreditarem em mim.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela minha vida, pelas oportunidades durante minha caminhada e pelos dons dos quais disponho.

À professora Denise Dal Molin, que em meio a tantos compromissos, ajudou-me se dispondo em orientar tão sabiamente este trabalho. Pela segurança em suas explicações e pela confiança depositada de que eu seria capaz de realizar uma pesquisa bem sucedida.

À Fernanda Macedo Pereira pelo estímulo, pelo empenho e pela paciência durante a orientação e, principalmente, por acreditar no meu potencial e despertar em mim o espírito científico. Agradeço, também, pela amizade e pelos momentos de descontração durante o estágio.

À professora Carin pela dedicação e pela disponibilidade em guiar este e os demais trabalhos de conclusão do curso.

Ao Fernando Recena pela colaboração e pelas imprescindíveis e valiosas recomendações ao longo da pesquisa. Por quem tenho grande admiração, meu sincero reconhecimento.

À Cientec pelo apoio para o desenvolvimento do programa experimental.

Às concreteiras Concrepedra, Engemix, Polimix e Supermix pela doação dos materiais utilizados no estudo.

Ao Nelson Postal pela ajuda na realização das atividades de laboratório.

Aos colegas do Departamento de Materiais de Construção Civil da Cientec.

Aos meus pais, meus tesouros, pelo apoio e amor incondicional.

Aos companheiros de apartamento, Thereza e meu irmão, Rafael, pelo convívio e pela paciência em me ouvirem falar sobre esta pesquisa mesmo sem serem da área.

Por fim, aos amigos Miguel, Xico, Marília, Natasha, Pedro e Menega, pela amizade, pelo carinho e pela compreensão em relação à ausência durante o desenvolvimento do trabalho.

Somos o que fazemos, mas somos, principalmente, o que  
fazemos para mudar o que somos.

*Eduardo Galeano*

## RESUMO

DE LUCCA, A. C. K. **Reação álcali-agregado:** efeito do uso de cinza volante. 2010. 95 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A reação álcali-agregado, dividida em reação álcali-sílica, álcali-silicato e álcali-carbonato, acontece no interior do concreto e pode ser explicada como uma reação química entre álcalis, provenientes principalmente do cimento, e alguns minerais reativos presentes no agregado. O produto gerado pode deteriorar a estrutura de concreto, pois tem caráter expansivo na presença de umidade, acarretando, deste modo, expansão, fissuração, redução da resistência, como também, aumento da permeabilidade do elemento. Medidas preventivas como, por exemplo, utilizar cimentos com baixo teor de álcalis e agregados não reativos e evitar a presença de umidade nem sempre são possíveis. Tem-se, então, empregado satisfatoriamente adições minerais como substituição parcial do cimento Portland na prevenção da reação expansiva. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal a determinação do teor de substituição de cimento Portland por cinza volante, eficiente na redução dos efeitos deletérios da reação álcali-agregado em concretos fabricados na região de Porto Alegre/RS. Desta forma, o programa de pesquisa compreendeu primeiramente a realização de ensaios de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado (NBR 15577-4/08), moldadas com cimento Portland tipo CP V-ARI e três amostras de agregados. Os resultados comprovaram a reatividade potencial das amostras de areia de rio e de brita basáltica, enquanto a de brita granítica manteve seu comportamento inócuo durante o ensaio. Em seguida, com a amostra de brita basáltica, classificada como a mais reativa, foram moldadas barras de argamassa com CP V-ARI e diferentes teores de cinzas volantes de finuras distintas em substituição parcial ao cimento, para a verificação da mitigação da expansão de acordo com a NBR 15577-5/08. A correlação entre os teores de substituição de cimento Portland por cinza volante e a redução da reação expansiva foi analisada, evidenciando a eficiência da adição em combater esse tipo de reação e, mostrando que com teores de 15% já é possível reduzir os efeitos da expansão para limites recomendados pela NBR 15577-1/08.

Palavras-chave: agregados reativos, cinza volante, reação álcali-agregado.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa .....   | 19 |
| Figura 2: bloco de fundação num edifício comercial em Recife/PE com a superfície superior intensamente fissurada devido à reação álcali-agregado .....  | 23 |
| Figura 3: estrutura original da sílica .....  | 24 |
| Figura 4: troca dos íons alcalinos por prótons do grupo silanol .....   | 24 |
| Figura 5: ataque às ligações do grupo siloxano .....  | 25 |
| Figura 6: difusão de íons alcalinos na estrutura interna da sílica (gel de álcali-sílica) ....  | 25 |
| Figura 7: troca de íons alcalinos por íons cálcio (formação de um gel não expansivo de cal-álcali-sílica) .....   | 26 |
| Figura 8: distribuição dos íons alcalinos na borda de reação .....  | 26 |
| Figura 9: fissuras em forma de mapa em um pavimento de concreto .....   | 32 |
| Figura 10: fissuras em uma viga super armada .....  | 32 |
| Figura 11: fissuras em uma coluna levemente protendida .....  | 33 |
| Figura 12: bloco de fundação com fissuras mapeadas na face superior e alinhadas com a armadura na face lateral .....  | 33 |
| Figura 13: desalinhamento da crista do paramento de uma barragem .....  | 34 |
| Figura 14: desalinhamento de juntas .....   | 34 |
| Figura 15: exsudação de gel .....   | 34 |
| Figura 16: <i>pop-out</i> .....   | 35 |
| Figura 17: cinzas volantes .....  | 44 |
| Figura 18: representação esquemática do programa experimental .....   | 50 |
| Figura 19: locais de origem dos agregados utilizados no trabalho .....  | 52 |
| Figura 20: frações granulométricas do agregado para ensaio .....  | 61 |
| Figura 21: britador de mandíbula .....  | 62 |
| Figura 22: colocação do agregado na argamassadeira .....  | 62 |
| Figura 23: (a) primeira camada de argamassa; (b) adensamento da primeira camada; (c) segunda camada de argamassa; (d) adensamento da segunda camada; (e) regularização da superfície; (f) moldagem finalizada ..... | 63 |
| Figura 24: acondicionamento das fôrmas com os corpos-de-prova em câmara úmida ....  | 64 |
| Figura 25: (a) leitura com paquímetro; (b) leitura com extensômetro .....   | 64 |
| Figura 26: (a) armazenamento dos corpos-de-prova em recipientes plásticos, contendo água ou solução alcalina; (b) armazenamento em estufa a 80°C .....  | 64 |
| Figura 27: corpos-de-prova após ensaio .....  | 67 |



## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1: efeito do valor do pH na taxa de desdolomitização e expansão de prismas de rochas carbonáticas reativas .....                           | 31 |
| Gráfico 2: classificação do comportamento da reação em função da relação entre os álcalis disponíveis e o consumo de cimento no concreto .....     | 37 |
| Gráfico 3: comportamento péssimo para relação água/cimento de 0,4, relação agregado/cimento de 2,75 e teor de álcalis de 6 kg/m <sup>3</sup> ..... | 39 |
| Gráfico 4: efeito da umidade relativa na expansão do concreto devido à reação álcali-sílica .....  | 41 |
| Gráfico 5: distribuição granulométrica da Cinza F .....  | 56 |
| Gráfico 6: distribuição granulométrica da Cinza M .....  | 57 |
| Gráfico 7: distribuição granulométrica da Cinza G .....  | 57 |
| Gráfico 8: difratogramas por raios-X das cinzas volantes .....   | 59 |
| Gráfico 9: evolução das expansões dos corpos-de-prova sem adição .....   | 66 |
| Gráfico 10: evolução da redução da expansão pela Cinza F .....   | 68 |
| Gráfico 11: evolução da redução da expansão pela Cinza M .....   | 68 |
| Gráfico 12: evolução da redução da expansão pela Cinza G .....   | 69 |
| Gráfico 13: expansão aos 16 dias devido aos teores de cinzas .....   | 69 |
| Gráfico 14: expansão aos 30 dias devido aos teores de cinzas .....   | 70 |
| Gráfico 15: evolução das expansões com teor de 5% de cinza volante .....   | 71 |
| Gráfico 16: evolução das expansões com teor de 15% de cinza volante .....  | 72 |
| Gráfico 17: evolução das expansões com teor de 30% de cinza volante .....  | 72 |
| Gráfico 18: evolução das expansões com teor de 45% de cinza volante .....  | 73 |
| Gráfico 19: evolução das expansões em todos teores de cinza volante .....  | 74 |
| Gráfico 20: efeito isolado do tipo de cinza na expansão aos 16 dias .....  | 75 |
| Gráfico 21: efeito isolado do teor de cinza na expansão aos 16 dias .....  | 76 |
| Gráfico 22: efeito da interação entre o teor e o tipo de cinza na expansão aos 16 dias ...   | 76 |
| Gráfico 23: efeito isolado do tipo de cinza na expansão aos 30 dias .....  | 77 |
| Gráfico 24: efeito isolado do teor de cinza na expansão aos 30 dias .....  | 77 |
| Gráfico 25: efeito da interação entre o teor e o tipo de cinza na expansão aos 30 dias ...   | 78 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1: agregados potencialmente reativos .....   | 39 |
| Quadro 2: origem dos agregados utilizados .....   | 52 |
| Quadro 3: caracterização química do cimento utilizado .....                                       | 53 |
| Quadro 4: caracterização física do cimento utilizado .....  | 54 |
| Quadro 5: caracterização mecânica do cimento utilizado .....                                      | 54 |
| Quadro 6: caracterização química das cinzas volantes utilizadas .....                             | 55 |
| Quadro 7: massa específica e superfície específica Blaine das cinzas volantes<br>utilizadas ..... | 56 |
| Quadro 8: caracterização granulométrica das cinzas volantes .....                                 | 58 |
| Quadro 9: granulometria requerida do material para ensaio .....                                   | 61 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: análise de variância para expansões aos 16 dias .....                   | 75 |
| Tabela 2: análise de variância para expansões aos 30 dias .....                   | 76 |
| Tabela 3: comparação múltipla de médias das expansões pelo método de Duncan ..... | 78 |

## LISTA DE SIGLAS

ANOVA: análise de variância

ARI: alta resistência inicial

ASTM: American Society for Testing and Materials

Cientec: Fundação de Ciência e Tecnologia

CP: cimento Portland

N: normal

NBR: Norma Brasileira Regulamentada

pH: potencial de hidrogênio

RAA: reação álcali-agregado

RS: Rio Grande do Sul

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UH: umidade relativa

US: *United States*

## LISTA DE FÓRMULAS QUÍMICAS

$\text{Ca}^{2+}$ : cátion cálcio

$\text{CaCO}_3$ : carbonato de cálcio (calcita)

$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ : carbonato de cálcio e magnésio (dolomita)

$\text{CaO}$ : óxido de cálcio

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ : hidróxido de cálcio (portlandita)

Ca/Si: relação cálcio-sílica

$\text{CO}_3^{2-}$ : carbonato

C-S-H: silicato hidratado de cálcio

$\text{H}^-$ : ânion hidrogênio

$\text{K}^+$ : cátion potássio

$\text{K}_2\text{O}$ : óxido de potássio

KOH: hidróxido de potássio

$\text{Mg}(\text{OH})_2$ : hidróxido de magnésio (brucita)

$\text{Na}^+$ : cátion sódio

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

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

NaOH: hidróxido de sódio

$\text{OH}^-$ : ânion hidróxido (hidroxila)

$\text{SiO}_2$ : sílica

SiOH: silanol

Si-O-Si: ligações do grupo siloxano

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                  | 15 |
| <b>2 MÉTODO DE PESQUISA</b> .....          | 17 |
| 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....              | 17 |
| 2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....            | 17 |
| <b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....      | 17 |
| <b>2.2.2 Objetivos secundários</b> .....   | 17 |
| 2.3 HIPÓTESE .....                         | 18 |
| 2.4 PRESSUPOSTOS .....                     | 18 |
| 2.5 PREMISSAS .....                        | 18 |
| 2.6 DELIMITAÇÕES .....                     | 18 |
| 2.7 LIMITAÇÕES .....                       | 19 |
| 2.8 DELINEAMENTO DA PESQUISA .....         | 19 |
| <b>3 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO</b> .....      | 21 |
| 3.1 HISTÓRICO .....                        | 21 |
| 3.2 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO .....  | 23 |
| <b>3.2.1 Reação álcali-sílica</b> .....    | 24 |
| <b>3.2.2 Reação álcali-silicato</b> .....  | 29 |
| <b>3.2.3 Reação álcali-carbonato</b> ..... | 30 |
| 3.3 MANIFESTAÇÕES DA REAÇÃO .....          | 31 |
| 3.4 FATORES INFLUENTES .....               | 35 |
| <b>3.4.1 Teor de álcalis</b> .....         | 36 |
| <b>3.4.2 Agregados</b> .....               | 38 |
| <b>3.4.3 Umidade</b> .....                 | 41 |
| <b>3.4.4 Temperatura</b> .....             | 41 |
| <b>3.4.5 Adições ativas</b> .....          | 42 |
| 3.5 MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO .....          | 46 |
| <b>3.5.1 Análise petrográfica</b> .....    | 46 |
| <b>3.5.2 Método químico</b> .....          | 47 |
| <b>3.5.3 Método Osipov</b> .....           | 47 |
| <b>3.5.4 Método das barras</b> .....       | 47 |
| <b>3.5.5 Método acelerado</b> .....        | 48 |
| <b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....       | 49 |
| 4.1 VARIÁVEIS .....                        | 50 |

|  |    |
|--|----|
| <b>4.1.1 Variáveis independentes</b> .....   | 50 |
| <b>4.1.2 Variável dependente</b> .....   | 51 |
| <b>4.2 MATERIAIS</b> .....   | 52 |
| <b>4.2.1 Agregados</b> .....   | 52 |
| <b>4.2.2 Cimento</b> .....   | 53 |
| <b>4.2.3 Cinzas volantes</b> .....   | 54 |
| <b>4.2.4 Água</b> .....  | 60 |
| <b>4.3 MÉTODOS</b> .....   | 60 |
| <b>4.3.1 Avaliação da reatividade potencial dos agregados pelo método acelerado</b> .....  | 60 |
| <b>4.3.2 Verificação da redução da expansão pelo método acelerado</b> .....  | 65 |
| <b>5 RESULTADOS</b> .....  | 66 |
| <b>5.1 REATIVIDADE POTENCIAL DOS AGREGADOS</b> .....   | 66 |
| <b>5.2 REDUÇÃO DA EXPANSÃO PELO USO DE TEORES DE CINZAS VOLANTES</b> .....   | 68 |
| <b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....  | 80 |
| <b>6.1 POTENCIALIDADE REATIVA DOS AGREGADOS</b> .....  | 81 |
| <b>6.2 REDUÇÃO DA RAA PELO USO DE CINZAS VOLANTES</b> .....  | 81 |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 83 |
| <b>APÊNDICE A – Resultados das leituras das expansões das barras de argamassa das amostras de agregados com os teores de cinzas utilizados</b> ..... | 86 |





## 1 INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto é um assunto que tem gerado muitos avanços na sua área tecnológica. Dentre as possíveis causas da sua redução, pode-se citar a reatividade álcali-agregado (RAA), comumente identificada em estruturas de concreto em contato com a água, tais como: barragens, pontes e fundações. Ocorre pela reação entre hidróxidos alcalinos, presentes no concreto, com agregados reativos. Dessa reação resulta um gel expansivo que pode acarretar fissuras, tornando o concreto mais suscetível a manifestações patológicas.

Como ainda não se tem um método eficaz de recuperar as estruturas atacadas por esse tipo de patologia, a melhor maneira seria prevenir a provável expansão com o uso de um cimento com baixo teor de álcalis, o emprego de agregados inertes ou evitar a difusão da umidade. Uma vez que nem sempre são possíveis tais soluções, pode-se fazer o emprego de adições ativas como a escória de alto forno, a cinza volante, o metacaulim e a sílica ativa em teores tais que mitiguem a reação álcali-agregado.

Neste contexto, recentemente, no Brasil, notou-se a grande demanda pelo ensaio que investiga a reatividade álcali-agregado. Isso ocorreu tanto pelo lançamento da norma que especifica tal ensaio (NBR 15577-4/2008: Agregados – reatividade álcali-agregado – parte 4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado), como pela preocupação no meio técnico com a verificação da potencialidade reativa dos agregados utilizados na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS.

O presente trabalho analisou agregados potencialmente reativos utilizados nesta região, buscando avaliar a influência da substituição de teores de cimento Portland por cinza volante, conforme a norma NBR 15577-5/08 (Agregados – reatividade álcali-agregado – parte 5: determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado). A cinza volante é um dos resíduos da queima do carvão, uma adição amplamente disponível no RS e frequentemente utilizada em algumas centrais dosadoras de concreto e em fábricas de cimento. Além de minimizar tal manifestação patológica, é uma alternativa mais sustentável.

A estrutura da pesquisa foi dividida em seis capítulos. No **segundo capítulo** encontram-se a questão da pesquisa, os objetivos, a hipótese, os pressupostos, as premissas, as delimitações,

as limitações e o delineamento do estudo. O **terceiro capítulo** apresenta uma breve revisão sobre a reação álcali-agregado, suas manifestações, seus fatores influentes e os métodos para sua investigação. O **quarto capítulo** aborda o programa experimental, expondo as variáveis independentes e de resposta (dependentes), a caracterização dos materiais utilizados e o método empregado. No **quinto capítulo** são dispostos os resultados, bem como sua análise e discussão. Por fim, no **sexto capítulo** está contida a conclusão.

## **2 MÉTODO DE PESQUISA**

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual teor de substituição de cimento Portland por cinza volante é eficaz na redução da reação álcali-agregado em concretos usados na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal deste trabalho é a determinação do teor de substituição de cimento Portland por cinza volante capaz de mitigar a reação álcali-agregado em concretos produzidos na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários deste trabalho são, considerando-se materiais utilizados na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS:

- a) verificação da reatividade álcali-agregado de agregados;
- b) verificação da reatividade álcali-agregado de agregados reativos em concretos com diferentes teores de cinzas volantes em substituição ao cimento Portland;

- c) verificação da influência do teor de substituição de cimento Portland por cinza volante na mitigação da reação álcali-agregado em concretos;
- d) verificação da influência da superfície específica da cinza volante na mitigação da reação álcali-agregado em concretos produzidos na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que um teor de 30% de substituição de cimento Portland por cinza volante é eficaz na mitigação da reação álcali-agregado em concretos de cimento Portland usados na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS.

## 2.4 PRESSUPOSTOS

A expansão máxima das barras de argamassa no ensaio, apresentada na NBR 15577-1/08 – Agregados – reatividade álcali-agregado – parte 1: guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto –, é considerada válida e foi utilizada como referência para definir os agregados potencialmente deletérios.

## 2.5 PREMISSAS

Os agregados utilizados na produção de concretos não devem reagir e ocasionar expansões, pois podem comprometer a durabilidade da estrutura.

## 2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho se delimitou à realização de ensaios com agregados utilizados na Região Metropolitana de Porto Alegre/RS.

## 2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a utilização de um cimento tipo CP V-ARI como o de referência;
- b) o uso de cinzas volantes de superfícies específicas diferentes utilizadas na região.

## 2.8 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O delineamento do trabalho abrangeu as seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- c) avaliação da reatividade de agregados;
- c) análise experimental com diferentes teores de substituição de cimento Portland por cinzas volantes de diferentes superfícies específicas;
- d) análise dos resultados obtidos;
- e) conclusões.

Uma representação esquemática do delineamento é apresentada na figura 1.

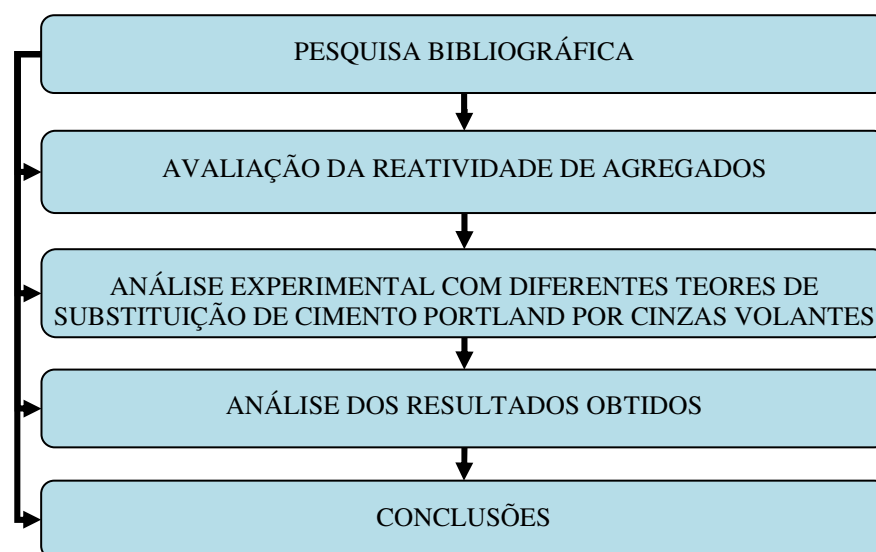


Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa

Para responder a questão de pesquisa, buscou-se realizar a **pesquisa bibliográfica**, com o objetivo de estudar a reação álcali-agregado e a influência da cinza volante nessa reação. É importante lembrar que essa etapa permaneceu ativa durante todo o desenvolvimento do trabalho, a fim de servir como auxílio nas etapas seguintes. Na sequência, realizou-se uma **avaliação da reatividade de agregados**, visando identificar agregados potencialmente deletérios utilizados na região de acordo com a NBR 15577-1/08.

Com a identificação dos agregados potencialmente deletérios, foi selecionado um agregado para a realização da **análise experimental com diferentes teores de substituição de cimento Portland por cinzas volantes** de diferentes superfícies específicas. Essa etapa consistiu em ensaios de reatividade potencial segundo a NBR 15577-5/08.

Na etapa **análise dos resultados obtidos**, os dados coletados nos ensaios foram avaliados e comparados, com a finalidade de se verificar a influência dos teores de substituição. Por fim, estabeleceram-se as **conclusões** da pesquisa.

### 3 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado figura como uma das causas da redução da durabilidade das estruturas de concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2008, p. 170), ela consiste em reações químicas envolvendo os álcalis e hidroxilas da pasta de cimento Portland e agregados reativos, podendo produzir expansões e fissurações do concreto e acarretar a perda de resistência e módulo de deformação.

Os próximos itens deste estudo apresentam os primeiros registros dessa reação, mostrando a importância do seu estudo. Em seguida, são abordados os seus diferentes tipos e manifestações, para, então, ser contemplada a influência de fatores como a alcalinidade do concreto, os minerais presentes nos agregados, a umidade, a temperatura e o uso de adições minerais. Por fim, são feitas referências a alguns métodos de investigação da reação álcali-agregado que auxiliam na análise da viabilidade de utilização de materiais empregados na produção de concreto.

#### 3.1 HISTÓRICO

Os primeiros registros de anomalias em estruturas de concreto associadas à reação álcali-agregado ocorreram na Califórnia nos anos 1920 a 1930. As estruturas afetadas passaram a apresentar o desenvolvimento de fissuras, expansões e exsudações de gel poucos anos após sua construção. Então, a partir da moldagem de corpos-de-prova com os materiais constituintes das estruturas danificadas, Stanton observou sintomas análogos e, por meio de análises químicas, propôs, em 1940, que a manifestação patológica resultava da expansão de um gel, gerado pelas reações entre os álcalis do cimento e a sílica reativa presente no agregado. Ainda, verificou um equivalente alcalino máximo do cimento de 0,6% para a não ocorrência de efeitos deletérios, fazendo com que a *US Bureau of Reclamation*, em 1941, limitasse para esse teor os álcalis do cimento, com o intuito de atenuar os danos decorrentes da reação (HOBBS, 1988, p. 2-3). No mesmo ano, Blanks e Meissner contribuíram com as constatações de Stanton quando observaram fissurações e deteriorações da estrutura de concreto da barragem Parker Dam devido à reação álcali-agregado (POOLE, 1992, p. [17]).

Depois da descoberta da reação álcali-agregado, muitas pesquisas passaram a ser desenvolvidas em diversos países a fim de investigar o fenômeno. Os principais objetivos partiam da identificação dos componentes minerais dos agregados possivelmente reativos, passando pelos mecanismos e controle da reação até os diagnósticos, ensaios e análises dos efeitos da mesma. Dentre os pesquisadores, três merecem destaque pelas suas contribuições de singular importância: Swenson, do Canadá, Idorn, da Dinamarca e Vivian, da Austrália (POOLE, 1992, p. [17]). Entretanto, segundo Prizskulnik (2005, p. 1017), mesmo depois da publicação de Stanton sobre a potencialidade reativa dos agregados, um grande número de técnicos continuou a classificá-los como inertes.

O Brasil teve como precursores Gitahy<sup>1</sup> (1963) e Ruiz<sup>2</sup> (1963), os quais relataram os primeiros estudos sobre a reação e desenvolveram soluções para a construção da Barragem de Jupuíá, no rio Paraná, entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. Frente à identificação da reatividade potencial do agregado utilizado, os autores especificaram um material pozolânico para a produção do concreto, com a finalidade de impedir a reação expansiva (PRISZKULNIK, 2005, p. 1017-1018). Porém, somente no ano de 1985 foi publicado o primeiro caso em barragem: Usina Hidroelétrica Apolônio Sales de Oliveira (Moxotó), desativada após a verificação de atrito entre as pás das turbinas e a estrutura devido às expansões (DECHICHI, 1998, p. 1). Andrade (1997, p. 17.2-17.3) cita alguns casos posteriores de ocorrência de danos nas barragens:

- a) de Joanes II, na Bahia;
- b) Ilha dos Pombos, no estado do Rio de Janeiro;
- c) de Peti, em Minas Gerais;
- d) de Furnas, em Minas Gerais.

Embora, até então no País, a reação tenha se concentrado em estruturas de obras hidráulicas (grandes maciços de concreto), em 2004 foi observada a ocorrência em blocos de fundações de um edifício residencial em Recife/PE. Então, a partir de 2005, frente à constatação da

---

<sup>1</sup> GITAHY, H. S. O Problema dos Agregados para os Concretos da Barragem de Jupuíá. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1963. Publicação n. 692.

<sup>2</sup> RUIZ, M. D. Geologia Aplicada à Barragem de Jupuíá (Sistema Urubupungá). São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1963. Publicação n. 699.



reatividade potencial dos agregados utilizados, o meio técnico passou a investigar outros casos na região. A figura 2 ilustra uma dessas ocorrências (ANDRADE, 2006).



Figura 2: bloco de fundação num edifício comercial em Recife/PE com a superfície superior intensamente fissurada devido à reação álcali-agregado (ANDRADE, 2006, p. 5)

Visto a complexidade da reação, muitos pesquisadores, no Brasil, tem estudado o fenômeno. Dentre eles, Paulon (1981) explicou o seu mecanismo, Valduga (2002) mapeou agregados reativos do estado de São Paulo, Hasparik (1999) e Munhoz (2007) analisaram a eficácia de adições em reduzir a reação e Tiecher, por sua vez, empregou diferentes tipos de cimentos para verificar a diminuição da expansão.

### 3.2 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado é subdividida em três tipos de reações (ANDRADE, 1997, p. 17.4; GILLOTT, 1975, p. 303; HOBBS, 1988, p. 1):

- a) álcali-sílica;
- b) álcali-silicato;
- c) álcali-carbonato.

Essas reações serão descritas nos itens subsequentes.

### 3.2.1 Reação álcali-sílica

A reação álcali-sílica mostra-se como a mais conhecida e frequente. Ela é referida como a reação entre íons alcalinos ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), provenientes da solução dos poros do concreto, e a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), presente em alguns agregados (THALMANN et al., 2001, p. 19). Sendo que essa sílica (figura 3) pode estar presente nas fases (VALDUGA, 2002, p. 17):

- amorfa: forma mais desordenada e reativa, encontrada, por exemplo, em calcedônias;
- vítrea: alguns tipos de vidros naturais, como os vulcânicos;
- microcristalina;
- cristalizada metaestável: cristobalitas e tridimitas.

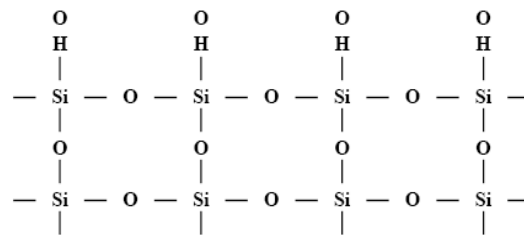


Figura 3: estrutura original da sílica  
(WANG; GILLOTT, 1991, p. 650)

Wang e Gillott (1991, p. 649-650) descrevem a reação álcali-sílica. Explicam que primeiramente o grupo silanol ( $\text{SiOH}$ ), presente na superfície da sílica, é atacado pelos álcalis  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e/ou  $\text{Ca}^{2+}$ . Ocorre, então, a associação dos álcalis  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  aos íons  $\text{H}^-$  e a troca de prótons do grupo silanol por  $\text{Ca}^{2+}$  (figura 4).

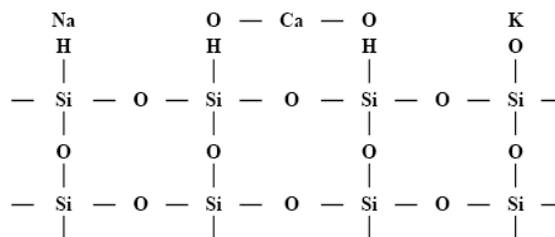


Figura 4: troca dos íons alcalinos por prótons do grupo silanol  
(WANG; GILLOTT, 1991, p. 650)

Logo em seguida, os hidróxidos (NaOH e KOH) quebram as ligações do grupo siloxano (Si-O-Si). Desta forma, surge um grupo silanol na estrutura interna da sílica (figura 5) (WANG; GILLOTT, 1991, p. 651).

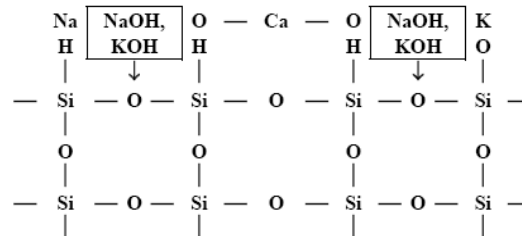


Figura 5: ataque às ligações do grupo siloxano (WANG; GILLOTT, 1991, p. 650)

Após, há a difusão de íons alcalinos na estrutura interna da sílica. Forma-se, então, um gel de álcali-sílica (figura 6) (WANG; GILLOTT, 1991, p. 651).

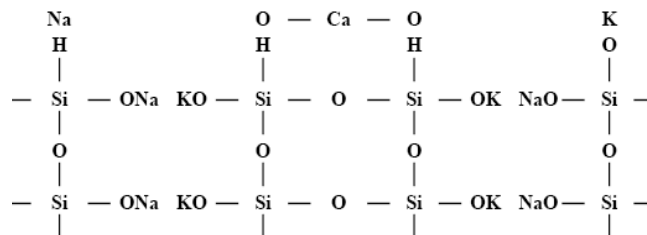


Figura 6: troca de prótons por íons alcalinos no interior dos grupos silanol (gel de álcali-sílica) (WANG; GILLOTT, 1991, p. 650)

Por fim, ocorre a troca de íons alcalinos por íons cálcio e a formação de um gel não expansivo de cal-álcali-sílica (figura 7), uma vez que a expansão causada pelo gel de álcali-sílica origina mais espaço, aumentando a capacidade dos íons cálcio atingirem os locais da reação. Então, como a ligação Ca-O possui muito mais força, ocorre a liberação de íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  disponíveis para a produção de mais produtos expansivos (WANG; GILLOTT, 1991, p. 651).

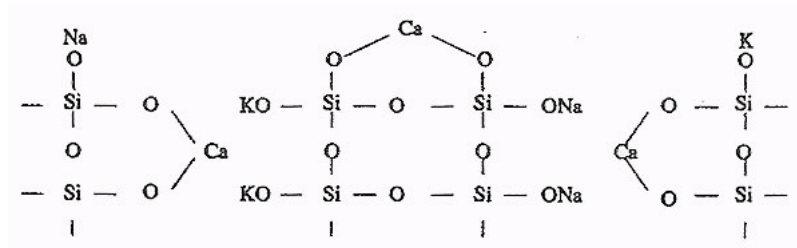


Figura 7: troca de íons alcalinos por íons cálcio (formação de um gel não expansivo de cal-álcali-sílica) (WANG; GILLOTT, 1991, p. 650)

Resumidamente, a reação se desencadeará com a hidrólise da sílica ativa pela hidroxila OH<sup>-</sup>, formando um gel de álcali-sílica. Então, esse gel, uma vez que é higroscópico, sofre absorção de água, aumentando de volume (POOLE, 1992, p. [21-22]).

Wang e Gillott (1991, p. 652-653) demonstram o padrão da borda de reação na superfície do agregado pelas concentrações de íons alcalinos (figura 8). A concentração de íons cálcio deve ser alta na parte externa da borda e deve decrescer em direção ao interior devido a sua baixa taxa de difusão.

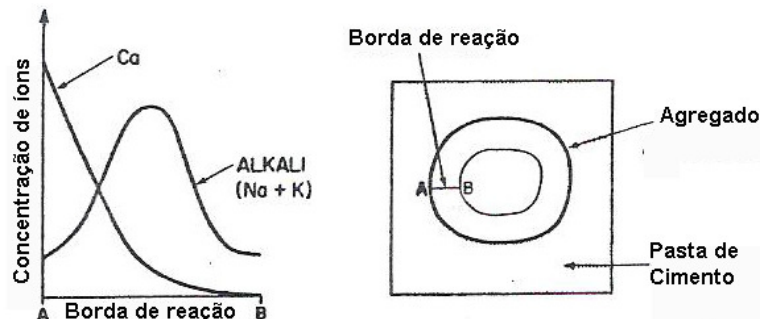
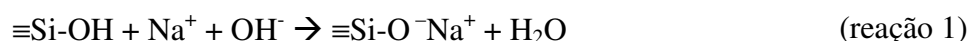


Figura 8: distribuição dos íons alcalinos na borda de reação (WANG; GILLOTT, 1991, p. 653)

Prezzi et al. (1997) propõem um modelo teórico baseado no modelo de Gouy-Chapman, que explica a floculação e inchamento das argilas e outros materiais porosos quando em contato com soluções elétricas. Os autores atribuem a expansão do gel ao inchamento causado por forças repulsivas de uma dupla camada elétrica, formada por íons oxigênio e alcalinos, uma vez que estes não possuem capacidade de formar ligações fortes com aqueles. A reação dessa dupla camada por ser expressa pela reação 1:



Os autores relacionam, também, as valências dos álcalis à maior ou menor capacidade de expansão dos produtos. Para uma mesma concentração, álcalis monovalentes, como o  $\text{Na}^+$  e o  $\text{K}^+$ , produzem uma dupla camada mais espessa e com maiores forças de repulsão na presença de água que álcalis bivalentes como o  $\text{Ca}^{2+}$ . Além disso, comprovam a teoria por ensaios acelerados, realizados de acordo com a ASTM C 1260, por Wang<sup>3</sup>. Comparam, então, a expansão das barras de argamassa com a composição dos géis da reação, onde as maiores expansões mostraram-se ligadas às maiores concentrações de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  e às menores relações  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  (PREZZI et al., 1997).

Urhan (1987, p. 141) explica o mecanismo da reação, onde os íons  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{OH}^-$  da pasta de cimento são adsorvidos pela sílica. Ocorre, então, a dissolução da superfície da sílica pelas hidroxilas e a adsorção de íons  $\text{Ca}^{2+}$ , uma vez que estes são mais reativos, para a formação de silicato hidratado de cálcio (C-S-H). A dissolução só termina quando a taxa de cristalização do C-S-H for maior que a da dissolução da sílica, podendo, desta maneira, ser formado C-S-H na sua superfície. Caso contrário, a dissolução continua e  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  podem penetrar, levando ao desenvolvimento do gel de álcali-sílica.

Apenas a presença do gel de álcali-sílica não caracteriza a fissuração do concreto, mas a resposta físico-química às reações (NEVILLE, 1997, p. 158). Conforme, também, explica Forum (1965, p. 164), o gel pode ou não ser expansivo, devendo-se o efeito à concentração de cal ou de álcalis. Se a concentração de cálcio for superior à de álcalis, haverá a formação de um gel não expansivo de cal-álcali-sílica, do contrário, se a concentração de álcalis for maior, um gel expansivo de álcali-sílica se formará.

Entretanto, estudos de Thomas et al. (1991) mostraram que inicialmente o gel formado na reação é rico em  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  e pobre em  $\text{Ca}^{2+}$ , além de ser relativamente fluido e ter a capacidade de se dispersar por entre os poros da pasta de cimento. Entretanto, quando os álcalis do gel são trocados por íons  $\text{Ca}^{2+}$ , é gerado um gel mais viscoso e com menor

---

<sup>3</sup> WANG, K. **Expansion-related concrete deterioration: interaction between microstructure, chemistry and performance.** 1994. Dissertation (PhD in Civil Engineering). University of California, Berkeley.

capacidade de se dissipar. Então, o inchamento desse gel leva a maiores tensões, acarretando a ruptura.

Chatterji (1979, p. 187-188) explica que a presença de  $\text{Ca(OH)}_2$  livre é essencial para o desenvolvimento da reação expansiva e que a sua falta suprime a reação deletéria. Wang e Gillott (1991, p. 653-654) comprovam por ensaios em barras de argamassa e indicam que o  $\text{Ca(OH)}_2$  é prejudicial por atuar como uma barreira, mantendo alto o pH dos poros, e por liberar íons  $\text{Ca}^{2+}$  que podem ser trocados por  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , permitindo que estes possam produzir mais produtos expansivos.

Thomas e Bleszynski (1998, p. 72-78) também demonstram que a disponibilidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  influencia no desenvolvimento da reação. Além disso, revelaram a presença de três composições distintas de gel de sílica: rico em cálcio, em sódio e potássio. O gel rico em cálcio foi encontrado na periferia dos agregados reativos, sendo que a sua presença evidencia a abundância de  $\text{Ca(OH)}_2$ . No interior dessa camada, foi achado um gel amorfo rico em sódio, seguido de um gel cristalino rico em potássio. A formação dessa camada rica em cálcio impede a dispersão do gel rico em sódio pela matriz cimentícia, pois atua como uma membrana semipermeável, permitindo a entrada de hidróxidos alcalinos, mas não a saída dos produtos aquosos.

Entretanto, Glasser (1992, p. [68]) explica que o pH é controlado pelo equilíbrio entre  $\text{Ca(OH)}_2$ , C-S-H e a fase aquosa, além desse equilíbrio ser independente da quantidade individual das fases. Sendo assim, fixando os outros fatores, a redução do  $\text{Ca(OH)}_2$  não afeta o pH, somente podendo acontecer pela sua eliminação total.

Segundo Andrade (1997, p. 17.5), a pasta de cimento desempenha uma função de membrana osmótica, permitindo a entrada de água da solução para o gel, mas não a sua saída. Então, como o gel é capaz de atrair moléculas aquosas (higroscópico), possui a consequente tendência a aumentar de volume, exercendo pressões hidráulicas.

Glasser (1992, p. [65]) afirma que as propriedades de embebição do gel são confundidas com a osmose. Mesmo esta podendo em menor parte ocorrer, o termo físico-químico apropriado que governa as propriedades de inchamento e contração do gel é a embebição. Além disso, alega que não são os álcalis os desencadeadores da reação, explicando que o seu condicionamento está ligado à concentração de hidroxilas e à suscetibilidade dos agregados.

Além disso, Dechichi (1998, p. 2) salienta que o desencadeamento da reação começará apenas quando a solução estiver suficientemente alcalina, ou seja, quando a concentração de hidroxilas na solução dos poros do concreto for capaz de manter a reação ativa.

### 3.2.2 Reação álcali-silicato

A reação álcali-silicato ocorre entre álcalis provenientes do cimento e silicatos (VALDUGA, 2002, p. 18). Hobbs (1988, p. 1) explica que estes minerais podem sofrer esfoliações, tornando-se capazes de expandir devido à absorção de água.

Os minerais capazes de provocar a reação álcali-silicato geralmente possuem retículo deformado, como é o caso do quartzo que mesmo considerado termodinamicamente estável, quando submetido a tensões de origem geológica, pode ter sua estrutura deformada. Logo, a potencialidade reativa também é capaz de ser avaliada em função do grau de deformação do mineral (ANDRADE, 1997). Então, conforme Glasser (1992, p. [51-52]), a suscetibilidade à reação se configura na presença de quartzos e/ou cristais de silicatos deformados (pela propensão ao ataque alcalino) e de quartzos microcristalinos (pela maior superfície específica).

A reação álcali-silicato assemelha-se à reação álcali-sílica, porém se desenvolve mais lentamente devido à maior disseminação dos minerais reativos no retículo cristalino. Essa semelhança torna difícil identificar o tipo de reação, pois existe, também, a possibilidade de se verificar o produto da reação álcali-sílica no interior do concreto (POOLE, 1992, p. [19]). Sendo assim, exige-se prudência na interpretação de resultados que podem vir a ocultar a presença da reação.

Mesmo a reação álcali-sílica ser considerada a mais frequente, no Brasil, conforme Valduga (2002, p. 18), a reação álcali-silicato figura como a mais encontrada no Brasil. O fato se deve à maior parte das barragens atacadas por essa reação ter sido construída com agregados procedentes de quartzitos, granitos e gnaisses.

### 3.2.3 Reação álcali-carbonato

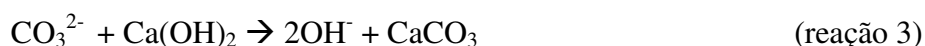
De acordo com Poole (1992, p. [18-19]), muitos tipos de reação álcali-carbonato foram relatadas, mas nem todas se apresentaram expansivas ou deletérias. As reações podem ser classificadas conforme o tipo de borda ou produtos de reação, ou seja, reações:

- a) carbonáticas com agregados calcíticos, distinguidas pelas bordas de reação escuras que se desenvolvem ao redor das partículas dos agregados;
- b) com agregados dolomíticos, caracterizadas pelas distintas reações ao redor do agregado;
- c) envolvendo agregados dolomíticos finos com calcita e argila intersticiais, diferenciadas pela ocorrência de desdolomitização e por ser a única capaz de produzir expansão significativa.

A reação álcali-carbonato se configura como a reação entre alguns agregados dolomíticos e hidróxidos contidos na solução dos poros do concreto, vindo a ocasionar desdolomitização (HOBBS, 1988, p. 2). Entretanto, não há nessa reação a formação de gel expansivo como na reação álcali-sílica (ANDRADE, 1997, p. 17.6). Deng e Tang (1993, p. 1398) apresentam a reação da desdolomitização (reação 2):



A desdolomitização se descreve como a reação da dolomita com hidróxidos alcalinos, formando calcita, brucita e  $\text{CO}_3^{2-}$ . Os cristais de calcita e brucita formados são finos e circundados de vácuo. Em seguida, o  $\text{CO}_3^{2-}$  reage com a portlandita, formando nova calcita e hidróxidos alcalinos. Essa reação continua até o consumo total da dolomita como mostra a reação 3 (DENG; TANG, 1993, p. 1400-1406):



Hobbs (1988, p. 3) afirma que o volume dos produtos da reação é menor que dos reagentes. Sugere, deste modo, que a expansão ocorre devido à presença de uma pequena quantidade de



argila nos cristais dolomíticos, onde a presença de água é oculta, expondo-se apenas quando a desdolomitização ocorre. Por conseguinte, a argila absorve moléculas aquosas, induzindo pressões suficientes a fissurar o concreto.

Conforme estudos de Deng e Tang (1993, p. 1400-1401), a desdolomitização e a expansão devido à reação álcali-carbonato são dependentes do pH. O gráfico 1 mostra que os fenômenos se processam bem lentamente ou mesmo nem ocorrem quando o pH é suficientemente baixo e praticamente se anulam quando este é menor que 12. Então, como as curvas mostram a similaridade, pode-se dizer que a expansão ocorre somente quando há a desdolomitização e quanto maior o grau de desdolomitização, maior a expansão. Segundo Tiecher (2006, p. 40), não existem no Brasil casos registrados desse tipo de reação.

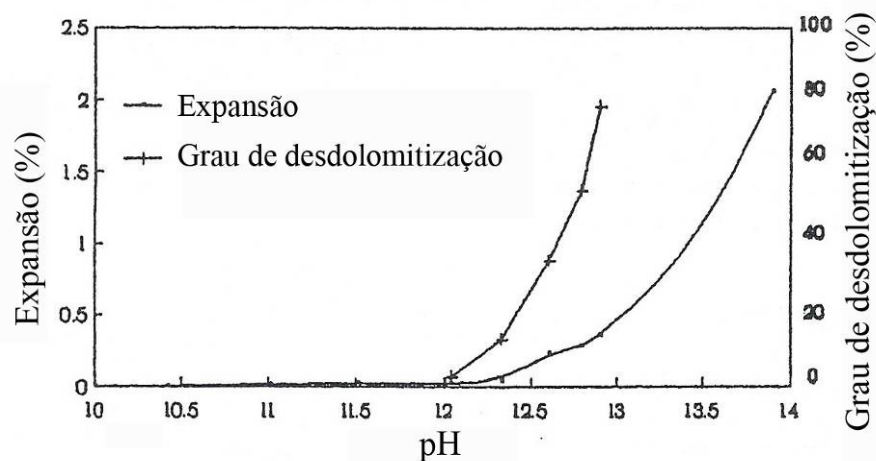


Gráfico 1: efeito do valor do pH na taxa de desdolomitização e expansão de prismas de rochas carbonáticas reativas (DENG; TANG, 1993, p. 1401)

### 3.3 MANIFESTAÇÕES DA REAÇÃO

As estruturas afetadas pela reação álcali-sílica podem apresentar ao menos um dos tipos de manifestações (POOLE, 1992, p. [37]):

- a) fissuras;
- b) expansão e/ou desalinhamento dos elementos estruturais;
- c) exsudação de gel;

d) lascamentos, denominados *pop-outs*.

A observação mais comum é o desenvolvimento de fissuras na superfície do concreto. As fissuras podem ocorrer em forma de mapa, quando o elemento não está sujeito a tensões direcionadas (figura 9 e 10) e alinhadas com a armadura, quando há tensões pré-existentes (figuras 11) (POOLE, 1992, p. [37]). Como também, o elemento pode apresentar a combinação dos dois tipos (figura 12).

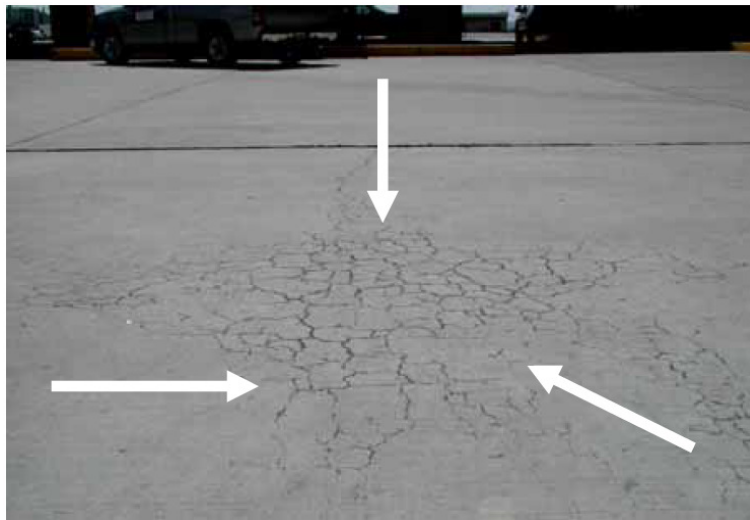


Figura 9: fissuras em forma de mapa em um pavimento de concreto (SARKAR et al., 2009, p. 2-15)



Figura 10: fissuras em uma viga super armada (HOBBS, 1988, p. 17)



Figura 11: fissuras em uma coluna levemente protendida (HOBBS, 1988, p. 17)



Figura 12: bloco de fundação com fissuras mapeadas na face superior e alinhadas com a armadura na face lateral (ANDRADE, 2006, p. 8)

O desalinhamento é outro caso típico de manifestação. A estrutura pode apresentar o desalinhamento de seus elementos estruturais (figura 13) (POOLE, 1992, p. [38]), como também, o de juntas (figura 14) (SARKAR et al., 2009, p. 2-8).

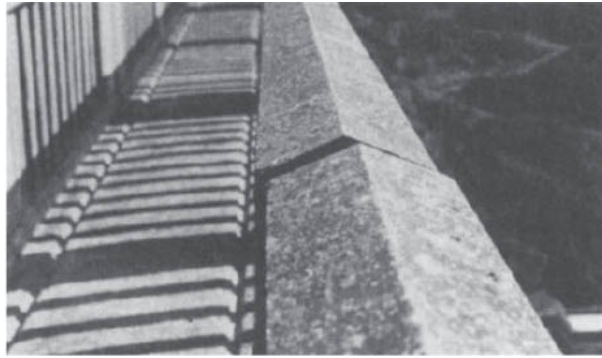


Figura 13: desalinhamento da crista do paramento de uma barragem (POOLE, 1992, p. [39])

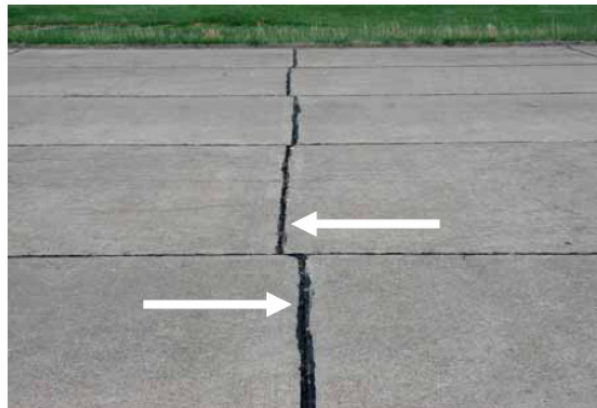


Figura 14: desalinhamento de juntas (SARKAR et al., 2009, p. 2-8)

Outro indício da reação é a exsudação do gel de álcali-sílica através das fissuras na superfície do concreto (figura 15). Esse tipo de manifestação pode ser confundido com eflorescências, já que essas são muito mais comuns (POOLE, 1992, p. [38-40]).



Figura 15: exsudação de gel (THALMANN et al., 2001, p. 22)

A ocorrência de *pop-outs* (figura 16) se configura como lascamentos circulares ou elípticos da superfície de concreto. Quando o gel se desenvolve numa partícula reativa perto da superfície, gera uma pressão excessiva devido à expansão. Então, ocorre o lascamento de uma área circular, como um tronco de cone com o vértice no ponto de reação (POOLE, 1992, p. [40]).



Figura 16: *pop-out* (SARKAR et al., 2009, p. 2-12)

### 3.4 FATORES INFLUENTES

Os fatores influentes na reação álcali-agregado são o teor de álcalis do cimento, a água de amassamento, os agregados reativos, além das condições do meio, como temperatura e umidade (ANDRADE, 1997, p. 17.25; BICZÓK, 1972, p. 278; PRISZKULNIK, 2005, p. 1034). Neste item será discutida a atuação:

- a) do teor de álcalis;
- b) dos agregados;
- c) da umidade;
- d) da temperatura;
- e) das adições ativas.

### 3.4.1 Teor de álcalis

No concreto, o cimento é a principal fonte de álcalis. Os mais comuns são o sódio ( $\text{Na}^+$ ) e o potássio ( $\text{K}^+$ ) que podem vir da matéria-prima ou do combustível utilizado na queima.

Pode-se expressar o teor de álcalis em função do equivalente de sódio, correlacionando a proporção molecular de óxidos de sódio e potássio. O cálculo se dá pela equação 1 (FORUM, 1965, p. 165; HOBBS, 1988, p. 11; POOLE, 1992, p. [22]):

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,685 \text{K}_2\text{O} \quad (\text{equação 1})$$

Hobbs (1988, p. 11) assume que concentrações equivalentes de hidróxidos de sódio e potássio são iguais em efeito. Além disso, geralmente os cimentos Portland produzidos contêm de 0,3 a 1,3% de álcalis, podendo existir cimentos com teores mais elevados.

Então, como medida preventiva, adotou-se o limite de 0,6% para o teor equivalente de álcalis do cimento, visto ser considerado a principal fonte de álcalis no concreto. Porém, conforme experiências, essa limitação não assegurava a ausência de expansões (ANDRADE, 1997, p. 17.26; FORUM, 1965, p. 165).

Conforme Biczók (1972, p. 279), o risco de expansões devido à reação álcali-agregado cresce com o conteúdo de álcalis e com o aumento do consumo de cimento. Oberholster et al.<sup>4</sup> (1983 apud HASPARYK, 1999, p. 66) estabelecem os limites para os agregados sul-africanos quanto ao teor de álcalis solúveis:

- a) acima de 3,8 kg/m<sup>3</sup>: comportamento expansivo;
- b) entre 1,8 kg/m<sup>3</sup> e 3,8 kg/m<sup>3</sup>: comportamento potencialmente reativo;
- c) abaixo de 1,8 kg/m<sup>3</sup>: comportamento inócuo.

---

<sup>4</sup> OBERHOLSTER, R. E.; VAN AARDT, J. H. P.; BRANDT, M. P. Durability of cementitious systems. In: BARNES, P. (Ed.). **Structures and performance of cements**. London: Applied Science Publishers, 1983. p. 380-397.

O gráfico 2 apresenta os limites propostos, considerando os álcalis disponíveis no cimento e o consumo de cimento.

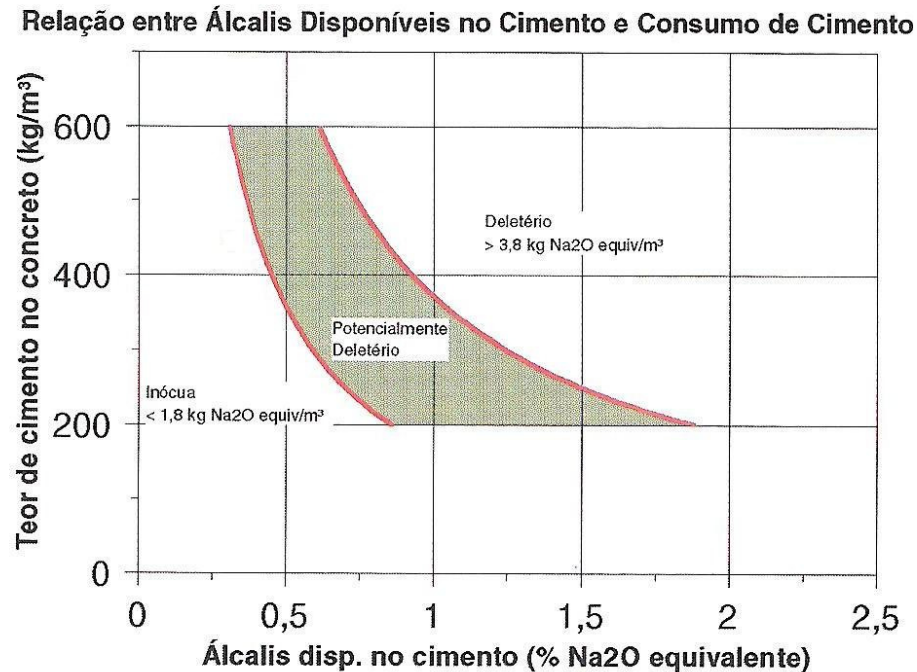


Gráfico 2: classificação do comportamento da reação em função da relação entre os álcalis disponíveis e o consumo de cimento no concreto (OBERHOLSTER et al.<sup>5</sup>, 1983 apud HASPARYK, 1999, p. 67)

Embora a principal fonte de álcalis no concreto seja o cimento, outras fontes não podem ser desprezadas. Geralmente a água de amassamento não contém uma concentração significativa de álcalis, mas existe a possibilidade de que cloreto de sódio seja incorporado na mistura devido ao uso de, por exemplo, água do mar (POOLE, 1992, p. [24]).

Sabendo que os álcalis também podem vir de fontes externas, pode-se citar casos de absorção de álcalis pelo concreto pelo contato com água do mar, água subterrânea e outros materiais, como sais de degelo. A absorção desses álcalis dependerá essencialmente da porosidade e permeabilidade do concreto e do tempo de exposição às fontes de álcalis (POOLE, 1992, p. [24]).

<sup>5</sup> OBERHOLSTER, R. E.; VAN AARDT, J. H. P.; BRANDT, M. P. Durability of cementitious systems. In: BARNES, P. (Ed.). **Structures and performance of cements**. London: Applied Science Publishers, 1983. p. 380-397.

### 3.4.2 Agregados

Para a ocorrência de expansões, os agregados precisam conter sílica capaz de reagir. Sendo que existe um teor dessa substância no agregado que leva a uma expansão máxima, correspondendo a um pico definido como **conteúdo péssimo** (gráfico 3) (BICZÓK, 1972, p. 279; HOBBS, 1988, p. 22).

Kühl<sup>6</sup> (1963 apud BICZÓK, 1972, p. 279) explica que determinada quantidade de álcalis não é perigosa quando se utiliza uma grande quantidade de agregados reativos. As expansões somente são produzidas quando existe uma pequena quantidade de substâncias reativas no agregado, já que, devido à maior quantidade disponível de álcalis em relação à quantidade de agregado, se produzem novas combinações.

Hobbs (1988, p. 22) mostra que quando o teor de agregados reativos é aumentado, a expansão se eleva até um máximo, posteriormente decrescendo com o aumento desse teor. Além disso, o tempo até o fissuramento decresce com o aumento do teor de agregados reativos, entretanto, sob teores elevados, não são observadas expansões ou fissurações. O gráfico 3 apresenta a expansão em função do teor de opala e agregados reativos, assumindo, no último caso, que 5% da massa do grão de agregado é constituída por opala.

A granulometria dos agregados, segundo Forum (1965, p. 165), influi na reação no sentido que a grande área específica dos agregados finos aumenta a absorção de álcalis e facilita a formação de gel não expansivo. Existem também outros indícios que a reação aumenta com o tamanho dos grãos. No quadro 1, Hasparyk (1999, p. 30) faz uma correlação entre natureza de rocha, o tipo de agregado e as fases mineralógicas presentes.

---

<sup>6</sup> KÜHL, H. **Der Baustoff Zement**: Eine Einführung in die Herstellung und Verarbeitung. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1963.



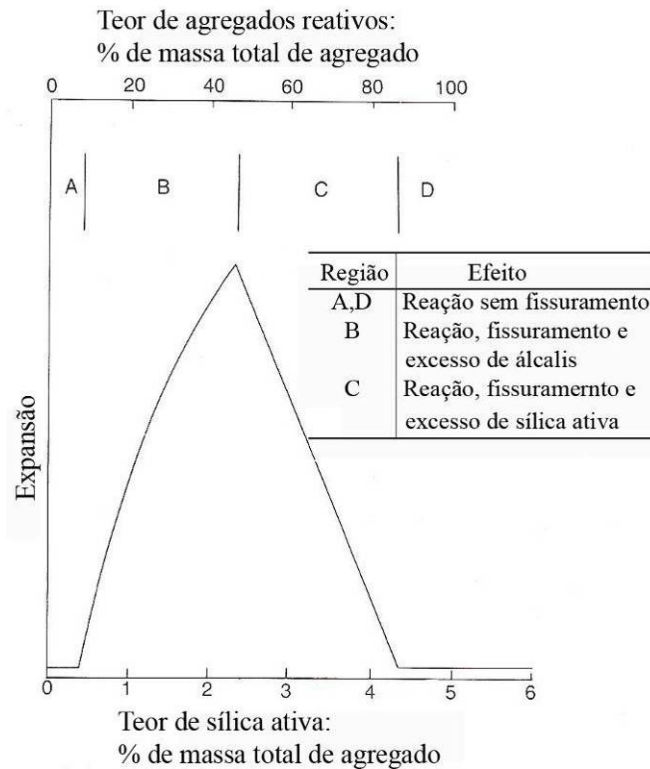


Gráfico 3: comportamento pessimo para relação água/cimento de 0,4, relação agregado/cimento de 2,75 e teor de álcalis de 6 kg/m<sup>3</sup> (HOBBS, 1988, p. 23)

| TIPO DE AGREGADO  |   | FASE MINERALÓGICA REATIVA   |
|-------------------|---|---|
| Areia - sedimento |   | Eventualmente o quartzo tensionado<br>Opala (> 0,25%), calcedônia (> 3%)                                  |
| Rocha ígnea       | Andesito, dacito, fonólito, latito, obsidiana, pedra púmice, riolito, traquito e tufo vulcânico | Vidro vulcânico ácido a intermediário, tridimita e minerais de alteração (vidro devitrificado)            |
|                   | Basalto   | Minerais de alteração (clorofeita), calcedônia, cristobalita, opala, palagonita<br>Vidro vulcânico básico |
|                   | Granito, granodiorito   | > 30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ e minerais de alteração     |

continua

continuação

| TIPO DE AGREGADO  |   | FASE MINERALÓGICA REATIVA  |
|-------------------|---|--|
| Rocha sedimentar  | Arenito   | > 30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$<br>Opala e calcedônia  |
|                   | Calcário  | Relação calcila/dolomita próxima a 1 e associado a argilominerais (filossilicatos)<br>Opala, calcedônia  |
|                   | Chert   | Calcedônia, opala<br>Quartzo criptocristalino  |
|                   | Grauvaca  | 30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ e quartzo microcristalino a criptocristalino<br>Argilominerais (filossilicatos)<br>Opala |
| Rocha metamórfica | Ardósia   | Quartzo tensionado<br>Argilominerais (filossilicatos)  |
|                   | Filito  | > 30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ e quartzo microcristalino a criptocristalino<br>Vermiculita (filossilicatos)           |
|                   | Hornfel   | > 30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ e quartzo microcristalino a criptocristalino<br>Vermiculita (filossilicatos)           |
|                   | Gnaise, granulito, micaxisto, quartzito e xisto | > 30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ , feldspato deformado e quartzo de granulação fina                                     |
|                   | Milonito  | Quartzo tensionado e de granulação fina  |
|                   | Rochas metasedimentares                         | Quartzo tensionado e filossilicatos  |

Quadro 1: agregados potencialmente reativos (HASPARYK, 1999, p. 30-31)

### 3.4.3 Umidade

Como em quase todas as reações, a reação álcali-sílica requer água para ocorrer. Sendo assim, esta servirá tanto no transporte de álcalis e hidroxilas como no inchamento do gel higroscópico (POOLE, 1992, p. [28]). Uma vez que para esse gel de silicato hidratado sofrer expansão é necessário a presença de água, a falta d'água ou de umidade limitará a reação mesmo com o emprego de cimentos com alto teor de álcalis e agregados reativos (BICZÓK, 1972, p. 279).

Poole (1992, p. [28-29]) demonstra, através do gráfico 4, que a expansão devido à reação álcali-sílica varia diretamente com a umidade relativa do concreto. Abaixo de 70% UH, a reação expansiva é praticamente desprezada, porém, acima de 80% UH, os efeitos são visivelmente perceptíveis.

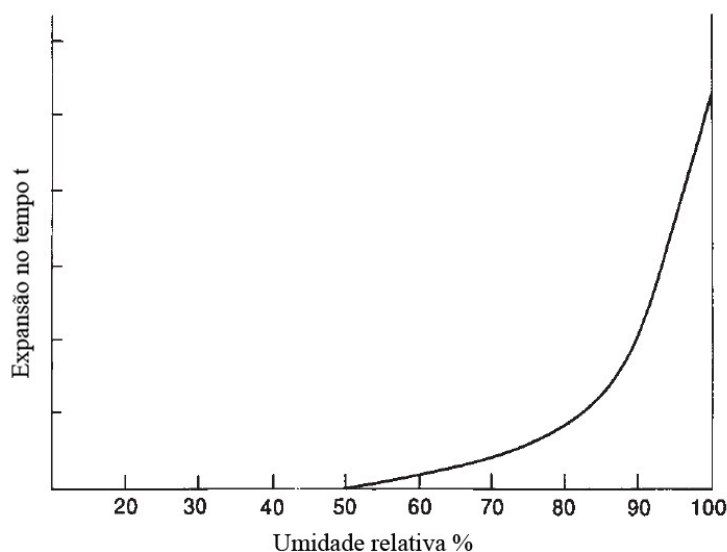


Gráfico 4: efeito da umidade relativa na expansão do concreto devido à reação álcali-sílica (POOLE, 1992, p. [29])

### 3.4.4 Temperatura

A reação álcali-agregado é favorecida por temperaturas elevadas, ativando as reações químicas. Além disso, Andrade (1997, p. 17.29) afirma que o aumento de temperatura acelera as reações e a formação do gel, já que são sensíveis ao calor.

### 3.4.5 Adições ativas

Adições com propriedades cimentíceas, como as pozolanas e a escória de alto-forno, são comumente empregadas tanto na fabricação de cimentos na fase de moagem, como na reposição parcial do cimento no processo de dosagem do concreto (ANDRADE, 1997, p. 17.30). Priszkulnik (2005, p. 1039) cita algumas contribuições dessas adições:

- a) maior durabilidade frente aos meios agressivos;
- b) maior resistência à compressão dos cimentos pozolânicos após os 28 dias de idade;
- c) menor calor de hidratação;
- d) maior impermeabilidade à água;
- e) maior resistência a ciclos de gelo-degelo;
- f) menor segregação e exsudação em argamassas e concretos frescos;
- g) contribuição à proteção ambiental.

A reação do cimento com as adições ocorre entre cálcio e hidroxilas, provenientes da hidratação do cimento, e a sílica das adições ativas, formando como produto o C-S-H (GILLOTT, 1975, p. 312). Sendo que, segundo Xu et al. (1995, p. 1235), na presença de adições minerais e de um alto teor de álcalis, tanto a reação pozolânica quanto a álcali-sílica podem acontecer simultaneamente. Sendo assim, a reação álcali-sílica ocorrerá entre os álcalis e os agregados reativos e entre os álcalis e as adições.

Para Paulon (1981, p. 54-55), quando pozolanas são utilizadas para reduzir a RAA, o aumento da temperatura é necessário, uma vez que acelera a reação destas com os produtos de hidratação do cimento. Além disso, o autor afirma que as mais reativas são consideravelmente mais afetadas com a temperatura.

A eficácia das adições em reduzir a reação álcali-agregado depende principalmente da composição química (XU et al., 1995, p. 1225) e do tipo de reação a ser reduzida (GILLOTT, 1975, p. 311). Sendo assim, pode ser explicada através do princípio que a reação pozolânica consome os álcalis presentes, diminuindo a alcalinidade da solução dos poros, e forma produtos secundários de hidratação (C-S-H) que preenchem os poros do concreto, reduzindo a

permeabilidade da pasta de cimento e, conseqüentemente, a mobilidade de álcalis no concreto (GILLOTT, 1975, p. 312; XU et al., 1995, p. 1235).

Além disso, as adições consomem a portlandita da pasta de cimento e proporcionam um aumento de resistência. Desta forma, aumentam a durabilidade frente às tensões de tração provocadas pela reação álcali-agregado (XU et al., 1995, p. 1235).

Gillott (1975, p. 312) explica que a atuação da pozolana se baseia nas concentrações relativas e taxas de difusão dos íons sódio ou potássio em comparação ao cálcio presente. Então, se existir uma quantidade suficiente de pozolana, um gel não expansivo de cal-álcali-sílica se formará na borda da partícula potencialmente expansiva e não um gel de álcali-sílica que tem a capacidade de se expandir na presença de água. Deste modo, o gel pode se distribuir e se acomodar dentro do concreto.

Resultados dos estudos de Bhatti (1985, p. 69) indicam que a adição de pozolanas pode reduzir ou eliminar a expansão causada pela RAA por formar C-S-H e C-S-H com baixo teor de cálcio, com poder de retenção dos álcalis adicionais responsáveis pela reação. Além disso, para o controle, sugerem a adição de aproximadamente 30% de cinza volante com baixo teor de cálcio ou até mesmo teores mais baixos, como 20%, se os agregados reativos forem silicosos.

Glasser (1995, p. [66-67]) explica a retenção dos álcalis pelo C-S-H. Afirma, que a composição do C-S-H é variável, sendo o teor de Ca/Si em torno de 1,8, mas adições minerais podem diminuir essa relação para 1,4 a 1,5, dependendo da composição e proporção do agente. Essa relação Ca/Si controla a carga da superfície do C-S-H. Para altas relações, a superfície se torna positiva, resultando em adsorção de ânions, desta forma, os íons alcalinos se concentram na solução dos poros. Caso contrário, se a relação decresce, a carga da superfície do C-S-H se anula, podendo até mesmo ficar negativa para relações abaixo de 1,2 a 1,3, mostrando, então, probabilidade para adsorção de cátions como os íons alcalinos.

Prezzi et al. (1997, p. 16) explicam o efeito benéfico das adições minerais em reduzir a expansão devido a reação álcali-sílica pelo modelo de Gouy-Chapman. Por reduzir o pH da solução dos poros do concreto, as adições diminuem tanto a agressividade da solução, como a carga negativa da superfície da sílica. Sendo assim, as pressões desenvolvidas serão menores com a redução da concentração iônica da solução e da carga da superfície da partícula.

Munhoz (2007, p. V) avaliou a eficiência de adições ativas em reduzir a reação álcali-agregado, combinando agregados potencialmente reativos com escória de alto-forno, cinza volante, metacaulim e sílica ativa, em teores comumente utilizados na fabricação do cimento e dosagem de concretos. Assim, conseguiu mostrar que a capacidade dessas adições em diminuir a expansão é dependente das suas composições química e mineralógica, bem como do teor utilizado e do grau de reatividade do agregado.

A cinza volante, um tipo de adição mineral, é obtida por precipitação mecânica ou eletrostática dos gases de exaustão de estações alimentadas por carvão (NEVILLE, 1997, p. 102). Ela se constitui, principalmente, por silicato vítreo, contendo alumínio, ferro e álcalis e uma pequena quantidade de fase cristalina, representada por quartzo, mulinita, silimanita, hematita e magnetita. As suas partículas são esféricas, com uma grande superfície específica, podendo possuir cenosferas e plerosferas (figura 17) (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 307).

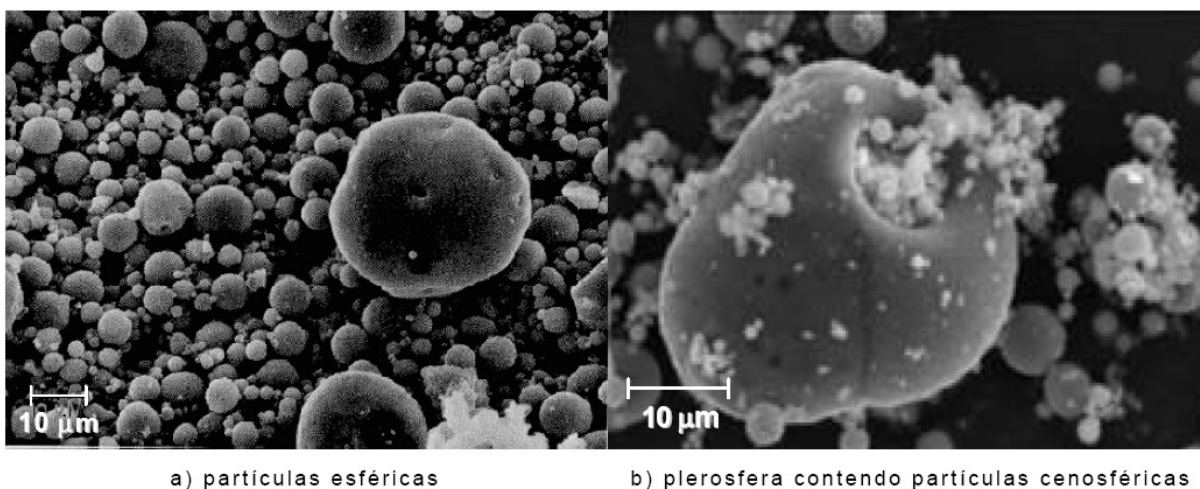


Figura 17: cinzas volantes (AZEVEDO, 2002, p. 39)

Sherata et al. (1999, p. 1915) mencionam que, quando a cinza volante é utilizada na substituição de parte do cimento Portland, a concentração de álcalis ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) na solução dos poros do concreto é significativamente diminuída. Porém a redução está sujeita a vários fatores como:

- a) as características da cinza (finura, teor de sílica e disponibilidade de álcalis);
- b) o teor de substituição;
- c) o teor de álcalis do cimento Portland;

d) a idade.

Bleszynski e Thomas (1998, p. 66) atribuem a eficácia da cinza volante a alguns fatores:

- a) redução da alcalinidade da solução dos poros;
- b) redução da disponibilidade de cálcio;
- c) refinamento da estrutura dos poros, reduzindo a mobilidade iônica e permeabilidade à água.

Nos concretos com cinza volante, a redução da disponibilidade de cálcio, devido à redução do conteúdo de  $\text{Ca(OH)}_2$ , evita a formação de gel expansivo. Com isso, o gel de caráter fluido não origina tensões internas, uma vez que pode se dispersar na matriz cimentícia (Thomas et al., 1991, p. 927).

Nas análises de Bleszynski e Thomas (1998, p. 75) dos produtos originados pela reação em concretos com cinza volante, não foi verificada a presença de uma camada rica em cálcio, mas se observou que o gel rico em sódio se dispersou pela matriz cimentícia e o gel rico em potássio permaneceu na superfície do agregado. Além disso, os autores salientam que a possível ocorrência de expansões nesses concretos pode ser explicada pelo consumo apenas parcial do  $\text{Ca(OH)}_2$  devido a:

- a) reação álcali-sílica ocorrer mais rapidamente que a pozolânica, onde formas muito reativas de sílica estão presentes;
- b) baixa pozolanicidade da cinza volante;
- c) alto teor de cálcio da cinza volante;
- d) quantidade insuficiente de cinza volante.

Sherata et al. (1999, p. 1920) indicam que os fatores influentes da cinza volante são os teores de álcalis, cálcio e sílica. Os compostos  $\text{CaO}$  e  $\text{SiO}_2$  afetam os produtos de hidratação devido à quantidade de cálcio e sílica no sistema. Então, quanto maior a quantidade de sílica, menor a relação  $\text{Ca/Si}$  dos produtos e/ou maior a quantidade destes, resultando numa maior quantidade de álcalis retirados da solução por esses produtos de hidratação. Já o elevado teor de cálcio aumenta a relação  $\text{Ca/Si}$  dos produtos, reduzindo a quantidade de álcalis removidos da

solução. Finalmente, quanto maior o teor de álcalis da cinza, maior o seu desprendimento da cinza para a solução dos poros, resultando numa maior alcalinidade.

Os autores introduzem a diluição teórica, mostrando o efeito da substituição de parte do cimento Portland por um diluente inerte. Assumem, para isso, que para um determinado teor de substituição de cimento um mesmo teor de hidroxilas é reduzido. As cinzas com baixo teor de CaO tem um efeito além da simples diluição, uma vez que a redução da alcalinidade cresce mais que o teor de substituição. Já as cinzas com alto teor de CaO produzem um efeito semelhante a diluição teórica, enquanto que as cinzas com moderado teor de CaO claramente aumentam a alcalinidade da solução dos poros, dando a entender que esse tipo de cinza volante contribui na quantidade de álcalis (SHERATA et al., 1999, p. 1917).

Conforme experimentos de Sherata e Thomas (2000, p. 1069), todos os tipos de cinza em quaisquer teores de substituição reduzem a expansão se comparados com o concreto de controle sem cinza volante. Além disso, mostram que a redução cresce com o aumento do teor de substituição. Portanto, cinzas menos eficazes (com alto teor de álcalis ou cálcio) precisam ser usadas com maiores teores de substituição para poder controlar a expansão. Enquanto 25% de cinza volante com baixo teor de cálcio é capaz de manter a expansão abaixo de 0,04% mesmo depois de dois anos, uma cinza volante com alto teor de cálcio ou álcalis necessitará de um teor de substituição de 40 a 50 %.

### 3.5 MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO

Para guiar a correta utilização de agregados potencialmente reativos, evitando, deste modo, danos que possam ocorrer na estrutura de concreto a ser executada, existem vários métodos de investigação. Alguns deles serão abordados nos itens subsequentes.

#### 3.5.1 Análise petrográfica

A análise petrográfica, através de microscopia óptica, pode ser realizada no agregado conforme as normas ASTM C-295/03<sup>7</sup> (PRISZKULNIK, 2005, p. 1058) e NBR 7389

---

<sup>7</sup> ASTM C-295/03: Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete.



(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Ela fornece dados referentes à composição mineralógica, possibilitando a identificação de elementos suscetíveis ao ataque dos álcalis (ANDRADE, 1997, p. 17.10).

Recomenda-se a complementação com ensaios de reatividade em argamassas ou concretos, a fim de certificar o resultado obtido. Deve-se isso à existência de outros fatores, além dos fornecidos pela análise petrográfica, que contribuem para a ocorrência da reação (HASPARYK, 1999, p. 49-50).

### **3.5.2 Método químico**

O método permite avaliar a reatividade potencial do agregado pela concentração de sílica dissolvida e a redução da alcalinidade. Pode ser realizado segundo a norma ASTM C-289/03<sup>8</sup> (PRISZKULNIK, 2005, p. 1059).

### **3.5.3 Método Osipov**

Foi desenvolvido pelo engenheiro Albert Osipov do *Institute Hydroproject* de Moscou. Este método também é conhecido como método térmico, já que se baseia em submeter o agregado graúdo à temperatura de 1000°C por 60 segundos. A fragmentação do agregado serve como indício da sua potencialidade reativa. Entretanto, se a fragmentação não ocorrer, não pode ser afirmado o caráter inócuo, necessitando, então, investigações por outros métodos (ANDRADE, 1997, p. 17.22).

### **3.5.4 Método das barras**

O método investiga a potencialidade reativa dos agregados conforme a variação do comprimento de barras de argamassa mantidas em recipiente hermeticamente fechado e sob atmosfera saturada de vapor d'água a 38°C (ANDRADE, 1997, p. 17.16). As normas

---

<sup>8</sup> ASTM C-289/03: Standard test method for potencial alkali-silica reactivity of aggregates (chemical method).

ASTM C-227/03<sup>9</sup> (PRISZKULNIK, 2005, p. 1059) e NBR 15577-6 explicitam a metodologia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008d). O longo período de ensaio (6 a 12 meses) se mostra como uma desvantagem do método (ANDRADE, 1997, p. 17.16).

### 3.5.5 Método acelerado

Semelhante ao método das barras, porém de avaliação mais rápida, o método acelerado se baseia no método Acelerado Sul Africano NBRI, desenvolvido por Oberholster e Davies<sup>10</sup> (1986 apud ANDRADE, 1997, p. 17.16) e normalizado como ASTM C-1260/05a (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2005). A NBR 15577-4 também explicita o procedimento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b).

Após o desmolde, as barras de argamassa são primeiramente imersas em água a 80°C por 24 horas, para, então, ser realizada a leitura de referência e posterior estocagem em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1N, também a 80°C. A variação do comprimento das barras é feita nas idades de 16 e 30 dias e necessita a efetuação de três leituras intermediárias em cada período (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b, p. 10).

A NBR 15577-1 classifica os agregados como potencialmente inócuos, quando a expansão obtida no ensaio acelerado NBR 15577-4 for menor que 0,19% aos 30 dias, e potencialmente reativos, se a mesma for maior ou igual a 0,19% aos 30 dias. No primeiro caso, o uso em concreto pode ser aprovado pelo responsável técnico, porém no segundo, são necessárias medidas de mitigação para que o agregado possa ser utilizado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008a, p. 7-8).

Para a verificação da mitigação da reação com o uso de agregados reativos e teores de substituição de cimento Portland por adições, utiliza-se a NBR 15577-5 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008c, p. 1). A realização é análoga à

---

<sup>9</sup> ASTM C-227/03: Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar-bar method).

NBR 15577-4, diferenciando-se apenas quanto à utilização de adições. É importante salientar a existência da ASTM C-1567/07 que também normaliza o ensaio (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007).

---

<sup>10</sup> OBERHOLSTER, R. E.; DAVIES, G. An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates. **Cement and Concrete Research**, New York, Pergamon Press, v. 16, n. 2, p. 181-189, Mar. 1986.

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Tendo por objetivo principal a determinação do teor de cinza volante capaz de reduzir os efeitos deletérios da RAA, o presente programa experimental foi desenvolvido a partir da seleção dos materiais e métodos a serem empregados. Foram escolhidas três amostras de agregados utilizados na Região Metropolitana de Porto Alegre, um tipo de cimento e três amostras de cinza volante para a realização de ensaios de barras de argamassa pelo método acelerado, segundo a NBR 15577-4/08 e a NBR 15577-5/08.

A pesquisa envolveu duas etapas distintas de experimentos. Num primeiro cenário, foram ensaiadas as amostras de agregado pelo método acelerado (NBR 15577-4/08), a fim de se avaliar a potencialidade reativa. Posteriormente, com o agregado mais reativo, realizaram-se os mesmos ensaios, porém com a substituição de parte do cimento por diferentes teores de cinzas volantes, segundo orientações da NBR 15577-5/08, para a verificação da redução da reação expansiva. Uma representação esquemática do programa experimental é apresentada na figura 18.

Nos próximos itens são apresentadas as variáveis analisadas, a definição e a caracterização dos materiais utilizados, bem como a descrição dos métodos de ensaio empregados.

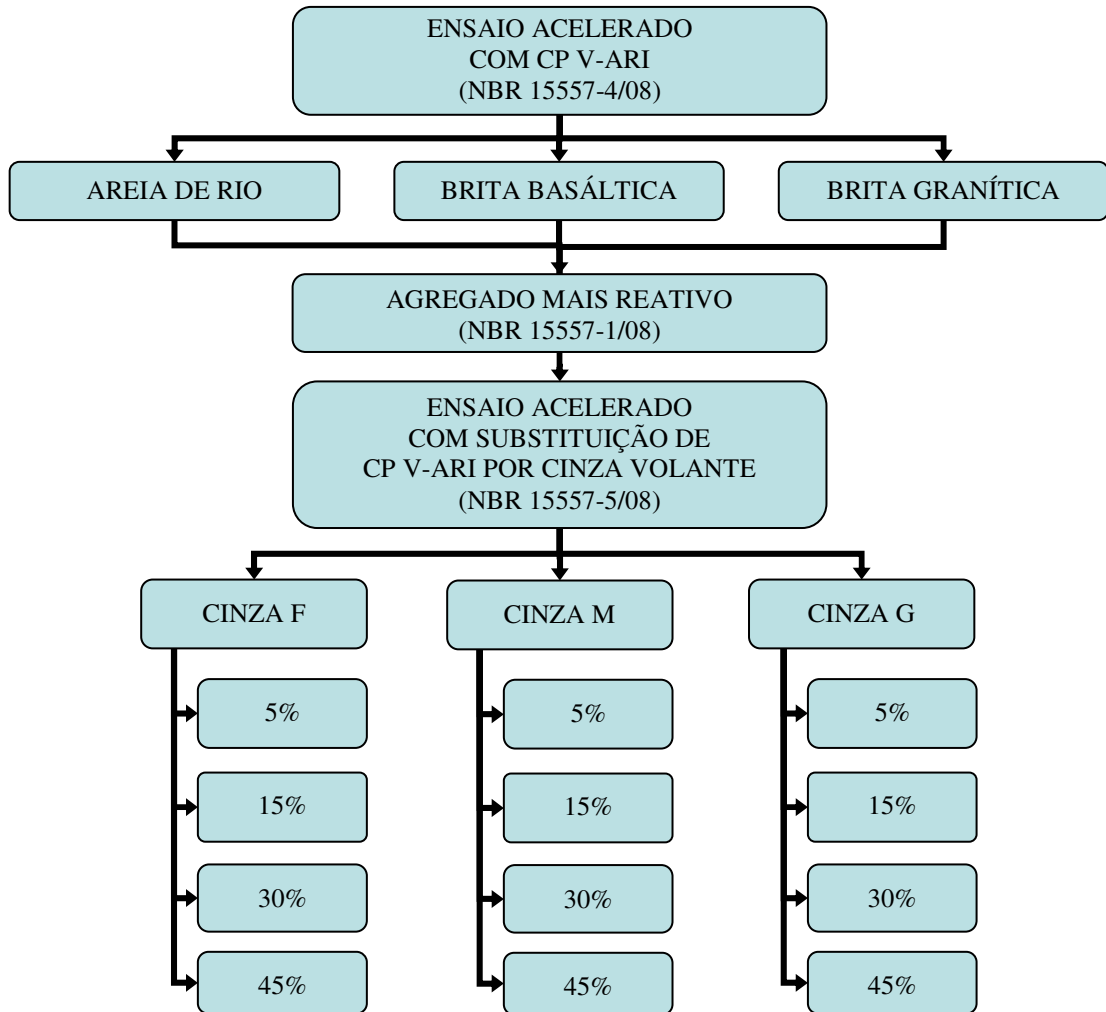


Figura 18: representação esquemática do programa experimental

## 4.1 VARIÁVEIS

As variáveis independentes e dependentes estabelecidas para a realização do trabalho são apresentadas a seguir.

### 4.1.1 Variáveis independentes

Como o enfoque do trabalho é a determinação do teor de cinza volante capaz de mitigar a RAA, procurou-se estabelecer parâmetros adequados que possibilitassem a sua verificação. O

mecanismo da reação é influenciado por diversos fatores relativos aos materiais presentes na estrutura. Sendo assim, foram definidas como variáveis independentes:

- a) mineralogia do agregado;
- b) finura da cinza volante;
- c) teores de substituição de cimento Portland por cinza volante.

A mineralogia do agregado tem caráter importante devido à presença de substâncias mais ou menos suscetíveis ao ataque alcalino. Para a pesquisa, procurou-se selecionar diferentes agregados em função do seu uso na produção de concretos na região. Deste modo, foram utilizadas três amostras fornecidas por concreteiras: **areia quartzosa de rio, brita basáltica e brita granítica**.

A finura da cinza volante se apresenta como fator relevante por influenciar a porosidade da pasta de cimento. Sendo assim, selecionaram-se três amostras com níveis distintos de superfície específica Blaine: **alta (Cinza F), média (Cinza M) e baixa (Cinza G)**.

O teor de substituição de cimento Portland por cinza volante é um parâmetro que influencia diretamente a redução da expansão. A escolha se baseou nos resultados de ensaios realizados por Tiecher (2006) com diferentes tipos de cimentos. A autora mostrou a eficácia do CP IV em inibir a expansão, por este possuir um teor de adições pozolânicas de até 50%. Desta forma, foram então fixados teores de **0%, 5%, 15%, 30% e 45%**.

#### **4.1.2 Variável dependente**

A variável dependente, produto dos ensaios realizados, é necessária para a avaliação do efeito das variáveis independentes na redução RAA. Definiu-se, então, a **expansão dos corpos-de-prova** como variável de resposta, pois possibilita a verificação da eficiência das adições utilizadas.

## 4.2 MATERIAIS

As caracterizações dos agregados, do cimento, das cinzas volantes e da água utilizados no estudo são contempladas nos itens a seguir.

### 4.2.1 Agregados

Segundo informações das concreteiras, as amostras de areia quartzosa de rio e de brita granítica eram procedentes de jazidas presentes na cidade de Porto Alegre, enquanto a amostra de brita basáltica, de uma pedreira em Montenegro. O quadro 2 e a figura 19 indicam a origem dos materiais.

| <b>Agregado</b>        | <b>Origem</b> |
|------------------------|---------------|
| Areia quartzosa de rio | Porto Alegre  |
| Brita basáltica        | Montenegro    |
| Brita granítica        | Porto Alegre  |

Quadro 2: origem dos agregados utilizados



Figura 19: locais de origem dos agregados utilizados no trabalho

## 4.2.2 Cimento

Escolhido para ser usado nos ensaios, o cimento CP V-ARI possui o menor teor de adições minerais dentre os encontrados no mercado. Deste modo, permite a verificação do potencial reativo dos agregados<sup>11</sup> e da influência da substituição parcial do cimento Portland por cinza volante. Proporciona, assim, a análise do comportamento desses materiais frente a uma quantidade pré-determinada de agente redutor da expansão.

Caracterizou-se a amostra utilizada física, química e mecanicamente. A decomposição do cimento em seus óxidos foi obtida por espectrometria de fluorescência de raios-X pelo Laboratório de Análises Inorgânicas da Fundação de Ciência e Tecnologia (Cientec). A finalização da caracterização química foi realizada no Laboratório de Combustíveis da mesma Fundação, com a determinação da perda ao fogo, conforme a NM 18/04, e do resíduo insolúvel, seguindo a NM 22/04. Os resultados estão apresentados no quadro 3.

| Determinação<br>(% em massa)                        | Resultado | Exigência da<br>NBR 5733/91 |
|---|-----------|-----------------------------|
| Óxido de cálcio (CaO)                               | 61,92     | -                           |
| Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )                | 17,83     | -                           |
| Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 4,36      | -                           |
| Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )    | 2,80      | -                           |
| Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)                | 0,60      | -                           |
| Óxido de magnésio (MgO)                             | 5,10      | ≤6,50                       |
| Óxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )                 | 3,06      | ≤3,50                       |
| Óxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )                | 0,26      | -                           |
| Perda ao fogo (1000°C)                              | 4,07      | ≤4,50                       |
| Resíduo insolúvel                                   | 1,5       | ≤1,00                       |

Quadro 3: caracterização química do cimento utilizado

<sup>11</sup> Não foi possível determinar se a amostra de cimento utilizado está de acordo com a especificação da NBR 15577-4/08 quanto à expansibilidade em autoclave e equivalente alcalino. Como o propósito do trabalho foi a realização de uma comparação entre diferentes teores de cinza, tais determinações não se mostraram relevantes.



Os resultados obtidos na análise química estão de acordo com as exigências da NBR 5733/91, com exceção do resíduo insolúvel que apresentou valor acima do limite permitido.

Os ensaios para caracterização física e mecânica do cimento foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Cientec. A massa específica, a superfície específica Blaine e a resistência à compressão foram determinadas, respectivamente, pelo método do picnômetro, NBR NM 76/98 e NBR 7215/96. Os quadros 4 e 5 apresentam os resultados obtidos.

| Determinação                                      | Resultado |
|---|-----------|
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )             | 3,08      |
| Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | 4490      |

Quadro 4: caracterização física do cimento utilizado

| Determinação                   |         | Resultado | Exigência da NBR 5733/91 |
|--------------------------------|---------|-----------|--------------------------|
| Resistência à compressão (MPa) | 1 dia   | 22,0      | ≥14,0                    |
|                                | 3 dias  | 33,3      | ≥24,0                    |
|                                | 7 dias  | 34,9      | ≥34,0                    |
|                                | 28 dias | 38,9      | -                        |

Quadro 5: caracterização mecânica do cimento utilizado

Quanto à resistência à compressão, os resultados obtidos para o cimento utilizado estão de acordo com as exigências da NBR 5733/91.

### 4.2.3 Cinzas volantes

Selecionou-se, para o presente trabalho, três amostras de cinza volante, classificadas em função das suas superfícies específicas Blaine. A identificação deu-se por: **Cinza F**, **Cinza M** e **Cinza G**, respectivamente, para as cinzas com alta, média e baixa superfície específica.

As adições usadas na pesquisa foram caracterizadas química e fisicamente. Para a caracterização química, empregou-se os mesmos ensaios utilizados para o cimento, com

exceção da determinação do óxido de enxofre, realizado no Laboratório de Combustíveis da Cientec, por combustão da amostra com detecção por infravermelho, segundo o recomendado pela ASTM D5016/07. O quadro 6 apresenta os resultados.

| Determinação  | Resultados<br>(% em massa) |         |         | Exigência<br>da NBR<br>12653/92 |
|---|----------------------------|---------|---------|---------------------------------|
|   | Cinza F                    | Cinza M | Cinza G |                                 |
| Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )                | 58,57                      | 66,56   | 66,27   | ≥70                             |
| Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 27,14                      | 21,59   | 21,02   |                                 |
| Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )    | 5,02                       | 5,50    | 5,63    |                                 |
| Óxido de cálcio (CaO)                               | 1,58                       | 2,10    | 2,96    | -                               |
| Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)                | 3,00                       | 1,81    | 1,90    | -                               |
| Óxido de magnésio (MgO)                             | 0,73                       | 0,69    | 0,79    | -                               |
| Óxido de fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )   | <0,03                      | <0,03   | <0,03   | -                               |
| Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)                  | 0,25                       | 0,15    | 0,16    | -                               |
| Óxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )                 | 0,29                       | 0,28    | 0,20    | ≤5,0                            |
| Óxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )                | 1,22                       | 0,71    | 0,70    | -                               |
| Perda ao fogo (1000°C)                              | 2,17                       | 0,58    | 0,34    | ≤6,0                            |
| Teor de álcalis (Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> )  | 2,30                       | 1,39    | 1,46    | ≤1,5                            |

Quadro 6: caracterização química das cinzas volantes utilizadas

Os resultados obtidos na análise química das cinzas volantes estão de acordo com as exigências da NBR 12653/92, com exceção da Cinza F que apresentou o teor de álcalis acima do limite especificado. Além disso, pode-se perceber a grande semelhança entre as cinzas M e G quanto aos óxidos determinados.

Parte da caracterização física foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Cientec com a determinação da massa específica e da superfície específica Blaine, respectivamente, pelo método do picnômetro e pela NBR NM 76/98. No quadro 7 são apresentados os resultados obtidos.

| Determinação                                      | Resultado |         |         |
|---|-----------|---------|---------|
|   | Cinza F   | Cinza M | Cinza G |
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )             | 2,30      | 1,94    | 1,88    |
| Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | 4195      | 2825    | 2680    |

Quadro 7: massa específica e superfície específica Blaine das cinzas volantes utilizadas

Pelos resultados apresentados no quadro 7, identifica-se, claramente, a Cinza F como a de maior superfície específica Blaine, seguida pela Cinza M e, por fim, pela Cinza G.

As granulometrias das cinzas volantes foram determinadas pelo Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS (LACER). Os gráficos 5 a 7 apresentam as distribuições granulométricas e o quadro 8, os diâmetros principais.

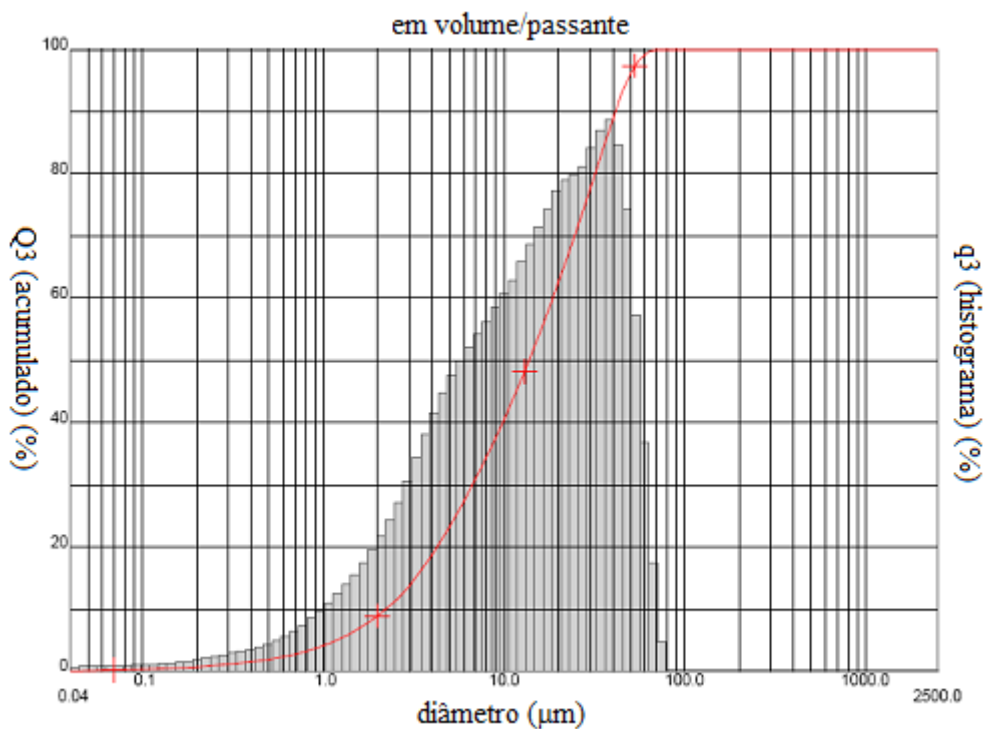


Gráfico 5: distribuição granulométrica da cinza F

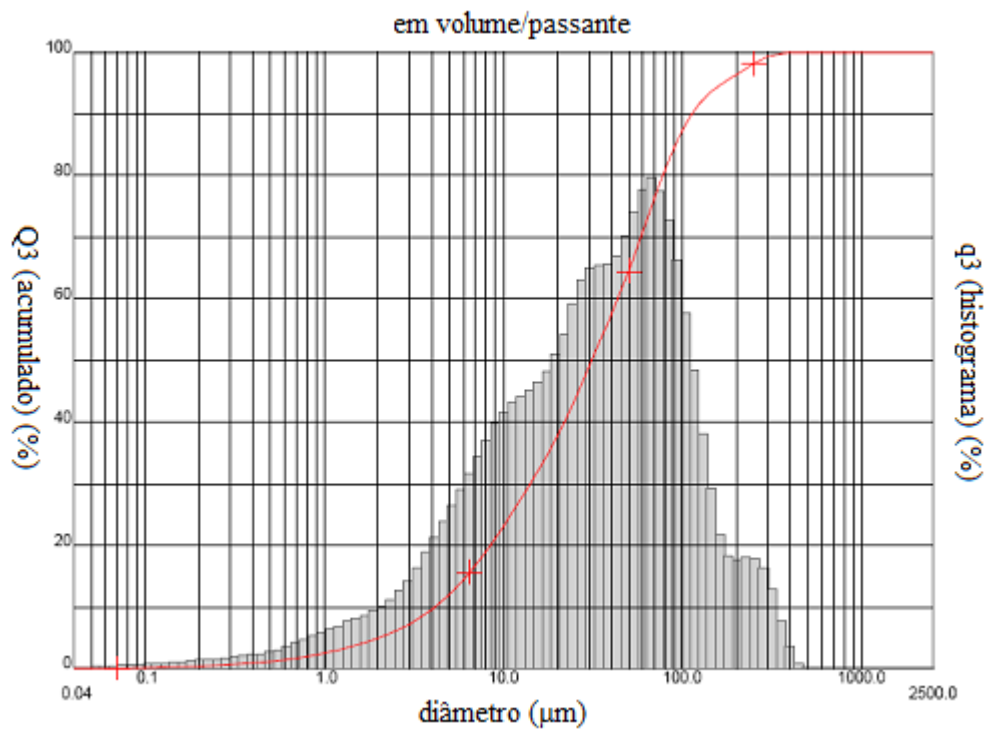


Gráfico 6: distribuição granulométrica da cinza M

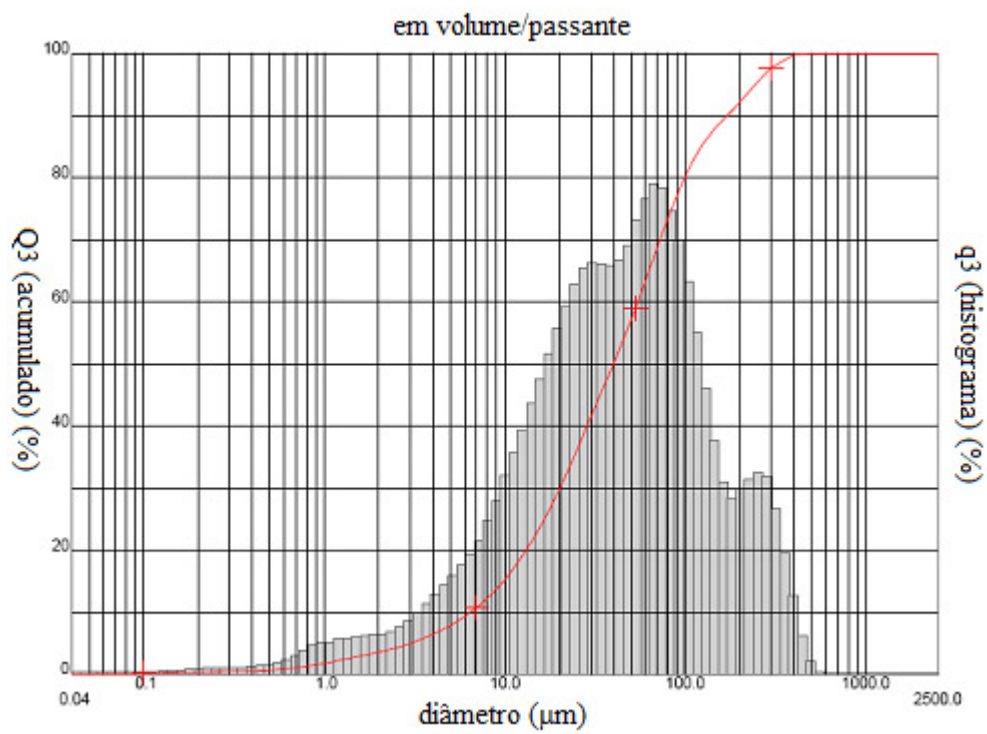


Gráfico 7: distribuição granulométrica da cinza G

| Determinação   | Resultado (µm) |         |         |
|----------------|----------------|---------|---------|
|                | Cinza F        | Cinza M | Cinza G |
| Diâmetro a 10% | 2,22           | 4,13    | 6,45    |
| Diâmetro a 50% | 13,8           | 31,24   | 40,05   |
| Diâmetro a 90% | 41,49          | 113,72  | 170,67  |
| Diâmetro médio | 18,22          | 50,25   | 66,93   |

Quadro 8: caracterização granulométrica das cinzas volantes

Os resultados presentes no quadro 8 permitem relacionar o diâmetro médio de cada cinza à sua respectiva superfície específica Blaine. Para alta superfície específica é encontrado um menor diâmetro médio de partícula. Fica assim evidente que a Cinza F, por ter uma maior superfície específica, se comparada às outras cinzas, tem, então, um menor diâmetro médio dos grãos.

Os difratogramas qualitativos das amostras (gráfico 8) foram obtidos pelo Laboratório de Análises Inorgânicas da Cientec, utilizando difratômetro de raios-X marca RIGAKU, sistema D/MAX - 2100, com goniômetro *theta-theta* e detector de cintilação de NaI(Tl). As amostras foram submetidas à varredura angular de 3° a 80°. As condições experimentais foram:

- a) tubo de raios-X com ânodo de cobre;
- b) radiação  $\text{CuK}\alpha$ ;
- c) tensão de 40 kV;
- d) corrente aplicada de 20 mA;
- e) velocidade de varredura de 2°/min;
- f) intervalo de leitura (passo) de 0,020°.

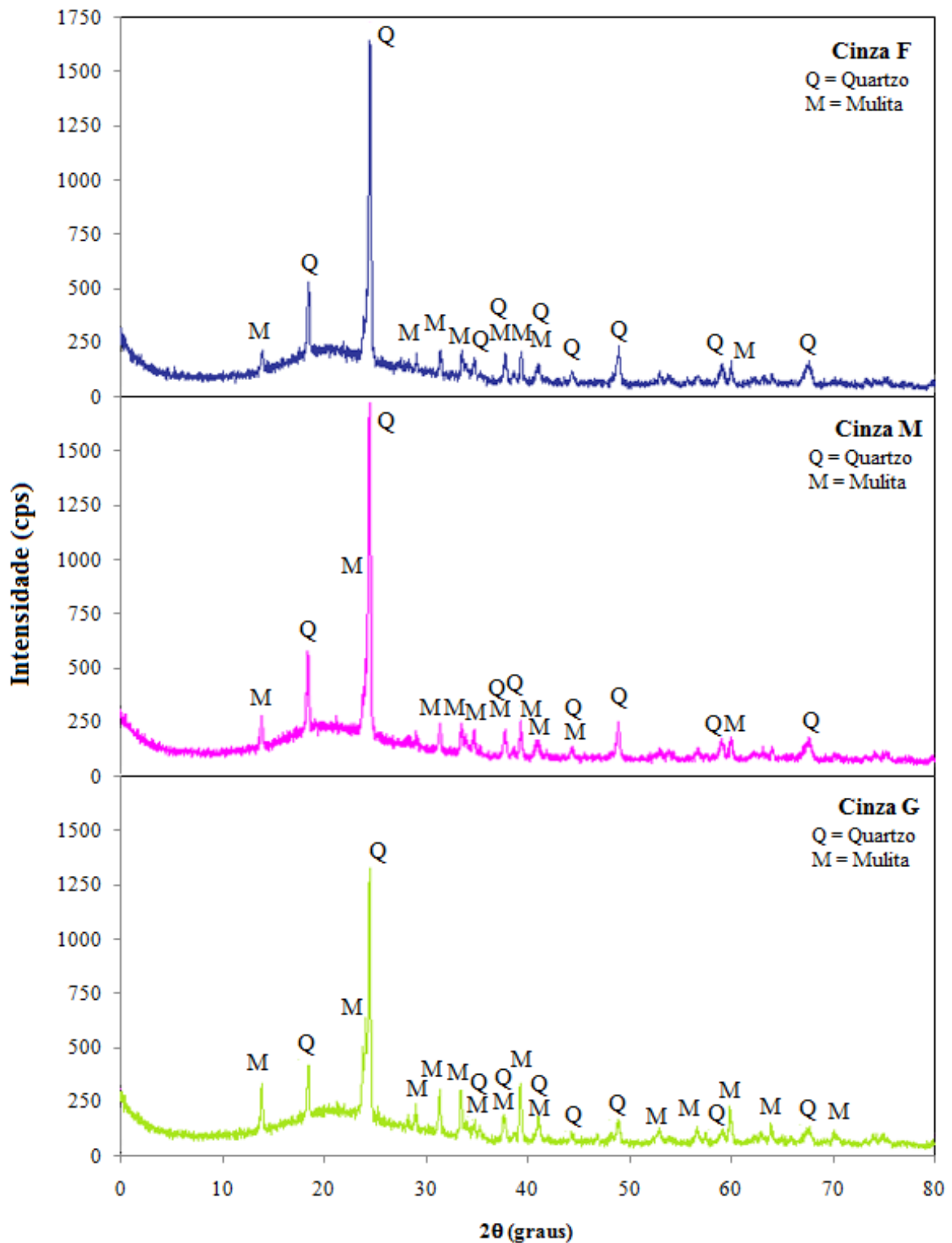


Gráfico 8: difratogramas por raios-X das cinzas volantes

Pelo gráfico 8, pode ser observada a semelhança entre as cinzas, como, também, a presença dos picos de cristais de quartzo e mulita e do halo amorfo, mostrando que a cinza é reativa.

#### 4.2.4 Água

A água utilizada nos ensaios era proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Porto Alegre. Mesmo que recomendado pela NBR 15577-4/08, a água para mistura da argamassa e cura inicial não foi destilada e deionizada, visto este procedimento não ocorrer no preparo de concretos.

### 4.3 MÉTODOS

Os métodos escolhidos para o desenvolvimento da pesquisa foram os acelerados, estabelecidos pelas NBR 15577-4 e NBR 15577-5. Esses consistem na moldagem de barras de argamassa que são submetidas a condições adversas, sendo que o primeiro permite avaliar a potencialidade reativa do agregado utilizado e o segundo, a mitigação da expansão devido à utilização de uma adição ativa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b,c). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Cientec e são detalhados nos itens a seguir.

#### 4.3.1 Avaliação da reatividade potencial dos agregados pelo método acelerado

A potencialidade reativa dos agregados escolhidos foi avaliada através do ensaio de barras de argamassa pelo método acelerado proposto pela NBR 15557-4. Este experimento consiste na verificação da expansão pelo monitoramento dimensional de corpos-de-prova frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) 1N a 80°C (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b).

Segundo o método, devem ser moldados três corpos-de-prova com dimensões nominais de (25x25x285) mm. Além disso, esse estabelece as quantidades necessárias de cimento, agregado e água para a moldagem das barras, sendo, respectivamente, 440 g, 990 g e 206,8 g (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b). Deste modo, pode-se dizer que a argamassa preparada apresenta um traço, em massa, de 1:2,25 (cimento:agregado) e uma relação água/cimento de 0,47.

As frações granulométricas do agregado para a moldagem das barras são pré-definidas e estão apresentadas no quadro 9 e na figura 20 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b). Portanto, quando necessário, foi preciso submeter o material a um processo de moagem, utilizando um britador de mandíbula do Laboratório de Geotecnia da Cientec (figura 21), com objetivo de se obter porções mais finas para, então, ser realizado o peneiramento e posterior armazenagem em sacos plásticos fechados. As frações não foram lavadas, conforme indica a norma.

| Peneira com abertura de malha |                   | Quantidade de material (em massa) |       |
|-------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------|
| Passante                      | Retido            | %                                 | g     |
| 4,75 mm                       | 2,36 mm           | 10                                | 99,0  |
| 2,36 mm                       | 1,18 mm           | 25                                | 247,5 |
| 1,18 mm                       | 600 $\mu\text{m}$ | 25                                | 247,5 |
| 600 $\mu\text{m}$             | 300 $\mu\text{m}$ | 25                                | 247,5 |
| 300 $\mu\text{m}$             | 150 $\mu\text{m}$ | 15                                | 148,5 |

Quadro 9: granulometria requerida do material para ensaio



Figura 20: frações granulométricas do agregado para ensaio





Figura 21: britador de mandíbula

A mistura dos materiais foi realizada numa argamassadeira, conforme recomenda a NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b):

- a) misturar o cimento e a água em velocidade baixa por 30 segundos;
- b) ainda em velocidade baixa, acrescentar o agregado (figura 22) durante um intervalo de 30 segundos;
- c) mudar a velocidade para alta e misturar os materiais por 30 segundos;
- d) descansar a mistura por um minuto e 30 segundos e, nos primeiros 15 segundos, raspar o fundo e as paredes da cuba;
- e) misturar a argamassa por mais um minuto em velocidade alta.



Figura 22: colocação do agregado na argamassadeira

As fôrmas foram previamente lubrificadas com óleo mineral e providas de pinos para, então, receber duas camadas de argamassa compactadas por 20 golpes e regularizadas (figura 23). Em seguida, os moldes foram identificados e armazenados em câmara úmida por 24 horas (figura 24). Após, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados, medidos com paquímetro (precisão de 0,05 mm) (figura 25a) e extensômetro (precisão de 0,002 mm)

(figura 25b) e colocados em recipientes plásticos (figura 26a) para cura em estufa a 80°C (figura 26b), durante 24 horas. Depois desse período, as barras, uma de cada vez, tiveram seus comprimentos novamente medidos por paquímetro e extensômetro, de modo a registrar a leitura de referência. Subsequentemente, foram imersas em solução de hidróxido de sódio 1N e armazenadas em estufa a 80°C.

Conforme indica a NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b), o monitoramento das barras foi realizado nas idades de 16 e 30 dias, com três leituras intermediárias em cada período. Para o cálculo da expansão dos corpos-de-prova, foram comparadas as leituras de referência com as de cada idade, considerando-se a média dos três corpos-de-prova para a classificação da amostra.



Figura 23: (a) primeira camada de argamassa; (b) adensamento da primeira camada; (c) segunda camada de argamassa; (d) adensamento da segunda camada; (e) regularização da superfície; (f) moldagem finalizada



Figura 24: acondicionamento das fôrmas com os corpos-de-prova em câmara úmida



(a)



(b)

Figura 25: (a) leitura com paquímetro; (b) leitura com extensômetro



(a)



(b)

Figura 26: (a) armazenamento dos corpos-de-prova em recipientes plásticos, contendo água ou solução alcalina; (b) armazenamento em estufa a 80°C

### **4.3.2 Verificação da redução da expansão pelo método acelerado**

A eficácia do uso de cinza volante em reduzir a expansão foi verificada através do método acelerado, seguindo as recomendações<sup>12</sup> da NBR 15577-5 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008c). Este ensaio se assemelha ao método disposto na NBR 15577-4/08, detalhado anteriormente, diferenciando-se apenas pela substituição em massa de parte do cimento Portland por um determinado teor de adição.

---

<sup>12</sup> Não foi possível determinar se o cimento está de acordo com o recomendado pela NBR 15577-4/08.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para a avaliação da reatividade potencial dos agregados e a da redução da reação devido à substituição de parte do cimento Portland por cinza volante. No apêndice C estão dispostas as leituras das expansões das barras de argamassa para cada idade analisada e teores de cinzas volantes empregados. As expansões dispostas nos gráficos correspondem à média de três corpos-de-prova submetidos ao método acelerado.

### 5.1 REATIVIDADE POTENCIAL DOS AGREGADOS

As amostras de agregado ensaiadas para a verificação da sua potencialidade reativa apresentaram a evolução da expansão ao longo do ensaio conforme o gráfico 9.

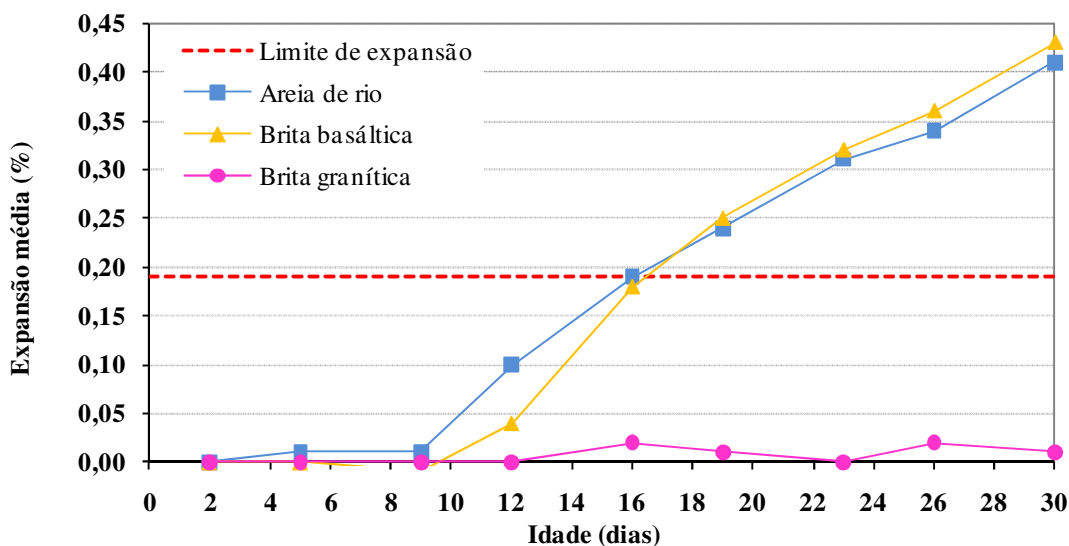


Gráfico 9: evolução das expansões dos corpos-de-prova sem adição

Com a análise do gráfico 9, pode-se observar que o comportamento potencialmente reativo da areia de rio e da brita basáltica foi claramente evidenciado. Nas primeiras idades, os corpos-de-prova não apresentaram expansão, mas, depois do seu início, a expansão manteve-se

crecente até o fim do ensaio (30 dias), não se estabilizando. Mesmo com expansões acima do limite recomendado pela NBR 15577-1/08, as barras não apresentaram fissuração e exsudação de gel (figura 27). Em relação à amostra de brita granítica, seu comportamento permaneceu potencialmente inócuo durante todo o ensaio, indicando a sua resistência à RAA.



Figura 27: corpos-de-prova após ensaio

Uma amostra de brita basáltica de mesma procedência foi ensaiada por Tiecher (2006) obtendo, aos 16 dias, 0,37% de expansão. Este valor se mostrou diferente do encontrado neste estudo, onde a expansão na mesma idade foi de 0,18%. A autora também ensaiou uma amostra de areia quartzosa de rio de mesma origem, resultando numa expansão de 0,27%, também aos 16 dias, confrontando com o valor de 0,19%, encontrado na presente pesquisa. O fato pode ser explicado tanto pela utilização de uma amostra diferente de agregado, como pelo uso de um cimento Portland CP V-ARI com composição diferente. No caso da brita, as diferentes formas dos grãos, resultantes do processo de britagem (tipo de britador utilizado), também é um fator influente.

## 5.2 REDUÇÃO DA EXPANSÃO PELO USO DE TEORES DE CINZAS VOLANTES

Pela análise dos resultados obtidos no item anterior, foi escolhida a amostra de brita basáltica para os ensaios subsequentes, visto a sua maior expansão no fim de 30 dias. Mesmo que a

amostra de areia quartzosa de rio tenha atingido expansões semelhantes à da escolhida, foi levado em conta o caráter comumente reativo dos basaltos, relatado por estudos de Tiecher (2006).

Os gráficos 10 a 12 apresentam o comportamento de redução da expansão nos corpos-de-prova devido à substituição de cimento Portland por Cinza F, Cinza M e Cinza G. Além disso, mostram que, com o aumento do teor de substituição de cimento Portland por cinza volante, comprova-se que é possível a redução da expansão se comparado com o comportamento sem adição. Com exceção do teor de 5%, os teores empregados foram eficazes em manter a expansão abaixo do limite recomendado no fim de 30 dias.

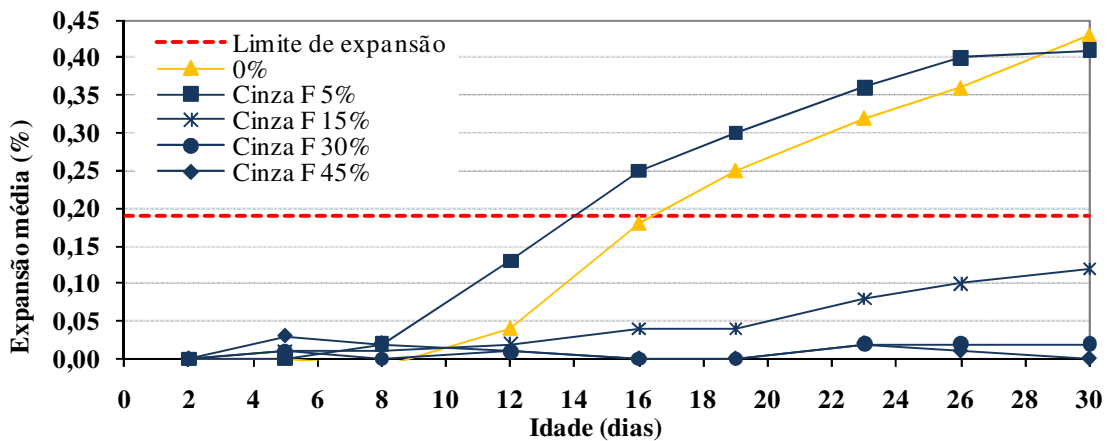


Gráfico 10: evolução da redução da expansão pela Cinza F

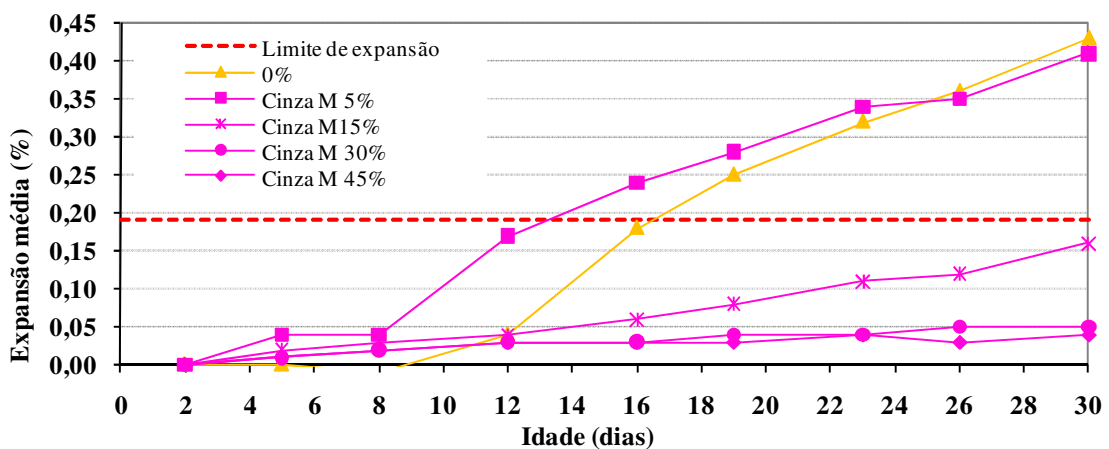


Gráfico 11: evolução da redução da expansão pela Cinza M

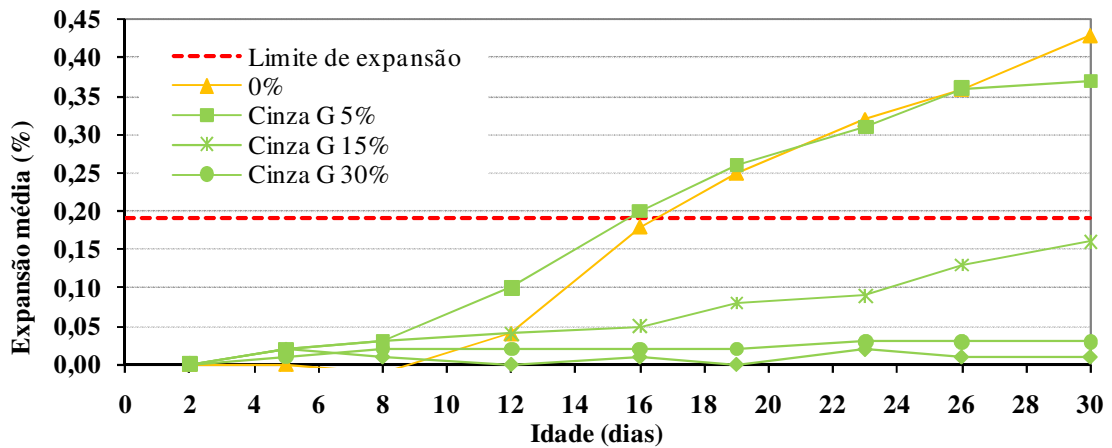


Gráfico 12: evolução da redução da expansão pela Cinza G

Para a análise da influência dos teores, nos gráficos 13 e 14 são mostradas as expansões ao fim de 16 e 30 dias relacionadas aos teores de cinzas utilizados. Consta-se que os comportamentos dos teores de cinzas nas duas idades seguem o mesmo padrão de desempenho.

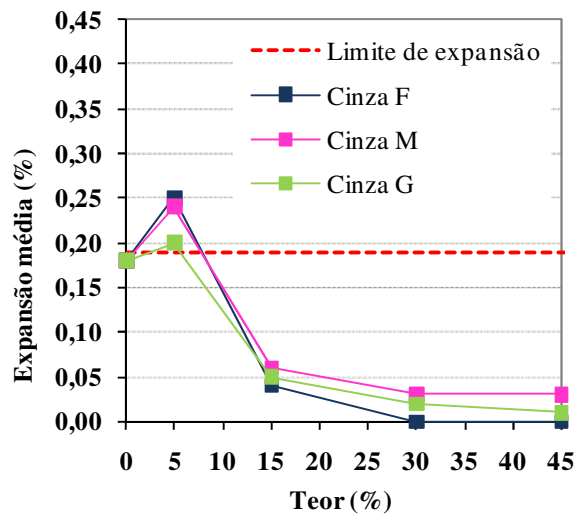


Gráfico 13: expansão aos 16 dias devido aos teores de cinzas



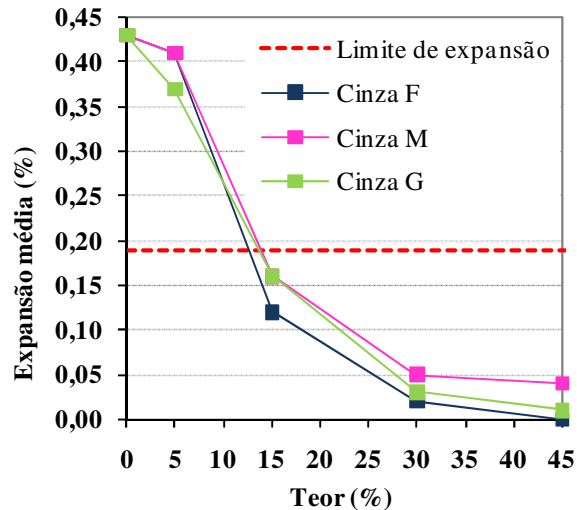


Gráfico 14: expansão aos 30 dias devido aos teores de cinzas

Aos 16 dias, somente o teor de 5% apresentou expansões superiores ao da não utilização de cinza, porém, ao término do ensaio, essas se mantiveram abaixo do valor da expansão atingida pelo concreto de referência, logo demonstra a pequena contribuição desse teor em reduzir a reação. Percebe-se, ainda, que a Cinza F teve a melhor eficiência com exceção de dois casos: aos 16 dias, no teor de 5%, os corpos-de-prova apresentaram valores de expansão superiores aos com as demais cinzas e, ao fim do ensaio, onde se igualaram aos com a Cinza G, também no teor de 5%. As expansões verificadas aos 30 dias pela utilização da Cinza G foram levemente superiores às das outras cinzas em todos os teores. Entretanto, aos 16 dias, a redução da reação por essa cinza apenas foi superior ao do teor de 5% de uso da Cinza F.

Sendo assim, plotaram-se os gráficos 15 a 18, a fim de se analisar a evolução e comparação entre as expansões resultantes devido a cada teor de cinzas volantes utilizado. Em cada gráfico também são apresentadas as expansões referentes a não utilização de cinzas.

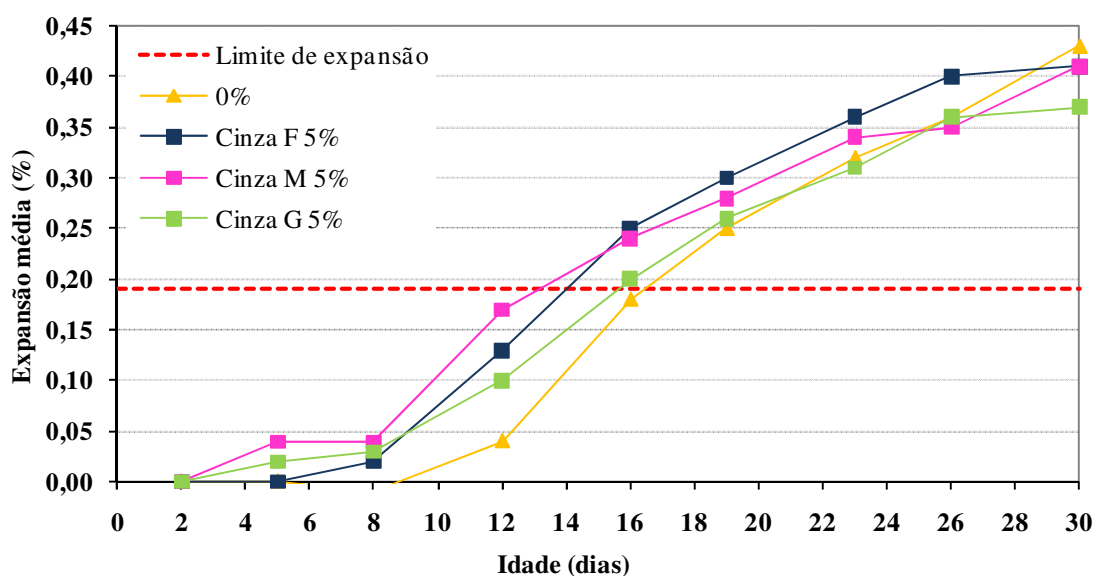


Gráfico 15: evolução das expansões com teor de 5% de cinza volante

No comportamento apresentado no gráfico 15, fica claro que, até próximo do fim do ensaio, a utilização de um teor de 5% de cinzas acarretou expansões mais elevadas que as da amostra de referência. Tal fato pode ser explicado por Bleszynski e Thomas (1998), que atribuem a eficácia da cinza volante ao refinamento da estrutura dos poros e explicam a possível ocorrência de expansões, dentre outras causas, pela quantidade insuficiente de cinza volante. Então, pode-se dizer que, em teores mais baixos, a cinza não tem a capacidade de reduzir a quantidade de álcalis disponível e torna a estrutura mais densa (menos porosa), não permitindo, provavelmente, a fácil acomodação e percolação do gel pelos poros da argamassa. Próximo ao fim do período de ensaio ocorre a redução do crescimento da expansão pela menor quantidade de reagente disponível devido à reação pozolânica.

Quando não há a adição de cinza, o gel consegue se dispersar em menores idades, sem expandir, uma vez que possui espaço para o seu desenvolvimento, mas, em idades superiores, existe uma maior quantidade de gel, dando início à expansão da argamassa.

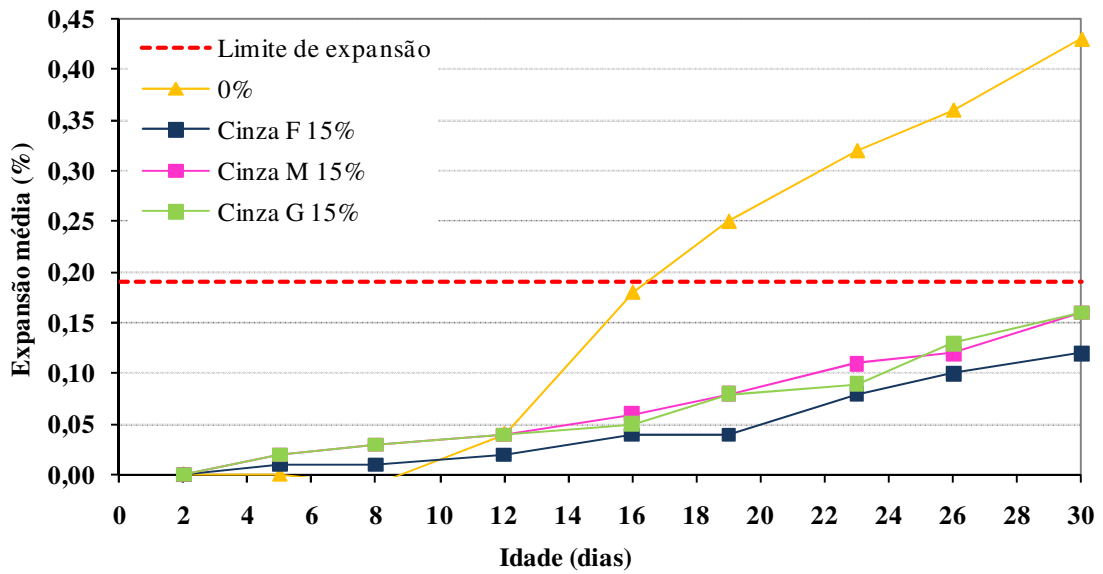


Gráfico 16: evolução das expansões com teor de 15% de cinza volante

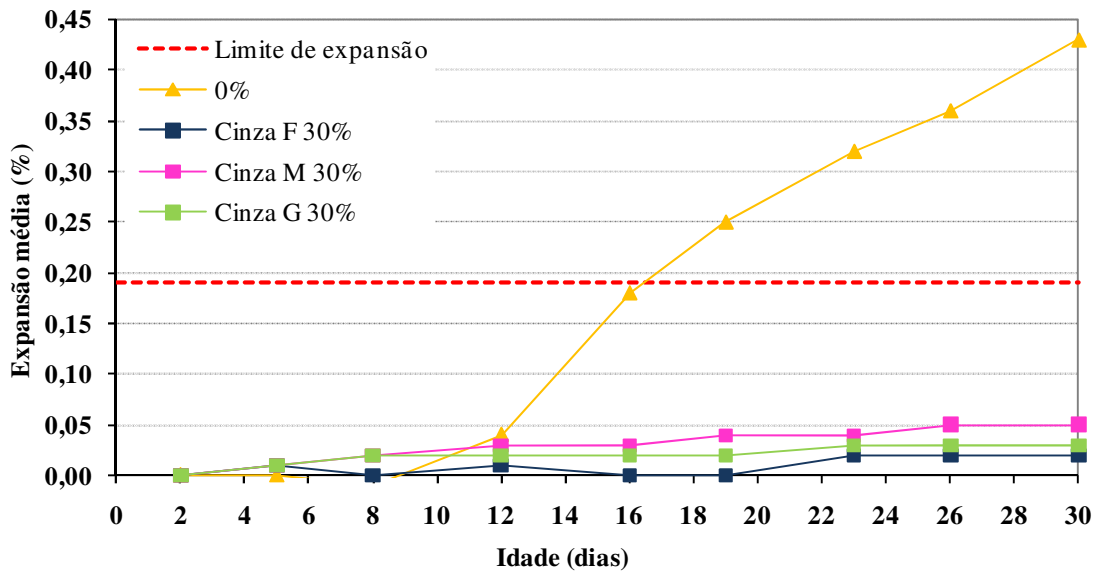


Gráfico 17: evolução das expansões com teor de 30% de cinza volante

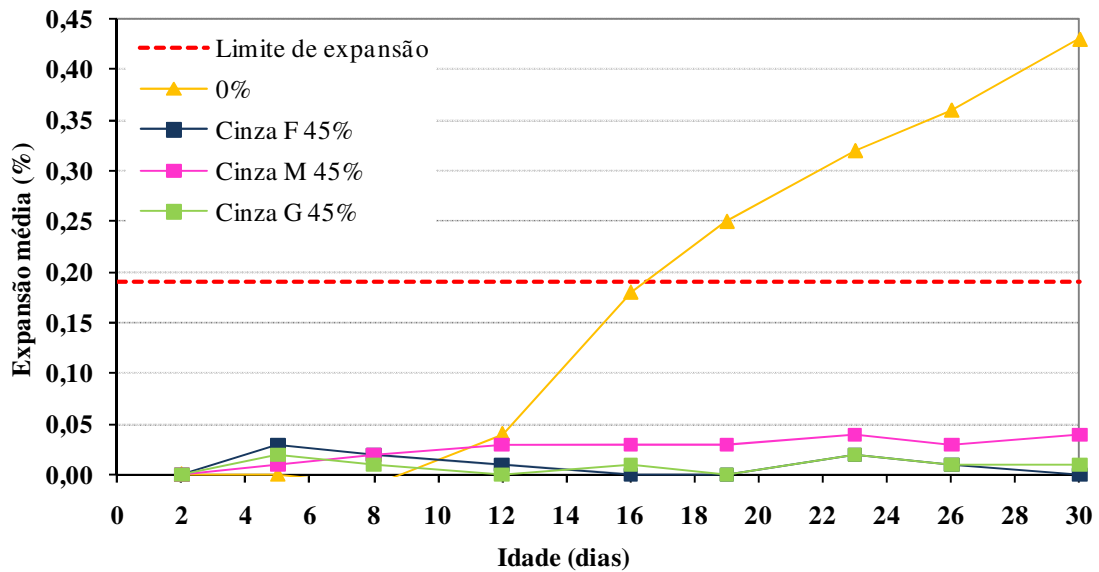


Gráfico 18: evolução das expansões com teor de 45% de cinza volante

Conforme se observa pelos gráficos 16 a 18, os teores acima de 15% se mostraram eficazes em reduzir a expansão devido à RAA a valores abaixo do limite especificado. Além disso, nota-se que a redução, num dado teor, foi maior para a Cinza F, seguida pela Cinza G e, por fim, pela Cinza M. Deste modo, considerando o parâmetro físico das cinzas, ficou evidenciado que, para um mesmo teor, a eficiência não depende somente da superfície específica, mas também de outros fatores como a forma dos grãos, a distribuição granulométrica e a composição química.

O gráfico 19 dispõe as evoluções da reação para as cinzas utilizadas em todos os teores testados. Os comportamentos apresentados nos gráficos referentes aos teores de substituição de cimento por cinza estão de acordo com os experimentos de Sherata e Thomas (2000, p. 1069), onde salientam que a redução da expansão cresce com o aumento do teor de cinza.

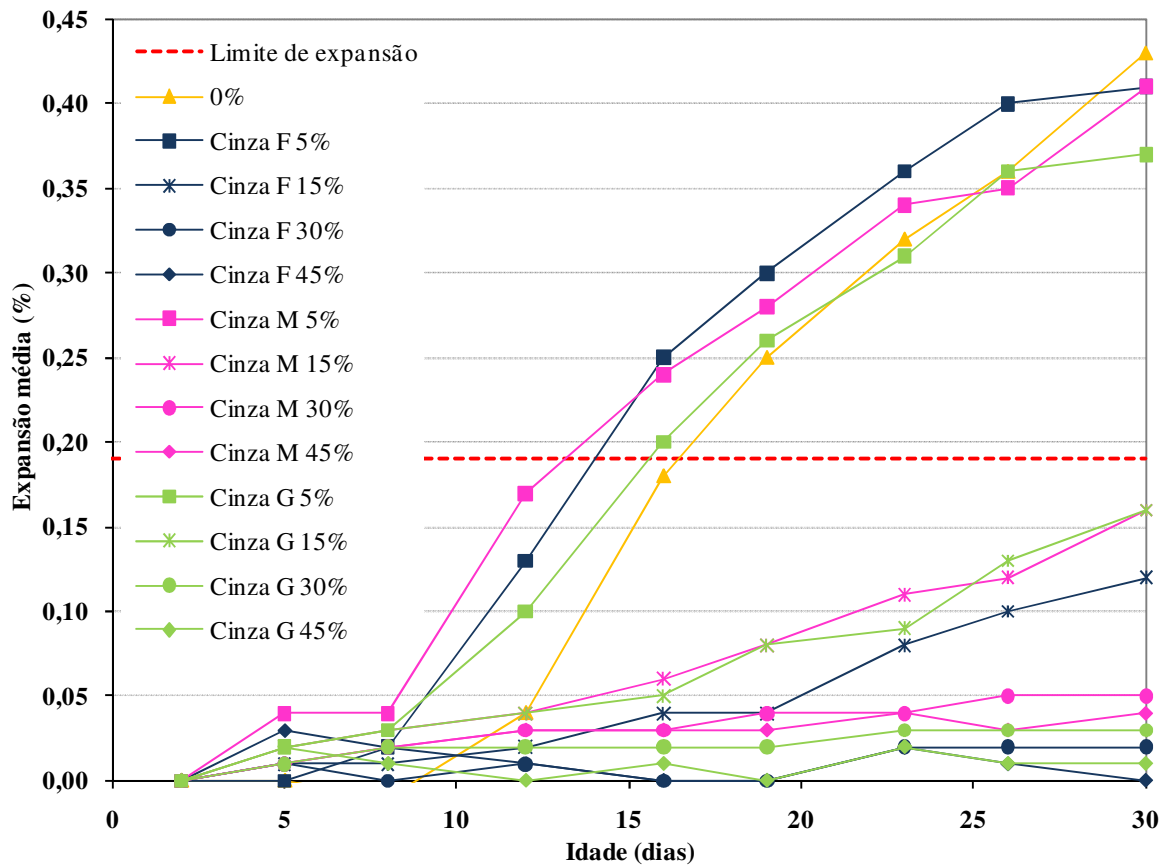


Gráfico 19: evolução das expansões em todos teores de cinza volante

A partir dos resultados individuais das expansões dos corpos-de-prova ensaiados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com o auxílio do software *Statistica* – versão 5.0. O objetivo era verificar a influência dos tipos de cinzas e dos teores na redução da expansão devido à RAA aos 16 e 30 dias. Quando o *p-level* (probabilidade, teste t de Student) é menor que 0,05, o fator referente é considerado significativo sobre a variável de resposta a um nível de confiança de 95%. Os resultados para as análises aos 16 dias estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1: análise de variância para expansões aos 16 dias

| Fator             | Graus de liberdade | Soma quadrática | Média quadrática | Teste F  | Significância <i>p-level</i> | Significância |
|-------------------|--------------------|-----------------|------------------|----------|------------------------------|---------------|
| Tipo de cinza (A) | 2                  | 0,001898        | 0,000949         | 13,77419 | 0,000057                     | Significativo |
| Teor de cinza (B) | 4                  | 0,358324        | 0,089581         | 1300,371 | 0,000000                     | Significativo |
| Interação AxB     | 8                  | 0,006232        | 0,000779         | 11,31452 | 0,000000                     | Significativo |
| Erro              | 30                 | 0,002070        | 0,000069         | -        | -                            | -             |

Pelos resultados da ANOVA, constata-se que, para os 16 dias, o tipo e o teor de cinza, bem como a interação entre os dois apresentam influência significativa na expansão devido à RAA. Os gráficos 20 a 22 mostram a tendência de comportamento entre as variáveis analisadas.

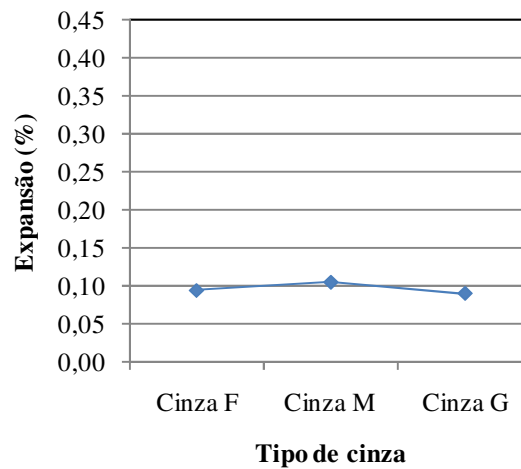


Gráfico 20: efeito isolado do tipo de cinza na expansão aos 16 dias

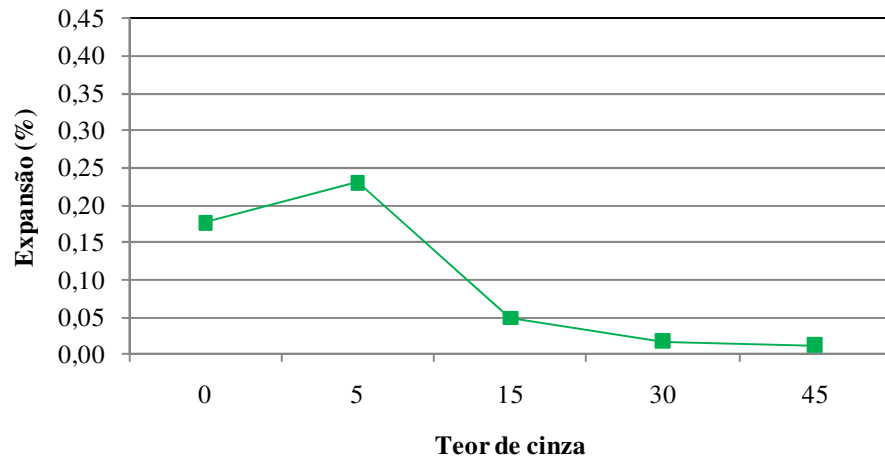


Gráfico 21: efeito isolado do teor de cinza na expansão aos 16 dias

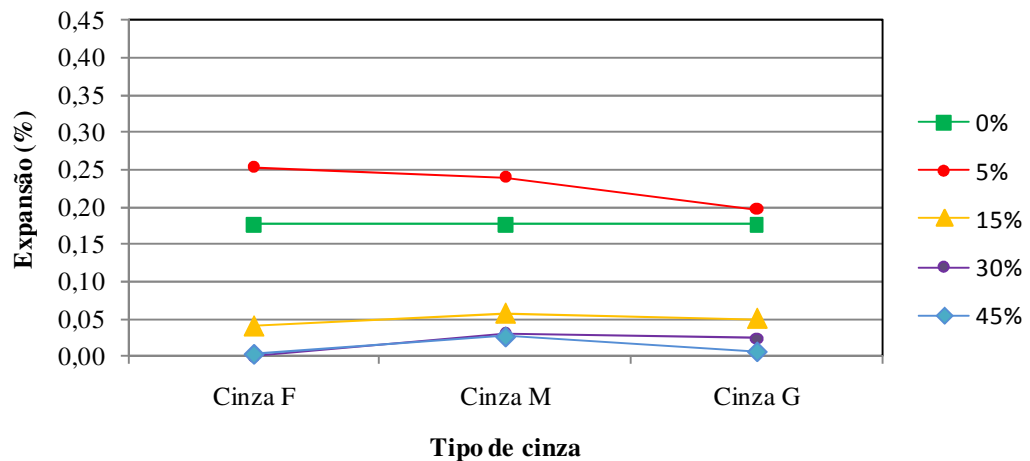


Gráfico 22: efeito da interação entre o teor e o tipo de cinza na expansão aos 16 dias

Os resultados para as análises aos 30 dias estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2: análise de variância para expansões aos 30 dias

| Fator             | Graus de liberdade | Soma quadrática | Média quadrática | Teste F  | Significância <i>p-level</i> | Significância     |
|-------------------|--------------------|-----------------|------------------|----------|------------------------------|-------------------|
| Tipo de cinza (A) | 2                  | 0,004494        | 0,002247         | 2,880342 | 0,071735                     | Não significativo |
| Teor de cinza (B) | 4                  | 1,358280        | 0,339570         | 435,3462 | 0,000000                     | Significativo     |
| Interação AxB     | 8                  | 0,007504        | 0,000938         | 1,202991 | 0,330515                     | Não significativo |
| Erro              | 30                 | 0,023400        | 0,000780         | -        | -                            | -                 |

Os resultados obtidos na ANOVA, para os 30 dias, indicam que apenas o teor de cinza apresenta influência significativa na expansão devido à RAA. Nem o tipo de cinza e a interação entre o tipo de cinza e o teor de cinza foram significativos para o nível de confiança especificado. Pelos gráficos 23 a 25 observa-se o comportamento entre as variáveis analisadas.

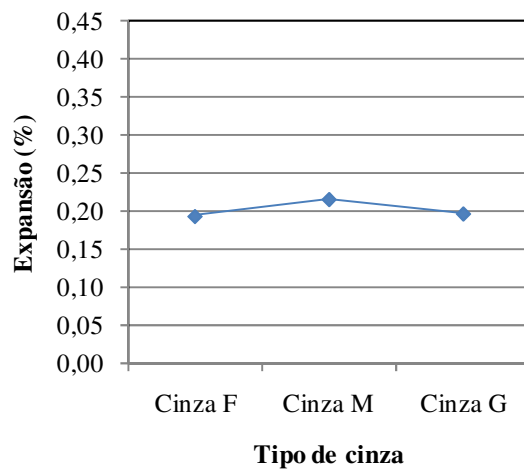


Gráfico 23: efeito isolado do tipo de cinza na expansão aos 30 dias

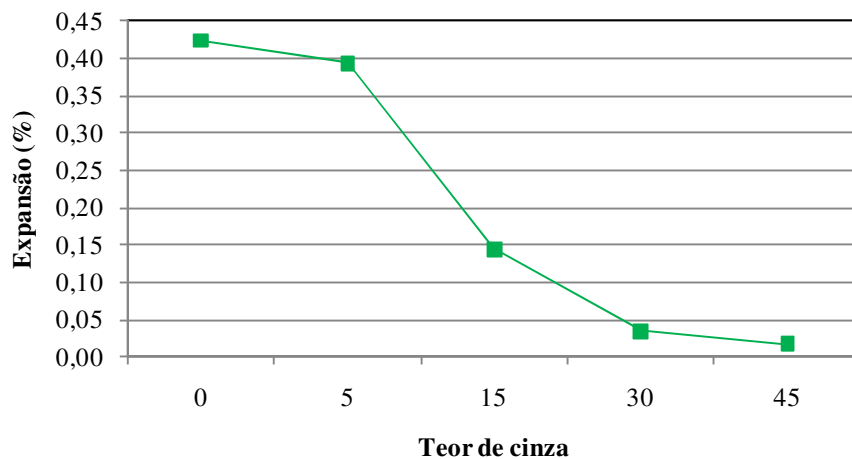


Gráfico 24: efeito isolado do teor de cinza na expansão aos 30 dias



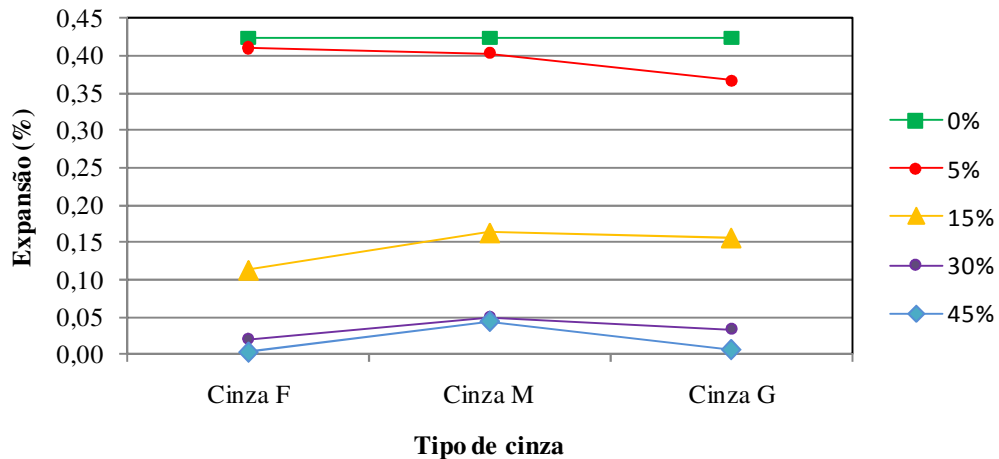


Gráfico 25: efeito da interação entre o teor e o tipo de cinza na expansão aos 30 dias

Constatou-se que, com o aumento do teor de substituição de cimento Portland por cinza volante, as expansões devido à RAA se reduziram, mas o comportamento dessa redução não aconteceu de forma linear. Sendo assim, foi realizada, para as expansões referentes aos teores testados, uma comparação múltipla de médias pelo método de Duncan (tabela 3).

Tabela 3: comparação múltipla de médias das expansões pelo método de Duncan

| Expansão média (%) | Resultados do teste de Duncan |            |            |            |            |            |
|--------------------|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                    | Teor de cinza (%)             | 0          | 5          | 15         | 30         | 45         |
| 0,42               | 0                             | -          | 0,030097 a | 0,000061 a | 0,000053 a | 0,000034 a |
| 0,39               | 5                             | 0,030097 a | -          | 0,000138 a | 0,000061 a | 0,000053 a |
| 0,14               | 15                            | 0,000061 a | 0,000138 a | -          | 0,000138 a | 0,000061 a |
| 0,03               | 30                            | 0,000053 a | 0,000061 a | 0,000138 a | -          | 0,215401 b |
| 0,02               | 45                            | 0,000034 a | 0,000053 a | 0,000061 a | 0,215401 b | -          |

\* Valores marcados com letras iguais indicam médias de expansão estatisticamente diferentes.

|               |               |                |                |                |
|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 0%<br>(0,42%) | 5%<br>(0,39%) | 15%<br>(0,14%) | 30%<br>(0,03%) | 45%<br>(0,02%) |
|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|

Pela análise da tabela 3, verifica-se que os valores médios das expansões resultantes para os teores de 0% a 15% diferem estatisticamente entre si e entre o grupo composto pelos teores de 30% e 45%, que não diferem entre si. Fica, assim, evidente que não é vantajosa a utilização de

um teor acima de 30% para mitigar a RAA, visto que o acréscimo de cinza volante acarreta a diminuição da resistência do concreto.

## 6 CONCLUSÃO

No presente trabalho objetivou-se a determinação de um teor de cinza volante capaz de reduzir a RAA a limites pré-estabelecidos pela NBR 15577-1/08. Empregou-se, para isso, o método de ensaio acelerado de barras de argamassa contido na NBR 15577-4/08, para a determinação da potencialidade reativa dos agregados, e na NBR 15577-5/08, para a verificação da redução da RAA.

Foram selecionadas três amostras de agregados da Região Metropolitana de Porto Alegre, sendo uma de areia quartzosa de rio, uma de brita basáltica e uma de brita granítica. Escolheu-se o cimento Portland CP V-ARI para o emprego na pesquisa pelo seu menor conteúdo de adições minerais. Foi possível, então, tanto identificar a potencialidade reativa dos materiais testados como a influência do teor de substituição de cimento por cinza volante. As três amostras de cinzas volantes utilizadas foram escolhidas em função de suas superfícies específicas Blaine, como alta (4195 cm<sup>2</sup>/g), média (2825 cm<sup>2</sup>/g) e baixa (2680 cm<sup>2</sup>/g). Além disso, fixaram-se os teores de cinza volante em 0%, 5%, 15%, 30% e 45%.

A seguir são apresentadas as conclusões referentes à potencialidade reativa dos agregados selecionados e ao efeito da cinza volante na redução da RAA em concretos com esses materiais. Salienta-se, também, que os resultados foram analisados estatisticamente.

Salienta-se que as conclusões aqui dispostas referem-se às condições específicas do programa experimental desenvolvido no presente trabalho. Não devem, portanto, ser consideradas de forma absoluta, sendo necessária a realização de novas pesquisas para confirmar sua representatividade, bem como complementar o conhecimento do desempenho dos concretos com cinza volante frente à redução da RAA.

## 6.1 POTENCIALIDADE REATIVA DOS AGREGADOS

Através do ensaio da NBR 15577-4/08 foi possível concluir que:

- a) as amostras de areia natural quartzosa de rio e de brita basáltica foram classificadas em potencialmente reativas, sendo que a segunda apresentou a maior expansão;
- b) a amostra de brita granítica apresentou comportamento potencialmente inócuo ao fim do ensaio.

## 6.2 REDUÇÃO DA RAA PELO USO DE CINZAS VOLANTES

Com a amostra mais reativa, a de brita basáltica, testaram-se teores de cinzas volantes para a verificação da redução da RAA, também por ensaios de barras de argamassa pelo método acelerado. Sendo possível concluir:

- a) a redução da expansão cresce com o aumento do teor de cinza;
- b) somente o teor de 5% não foi eficaz na redução da RAA a valores abaixo do limite estabelecido aos 30 dias, mas pôde levemente diminuir a expansão, se comparado com as expansões resultantes dos corpos-de-prova sem adição;
- c) aos 16 dias, apenas o teor de 5% apresentou expansões maiores ao de não utilização de cinza;
- d) a cinza de maior superfície específica, observada para a Cinza F, resultou na melhor eficiência, com exceção do teor de 5%, aos 16 dias;
- e) a cinza de média superfície específica, Cinza G, apresentou expansões superiores às das outras cinzas em todos os teores, com exceção do teor de 5%, aos 16 dias;
- f) para um mesmo teor, acima de 15%, foi verificado que, se considerado o parâmetro físico das cinzas, a eficiência não depende somente da superfície específica.

Para a análise da influência dos tipos e teores de cinzas empregados, realizou-se a ANOVA, podendo-se enumerar as seguinte conclusões:

- a) aos 16 dias, o tipo e o teor de cinza, bem como a interação entre os dois apresentam influência significativa na expansão;

- b) aos 30 dias, apenas o teor de cinza apresenta influência significativa na expansão. Nem o tipo de cinza e a interação entre o tipo de cinza e o teor de cinza foram significativos.

Como a redução da RAA pelo emprego de cinzas volantes não se mostrou linear, realizou-se uma comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, podendo se concluir:

- a) a utilização de teores de 0% a 15% de cinzas volantes apresentou expansões estatisticamente diferentes entre si e entre o grupo composto pelos teores de 30% e 45%, que não diferem entre si;
- b) o uso de teores acima de 30% de cinza não é justificável, visto a redução ocasionada na resistência do concreto.

Sendo assim, pode-se concluir que a utilização de um teor de substituição de 15% de cimento Portland por cinza volante foi suficiente em manter as expansões devido à RAA a valores abaixo do limite recomendado.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, T. Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na região metropolitana do Recife. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2. 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006, 1 CD.

ANDRADE, W. P. (Ed.). **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ATSM C-1260/05a: Standard test method for potencial alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). In: \_\_\_\_\_. **Annual book of ASTM standards**. West Conshohocken, 2005. s. 4, v. 4.2.

\_\_\_\_\_. ASTM C-1567/07: Standard test method for determining the potencial alkali-silica reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate (accelerated mortar-bar method). In: \_\_\_\_\_. **Annual book of ASTM standards**. West Conshohocken, 2007. s. 4, v. 4.2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1**: agregados – reatividade álcali-agregado – parte 1: guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-4**: agregados – reatividade álcali-agregado – parte 4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-5**: agregados – reatividade álcali-agregado – parte 5: determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008c.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-6**: agregado – reatividade álcali-agregado – parte 6: determinação da expansão em prismas de concreto, Rio de Janeiro, 2008d.

\_\_\_\_\_. **NBR 7389**: agregados – análise petrográfica de agregado para concreto. Rio de Janeiro, 2009.

AZEVEDO, A. F. F. L. C. **Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes**. 2002. 456 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade do Minho, Guimarães. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1822/7>>. Acesso em: 28 nov. 2009.

BICZÓK, I. **Corrosión y Protección del Hormigón**. 6. ed. Bilbao: Urmo, 1972.

BHATTY, M. S. Y. Mechanism of pozzolanic reactions and control of alkali-aggregate expansion. **Cement, Concrete and Aggregates**, West Conshohocken, v. 7, n. 2, p. 69-77, Jan. 1985.

BLESZYNSKI, R. F.; THOMAS, M. D. A. Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete immersed in alkaline solutions. **Advanced Cement Based Materials**, New York, v. 7, n. 2, p. 66-78, Mar. 1998.

- CHATTERJI, S. The role of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in the breakdown of Portland cement concrete due to alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, New York, Pergamon Press, v. 9, n. 2, p. 185-188, Mar. 1979.
- DECHICHI, M. **Reação álcali-agregado**: estudo das propriedades elásticas e mecânicas através da utilização de inibidores. 1998. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: < <http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000186794>>. Acesso em: 29 nov. 2009.
- DENG, M.; TANG, M. Mechanism of dedolomitization and expansion of dolomitic rocks. **Cement and Concrete Research**, New York, Pergamon Press, v. 23, n. 6, p. 1397-1408, Nov. 1993.
- FORUM, C. S. Alkali-Reaktion der Zuschlagstoffe im Beton. **Beton und Stahlbetonbau**, Berlin, n. 7, p. 163-168, Dec. 1965.
- GILLOTT, J. E. Alkali-aggregate reactions in concrete. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 9, n. 4, p. 303-326, Dec. 1975.
- GLASSER, F. P. Chemistry of the alkali-aggregate reaction. In: SWAMY, R. N. (Ed.). **The alkali-silica reaction in concrete**. Glasgow: Blackie and Son, 1992. p. [45-68].
- HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado**: efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa. 1999. 257 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- HOBBS, D.W. **Alkali-silica reaction in concrete**. London: Thomas Telford, 1988.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.
- MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**. 2007. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. atual. São Paulo: Pini, 1997.
- PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado no concreto**. 1981. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- POOLE, A. B. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. In: SWAMY, R. N. (Ed.). **The alkali-silica reaction in concrete**. Glasgow: Blackie and Son, 1992. p. [16-44].
- PREZZY, M.; MONTEIRO, P. J. 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**, Farmington Hills, v. 94, n. 1, p. 10-17, Jan./Feb. 1997.
- PRISZKULNIK, S. Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto afetadas pelas reações cimento-agregado. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 1017-1070. v. 2.

SARKAR, L.; ZOLLINGER, D. G.; MUKHOPADHYAY, K.; SEUNGWOOK, L.; SHON, C. Handbook for identification of alkali-silica reactivity in airfield pavement. **Advisory Circular**, Washington, Federal Aviation Administration, n. 150/5380-8A, 2009. Disponível em: <<http://www.faa.gov/arp/publications/acs5380-8a.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2009.

SHERATA, M. H.; THOMAS, M. D. A. The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, New York, Pergamon Press, v. 30, n. 7, p. 1063-1072, Sept. 2000.

SHERATA, M. H.; THOMAS, M. D. A.; BLESZYNSKI, R. F. The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrate cement pastes. **Cement and Concrete Research**, New York, Pergamon Press, v. 29, n. 12, p. 1915-1920, Dec. 1999.

THOMAS, M. D. A.; NIXON, P. J.; PETTIFER, K. The effect of pulverized-fuel ash with a high total alkali content on alkali-silica reaction in concrete containing natural UK aggregate. In: MALHOTRA, V. M. (Ed.). **Proceedings of the Second CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete**. Detroit: American Concrete Institute, 1991. p. 919-940. v. 2.

TIECHER, F. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado**. 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/8021>>. Acesso em: 29 nov. 2009.

THALMANN, C.; ZINGG, J.; RYTZ, G.; STRAHM, K.; WYSS, C. Verhinderung von Betonschäden infolge Alkali-Aggregat-Reaktion. *Tec 21*, Zürich, n. 15, p. 19-25, 2001. Disponível em: <[http://www.b-i-g.ch/publikationen/AAR\\_tec21\\_01\\_d.pdf](http://www.b-i-g.ch/publikationen/AAR_tec21_01_d.pdf)>. Acesso em: 29 nov. 2009.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado: mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo**. 2002. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000255813>>. Acesso em: 29 nov. 2009.

WANG, H.; GILLOT, J. E. Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide. **Cement and Concrete Research**, New York, Pergamon Press, v. 21, n. 4, p. 647-654, July 1991.

XU, G. J. Z.; WATT, D. F.; HUDEC; P. P. Effectiveness of mineral admixtures in reducing ASR expansion. **Cement and Concrete Research**, New York, Pergamon Press, v. 25, n. 6, p. 1225-1236, Aug. 1995.



**APÊNDICE A – Resultados das leituras das expansões das barras de argamassa das amostras de agregados com os teores de cinzas utilizados**

| Agregado: Areia natural<br>Cimento: CP V - ARI<br>Data de moldagem: 07/01/10 |              |    |                         |                           |              |                    | Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Data de moldagem: 07/01/10 |                         |                           |              |                    |
|--|--------------|----|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|--|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|
| Data   | Idade (dias) | CP | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) | CP   | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) |
| 08/01/10   | 1            | 1  | 296,8                   | 2,894                     | -            | -                  | 1  | 295,8                   | 1,750                     | -            | -                  |
|  |              | 2  | 296,8                   | 2,801                     | -            |                    | 2  | 295,0                   | 0,592                     | -            |                    |
|  |              | 3  | 296,6                   | 2,797                     | -            |                    | 3  | 294,8                   | 0,328                     | -            |                    |
| 09/01/10   | 2            | 1  | 296,8                   | 3,054                     | 0,00         | 0,00               | 1  | 295,8                   | 1,885                     | 0,00         | 0,00               |
|  |              | 2  | 296,8                   | 2,966                     | 0,00         |                    | 2  | 295,0                   | 0,684                     | 0,00         |                    |
|  |              | 3  | 296,6                   | 2,864                     | 0,00         |                    | 3  | 244,6                   | 0,430                     | 0,00         |                    |
| 12/01/10   | 5            | 1  | -                       | 3,083                     | 0,01         | 0,01               | 1  | -                       | 1,843                     | -0,01        | 0,00               |
|  |              | 2  | -                       | 2,962                     | 0,00         |                    | 2  | -                       | 0,710                     | 0,01         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 2,891                     | 0,01         |                    | 3  | -                       | 0,423                     | 0,00         |                    |
| 16/01/10   | 9            | 1  | -                       | 3,053                     | 0,00         | 0,01               | 1  | -                       | 1,869                     | -0,01        | -0,01              |
|  |              | 2  | -                       | 3,023                     | 0,02         |                    | 2  | -                       | 0,718                     | 0,01         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 2,906                     | 0,01         |                    | 3  | -                       | 0,369                     | -0,02        |                    |
| 19/01/10   | 12           | 1  | -                       | 3,383                     | 0,11         | 0,10               | 1  | -                       | 2,013                     | 0,04         | 0,04               |
|  |              | 2  | -                       | 3,265                     | 0,10         |                    | 2  | -                       | 0,808                     | 0,04         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 3,160                     | 0,10         |                    | 3  | -                       | 0,525                     | 0,04         |                    |
| 23/01/10   | 16           | 1  | -                       | 3,635                     | 0,19         | 0,19               | 1  | -                       | 2,380                     | 0,17         | 0,18               |
|  |              | 2  | -                       | 3,555                     | 0,20         |                    | 2  | -                       | 1,180                     | 0,17         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 3,406                     | 0,18         |                    | 3  | -                       | 0,904                     | 0,19         |                    |
| 26/01/10   | 19           | 1  | -                       | 3,785                     | 0,24         | 0,24               | 1  | -                       | 2,542                     | 0,22         | 0,25               |
|  |              | 2  | -                       | 3,705                     | 0,25         |                    | 2  | -                       | 1,370                     | 0,23         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 3,594                     | 0,24         |                    | 3  | -                       | 1,145                     | 0,29         |                    |
| 30/01/10   | 23           | 1  | -                       | 3,965                     | 0,30         | 0,31               | 1  | -                       | 2,760                     | 0,29         | 0,32               |
|  |              | 2  | -                       | 3,898                     | 0,31         |                    | 2  | -                       | 1,575                     | 0,30         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 3,847                     | 0,33         |                    | 3  | -                       | 1,355                     | 0,38         |                    |
| 02/02/10   | 26           | 1  | -                       | 4,084                     | 0,34         | 0,34               | 1  | -                       | 2,833                     | 0,32         | 0,36               |
|  |              | 2  | -                       | 3,990                     | 0,34         |                    | 2  | -                       | 1,680                     | 0,34         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 3,905                     | 0,35         |                    | 3  | -                       | 1,460                     | 0,42         |                    |
| 06/02/10   | 30           | 1  | -                       | 4,315                     | 0,42         | 0,41               | 1  | -                       | 3,020                     | 0,38         | 0,43               |
|  |              | 2  | -                       | 4,192                     | 0,41         |                    | 2  | -                       | 1,880                     | 0,40         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 4,106                     | 0,41         |                    | 3  | -                       | 1,636                     | 0,49         |                    |

| Agregado: Brita granítica  |              |    |                         |                           |              |                    |
|----------------------------|--------------|----|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|
| Cimento: CP V - ARI        |              |    |                         |                           |              |                    |
| Data de moldagem: 25/01/10 |              |    |                         |                           |              |                    |
| Data                       | Idade (dias) | CP | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) |
| 26/01/10                   | 1            | 1  | 296,4                   | 2,474                     | -            | -                  |
|                            |              | 2  | 296,8                   | 2,788                     | -            |                    |
|                            |              | 3  | 297,0                   | 3,134                     | -            |                    |
| 27/01/10                   | 2            | 1  | 296,4                   | 2,620                     | 0,00         | 0,00               |
|                            |              | 2  | 296,8                   | 2,956                     | 0,00         |                    |
|                            |              | 3  | 297,0                   | 3,304                     | 0,00         |                    |
| 30/01/10                   | 5            | 1  | -                       | 2,630                     | 0,00         | 0,00               |
|                            |              | 2  | -                       | 2,960                     | 0,00         |                    |
|                            |              | 3  | -                       | 3,290                     | 0,00         |                    |
| 02/02/10                   | 9            | 1  | -                       | 2,642                     | 0,01         | 0,00               |
|                            |              | 2  | -                       | 2,955                     | 0,00         |                    |
|                            |              | 3  | -                       | 3,296                     | 0,00         |                    |
| 06/02/10                   | 12           | 1  | -                       | 2,648                     | 0,01         | 0,00               |
|                            |              | 2  | -                       | 2,970                     | 0,00         |                    |
|                            |              | 3  | -                       | 3,306                     | 0,00         |                    |
| 10/02/10                   | 16           | 1  | -                       | 2,690                     | 0,02         | 0,02               |
|                            |              | 2  | -                       | 3,007                     | 0,02         |                    |
|                            |              | 3  | -                       | 3,330                     | 0,01         |                    |
| 13/02/10                   | 19           | 1  | -                       | 2,690                     | 0,02         | 0,01               |
|                            |              | 2  | -                       | 2,970                     | 0,00         |                    |
|                            |              | 3  | -                       | 3,314                     | 0,00         |                    |
| 17/02/10                   | 23           | 1  | -                       | 2,630                     | 0,00         | 0,00               |
|                            |              | 2  | -                       | 2,950                     | 0,00         |                    |
|                            |              | 3  | -                       | 3,302                     | 0,00         |                    |
| 20/02/10                   | 26           | 1  | -                       | 2,690                     | 0,02         | 0,02               |
|                            |              | 2  | -                       | 2,992                     | 0,01         |                    |
|                            |              | 3  | -                       | 3,352                     | 0,02         |                    |
| 24/02/10                   | 30           | 1  | -                       | 2,670                     | 0,02         | 0,01               |
|                            |              | 2  | -                       | 2,980                     | 0,01         |                    |
|                            |              | 3  | -                       | 3,320                     | 0,01         |                    |

| Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Cinza: Cinza F Teor: 5%<br>Data de moldagem: 05/04/10 |              |    |                         |                           |              |                    | Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Cinza: Cinza F Teor: 15%<br>Data de moldagem: 05/04/10 |                         |                           |              |                    |
|---|--------------|----|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|--|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|
| Data  | Idade (dias) | CP | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) | CP   | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) |
| 06/04/10  | 1            | 1  | 295,2                   | 1,440                     | -            | -                  | 1  | 295,2                   | 1,237                     | -            | -                  |
|   |              | 2  | 295,5                   | 1,688                     | -            |                    | 2  | 295,4                   | 1,375                     | -            |                    |
|   |              | 3  | 295,8                   | 1,797                     | -            |                    | 3  | 295,0                   | 1,214                     | -            |                    |
| 07/04/10  | 2            | 1  | 295,2                   | 1,602                     | 0,00         | 0,00               | 1  | 295,2                   | 1,380                     | 0,00         | 0,00               |
|   |              | 2  | 295,5                   | 1,833                     | 0,00         |                    | 2  | 295,4                   | 1,490                     | 0,00         |                    |
|   |              | 3  | 295,8                   | 1,930                     | 0,00         |                    | 3  | 295,0                   | 1,322                     | 0,00         |                    |
| 10/04/10  | 5            | 1  | -                       | 1,615                     | 0,00         | 0,00               | 1  | -                       | 1,440                     | 0,02         | 0,01               |
|   |              | 2  | -                       | 1,830                     | 0,00         |                    | 2  | -                       | 1,508                     | 0,01         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 1,940                     | 0,00         |                    | 3  | -                       | 1,314                     | 0,00         |                    |
| 13/04/10  | 8            | 1  | -                       | 1,652                     | 0,02         | 0,02               | 1  | -                       | 1,450                     | 0,02         | 0,01               |
|   |              | 2  | -                       | 1,866                     | 0,01         |                    | 2  | -                       | 1,511                     | 0,01         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,018                     | 0,03         |                    | 3  | -                       | 1,330                     | 0,00         |                    |
| 17/04/10  | 12           | 1  | -                       | 1,940                     | 0,11         | 0,13               | 1  | -                       | 1,435                     | 0,02         | 0,02               |
|   |              | 2  | -                       | 2,225                     | 0,13         |                    | 2  | -                       | 1,555                     | 0,02         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,320                     | 0,13         |                    | 3  | -                       | 1,403                     | 0,03         |                    |
| 21/04/10  | 16           | 1  | -                       | 2,322                     | 0,24         | 0,25               | 1  | -                       | 1,522                     | 0,05         | 0,04               |
|   |              | 2  | -                       | 2,604                     | 0,26         |                    | 2  | -                       | 1,615                     | 0,04         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,702                     | 0,26         |                    | 3  | -                       | 1,402                     | 0,03         |                    |
| 24/04/10  | 19           | 1  | -                       | 2,486                     | 0,30         | 0,30               | 1  | -                       | 1,541                     | 0,05         | 0,04               |
|   |              | 2  | -                       | 2,720                     | 0,30         |                    | 2  | -                       | 1,655                     | 0,06         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,825                     | 0,30         |                    | 3  | -                       | 1,392                     | 0,02         |                    |
| 28/04/10  | 23           | 1  | -                       | 2,645                     | 0,35         | 0,36               | 1  | -                       | 1,650                     | 0,09         | 0,08               |
|   |              | 2  | -                       | 2,910                     | 0,36         |                    | 2  | -                       | 1,745                     | 0,09         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,990                     | 0,36         |                    | 3  | -                       | 1,540                     | 0,07         |                    |
| 01/05/10  | 26           | 1  | -                       | 2,760                     | 0,39         | 0,40               | 1  | -                       | 1,682                     | 0,10         | 0,10               |
|   |              | 2  | -                       | 3,020                     | 0,40         |                    | 2  | -                       | 1,855                     | 0,12         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 3,120                     | 0,40         |                    | 3  | -                       | 1,550                     | 0,08         |                    |
| 05/05/10  | 30           | 1  | -                       | 2,820                     | 0,41         | 0,41               | 1  | -                       | 1,738                     | 0,12         | 0,12               |
|   |              | 2  | -                       | 3,086                     | 0,42         |                    | 2  | -                       | 1,890                     | 0,13         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 3,122                     | 0,40         |                    | 3  | -                       | 1,590                     | 0,09         |                    |

| Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Cinza: Cinza F Teor: 30%<br>Data de moldagem: 18/03/10 |              |    |                         |                           |              |                    | Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Cinza: Cinza F Teor: 45%<br>Data de moldagem: 18/03/10 |                         |                           |              |                    |
|--|--------------|----|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|--|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|
| Data   | Idade (dias) | CP | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) | CP   | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) |
| 19/03/10   | 1            | 1  | 294,8                   | 0,738                     | -            | -                  | 1  | 295,8                   | 1,795                     | -            | -                  |
|  |              | 2  | 295,0                   | 0,975                     | -            |                    | 2  | 296,4                   | 2,480                     | -            |                    |
|  |              | 3  | 294,8                   | 1,024                     | -            |                    | 3  | 295,0                   | 1,014                     | -            |                    |
| 20/03/10   | 2            | 1  | 294,8                   | 0,908                     | 0,00         | 0,00               | 1  | 295,8                   | 1,890                     | 0,00         | 0,00               |
|  |              | 2  | 295,0                   | 1,120                     | 0,00         |                    | 2  | 296,4                   | 2,560                     | 0,00         |                    |
|  |              | 3  | 294,8                   | 1,150                     | 0,00         |                    | 3  | 295,0                   | 1,145                     | 0,00         |                    |
| 23/03/10   | 5            | 1  | -                       | 0,986                     | 0,03         | 0,01               | 1  | -                       | 1,965                     | 0,03         | 0,03               |
|  |              | 2  | -                       | 1,099                     | -0,01        |                    | 2  | -                       | 2,668                     | 0,04         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,148                     | 0,00         |                    | 3  | -                       | 1,204                     | 0,02         |                    |
| 26/03/10   | 8            | 1  | -                       | 0,970                     | 0,02         | 0,00               | 1  | -                       | 1,962                     | 0,02         | 0,02               |
|  |              | 2  | -                       | 1,110                     | 0,00         |                    | 2  | -                       | 2,600                     | 0,01         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,140                     | 0,00         |                    | 3  | -                       | 1,210                     | 0,02         |                    |
| 30/03/10   | 12           | 1  | -                       | 0,980                     | 0,02         | 0,01               | 1  | -                       | 1,912                     | 0,01         | 0,01               |
|  |              | 2  | -                       | 1,125                     | 0,00         |                    | 2  | -                       | 2,570                     | 0,00         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,152                     | 0,00         |                    | 3  | -                       | 1,183                     | 0,01         |                    |
| 03/04/10   | 16           | 1  | -                       | 0,920                     | 0,00         | 0,00               | 1  | -                       | 1,930                     | 0,01         | 0,00               |
|  |              | 2  | -                       | 1,122                     | 0,00         |                    | 2  | -                       | 2,550                     | 0,00         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,142                     | 0,00         |                    | 3  | -                       | 1,150                     | 0,00         |                    |
| 06/04/10   | 19           | 1  | -                       | 0,904                     | 0,00         | 0,00               | 1  | -                       | 1,888                     | 0,00         | 0,00               |
|  |              | 2  | -                       | 1,120                     | 0,00         |                    | 2  | -                       | 2,560                     | 0,00         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,130                     | -0,01        |                    | 3  | -                       | 1,130                     | -0,01        |                    |
| 10/04/10   | 23           | 1  | -                       | 0,925                     | 0,01         | 0,02               | 1  | -                       | 1,960                     | 0,02         | 0,02               |
|  |              | 2  | -                       | 1,182                     | 0,02         |                    | 2  | -                       | 2,628                     | 0,02         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,225                     | 0,03         |                    | 3  | -                       | 1,180                     | 0,01         |                    |
| 13/04/10   | 26           | 1  | -                       | 0,950                     | 0,01         | 0,02               | 1  | -                       | 1,945                     | 0,02         | 0,01               |
|  |              | 2  | -                       | 1,160                     | 0,01         |                    | 2  | -                       | 2,620                     | 0,02         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,240                     | 0,03         |                    | 3  | -                       | 1,135                     | 0,00         |                    |
| 17/04/10   | 30           | 1  | -                       | 0,980                     | 0,02         | 0,02               | 1  | -                       | 1,945                     | 0,02         | 0,00               |
|  |              | 2  | -                       | 1,165                     | 0,02         |                    | 2  | -                       | 2,570                     | 0,00         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,210                     | 0,02         |                    | 3  | -                       | 1,115                     | -0,01        |                    |

| Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Cinza: Cinza M Teor: 5%<br>Data de moldagem: 19/04/10 |              |    |                         |                           |              |                    | Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Cinza: Cinza M Teor: 15%<br>Data de moldagem: 19/04/10 |                         |                           |              |                    |
|---|--------------|----|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|--|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|
| Data  | Idade (dias) | CP | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) | CP   | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) |
| 20/04/10  | 1            | 1  | 296,0                   | 2,050                     | -            | -                  | 1  | 295,8                   | 1,810                     | -            | -                  |
|   |              | 2  | 295,8                   | 1,752                     | -            |                    | 2  | 295,4                   | 1,460                     | -            |                    |
|   |              | 3  | 295,4                   | 1,508                     | -            |                    | 3  | 295,4                   | 1,429                     | -            |                    |
| 21/04/10  | 2            | 1  | 296,0                   | 2,170                     | 0,00         | 0,00               | 1  | 295,8                   | 1,925                     | 0,00         | 0,00               |
|   |              | 2  | 295,8                   | 1,874                     | 0,00         |                    | 2  | 295,4                   | 1,522                     | 0,00         |                    |
|   |              | 3  | 295,4                   | 1,614                     | 0,00         |                    | 3  | 295,4                   | 1,510                     | 0,00         |                    |
| 24/04/10  | 5            | 1  | -                       | 2,240                     | 0,02         | 0,04               | 1  | -                       | 1,992                     | 0,02         | 0,02               |
|   |              | 2  | -                       | 1,963                     | 0,03         |                    | 2  | -                       | 1,580                     | 0,02         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 1,791                     | 0,06         |                    | 3  | -                       | 1,578                     | 0,02         |                    |
| 27/04/10  | 8            | 1  | -                       | 2,305                     | 0,05         | 0,04               | 1  | -                       | 2,005                     | 0,03         | 0,03               |
|   |              | 2  | -                       | 2,004                     | 0,04         |                    | 2  | -                       | 1,608                     | 0,03         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 1,740                     | 0,04         |                    | 3  | -                       | 1,601                     | 0,03         |                    |
| 01/05/10  | 12           | 1  | -                       | 2,680                     | 0,17         | 0,17               | 1  | -                       | 2,054                     | 0,04         | 0,04               |
|   |              | 2  | -                       | 2,360                     | 0,16         |                    | 2  | -                       | 1,646                     | 0,04         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,130                     | 0,17         |                    | 3  | -                       | 1,650                     | 0,05         |                    |
| 05/05/10  | 16           | 1  | -                       | 2,870                     | 0,23         | 0,24               | 1  | -                       | 2,094                     | 0,06         | 0,06               |
|   |              | 2  | -                       | 2,590                     | 0,24         |                    | 2  | -                       | 1,680                     | 0,05         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,355                     | 0,25         |                    | 3  | -                       | 1,682                     | 0,06         |                    |
| 08/05/10  | 19           | 1  | -                       | 3,024                     | 0,29         | 0,28               | 1  | -                       | 2,160                     | 0,08         | 0,08               |
|   |              | 2  | -                       | 2,710                     | 0,28         |                    | 2  | -                       | 1,748                     | 0,08         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,465                     | 0,29         |                    | 3  | -                       | 1,750                     | 0,08         |                    |
| 12/05/10  | 23           | 1  | -                       | 3,196                     | 0,34         | 0,34               | 1  | -                       | 2,255                     | 0,11         | 0,11               |
|   |              | 2  | -                       | 2,862                     | 0,33         |                    | 2  | -                       | 1,848                     | 0,11         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,622                     | 0,34         |                    | 3  | -                       | 1,845                     | 0,11         |                    |
| 15/05/10  | 26           | 1  | -                       | 3,232                     | 0,36         | 0,35               | 1  | -                       | 2,278                     | 0,12         | 0,12               |
|   |              | 2  | -                       | 2,912                     | 0,35         |                    | 2  | -                       | 1,868                     | 0,12         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,672                     | 0,36         |                    | 3  | -                       | 1,874                     | 0,12         |                    |
| 19/05/10  | 30           | 1  | -                       | 3,395                     | 0,41         | 0,41               | 1  | -                       | 2,403                     | 0,16         | 0,16               |
|   |              | 2  | -                       | 3,078                     | 0,40         |                    | 2  | -                       | 2,001                     | 0,16         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,802                     | 0,40         |                    | 3  | -                       | 2,009                     | 0,17         |                    |

| Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Cinza: Cinza M Teor: 30%<br>Data de moldagem: 27/04/10 |              |    |                         |                           |              |                    | Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Cinza: Cinza M Teor: 45%<br>Data de moldagem: 27/04/10 |                         |                           |              |                    |
|--|--------------|----|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|--|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|
| Data   | Idade (dias) | CP | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) | CP   | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) |
| 28/04/10   | 1            | 1  | 295,0                   | 1,717                     | -            | -                  | 1  | 296,5                   | 2,652                     | -            | -                  |
|  |              | 2  | 295,8                   | 1,308                     | -            |                    | 2  | 296,2                   | 2,314                     | -            |                    |
|  |              | 3  | 295,0                   | 1,280                     | -            |                    | 3  | 296,5                   | 2,512                     | -            |                    |
| 29/04/10   | 2            | 1  | 295,0                   | 1,862                     | 0,00         | 0,00               | 1  | 296,5                   | 2,745                     | 0,00         | 0,00               |
|  |              | 2  | 295,8                   | 1,433                     | 0,00         |                    | 2  | 295,4                   | 2,305                     | 0,00         |                    |
|  |              | 3  | 295,0                   | 1,388                     | 0,00         |                    | 3  | 296,5                   | 2,590                     | 0,00         |                    |
| 03/05/10   | 5            | 1  | -                       | 1,888                     | 0,01         | 0,01               | 1  | -                       | 2,780                     | 0,01         | 0,01               |
|  |              | 2  | -                       | 1,470                     | 0,01         |                    | 2  | -                       | 2,350                     | 0,02         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,428                     | 0,01         |                    | 3  | -                       | 2,612                     | 0,01         |                    |
| 06/05/10   | 8            | 1  | -                       | 1,930                     | 0,02         | 0,02               | 1  | -                       | 2,768                     | 0,01         | 0,02               |
|  |              | 2  | -                       | 1,480                     | 0,02         |                    | 2  | -                       | 2,448                     | 0,05         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,450                     | 0,02         |                    | 3  | -                       | 2,645                     | 0,02         |                    |
| 10/05/10   | 12           | 1  | -                       | 1,950                     | 0,03         | 0,03               | 1  | -                       | 2,822                     | 0,03         | 0,03               |
|  |              | 2  | -                       | 1,506                     | 0,02         |                    | 2  | -                       | 2,402                     | 0,03         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,472                     | 0,03         |                    | 3  | -                       | 2,654                     | 0,02         |                    |
| 13/05/10   | 16           | 1  | -                       | 1,945                     | 0,03         | 0,03               | 1  | -                       | 2,822                     | 0,03         | 0,03               |
|  |              | 2  | -                       | 1,515                     | 0,03         |                    | 2  | -                       | 2,406                     | 0,03         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,478                     | 0,03         |                    | 3  | -                       | 2,660                     | 0,02         |                    |
| 17/05/10   | 19           | 1  | -                       | 1,975                     | 0,04         | 0,04               | 1  | -                       | 2,832                     | 0,03         | 0,03               |
|  |              | 2  | -                       | 1,570                     | 0,05         |                    | 2  | -                       | 2,420                     | 0,04         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,495                     | 0,04         |                    | 3  | -                       | 2,666                     | 0,03         |                    |
| 20/05/10   | 23           | 1  | -                       | 1,970                     | 0,04         | 0,04               | 1  | -                       | 2,840                     | 0,03         | 0,04               |
|  |              | 2  | -                       | 1,532                     | 0,03         |                    | 2  | -                       | 2,450                     | 0,05         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,502                     | 0,04         |                    | 3  | -                       | 2,685                     | 0,03         |                    |
| 24/05/10   | 26           | 1  | -                       | 2,010                     | 0,05         | 0,05               | 1  | -                       | 2,844                     | 0,03         | 0,03               |
|  |              | 2  | -                       | 1,555                     | 0,04         |                    | 2  | -                       | 2,403                     | 0,03         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,540                     | 0,05         |                    | 3  | -                       | 2,650                     | 0,02         |                    |
| 27/05/10   | 30           | 1  | -                       | 2,010                     | 0,05         | 0,05               | 1  | -                       | 2,870                     | 0,04         | 0,04               |
|  |              | 2  | -                       | 1,540                     | 0,04         |                    | 2  | -                       | 2,440                     | 0,05         |                    |
|  |              | 3  | -                       | 1,555                     | 0,06         |                    | 3  | -                       | 2,715                     | 0,04         |                    |

| Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Cinza: Cinza G Teor: 5%<br>Data de moldagem: 25/02/10 |              |    |                         |                           |              |                    | Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Cinza: Cinza G Teor: 15%<br>Data de moldagem: 25/02/10 |                         |                           |              |                    |
|---|--------------|----|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|--|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|
| Data  | Idade (dias) | CP | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) | CP   | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) |
| 26/02/10  | 1            | 1  | 295,8                   | 1,832                     | -            | -                  | 1  | 296,0                   | 1,954                     | -            | -                  |
|   |              | 2  | 296,0                   | 2,164                     | -            |                    | 2  | 295,8                   | 1,814                     | -            |                    |
|   |              | 3  | 296,2                   | 2,234                     | -            |                    | 3  | 295,8                   | 1,892                     | -            |                    |
| 27/02/10  | 2            | 1  | 295,8                   | 1,875                     | 0,00         | 0,00               | 1  | 296,0                   | 2,002                     | 0,00         | 0,00               |
|   |              | 2  | 296,0                   | 2,222                     | 0,00         |                    | 2  | 296,0                   | 1,860                     | 0,00         |                    |
|   |              | 3  | 296,2                   | 2,288                     | 0,00         |                    | 3  | 295,8                   | 1,910                     | 0,00         |                    |
| 02/03/10  | 5            | 1  | -                       | 1,950                     | 0,03         | 0,02               | 1  | -                       | 2,050                     | 0,02         | 0,02               |
|   |              | 2  | -                       | 2,280                     | 0,02         |                    | 2  | -                       | 1,920                     | 0,02         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,360                     | 0,02         |                    | 3  | -                       | 1,985                     | 0,03         |                    |
| 05/03/10  | 8            | 1  | -                       | 1,960                     | 0,03         | 0,03               | 1  | -                       | 2,094                     | 0,03         | 0,03               |
|   |              | 2  | -                       | 2,320                     | 0,03         |                    | 2  | -                       | 1,950                     | 0,03         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,365                     | 0,03         |                    | 3  | -                       | 2,038                     | 0,04         |                    |
| 09/03/10  | 12           | 1  | -                       | 2,210                     | 0,11         | 0,10               | 1  | -                       | 2,080                     | 0,03         | 0,04               |
|   |              | 2  | -                       | 2,498                     | 0,09         |                    | 2  | -                       | 2,030                     | 0,06         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,590                     | 0,10         |                    | 3  | -                       | 2,040                     | 0,04         |                    |
| 13/03/10  | 16           | 1  | -                       | 2,440                     | 0,19         | 0,20               | 1  | -                       | 2,162                     | 0,05         | 0,05               |
|   |              | 2  | -                       | 2,825                     | 0,20         |                    | 2  | -                       | 2,034                     | 0,06         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,892                     | 0,20         |                    | 3  | -                       | 2,042                     | 0,04         |                    |
| 16/03/10  | 19           | 1  | -                       | 2,640                     | 0,26         | 0,26               | 1  | -                       | 2,240                     | 0,08         | 0,08               |
|   |              | 2  | -                       | 2,970                     | 0,25         |                    | 2  | -                       | 2,090                     | 0,08         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 3,060                     | 0,26         |                    | 3  | -                       | 2,200                     | 0,10         |                    |
| 20/03/10  | 23           | 1  | -                       | 2,756                     | 0,30         | 0,31               | 1  | -                       | 2,290                     | 0,10         | 0,09               |
|   |              | 2  | -                       | 3,190                     | 0,32         |                    | 2  | -                       | 2,160                     | 0,10         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 3,216                     | 0,31         |                    | 3  | -                       | 2,136                     | 0,08         |                    |
| 23/03/10  | 26           | 1  | -                       | 2,908                     | 0,35         | 0,36               | 1  | -                       | 2,410                     | 0,14         | 0,13               |
|   |              | 2  | -                       | 3,314                     | 0,37         |                    | 2  | -                       | 2,270                     | 0,14         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 3,340                     | 0,35         |                    | 3  | -                       | 2,240                     | 0,11         |                    |
| 27/03/10  | 30           | 1  | -                       | 2,960                     | 0,36         | 0,37               | 1  | -                       | 2,480                     | 0,16         | 0,16               |
|   |              | 2  | -                       | 3,300                     | 0,36         |                    | 2  | -                       | 2,360                     | 0,17         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 3,410                     | 0,38         |                    | 3  | -                       | 2,320                     | 0,14         |                    |



| Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Cinza: Cinza G Teor:30%<br>Data de moldagem: 01/03/10 |              |    |                         |                           |              |                    | Agregado: Brita basáltica<br>Cimento: CP V - ARI<br>Cinza: Cinza G Teor: 45%<br>Data de moldagem: 01/03/10 |                         |                           |              |                    |
|---|--------------|----|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|--|-------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|
| Data  | Idade (dias) | CP | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) | CP   | Leitura paquímetro (mm) | Leitura extensômetro (mm) | Expansão (%) | Expansão média (%) |
| 02/03/10  | 1            | 1  | 296,8                   | 2,624                     | -            | -                  | 1  | 295,6                   | 1,578                     | -            | -                  |
|   |              | 2  | 296,8                   | 2,962                     | -            |                    | 2  | 295,0                   | 0,920                     | -            |                    |
|   |              | 3  | 296,8                   | 2,700                     | -            |                    | 3  | 295,8                   | 1,738                     | -            |                    |
| 03/03/10  | 2            | 1  | 296,8                   | 2,740                     | 0,00         | 0,00               | 1  | 295,6                   | 1,686                     | 0,00         | 0,00               |
|   |              | 2  | 296,8                   | 3,060                     | 0,00         |                    | 2  | 295,0                   | 1,020                     | 0,00         |                    |
|   |              | 3  | 296,8                   | 2,800                     | 0,00         |                    | 3  | 295,8                   | 1,830                     | 0,00         |                    |
| 06/03/10  | 5            | 1  | -                       | 2,750                     | 0,00         | 0,01               | 1  | -                       | 1,780                     | 0,03         | 0,02               |
|   |              | 2  | -                       | 3,064                     | 0,00         |                    | 2  | -                       | 1,034                     | 0,00         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,840                     | 0,01         |                    | 3  | -                       | 1,862                     | 0,01         |                    |
| 09/03/10  | 8            | 1  | -                       | 2,840                     | 0,03         | 0,02               | 1  | -                       | 1,710                     | 0,01         | 0,01               |
|   |              | 2  | -                       | 3,100                     | 0,01         |                    | 2  | -                       | 1,060                     | 0,01         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,830                     | 0,01         |                    | 3  | -                       | 1,822                     | 0,00         |                    |
| 13/03/10  | 12           | 1  | -                       | 2,800                     | 0,02         | 0,02               | 1  | -                       | 1,696                     | 0,00         | 0,00               |
|   |              | 2  | -                       | 3,110                     | 0,02         |                    | 2  | -                       | 1,020                     | 0,00         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,840                     | 0,01         |                    | 3  | -                       | 1,850                     | 0,01         |                    |
| 17/03/10  | 16           | 1  | -                       | 2,824                     | 0,03         | 0,02               | 1  | -                       | 1,708                     | 0,01         | 0,01               |
|   |              | 2  | -                       | 3,130                     | 0,02         |                    | 2  | -                       | 1,022                     | 0,00         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,870                     | 0,02         |                    | 3  | -                       | 1,864                     | 0,01         |                    |
| 20/03/10  | 19           | 1  | -                       | 2,872                     | 0,04         | 0,02               | 1  | -                       | 1,684                     | 0,00         | 0,00               |
|   |              | 2  | -                       | 3,090                     | 0,01         |                    | 2  | -                       | 1,020                     | 0,00         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,855                     | 0,02         |                    | 3  | -                       | 1,847                     | 0,01         |                    |
| 24/03/10  | 23           | 1  | -                       | 2,840                     | 0,03         | 0,03               | 1  | -                       | 1,770                     | 0,03         | 0,02               |
|   |              | 2  | -                       | 3,142                     | 0,03         |                    | 2  | -                       | 1,040                     | 0,01         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,902                     | 0,03         |                    | 3  | -                       | 1,870                     | 0,01         |                    |
| 27/03/10  | 26           | 1  | -                       | 2,815                     | 0,03         | 0,03               | 1  | -                       | 1,740                     | 0,02         | 0,01               |
|   |              | 2  | -                       | 3,130                     | 0,02         |                    | 2  | -                       | 1,040                     | 0,01         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,885                     | 0,03         |                    | 3  | -                       | 1,870                     | 0,01         |                    |
| 31/03/10  | 30           | 1  | -                       | 2,836                     | 0,03         | 0,03               | 1  | -                       | 1,700                     | 0,00         | 0,01               |
|   |              | 2  | -                       | 3,157                     | 0,03         |                    | 2  | -                       | 1,040                     | 0,01         |                    |
|   |              | 3  | -                       | 2,920                     | 0,04         |                    | 3  | -                       | 1,870                     | 0,01         |                    |