



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DOS EFEITOS DO NITRATO DE LÍTIO NA  
EXPANSÃO DE ARGAMASSAS SUJEITAS A REAÇÃO  
ÁLCALI-SÍLICA**

*Domingos Jorge Ferreira da Silva*

**Dissertação de Mestrado**

**Ilha Solteira**

**2007**

**DOMINGOS JORGE FERREIRA DA SILVA**

**ESTUDO DOS EFEITOS DO NITRATO DE LÍTIO NA  
EXPANSÃO DE ARGAMASSAS SUJEITAS A REAÇÃO  
ÁLCALI-SÍLICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

Co-orientador: Prof. Dr. Haroldo de Mayo Bernardes

Ilha Solteira

Outubro de 2007

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

S586e	<p>Silva, Domingos Jorge Ferreira da Estudo dos efeitos do nitrato de lítio na expansão de argamassas sujeitas a reação álcali-sílica / Domingos Jorge Ferreira da Silva. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2007 98 p. : il.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2007</p> <p>Orientador: Jorge Luís Akasaki Co-orientador: Haroldo de Mayo Bernardes Bibliografia: p. 70-74</p> <p>1. Reação álcali-agregado. 2. Expansão. 3. Compostos de lítio. 4. Argamassa.</p>
-------	--

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: -"Estudo dos Efeitos do Nitrato de Lítio na Expansão de Argamassas Sujeitas a Reação Álcali-Sílica".**

**AUTOR: DOMINGOS JORGE FERREIRA DA SILVA**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI**

**DATA DA REALIZAÇÃO: 29 DE OUTUBRO DE 2007**

Aprovada com parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA CIVIL pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. MARCO ANTONIO MORAIS ALCANTARA  
Departamento de Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. VLADIMIR ANTONIO PAULON  
Departamento de Recursos Hídricos - UNICAMP - Campinas/SP

Dedico este trabalho aos meus pais, Itálvio Ferreira da Silva e Almerinda Melo da Silva, que me apoiaram desde o início, e lá estiveram quando precisei.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki, por ter aceito meu projeto, pelo apoio, acompanhamento e pela valiosa revisão do estudo.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Haroldo de Mayo Bernardes, que deu forma a este trabalho no início do disperso.

Agradeço ao Prof. Dr. Laércio Caetano, que com competência e paciência me ajudou muito no entendimento da parte química desta pesquisa.

Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil, LCEC, por fornecer o laboratório, materiais, equipamentos e pessoal para o desenvolvimento do estudo, em especial ao Eng<sup>o</sup>. Flávio Moreira Salles e aos técnicos especializados.

Aos professores, funcionários e colegas do Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da UNESP do Campus de Ilha Solteira.

A CNPq pelo incentivo financeiro através de bolsa de estudos concedida.

A Holcim Brasil, pela doação do cimento utilizado no estudo.

A todos os demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

SILVA, D. J. F. **Estudo dos efeitos do nitrato de lítio na expansão de argamassas sujeitas a reação álcali-sílica.** Ilha Solteira, 2007. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

Várias pesquisas realizadas com compostos a base de lítio tem mostrado resultados satisfatórios na redução da expansão associada à reação álcali-sílica (RAS), mas ainda existem muitas dúvidas sobre seus mecanismos de ação. A presente pesquisa avaliou os efeitos de uma adição química a base de nitrato de lítio ( $\text{LiNO}_3$ ) na redução da expansão associada a RAS, utilizando várias dosagens. O estudo dos efeitos do  $\text{LiNO}_3$  na RAS foi feito pelo método acelerado das barras de argamassa (ASTM C-1260) utilizando dois tipos de agregado reativo. Também foram realizados ensaios de expansão com uma adição mineral a base de cinza volante a fim de correlacionar os efeitos de uma adição mineral com uma química na redução da expansão devido a RAS. Ensaio de resistência à compressão e trabalhabilidade foram realizados também buscando algum efeito do  $\text{LiNO}_3$  nestas propriedades. Os resultados do ensaio ASTM C-1260 indicaram que as adições de lítio foram efetivas na redução da expansão para os dois tipos de agregados reativos, sendo que para as condições e materiais utilizados na presente pesquisa foi necessário uma dose de adição de  $\text{LiNO}_3$  com relação molar ( $\text{Li}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ) de 7,00 para reduzir a expansão ao valor aceitável pela norma de 0,10% aos 16 dias. Foi observado também intensidades de redução da expansão diferentes entre os dois tipos de agregados estudados devido a diferença de reatividade dos mesmos. Verificou-se um limite de adição de lítio para o basalto, onde não havia mais redução significativa de expansão com o aumento da dosagem de adição. Observou-se também que as misturas contendo  $\text{LiNO}_3$  reduziram a expansão ao longo dos 30 dias, enquanto nas misturas contendo FA a expansão continuou a aumentar ao longo do teste. Os ensaios de condição de trabalhabilidade e de resistência à compressão mostraram que o  $\text{LiNO}_3$  não afeta consideravelmente estas propriedades.

**Palavras-chave:** Reação Álcali-Agregado; expansão; compostos de lítio; argamassa.

## ABSTRACT

SILVA, D. J. F. **Study of effects of lithium nitrate on expansion of mortars subjected to alkali-silica reaction** . Ilha Solteira, 2007. 96f. Dissertation (Master's Degree Civil Engineering) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

Lithium compounds have been shown satisfactory results for the reduction of the expansion due to alkali-silica reaction (ASR), but there are many doubts about its mechanisms of action. The present research evaluated the effects of a chemical addition to lithium nitrate based ( $\text{LiNO}_3$ ) on the reduction of expansion associated with ASR, utilizing several dosages. For the study of the effects of the  $\text{LiNO}_3$  on the ASR it was used the accelerated mortar bar method (ASTM C-1260), with two kinds of reactive aggregate. Mortar bars were molded also with a mineral addition of fly ash based (FA) with the objective to compare the effects of a mineral addition with a chemistry on the expansion due ASR. Compressive strength and consistence index tests had been carried also for searching some effects of the  $\text{LiNO}_3$  at these properties. The results from ASTM C-1260 showed that the addition of  $\text{LiNO}_3$  were effective on the expansion reduction for two kinds of reactive aggregate, which current conditions and materials on this research required a  $\text{LiNO}_3$  addition with ( $\text{Li}/\text{Na}_{\text{eq}}$ ) of 7,00 molar ratio to decrease the expansion to an acceptable value of 0,10% on 16 days. Also, the intensity of the expansion reduction was observed between two kinds of studied aggregates by their reactivity difference. A lithium additive upper bound was verified for the basalt, where it did not have more significant reduction of expansion with the increase of the dosage of addition. Also, was observed that admixtures that contained  $\text{LiNO}_3$  have reduced the expansion trough 30 days, while on the admixtures that contained FA the expansion grew up. The results obtained for the compressive strength and consistence index tests showed no significant differences between mixtures with and without  $\text{LiNO}_3$  admixture.

**Key-words:** Alkali-aggregate reaction; expansion; lithium composed; mortar.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fissuração em mapa causada pela RAA no Pilar do vertedouro da Barragem UHE Furnas (LOPES, 2004) .....	17
Figura 2 – Fissuras e trincas típicas de expansão, induzidas pela RAA em um dos blocos da Ponte Paulo Guerra em Recife – PE (ANDRADE, 2006).....	17
Figura 3 – Vista superior da fundação de um pilar sobre ação deletéria da RAA de um edifício da Região do Grande Recife – PE (PECCHIO <i>et al.</i> , 2006) .....	18
Figura 4 – Fissuração em forma de mapa (ANDRADE, 1997).....	23
Figura 5 – Gel exsudado a partir de um fissura na superfície de uma estrutura de concreto (HASPARYK <i>et al.</i> , 2006) .....	23
Figura 6 – Bordas de reação visíveis em torno do agregado graúdo (ANDRADE, 2006) .....	24
Figura 7 – Fotomicrografia tirada ao microscópio de luz transmitida na qual se observa um poro (P) preenchido por gel (PECCHIO <i>et al.</i> , 2006).....	24
Figura 8 – Microfissuração da argamassa com preenchimento do gel (LOPES, 2004)...	25
Figura 9 - Fluxograma das atividades do Programa Experimental .....	44
Figura 10 - Fôrma e barra de argamassa .....	49
Figura 11 - Equipamento para medição de barra de argamassa .....	50
Figura 22 - Recipiente de estocagem das barras .....	50
Figura 13 – Comportamento expansivo das barras de argamassa de referência dos dois agregados utilizados .....	55
Figura 34 – Expansão das barras de argamassa com/sem adição de $\text{LiNO}_3$ para o Basalto .....	57
Figura 15 – Variações na expansão das barras de argamassa para diferentes dosagens de $\text{LiNO}_3$ para o Basalto aos 16 dias .....	57
Figura 16 – Variações na expansão das barras de argamassa para diferentes dosagens de $\text{LiNO}_3$ para o Basalto aos 30 dias .....	58

Figura 47 – Expansão das barras de argamassa com/sem adição de $\text{LiNO}_3$ para o Seixo .....	61
Figura 18 – Variações na expansão das barras de argamassa para diferentes dosagens de $\text{LiNO}_3$ para o Seixo aos 16 dias .....	61
Figura 19 – Variações na expansão das barras de argamassa para diferentes dosagens de $\text{LiNO}_3$ para o Seixo aos 30 dias .....	62
Figura 20 – Expansão das barras de argamassa com/sem adição de $\text{LiNO}_3$ para o Basalto .....	64
Figura 21 – Expansão das barras de argamassa com/sem adição de $\text{LiNO}_3$ para o Seixo .....	64
Figura 22 – Resistência à compressão média dos corpos-de-prova ao longo do tempo .....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos minerais relacionados com a RAA.....	31
Tabela 2 – Teores de adições minerais normalmente empregadas.....	36
Tabela 3 – Resumo de pesquisas encontradas relacionadas à dosagem de lítio na redução da expansão devido a RAS .....	42
Tabela 4 – Análise físico-química do cimento CP V – ARI – PLUS .....	45
Tabela 5 – Análise físico-química da cinza volante.....	46
Tabela 6 – Características do Basalto procedente da Pedreira Três Irmãos de Andradina – SP.....	47
Tabela 7 – Características do Seixo procedente do Porto N. Sra. Aparecida de Três Lagoas – MS.....	47
Tabela 8 – Ensaio que serão realizados no programa experimental .....	48
Tabela 9 – Quantidade dos materiais componentes das barras de argamassa (3 barras) .....	51
Tabela 10 – Quantidade dos materiais componentes das barras de argamassa (3 barras) moldadas com cinza volante para os agregados utilizados .....	52
Tabela 11 – Quantidade dos materiais componentes dos corpos-de-prova moldados ...	53
Tabela 12 – Expansões (%) obtidas para o Basalto Três Irmãos e para o Seixo Nossa Sra. Aparecida, método acelerado .....	55
Tabela 13 – Expansões (%) aos 16 e 30 dias das barras de argamassa moldadas com/sem LiNO <sub>3</sub> para o Basalto Três Irmãos.....	58
Tabela 14 – Expansões (%) aos 16 e 30 dias das barras de argamassa moldadas com/sem LiNO <sub>3</sub> para o Seixo Nossa Sra. Aparecida.....	62
Tabela 15 – Expansões (%) aos 16 e 30 dias das barras de argamassa moldadas com/sem LiNO <sub>3</sub> e FA para o Basalto .....	65
Tabela 16 – Expansões (%) aos 16 e 30 dias das barras de argamassa moldadas com/sem LiNO <sub>3</sub> e FA para o Seixo.....	65

Tabela 17 – Condição de Trabalhabilidade de argamassa moldadas com/sem adição de $\text{LiNO}_3$ .....	66
Tabela 18 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova (CP) de argamassa moldadas com/sem $\text{LiNO}_3$ .....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS

Agr.	- agregado
CESP	- Companhia Energética de São Paulo
Cim.	- cimento
CP	- corpo-de-prova
Dens. abs.	- densidade absoluta
Equiv. Alc.	- equivalente alcalino
Exp.	- expansão
FA	- fly ash
Li/Na <sub>eq</sub>	- relação molar Li <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub>
MEV	- microscópio eletrônico de varredura
Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	- equivalente alcalino
RAC	- reação álcali-carbonato
RAA	- reação álcali-agregado
RAS	- reação álcali-sílica
P	- poro
PE	- Pernambuco
RM	- relação molar
Superf. Espc.	- superfície específica
UHE	- Usina Hidroelétrica

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1. IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA .....	16
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA.....	19
<b>1.2.1. Objetivo geral .....</b>	<b>19</b>
<b>1.2.2. Objetivos Específicos .....</b>	<b>19</b>
1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA .....	20
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
2.1. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO .....	20
2.2. PROCESSO QUÍMICO DA RAA.....	31
<b>2.2.1. Processo Químico da Reação Álcali-Sílica (RAS).....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.2. Processo Químico da Reação Álcali-Silicato .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.3. Processo Químico da Reação Álcali-Carbonato (RAC) .....</b>	<b>34</b>
2.3. ADIÇÕES MINERAIS NA RAA.....	35
2.4. ADIÇÕES QUÍMICAS NA RAS .....	37
2.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	43
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>43</b>
3.1. PANORAMA GERAL.....	43
3.2. MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO .....	44
3.3. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	47
3.4. ENSAIO DE EXPANSÃO DA ARGAMASSA PELO MÉTODO ACELERADO.....	48
3.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	52

3.6. CONDIÇÃO DE TRABALHABILIDADE.....	53
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>54</b>
4.1. ENSAIO DE EXPANSÃO PELO MÉTODO ACELERADO.....	54
<b>4.1.1. Expansão das Barras de Argamassa de Controle Preparadas sem a Adição de LiNO<sub>3</sub>.....</b>	<b>54</b>
<b>4.1.2. Expansão das Barras de Argamassa com Adição de LiNO<sub>3</sub> para o Basalto da Pedreira Três Irmãos .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1.3. Expansão das Barras de Argamassa com Adição de LiNO<sub>3</sub> para o Seixo P. Nossa Sra. De Aparecida.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1.4. Comparação dos Efeitos do LiNO<sub>3</sub> com o Cinza Volante na reação álcali-sílica .....</b>	<b>63</b>
4.2. CONDIÇÃO DE TRABALHABILIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	66
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>68</b>
5.1. CONCLUSÕES.....	68
5.2. SUJESTÕES.....	70
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>
APÊNDICE A – Dados da granulometria dos agregados.....	76
APÊNDICE B – Dados de expansão pelo método da ASTM C-1260 do Basalto da Pedreira Três Irmãos .....	78
APÊNDICE C – Dados de expansão pelo método da ASTM C-1260 do Seixo do P. Nossa Sra. de Aparecida.....	89

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Grandes avanços tecnológicos foram feitos visando garantir a segurança, qualidade e durabilidade de estruturas de concreto em geral incluindo as de grande porte. O estudo nas fases de viabilidade, projeto básico e no acompanhamento da construção de um empreendimento devem ser feitos de maneira a evitar qualquer tipo de patologia que afete a sua vida útil. Várias questões já foram resolvidas com pesquisas realizadas com o concreto, porém algumas questões ligadas ao processo de deterioração do concreto ainda não foram esclarecidas. A reação álcali-agregado (RAA) é um dos processos que afetam a durabilidade do concreto que ainda não tem uma maneira totalmente eficiente e econômica de se combater, uma vez instalada no concreto. Este fenômeno patológico tem sido motivo de várias pesquisas, em diversas partes do mundo, buscando soluções seguras e viáveis tanto nas etapas de dosagem do concreto quanto no controle da ação deletéria da RAA já instalado no concreto.

O estudo da RAA iniciou-se em 1940, por Stanton, o qual demonstrou que a causa primária de deterioração de diversas estruturas construídas na Califórnia, Estados Unidos, entre 1920 a 1930, foi causada por fissuras e expansões associadas à RAA, desde então, fissuras em concreto provocadas pela RAA foram encontradas em muitos outros países (RAMACHANDRAN, 1998). As obras em contato direto com a água ou elevada umidade são as mais suscetíveis a apresentarem este tipo de problema, sendo as estruturas deterioradas dos mais variados tipos: barragens, pontes, pavimentos, quebra mar, píer e fundações de concreto.

Hoje, no meio técnico, já existe relatos de mais de 140 barragens afetadas pela RAA (HASPARYK, 2005). Várias obras no Brasil e no mundo têm sofrido processo de deterioração em virtude da reação álcali-agregado, sendo que em alguns casos o mesmo tornou-se irreversível levando à inutilização da estrutura. No Brasil é cada vez maior o número de casos catalogados de ocorrência da RAA em estruturas de concreto como barragens (Figura 1), pontes (Figura 2) e obras onde o concreto tem contado intenso e permanente com a água. Atualmente foram constatados casos da ocorrência da RAA em blocos de concreto de fundações (Figura 3) em algumas edificações do país.

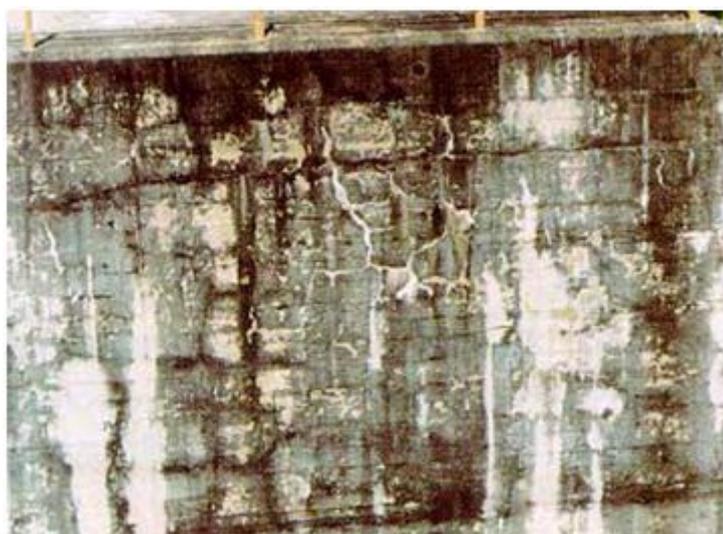


Figura 1 - Fissuração em mapa causada pela RAA no Pilar do vertedouro da Barragem UHE Furnas (LOPES, 2004)



Figura 2 - Fissuras e trincas típicas de expansão, induzidas pela RAA em um dos blocos da Ponte Paulo Guerra em Recife – PE (ANDRADE, 2006)



Figura 3 - Vista superior da fundação de um pilar sobre ação deletéria da RAA de um edifício da Região do Grande Recife – PE (PECCHIO et al., 2006)

Dada a dificuldade de controle da ação deletéria da RAA já instalada no concreto, a melhor maneira de prevenção da RAA seria evitar sua ocorrência antes da construção de um empreendimento. Realizar estudos prévios para conhecer as características dos materiais componentes do concreto pode reduzir a possibilidade de ocorrência da RAA adotando medidas que atenuem as condições favoráveis à sua ocorrência.

Na dificuldade de substituição dos materiais componentes de um concreto suscetível a ocorrência da RAA de um novo empreendimento, a melhor medida de prevenção para que a reação não ocorra ou não venha comprometer a qualidade do concreto é a utilização de adições. As adições minerais já estão sendo empregadas em muitas construções de concreto de modo a prevenir a RAA, porém nem todas as adições minerais são igualmente efetivas neste papel e a quantia destas adições no controle da RAA pode não ser aceitável por outras razões. Outra alternativa de prevenção da RAA seria o uso de adições químicas no concreto, que é o assunto deste trabalho. Com o intuito de estudar um dos diferentes tipos de adições, de modo a fornecer alternativas de prevenção da RAA, a presente pesquisa é proposta.

## 1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.2.1. Objetivo Geral

A presente pesquisa tem o objetivo geral de contribuir para o entendimento do efeito de uma adição química na redução da expansão devido a RAS através da análise de expansão de barras de argamassa sujeitas a RAS utilizando dois tipos de agregados reativos e também comparar com os efeitos de redução da expansão de barras de argamassa moldadas com uma adição mineral utilizando os mesmos agregados reativos.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Avaliar a redução no comportamento expansivo de barras de argamassas moldadas em laboratório sujeitas a RAS contendo uma adição química a base de nitrato de lítio pelo método acelerado das barras de argamassa;
- b) Comparar os efeitos das mesmas dosagens de nitrato de lítio na redução da expansão associada a RAS entre dois tipos de agregados reativos;
- c) Comparar os efeitos na redução da expansão de barras de argamassas moldadas em laboratório sujeitas a RAS entre uma adição química a base de nitrato de lítio e uma adição mineral a base de cinza volante;
- d) Avaliar os efeitos do nitrato de lítio nas propriedades de argamassa como as condições de trabalhabilidade e resistência à compressão;
- e) A partir dos resultados obtidos nos itens anteriores, e com o aprofundamento do conhecimento dos mecanismos envolvidos na RAS, chegar no melhor entendimento sobre os efeitos do nitrato de lítio na redução da expansão de argamassas sujeitas a RAS.

### 1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA

A dissertação foi desenvolvida em cinco capítulos.

O primeiro capítulo apresenta a introdução ao assunto, a importância e relevância do tema estudado, os objetivos, e a estrutura da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre a reação álcali-agregado, abordando-se aspectos tais como: como esta se desenvolve e quais são os tipos de reação, parâmetros que influenciam na reação, os métodos de investigação, os processos químicos da RAA e o efeito das adições minerais e químicas na RAS.

O terceiro apresenta o programa experimental utilizado na pesquisa, os materiais empregados e o planejamento dos experimentos, assim como a metodologia desenvolvida.

O capítulo quatro apresenta a análise e discussão de todos os resultados obtidos nos ensaios experimentais bem como as correlações entre os resultados realizados.

As conclusões resultantes da discussão realizada no capítulo anterior estão relatadas no capítulo cinco juntamente com as considerações finais.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado é um fenômeno patológico que ocorre internamente nas estruturas de concreto pela reação química entre alguns constituintes mineralógicos contidos nos agregados e os hidróxidos alcalinos (proveniente principalmente do cimento e de outras fontes como, por exemplo, água de amassamento, agregados, pozolanas, agentes externos), liberados no processo de hidratação do cimento Portland, que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto. A reação resulta na formação de um gel higroscópico expansivo, com grande potencial de absorver água, que passa a ocupar os poros do concreto sofrendo aumento de volume na presença de água. Uma

vez preenchido o volume dos poros, o gel promove o surgimento de pressões intersticiais que podem causar fissuras e ocasionar deslocamentos nas estruturas de concreto desencadeando problemas tanto de nível estrutural quanto operacional.

Dependendo da taxa de crescimento do gel, as tensões podem ser dissipadas ou não. Uma taxa de crescimento lenta pode permitir que o gel migre ao longo do concreto, dissipando as tensões. Já uma taxa de crescimento rápida pode provocar tensões internas capazes de causar fissuras e expansão do gel (HASPARYK et al., 2006). Quando as tensões hidráulicas, causadas pela expansão do gel, exceder a resistência de ruptura à tração da pasta e do concreto, a massa de concreto sofrerá uma microfissuração intensa, perdendo resistência mecânica, diminuindo sua durabilidade.

No período evolutivo da RAA, ao longo do tempo, verifica-se a existência de três fases (CARRAZEDO, 2004):

- **1º período:** ocorre a formação dos produtos da reação (gel) nos poros do concreto, tornando-o saturado pelos mesmos, não ocorrendo expansões;
- **2º período:** ao absorver água, ocorre a expansão do gel. Envoltos pela pasta de cimento, e sem poder migrar através dela, começa, então, a exercer pressões hidráulicas e expansão do concreto; e
- **3º período:** ocorre extinção dos minerais reativos encerrando a formação do gel e conseqüente estabilização do processo expansivo.

Desde a sua descoberta, a mais de 60 anos (STANTON, 1940), vários pesquisadores passaram a estudar esse fenômeno patológico, em diversas partes do mundo, tentando entender o processo químico envolvido, fazendo a identificação dos minerais reativos, buscando soluções seguras e viáveis para a etapa de dosagem do concreto e controle da ação deletéria de estruturas afetadas por essa patologia.

A manifestação da RAA pode se dar de várias formas, desde expansões, movimentações diferenciais nas estruturas e fissurações, exsudação do gel e redução das propriedades mecânicas e da vida útil da estrutura. A RAA pode não ser a causa principal da deterioração estrutural prematura, mas pode ser catalisadora de outras formas de deterioração, pois as fissuras causadas por este fenômeno facilitam a possibilidade de entrada de agentes agressivos à armadura, acelerando a evolução da corrosão, e ao próprio concreto. As fissuras nas estruturas hidráulicas podem conduzir ainda a perda de estanqueidade, a lixiviação e redução do módulo de elasticidade do concreto, aumentando as deformações (CAVALCANTE, 2005).

As propriedades mecânicas do concreto são afetadas de maneiras distintas pela RAA, como segue (ALMEIDA et al., 2006; HASPARYK et al., 2006):

- Geralmente ocorre um ganho de resistência devido a colmatação dos poros pelos produtos neoformados, entretanto, em níveis maiores de deterioração do concreto, a resistência pode cair;
- Medidas de resistência à tração já apresentaram perdas entre 40 a 80%; e
- O módulo de elasticidade do concreto é o mais afetado pela RAA, até para expansões relativamente baixas.

As expansões causadas pela RAA podem ser observadas em diferentes idades a partir de sua instalação, dependendo das condições de exposição das estruturas de concreto e do grau de reatividade do agregado. Como a RAA isoladamente se desenvolve ao longo de anos, este fenômeno não leva uma estrutura de concreto a um colapso repentino, permitindo a tomada de medidas corretivas antes que possa ocorrer um acidente. A realização de inspeções periódicas na estrutura torna-se muito importante nesse caso (CAVALCANTE, 2005).

Segundo Silveira (1996), as manifestações mais comuns verificadas em estruturas de concreto atacadas são:

- Fissuras desordenadas na superfície do concreto apresentando um modelo típico na forma de mapa (Figura 4);
- Presença de mancha e exsudação do gel (Figura 5);
- Agregados graúdos com bordas de reação (Figura 6);
- Poros do concreto preenchidos total ou parcialmente esbranquiçado com composição do gel (Figura 7); e
- Microfissuração da argamassa com preenchimento do gel (Figura 8).



Figura 4 - Fissuração em forma de mapa (ANDRADE, 1997)



Figura 5 - Gel exsudado a partir de uma fissura na superfície de uma estrutura de concreto (HASPARYK et al., 2006)

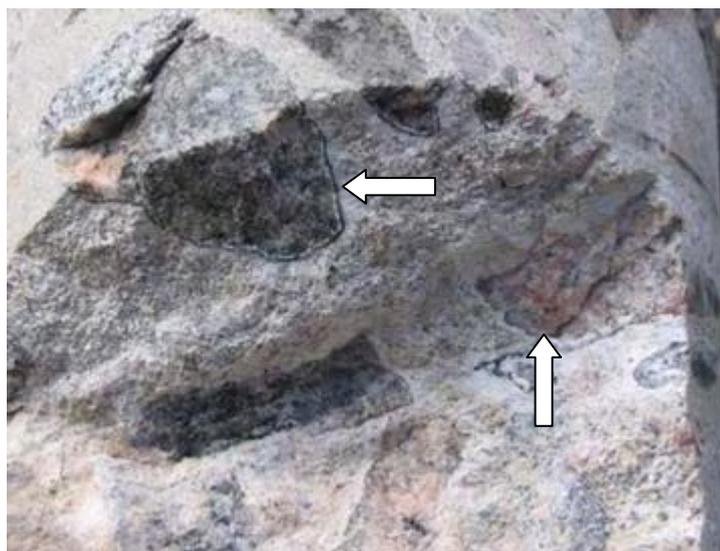


Figura 6 - Bordas de reação visíveis em torno do agregado graúdo (ANDRADE, 2006)

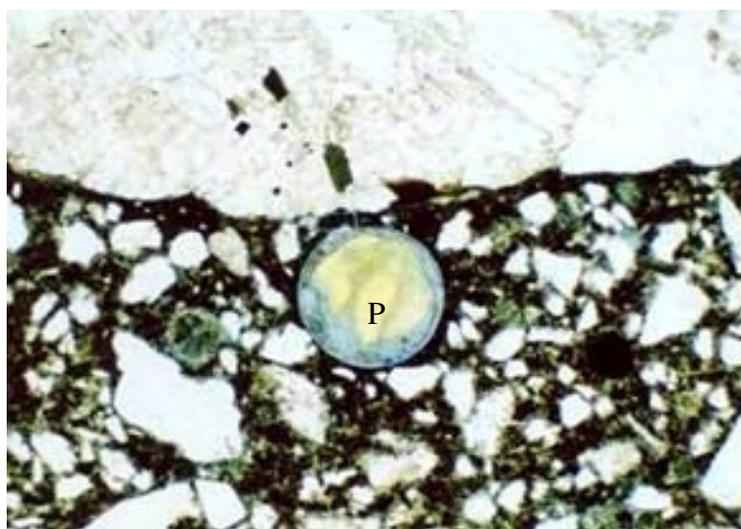


Figura 7 - Fotomicrografia tirada ao microscópio de luz transmitida na qual se observa um poro (P) preenchido por gel (PECCHIO et al., 2006)

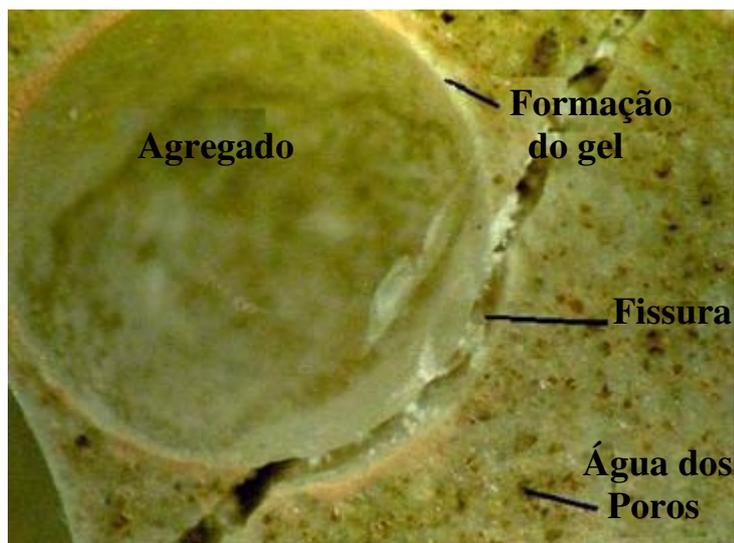


Figura 8 - Microfissuração da argamassa com preenchimento do gel (LOPES, 2004)

Três tipos de reação álcali-agregado podem ocorrer no concreto, em função do tipo e mineralogia do agregado reativo envolvido, como:

- Reação Álcali-sílica (RAS);
- Reação Álcali-silicato; e
- Reação Álcali-carbonato (RAC).

A **reação álcali-sílica (RAS)** é a RAA predominante e este fenômeno particular tem sido mais examinado e é melhor compreendido, sendo a que normalmente ocorre mais rapidamente, em função das formas minerais de sílica reativa envolvidas. Envolve a presença de opala ou sílica amorfa, calcedônia, cristobalita, tridimita, vidros naturais e artificiais e quartzo microcristalino/criptocristalino e deformado (HASPARYK, 2005).

Já a **reação álcali-silicato** possui o mesmo princípio da reação álcali-sílica, porém ocorre mais lentamente uma vez que os minerais reativos estão mais disseminados na matriz. Os minerais envolvidos são alguns tipos de silicatos presentes em rochas sedimentares (argilitos, siltitos e grauvacas), metamórficas (ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos e hornfels) e ígneas (granitos). Os minerais envolvidos na reação álcali-silicato mais mencionados são os expansivos do grupo dos filossilicatos como a vermiculita, ilita e montmorilonita. Nesta classificação também são destacados os feldspatos alcalinos e alguns minerais presentes nos folhelhos argilosos (HASPARYK, 2005).

A **reação álcali-carbonato** ocorre com menos frequência, portanto é pouco estudada, e é completamente diferente da RAS e da reação álcali-silicato. Ocorre entre certos calcários dolomíticos e as soluções alcalinas presentes nos poros do concreto promovendo a formação da brucita ( $Mg(OH)_2$ ), processo conhecido como desdolomitização, e regeneração de hidróxidos alcalinos. Nesta reação não ocorre à formação do gel, os produtos formados na reação ocupam maior volume que aquele ocupado pela dolomita, gerando fissurações e o enfraquecimento da zona de transição (HASPARYK, 2005). Não existe relatos desta reação no Brasil, mas em alguns países africanos esta reação é a RAA predominante.

As condições em que ocorrem a RAA são ainda pouco conhecidas, uma vez que pode ocorrer a interação de vários fatores que podem acelerar ou inibir a reação. As condições necessárias para que as RAA se iniciem e se desenvolvam no concreto e como esses fatores influenciam a reação são:

- **Teor de álcalis no concreto:** quanto maiores o teor de álcalis do cimento e o consumo de cimento no concreto, maiores serão as expansões (HASPARYK, 2005). O cimento é tido como a principal fonte de álcalis no concreto, mais é importante considerar que pode haver outras fontes de álcalis como água de amassamento, agregados, adições minerais, aditivos e agentes externos. Assim sendo, é preciso determinar o conteúdo total de álcalis ao qual o concreto está exposto. O teor de álcalis afeta somente as reações álcali-sílica e álcali-silicato, pois os álcalis formam o gel expansivo produto de suas reações com o agregado. A reação álcali-carbonato precisa apenas de uma quantidade mínima de álcalis para reagir, pois são apenas catalisadores da reação de desdolomitização e são regenerados, não fazendo parte do produto final da reação;
- **Tipo e tamanho dos agregados reativos:** há uma tendência de expansão em argamassas contendo maior quantidade de partículas finas que naquelas com quantidades menores ou similares de partículas maiores (VIVIAN, 1951). O grau de reatividade de um agregado está ligado diretamente à velocidade em que as reações ocorrem, assim como o tipo de reação que há de ocorrer. Em ordem decrescente de reatividade encontram-se os minerais com estrutura amorfa (opala e vidro), microcristalina a criptocristalina (calcedônia),

metaestável (tridimita e cristobalita) e cristalina (quartzo e feldspato deformados e filossilicatos alterados) (HASPARYK, 2005);

- **Proporção de cimento e de agregado:** como a alcalinidade nos poros do concreto é proveniente do cimento e os minerais reativos estão contidos no agregado, a proporção de cimento e de agregado influencia na intensidade da reação, uma vez que age diretamente no teor de álcalis disponíveis e na quantidade da fase mineralógica (ANDRADE, 1997).
- **Porosidade:** influência na circulação de água e do gel no interior do concreto, limitando sua mobilidade. A baixa porosidade pode impedir a expansão do gel e até sua formação, pois este necessita de íons hidroxila. Já um concreto com alta porosidade, por mais que o gel expanda, teria espaço, não exercendo as pressões internas responsáveis pelas fissuras e expansões do concreto (CARRAZEDO, 2004).
- **Tensões confinantes:** limita a livre expansão do concreto, podendo até suprimi-la. Uma carga de compressão reduz a expansão na direção de aplicação, assim como uma carga de tração auxilia a expansão na mesma direção (CARRAZEDO, 2004).
- **Umidade:** a água é necessária para solubilizar os íons alcalinos. Então, para que ocorra a ação deletéria, é necessário ter diluída, nos poros do concreto, água proveniente de alguma fonte. Devido ao fato de a umidade ser um dos fatores determinantes da existência da RAA, as obras hidráulicas são as mais suscetíveis de apresentarem esse tipo de problema. Em ambientes com umidade relativa acima de 80% a 85% ocorre expansão. Por outro lado, além dos agregados reativos e dos álcalis em concentração suficiente, é necessário que haja água ou elevada umidade para que ocorra a RAA (HASPARYK, 2005);
- **Temperatura:** a elevação da temperatura acelera a RAA e a formação do gel, pois aumenta a solubilidade da sílica e diminui a solubilidade do  $\text{Ca(OH)}_2$ . Portanto quanto maior a temperatura ambiente, mais rapidamente ocorrerá a reação. Isto pode ser explicado em função da maioria das reações químicas serem sensíveis à temperatura (HASPARYK, 2005).

A realização de estudos prévios para conhecer as características dos materiais componentes do concreto pode reduzir a possibilidade de ocorrência da RAA quando adotadas medidas que atenuem as condições favoráveis à sua ocorrência, evitando possíveis danos às estruturas de concreto. Os estudos para verificação da reatividade do agregado e suas respectivas normas são:

- **Análise petrográfica (ASTM C-295):** é o primeiro passo para verificar as potencialidades reativas do agregado, pois mostra a composição mineralógica, ou seja, a presença ou não de constituintes do agregado suscetíveis aos álcalis do cimento e seu potencial;
- **Método químico (ASTM C-289 e NBR 9774):** avalia a reatividade potencial do agregado em função da concentração de sílica dissolvida e da redução de alcalinidade, colocando o agregado imerso em solução de hidróxido de sódio 1 N a 80°C, durante 24 horas. Os resultados são plotados em um gráfico, onde o agregado é classificado como inócuo, deletério ou potencialmente deletério;
- **Caracterização química do cimento (NBR 5747):** deve ser feita para verificar o teor de álcalis contido no cimento. Segundo a ASTM C-150, para que um cimento tenha um baixo teor de álcalis seu equivalente alcalino ( $\%Na_2O + 0,658 \times \%K_2O$ ) não deve exceder 0,60%. No entanto, experiências mostraram que esta limitação por si só não assegura a ausência de reação expansiva. Há quem considere esse limite muito elevado e sugira 0,4% (ALMEIDA et al.,2006);
- **Método acelerado das barras de argamassa (ASTM C-1260):** este método estuda o conjunto agregado-aglomerante tornando possível, em curto prazo (16 a 30 dias), a análise do comportamento dos agregados em face da reatividade potencial e o estudo de alternativas para combater uma eventual expansibilidade. Este método investiga a RAA através da variação de comprimento de barras de argamassa estocadas em solução de hidróxido de sódio 1 N a 80°C. De acordo com a norma, expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias após a modelagem e um indicativo de comportamento inócuo do agregado, expansões entre 0,10% e 0,20%, para 16 dias após a modelagem é um indicativo da presença de agregados parcialmente reativo, sendo necessário para estes agregados à realização de testes complementares para

confirmar o potencial reativo dos mesmos, levando o ensaio até 30 dias. Para expansões superiores a 0,20 %, para 16 dias após a modelagem o agregado é considerado potencialmente deletério; e

- **Método dos prismas de concreto (ASTM C-1293):** outro método que investiga o conjunto agregado-aglomerante medindo a variação do comprimento de prismas de concreto submetidos a um ambiente de elevada umidade, a 38°C. O limite de expansão é de 0,04%, sendo a desvantagem desse método o longo período de ensaio de 365 dias, o que o torna ineficiente em situações dinâmicas. Uma adaptação do método dos prismas de concreto foi feita por Grosbois e Fontaine (2000), aumentando a temperatura de confinamento dos prismas para 60°C, reduzindo o período de ensaio, propondo o mesmo limite na idade de 91 dias.

No caso do estudo do agregado apresentar reatividade, a medida preventiva mais segura seria a substituição total ou parcial do agregado potencialmente reativo por outro, inócuo, o que não é viável, prático e econômico. Existem diversas medidas preventivas a serem tomadas para que e a reação não ocorra ou não venha comprometer a qualidade do concreto, e dependerá apenas da disponibilidade de recursos e de um estudo da relação custo-benefício. Estas medidas preventivas são:

- Utilizar cimentos com baixo teor de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente na ordem de 0,6%), ou limitar o conteúdo de álcalis no concreto entre 1,8 e 3  $\text{kg/m}^3$  de  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente, pode minimizar ou mesmo eliminar o problema, dependendo da reatividade do agregado, da vida útil prevista para a estrutura e as condições de exposição do concreto. Esta medida pode não ser efetiva contra as reações álcali-carbonato, pois a reação precisa apenas de uma quantidade mínima de álcalis para reagir, pois os álcalis são apenas catalisadores da reação de desdolomitização e são regenerados, não fazendo parte do produto final da reação;
- Fazer uso de adições minerais, substituindo parte do cimento por sílica ativa, metacaulim, cinza volante, cinza de casca de arroz, escória granulada de alto-forno e pozolanas naturais, adicionados ao concreto na própria obra, em teores compatíveis e previamente estudados em conjunto com o agregado

reativo com o objetivo de verificar a melhor opção na inibição ou redução das expansões causadas pela RAA; e

- Uso de aditivos químicos adicionados durante o amassamento do concreto. A adições químicas mostraram reduzir as expansões associadas a RAS, mas ainda existe muitas dúvidas a serem esclarecidas sobre seus mecanismos de ação, sendo este o objeto de estudos e pesquisas.

Com vários estudos e pesquisas já realizados, há conhecimento, materiais, procedimentos e capacitação laboratorial instalada para analisar previamente os agregados e prevenir a instalação desse fenômeno em novos empreendimentos.

Infelizmente ainda não existe uma maneira totalmente eficiente e econômica de combater a reação e suas expansões uma vez instalada no concreto, sendo este o objetivo de pesquisas efetuadas em todo o mundo. Havendo a necessidade de recuperar uma estrutura com RAA instalada, um estudo detalhado de cada caso será requerido.

Algumas medidas podem ser tomadas em estruturas deterioradas, que já apresentam o fenômeno da RAA instalado, para minimizar suas conseqüências e podem ser tomadas em conjunto dependendo de cada situação, a saber (HASPARYK, 2005):

- Limitar o acesso da água e umidade através da aplicação de agentes hidrófobos (impregnantes/penetrantes), selantes, por meio de pinturas, por exemplo, ou impermeabilizantes com membranas;
- Tratamentos químicos com injeção de sais de lítio de modo a reduzir a velocidade das reações. Essa medida ainda é objeto de estudos e pesquisas;
- Reforços estruturais, com o objetivo de restringir as deformações por meio de encapsulamento com concreto armado e/ou aplicar tensões com protensão;
- Aliviar as tensões realizando cortes na estruturas pela abertura de juntas de expansão liberando as deformações em determinadas direções; e
- Substituição do concreto afetado pela RAA, medida mais segura, embora raramente aceitável do ponto de vista econômico.

Como ainda não são conhecidas maneiras totalmente eficientes e econômicas de se corrigir definitivamente uma estrutura afetada pela RAA, o monitoramento adequado e acompanhamento do desempenho da estrutura afetada são fundamentais para qualquer solução de recuperação adotada, durante o restante de sua vida útil.

## 2.2. PROCESSO QUÍMICO DA RAA

Os mecanismos de expansão diferem para cada tipo de reação, como será explicado a seguir, mas todos envolvem de uma forma ou de outra, os álcalis liberado na hidratação do cimento e os componentes mineralógicos reativos do agregado.

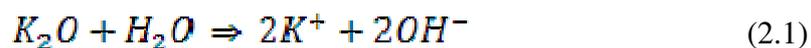
Na Tabela 1 são apresentados os minerais reativos mais comuns e qual o tipo de reação que cada um provoca (CARRAZEDO, 2004).

Tabela 1 – Composição dos minerais relacionados com a RAA

Mineral Reativo	Composição Química Reativa	Natureza da Reação
Quartzo Deformado	SiO <sub>2</sub>	Álcali-silicato
Opala	SiO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	Álcali-sílica
Calcedônia	SiO <sub>2</sub>	Álcali-sílica
Tridimita/Cristobalita	SiO <sub>2</sub>	Álcali-sílica
Vidros	Silicosos com Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Álcali-sílica
Calcita e Dolomita	CaMg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Álcali-carbonato

### 2.2.1. Processo Químico da Reação Álcali-Sílica (RAS)

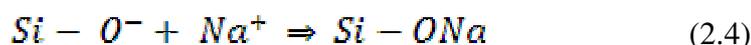
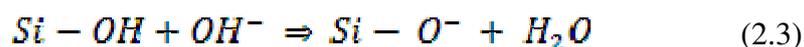
O Potássio (K) e o sódio (Na) são os únicos elementos dos metais alcalinos que são encontrados na solução dos poros do concreto em concentrações apreciáveis. Juntos, os óxidos destes metais, Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O, são referidos genericamente como “os álcalis” dentro da indústria do concreto. Álcalis podem ser introduzidos no concreto principalmente pelo cimento e também, em alguns casos, pelos agregados, aditivos químicos, água e adições mineralis. Durante a hidratação do cimento, na solução dos poros do concreto, ocorre a dissociação dos óxidos como mostrado nas equações (2.1) e (2.2):



liberando hidróxidos alcalinos, dando uma concentração suficiente de íons hidroxila ( $OH^-$ ), tornando o fluido dos poros do concreto fortemente básico, com um ph alcançando valores entre 12,5 a 13,5 (MONTEIRO; KURTIS, 2003).

O ataque da álcali-sílica no concreto é iniciado pela dissolução de silicatos presentes no agregado, cuja fase mineralógica contenha sílica amorfa tais como opala, calcedônia, cristobalita e tridimita, certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais. Dent Glasser e Kataoka (1981) identificaram dois mecanismos que constitui a dissolução da sílica no ambiente do concreto (MONTEIRO; KURTIS, 2003):

- Inicialmente os íons hidroxila ( $OH^-$ ), dissociados na solução alcalina, atacam as ligações do grupo silanol (Si-OH), presente na superfície da sílica, modificando sua estrutura e liberando água. Concomitantemente, ocorre a associação dos íons metálicos alcalinos (Na e K) à estrutura, desbalanceado negativamente pelo  $SiO^-$ , formando o gel de silicato alcalino, conforme representado nas equações (2.3) e (2.4):



- As ligações do grupo siloxano (Si-O-Si) também são atacadas, em um segundo estágio, pelos íons hidroxila ( $OH^-$ ), provocando a ruptura delas e substituindo-o por pares de  $SiO^-$ , propiciando a absorção de água e íons metálicos alcalinos, ficando em solução  $H_2SiO_4$  (ácido ortossilícico), conforme a equação (2.5):



Enquanto a solubilidade da sílica é aumentada na solução dos poros do concreto que são fortemente alcalinos, um ponto de saturação será alcançado, porque a difusão no concreto é limitada. Uma vez que esse ponto foi alcançado em um ambiente local, ocorre a repolimerização da sílica dissolvida em um produto de gel que contém sílica, água, álcalis, e outros íons em concentrações variadas. As moléculas aquosas migram para o gel sílico-alcalino, através de osmose, mas não deste para a solução. Assim, ao absorver grande quantidade de água, aumenta de volume e envolta pela pasta de cimento e, sem poder migrar através dela, começa a exercer pressões hidráulicas suficientes para danificar o concreto. Enquanto os mecanismos de expansão do gel da RAS são incompletamente compreendidos, a pressão gerada pode superar a resistência a ruptura à tração da pasta e do concreto, causando fissuras internas e externas no concreto e expansões na estrutura (MONTEIRO; KURTIS, 2003).

Dependendo da concentração de cálcio e de álcalis, o gel formado pode ser ou não expansivo. Desta forma, quando a concentração de cálcio for superior a de álcalis, haverá a formação de um gel não expansivo de cal-álcali-sílica. Por outro lado, se a concentração de álcalis é maior, haverá a formação de um gel de álcali-sílica com propriedades expansivas (CARRAZEDO, 2004). A mobilidade e/ou fluidez do gel também é dependente da sua composição química, estando esta composição diretamente relacionada à sua capacidade de expansão (HASPARYK, 2005).

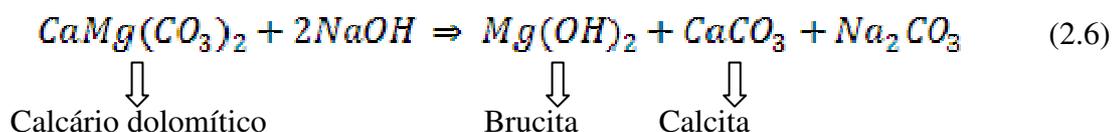
### **2.2.2. Processo Químico da Reação Álcali-Silicato**

Essa reação possui o mesmo princípio da reação álcali-sílica, porém ocorre mais lentamente uma vez que os minerais reativos estão mais disseminados na matriz. O  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , proveniente da hidratação de cimento reagirá com o agregado. A cal poderá também penetrar no agregado e reagir, liberando álcalis sobre a forma de KOH e NaOH e/ou silicato de potássio e sódio, sendo este último sob a forma de gel parcialmente solúvel em água. Quando os álcalis atingirem certa concentração, os silicatos de cálcio tenderão a se dissolver em silicatos de potássio e sódio, formando um gel que terá cálcio, potássio, sódio e sílica, às vezes estendendo-se até o interior do agregado. Este gel, parcialmente solúvel em água, tem mobilidade dentro do agregado e do cimento, além de estar sujeito a contrações e dilatações, conforme receba ou perca água. Assim, a

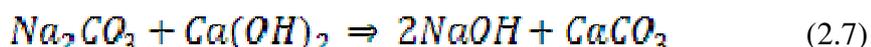
partícula de agregado envolvida pelo gel, semi-líquido, tem baixa resistência (CARRAZEDO, 2004).

### 2.2.3. Processo Químico da Reação Álcali-Carbonato (RAC)

Os mecanismos da RAC que provocam a expansão ainda não são bem conhecidos. Um mecanismo bastante aceito é que este tipo de processo está fundamentado na reação entre certos calcários dolomíticos e as soluções alcalinas presentes nos poros do concreto promovendo a formação da brucita ( $Mg(OH)_2$ ), processo conhecido como desdolomitização, ocorrendo também a regeneração de hidróxidos alcalinos, não havendo formação de gel expansivo como nas outras reações. O processo de desdolomitização está representado na equação (2.6) (ANDRADE, 1997):



A regeneração de hidróxidos alcalinos ocorre com a reação entre o hidróxido de cálcio presente no concreto com o  $CO_3$ , produzido durante a desdolomitização, formando calcita e regenerando íons hidroxila, mantendo o valor do pH elevado. Os álcalis atuam como catalisadores da reação, não participam dos produtos formados. O processo de regeneração de hidróxidos alcalinos está representado na equação (2.7) (ANDRADE, 1997):



As teorias de expansão da RAC diferem entre alguns pesquisadores. De acordo com Deng e Tang (1993), dois pesquisadores que investigaram este tipo de reação na China, a expansão é causada pela formação e crescimento de produtos cristalinos em um

espaço confinado, interface de cristais dolomíticos e a matriz. Portanto, não ocorre à formação do gel, os produtos formados na reação, calcita e brucita, ocupam maior volume que aquele ocupado pela dolomita, gerando fissurações e o enfraquecimento da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, e a presença de microfissurações (ANDRADE, 1997).

Já Gillott e Swenson (1986), propuseram que a expansão é devido à absorção de íons hidroxila pelos argilominerais recém expostos, resultantes da reação de desmolomitização (ANDRADE, 1997).

### 2.3. ADIÇÕES MINERAIS NA RAA

Inúmeras pesquisas mostraram que o uso de adições minerais com atividade química podem inibir ou reduzir as reações expansivas causadas pela RAA, pois estas adições reduzem a permeabilidade do concreto (diminuindo a mobilidade dos íons), eleva a resistência às tensões expansivas causadas pela reação, diminui os álcalis em função da reposição parcial do cimento e consomem parte dos álcalis pela reação pozolânica, ao invés da reação com os agregados reativos (ANDRADE, 1997; CARRAZEDO, 2004).

As adições minerais utilizadas atualmente são resíduos provenientes de indústrias que seriam descartados em grandes quantidades em locais impróprios, gerando risco de problemas ambientais, mas também estas adições podem ser de origem natural. O cimento e os teores das adições a serem empregados devem ser previamente estudados em conjunto com o agregado reativo com o objetivo de verificar a melhor opção na inibição ou redução das expansões causadas pela RAA.

O tipo de agregado e o seu grau de reatividade influenciam no teor de adição, sendo necessário o estudo prévio do cimento e das adições com o agregado, conforme comentado. A Tabela 2 mostra as adições minerais e seus teores de adição, que normalmente tem sido empregada, utilizados na prática ou sugeridos a partir de experimentações (SOBBAG, 2003; HASPARYK, 2005).

Tabela 2 – Teores de adições minerais normalmente empregadas

Adição Mineral	Teores de Adição (%)
sílica ativa	10 a 15
metacaulim	10 a 25
cinza de casca de arroz	12 a 15
cinza volante	30 a 40
escória granulada de alto-forno	37 a 45
pozolanas naturais	20 a 30

A descrição de cada adição e seus efeitos sobre a RAA estão destacados a seguir (ANDRADE, 1997; CARRAZEDO, 2004; DAL MOLIN, 2005):

- **Sílica ativa:** subproduto do processo de obtenção do ferro-silício e silício-metálico constituída basicamente de sílica amorfa (84% a 98% em massa). Tem efeito sobre RAA promovendo a reação álcali-sílica no concreto ainda no estado fresco, isto se deve às partículas de sílica amorfa ultrafinas, exaurindo o conteúdo de álcalis antes mesmo que o concreto desenvolva significativa resistência, evitando a expansão. Em face de suas partículas ultrafinas, seu uso favorável está ligado ao uso adequado de superplastificantes;
- **Metacaulim:** obtida, normalmente, de alguns tipos de argilas, como as caulínicas e os caulins (entre 600°C e 900°C). Seu efeito sobre a RAA está ligado a um componente amorfo e de grande instabilidade química, denominado metacaulita ( $Al_2Si_2O_7$ ), absorvendo os íons hidroxila para a formação de C-S-H (reação pozolânica), reduzindo o pH e a taxa de dissolução de sílica.
- **Cinza de casca de arroz:** resultante da queima controlada da casca de arroz para que possa obter sílica altamente reativa e baixa quantidade de álcalis em sua composição. Influencia na RAA diminuindo a concentração de íons hidroxila, ficando em solução uma quantidade de álcalis insuficiente para provocar reações expansivas com o agregado;

- **Cinza volante:** proveniente da queima de carvão pulverizado sendo eficiente se conter alto teor de sílica amorfa e baixo teor de álcalis e o cimento conter um elevado teor de álcalis. Seu efeito na RAA tem o mesmo princípio do efeito da cinza de casca de arroz já comentado acima;
- **Escória granulada de alto-forno:** resíduo não metálico proveniente da produção do ferro-gusa. Tem efeito sobre RAA propiciando maior incorporação dos álcalis, diminuindo a concentração dos íons alcalinos para reagir com o agregado, pois o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), formado na hidratação do cimento contendo escória, apresenta uma relação C/S menor que aquela contida na pasta de cimento Portland comum;
- **Pozolanas naturais:** são rochas que não necessitam, para o seu emprego, de nenhum outro processo além da moagem. Segundo Monteiro et al.(1997), a influência das pozolanas naturais na RAA está ligado na incorporação de íons alcalinos e na redução da porosidade e permeabilidade do concreto. É eficaz quanto maior for a taxa de óxido de cálcio (CaO) em relação aos hidróxidos alcalinos. Já Collins e Bareham (1987) mostram que ocorre absorção dos íons hidroxila pelo excesso de sílica na mistura pela adição de pozolanas naturais, favorecendo a formação de C-S-H secundário (reação pozolânica), pela redução do pH e a taxa de dissolução de sílica.

## 2.4. ADIÇÕES QUÍMICAS NA RAS

A necessidade de se encontrar meios alternativos para evitar danos causados pela RAS fez com que às pesquisas se dirigissem para o uso de adições químicas. As adições químicas passaram a ser outra alternativa de adição na prevenção da RAS desde que não venham a afetar as propriedades mecânicas do concreto, tomando cuidado também que esta adição pode estar apenas retardando a evolução do quadro reativo.

McCoy e Caldwell (1951) foram os primeiros a relatar que a expansão da RAS poderia ser inibida por algumas adições químicas. Desde então medidas usando adições químicas para inibir a RAS têm recebido cada vez mais atenção. Este estudo inicial e estudos subseqüentes mostraram que certas substâncias químicas, incluindo sais de lítio,

sais de cálcio, e acetona, podem reduzir as expansões causadas pela RAS. A falta de entendimento do mecanismo ou mecanismos pelas quais estas substâncias químicas reduzem as expansões é talvez o obstáculo fundamental para o uso prático de tais adições químicas. Sem conhecer o mecanismo de controle, é difícil prever a eficiência de uma adição química, para prever a duração de seu controle ou para recomendar dosagens (MONTEIRO & KURTIS, 2003). Outro obstáculo para o uso prático das adições químicas está ligado ao fator ambiental, como as obras hidráulicas são as mais suscetíveis a apresentarem esta patologia, há um grande risco de contaminação da água mananciais e solos por algumas destas adições, podendo chegar a cadeia alimentar do ser humano pela ingestão de água e alimentos contaminados por estas adições.

De todas as pesquisas utilizando adições químicas, as que mais deram resultados satisfatórios, foram às realizadas com compostos de lítio devido a sua especial eficiência na redução das expansões devido a RAS. As pesquisas mostraram que todos os compostos de lítio estudados, incluindo LiF, LiCl, LiBr, LiOH, LiOHxH<sub>2</sub>O, LiNO<sub>3</sub>, LiNO<sub>2</sub>, Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Li<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> e Li<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, são eficientes na redução das expansões causadas pela RAS no concreto, contanto que sejam usadas nas dosagens apropriadas. Encontrou-se que a eficácia das adições na redução da RAS depende na maioria de alguns dos componentes químicos da adição. Comparando com os outros compostos a base de lítio, os pesquisadores consideram que o nitrato de lítio (LiNO<sub>3</sub>) representa o mais promissor. O uso do LiNO<sub>3</sub>, um sal neutro inteiramente solúvel, não gera aumento significativo na concentração de íons hidroxila e assim reduz o risco de aceleração da RAS ao mesmo tempo em que melhoram seus efeitos. Há vários estudos utilizando compostos a base de lítio, porém ainda existem muitas dúvidas a serem esclarecidas quanto ao seu efeito (MO, 2005).

Vários mecanismos foram propostos descrevendo os efeitos dos compostos a base de lítio na redução das expansões associadas à RAS, incluindo os seguintes (FOLLIARD et al., 2003):

- Lítio altera a composição da RAS, resultando em um produto com pequena ou nenhuma capacidade de absorver água e expandir;
- Lítio reduz a dissolução da sílica;
- Lítio diminui a repolimerização de sílica e silicatos; e
- Lítio reduz as forças repulsivas entre as partículas coloidais do gel da RAS.

A dosagem das adições a base de lítio pode variar dependendo dos objetivos específicos, mas a dosagem deve ser baseada no equivalente alcalino ( $\%Na_2O_{eq}$ ) contido no cimento Portland. Esta dosagem é calculada pela razão da concentração molar do óxido de lítio pela concentração molar do óxido de sódio ( $Li_2O / Na_2O_e = Li / Na_e$ ). No entanto,  $Li_2O / Na_2O_e$  se iguala a  $Li / Na_e$  convertendo o  $Li_2O$  desta fórmula, usando relação molar (2 mol Li / 1 mol  $Li_2O$ ). Deste ponto,  $Li / Na_e$  poderá ser usado permutavelmente como  $Li_2O / Na_2O_e$  (COLLINS et al., 2004).

Stark et al. (1993) confirmaram os efeitos do LiF e do  $Li_2CO_3$  pelo método de ensaio ASTM C-227 e os efeitos do LiOH pelo método de ensaio ASTM C-1260 na redução da expansão em argamassas. Utilizando um agregado altamente reativo encontraram que o lítio é efetivo utilizando a relação molar de 0,6; 0,92 e 0,67 para LiF,  $Li_2CO_3$  e LiOH, respectivamente. Uma importante observação deste trabalho era que uma dosagem insuficiente de lítio resultava em um aumento na expansão se comparada com a argamassa de controle sem o lítio, conhecido como “péssimo efeito”. O péssimo efeito foi confirmado também por Diamond & Ong (1992). Esta reação de péssimo efeito pode ser atribuída ao aumento da alcalinidade ( $OH^-$ ) na solução dos poros causada pela adição de lítio, especialmente o LiOH. Outras formas de lítio também aumentaram o pH da solução dos poros, mas o  $LiNO_3$  é o único que não tende a elevar o pH, eliminando o péssimo efeito.

O  $LiNO_3$  pode apresentar um efeito benigno nas propriedades de resistência do concreto, resistência elétrica, retração por secagem e resistência ao gelo e degelo. O LiOH apresenta resultados semelhantes a estes efeitos, com exceção de um efeito retardador do desenvolvimento da resistência (FENG et al., 2005).

Segundo Folliard et al. (2003), vários estudos realizados com lítio indicam uma maior eficiência na redução das expansões quando o composto é utilizado na forma de  $LiNO_3$ , com relação molar  $Li/Na_e$  de 0.74, além de não aumentar o pH.

Collins et al. (2004) a fim de entenderem os meios pelo o qual o lítio atua na RAS, estudaram três adições a base de lítio (LiOH, LiCl e  $LiNO_3$ ), utilizando várias dosagens. O efeito das adições à base de lítio na RAS foi avaliado utilizando o ensaio de expansão em barras de argamassa e análise elementar quantitativa para medir mudanças nas concentrações das fases das espécies em solução (Si, Na, Ca e Li) em filtrados obtidos em diferentes tempos do gel de sílica e da solução alcalina. Os resultados dos ensaios das barras de argamassa mostraram que as adições à base de lítio foram efetivos

reduzindo as expansões abaixo de um limite aceitável de 0.05% aos 56 dias. Porém, diferentes dosagens ( $\text{Li}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}_e$ ), para cada tipo de adição, foram requeridas para redução das expansões (aproximadamente 0.6 para  $\text{LiOH}$ , 0.8 para  $\text{LiNO}_3$  e 0.9 para  $\text{LiCl}$ ). A análise elementar quantitativa indicou que o sódio e o lítio foram ambos incorporados no produto de reação formando o gel da RAS. Acredita-se que o lítio pode ter sido preferencialmente incorporado ao gel porque foi encontrado uma maior porcentagem na diminuição do lítio dissolvido do que no sódio dissolvido, observado nas primeiras 24 h. Ou as adições à base de lítio diminuiram a dissolução da sílica, ou promoveu a precipitação dos produtos ricos em sílica (alguns dos quais podem ser não expansivos), porque a concentração de sílica dissolvida diminuiu com o aumento da dosagem do  $\text{LiNO}_3$  ou do  $\text{LiCl}$ .

Bérubé et al. (2004) avaliou a influência do  $\text{LiNO}_3$  no comportamento de pastas de cimento com teor alcalino variável mantendo fixa a relação molar entre  $\text{Li}/\text{Na}_e$  e igual a 0.74. Os espécimes foram armazenados a 23, 38 e 60°C em recipientes lacrados. As soluções dos poros foram extraídas para análise depois de 3, 7, 28 e 91 dias. Nos estudos observaram que a relação molar da solução reduziu em 50% e nos produtos hidratados esta relação ficou sempre acima de 1.1, mostrando a eficiência e preferência do lítio na fixação aos hidratos quando comparado com o Na e K. O lítio foi capaz de reduzir o seu pH apesar do aumento da concentração dos íons Na e K na solução (HASPARYK, 2005).

Na mesma linha de pesquisa, Feng et al. (2004) verificou a eficiência da técnica na investigação do efeito do nitrato de lítio em pastas de cimento, utilizando relações molares variando de 0.19 a 1.49, através de ressonância magnética por imagem, mostrando também a fixação do lítio nos produtos de hidratação do cimento (HASPARYK, 2005).

Outra pesquisa mais recente de Feng et al. (2005), reuniu várias pesquisas realizadas utilizando compostos de lítio chegando a conclusão que a relação molar ( $\text{Li}/\text{Na}_e$ ) para um eficiente controle da RAS é geralmente na faixa de 0.67 a 1.20 para a maioria dos compostos de lítio estudado e 0.72 a 0.93 para o  $\text{LiNO}_3$ .

Um estudo apresentado por Ramyar et al. (2004), determinou as características químicas e morfológicas dos produtos de reação de barras de argamassas, com/sem a adição de lítio ( $\text{LiF}$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  usados na água de mistura) ou cinza volante, sujeitas as condições do método de ensaio da ASTM C-1260, onde registraram as expansões até 56

dias. Verificou-se que as adições utilizando os componentes à base de lítio cessaram as expansões aos 28 dias, enquanto que as adições à base de cinza volante as expansões não cessaram ao longo do teste. Também, observações utilizando microscópio eletrônico de varredura (MEV) e microanálise de dispersão de energia por Raio-X confirmaram que a morfologia dos produtos cristalinos de reação foi mudada pelo uso das adições a base de lítio.

Hasparyk et al. (2006), realizando ensaios de expansão em laboratório, em testemunhos de concreto extraídos de uma estrutura já afetada pela RAA, verificou o papel do lítio nas expansões residuais geradas por esta reação. O testemunhos de concreto foram ensaiados em duas condições, uma após tratamento com lítio, sendo imersos em seguida em solução de NaOH e a outra imersos diretamente em solução com concentração molar de 0,74  $\text{LiNO}_3/\text{NaOH}$ , as expansões se apresentaram inferiores àquelas obtidas para a condição apenas de imersão em NaOH, chegando a níveis médios de 0,09% e 0,12% em um ano, respectivamente. Estes resultados mostram o potencial do lítio na redução das expansões da RAA em testemunhos já afetados pela RAA.

Embora os mecanismos pelos quais o lítio reduz as expansões não são completamente compreendidos, é evidente que lítio afeta a natureza do gel da RAS, tornando-o não expansivo. O produto de reação (gel) ainda se forma, mas o lítio impede sua habilidade de absorver água e se expandir.

Apesar das adições minerais já serem empregadas em muitos empreendimentos, a disponibilidade das adições minerais eficazes na prevenção da RAS pode ser limitada em certas regiões e a demanda pode exceder a fonte local, além de nem todas estas adições serem igualmente efetivas neste papel e sua quantia no controle da RAS pode não ser aceitável por outras razões. Com isso, seria vantajoso o uso dos compostos a base de lítio na prevenção da RAS devido a sua fácil obtenção e eficiência, desde que sua quantia também seja aceitável por outras razões.

A Tabela 3 mostra alguns estudos citados nesta seção e vários estudos de laboratório usando compostos à base de lítio na inibição da RAS. A Tabela 3 focaliza particularmente comparações entre as dosagens de lítio necessárias para inibir a expansão deletéria da RAS para cada caso. As pesquisas citadas acima, como as da Tabela 3, foram usadas como base para as primeiras dosagens de lítio neste trabalho.

Tabela 3 – Resumo de pesquisas encontradas relacionadas à dosagem de lítio na redução da expansão devido a RAS

Pesquisadores	Método de Ensaio	Agregado Reativo	Composto(s) de Lítio	Mínima Li/Na <sub>e</sub> Necessária p/ Suspender a Reação
McCoy e Caldwell (1951)	ASTM C-227	Vidro Pyrex	LiCl, Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , LiF, Li <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , LiNO <sub>3</sub> e Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.74
Sakaguchi et al. (1989)	ASTM C-227	Vidro Pyrex, Piroxênios e Areia Andesito	LiOHxH <sub>2</sub> O, LiNO <sub>2</sub> e Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.90
Ohama et al. (1989)	Autoclave	Opala	LiOHxH <sub>2</sub> O, LiF e Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.5% (por massa de cim.) – LiF 0.7% (por massa de cim.) – LiOHxH <sub>2</sub> O
Stark (1992); Stark et al. (1993)	ASTM C-227 ASTM C-1260	Riolito e Granito Gnaissé	LiOHxH <sub>2</sub> O, LiF e Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.6 – LiF 0.92 – Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 0.75-1.00 – LiOH
Diamond e Ong (1992)	ASTM C-227	Cristobalita e Opala	LiOH	1.2
Qinghan et al. (1995)	Autoclave	Andesito	LiNO <sub>2</sub>	0.8 p/ elevado %Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>
Lumley (1997)	ASTM C-1293	Cristobalita	LiOHxH <sub>2</sub> O, LiF e Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.62
Blackwell et al. (1997); Thomas (2000)	ASTM C-1293	Vários Agregados	LiOH e LiNO <sub>3</sub>	0.70 – LiNO <sub>3</sub> 0.85 – LiOH
Durand (2000)	ASTM C-1293	Agregados do Canadá (Sudbury – arenito, quartzo; Potsdam – arenito; e Sherbrooke – xisto)	LiOHxH <sub>2</sub> O, LiF, Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> e LiNO <sub>3</sub>	0.72 – LiNO <sub>3</sub> 0.82 – LiOHxH <sub>2</sub> O, LiF e Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Collins et al. (2004)	ASTM C-227	Vidro Borossilicato	LiOH, LiNO <sub>3</sub> e LiCl	0.6 – LiOH 0.8 – LiNO <sub>3</sub> 0.9 – LiCl
Fournier et al. (2004)	ASTM C-1293	Riolito, Grauvaca e Calcário	LiOH (Riolito, Grauvaca) e LiNO <sub>3</sub> (Riolito, Calcário)	LiOH: 1.11 com Riolito; ~1.0 com Grauvaca LiNO <sub>3</sub> : ~0.74 com Riolito; 0.93 com Calcário
Tremblay et al. (2004a, b)	ASTM C-1293	Agregados do Canadá (grauvaca/arg., Dolostone, Cascalho, Riolito, Calcário, Granito/Gnaissé)	LiNO <sub>3</sub>	Tipo agr. (1 ano %exp.) Relação molar <ul style="list-style-type: none"> <li>• Granito/gnaissé (0.029%): 0.56</li> <li>• Xisto (0.082%): &gt;0.94</li> <li>• Grauvaca/arg. (0.087%): 0.71</li> <li>• Dolostone (0.100%): 0.61</li> <li>• Cascalho (0.101%): 0.58</li> <li>• Cascalho (0.103%): 0.91</li> <li>• Cascalho (0.113%): 0.97</li> <li>• Cascalho (0.122%): 0.66</li> <li>• Grauvaca (0.142%): &gt;1.11</li> <li>• Cascalho (Riolito) (0.151%): 0.63</li> <li>• Calcário (0.162%): &gt;1.04</li> <li>• Calcário (0.199%): &gt;1.11</li> </ul>

Fonte: FOLLIARD et al. (2006)

## 2.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente levantamento bibliográfico foi importante para ampliar o conhecimento do tema e auxiliar no desenvolvimento do estudo dos efeitos das adições químicas na prevenção da RAS. No Brasil, os estudos evoluíram muito no uso de adições minerais para prevenção da RAS, contudo, há uma carência nos estudos utilizando adições químicas. A proposta deste trabalho é de contribuir com o tema reação álcali-sílica a partir do estudo de uma adição química, a base de nitrato de lítio, a fim de observar, em laboratório, o seu efeito na redução da expansão em barras de argamassa sujeitas a RAS, comparando também com os efeitos de redução da expansão de barras de argamassa com uma adição mineral a base de cinza volante e observando os efeitos desta adição química na resistência à compressão e nas condições de trabalhabilidade da argamassa. Como são poucos os estudos envolvendo adições químicas na prevenção da RAS no Brasil, resolveu-se realizar esse trabalho, a fim de contribuir com novas alternativas de adição para a prevenção desta patologia.

## 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 3.1. PANORAMA GERAL

Os ensaios relativos à RAA para execução do seguinte trabalho foram divididos em dois. O primeiro foi o método acelerado das barras de argamassa moldadas em laboratório, onde foram feitos à análise do comportamento dos agregados em face da reatividade potencial, com/sem a adição de  $\text{LiNO}_3$  e cinza volante; o segundo ensaio avaliou as propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido, como as condições de trabalhabilidade e resistência à compressão respectivamente, com/sem a adição de  $\text{LiNO}_3$ .

No fluxograma a seguir (Figura 9) estão apresentadas, de forma detalhada, todas as atividades que foram realizadas no programa experimental.

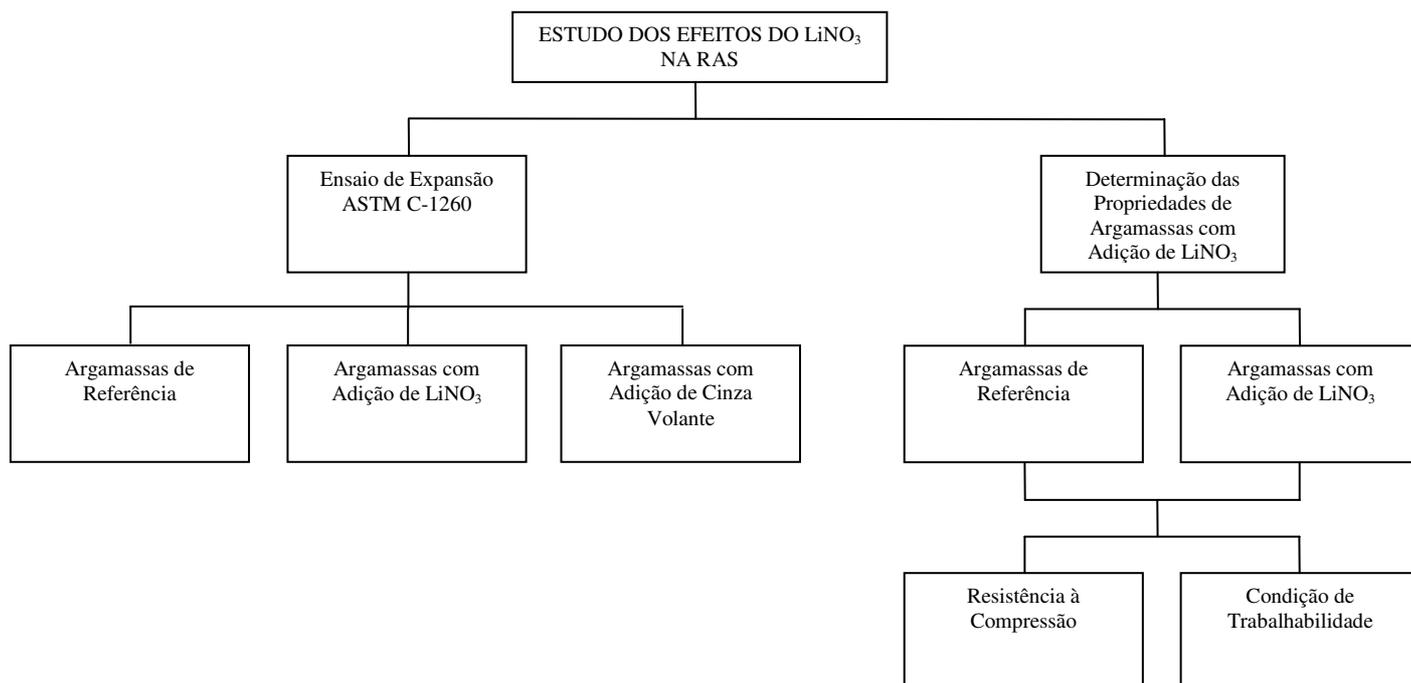


Figura 9 – Fluxograma das atividades do Programa Experimental

### 3.2. MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO

Os materiais que foram utilizados na moldagem das argamassas do programa experimental estão apresentados a seguir:

- Aglomerante hidráulico: cimento Portland CP V – ARI – PLUS;
- Agregados: Basalto procedente da Pedreira Três Irmãos de Andradina – SP e Seixo procedente do Porto N. Sra. Aparecida de Três Lagoas – MS;
- Reagentes químicos: Nitrato de Lítio (LiNO<sub>3</sub>) com 95% de pureza e Hidróxido de Sódio (NaOH), todos comercialmente vendidos no mercado;
- Adição mineral: cinza volante; e
- Água potável.

As Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam os ensaios de caracterização realizados com os materiais que foram empregados no estudo experimental.

Tabela 4 – Análise físico-química do cimento CP V – ARI – PLUS

Referência		22909	Especificações NBR 5733		
			min.	máx.	
Finura peneira #200 (% retida)		0,20	-	6,0	
Finura peneira #325 (% retida)		0,28	-	-	
Superf. espec. Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4733	3000	-	
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )		0,97	-	-	
Densidade absoluta (g/cm <sup>3</sup> )		3,14	-	-	
Água de consistência da pasta	gramas	157	-	-	
	(%)	31,4	-	-	
Início de pega (h:min)		02:05	01:00	-	
Expansão em auto-clave (%)		exp	-	0,8*	
Resistência à compressão axial	Consistência da argamassa	gramas	150	-	-
		a / c	0,48	-	-
	Data de moldagem		05/12/2006	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	35,4	24,0	-
		07 dias	41,9	34,0	-
		28 dias	48,5	-	-
Análise química (%)	Perda ao fogo		3,89	-	4,5
	Insolúveis		0,53	-	1,0
	SiO <sub>2</sub>		18,97	-	-
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,52	-	-
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		4,80	-	-
	CaO		59,17	-	-
	MgO		5,30	-	6,5
	SO <sub>3</sub>		3,53	-	3,5
	Na <sub>2</sub> O		0,13	-	-
	K <sub>2</sub> O		0,87	-	-
	Equivalente alcalino Na <sub>2</sub> O		0,70	-	-
	Cal livre em CaO		1,15	-	-

\*Ensaio não especificado pela ABNT

Tabela 5 – Análise físico-química da cinza volante

Referência		5576	Especificações NBR 12653	
			min.	máx.
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )		0,7	-	-
Densidade absoluta (g/cm <sup>3</sup> )		2,36	-	-
Finura peneira #325 (% retida)		24,3	-	34,0
Superf. Espec. Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4363	-	-
Diâmetro do grãos (micras)		5,83	-	-
Reatividade c/ álcalis	Redução expansão (%)	63,8	75,0	-
	Expansão argamassa (%)	0,074	-	0,020
Índices atividade pozolânica	Água requerida (%)	106,4	-	110,0
	com cimento (%)	72,4	75,0	-
	com cal (MPa)	-	6,0	-
Retração por secagem (%)		0,002	-	0,050
Umidade da amostra (%)		1,07	-	3,00
Análise Química (%)	Perda ao fogo	14,19	-	6,0
	SiO <sub>2</sub>	44,26	-	-
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,15	-	-
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,73	-	-
	CaO	2,22	-	-
	MgO	0,23	-	-
	SO <sub>3</sub>	0,19	-	5,00
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,88	-	-
	SiO <sub>2</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	79,14	70,0	-
	Equiv. alc. em Na <sub>2</sub> O (disp)	0,48	-	-

Tabela 6 – Características do Basalto procedente da Pedreira Três Irmãos de Andradina – SP

<b>Característica</b>	<b>Norma</b>	<b>Agregado (19 mm)</b>
Módulo de finura (Apêndice A)	NBR NM 248/03	6,85
Massa específica S.S.S. (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52/03	2,938
Absorção (%)	NBR NM 53/03	1,36

Tabela 7 – Características do Seixo procedente do Porto N. Sra. Aparecida de Três Lagoas – MS

<b>Característica</b>	<b>Norma</b>	<b>Agregado (25 mm)</b>
Módulo de finura (Apêndice A)	NBR NM 248/03	7,10
Massa específica S.S.S. (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52/03	2,631
Absorção (%)	NBR NM 53/03	0,36

### 3.3. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

A Tabela 8 detalha os ensaios que serão realizados, o tamanho das amostras que serão envolvidos em cada etapa com as respectivas normas ou métodos de ensaios que serão empregados no programa experimental em argamassas.

Tabela 8 – Ensaio realizados no programa experimental

<b>Características ou propriedades Investigadas</b>	<b>Número de amostras / CP's por agregado</b>	<b>Condição das amostras / CP's</b>	<b>Norma ou metodologia adotada</b>
<b>Ensaio com argamassas moldadas</b>			
Ensaio de expansão pelo método acelerado	24 *	com adição de $\text{LiNO}_3$	ASTM C-1260
	3	cinza volante	
	3	controle	
Resistência à compressão **	12	com adição de $\text{LiNO}_3$	NBR 7215
	12	controle	
Condições de Trabalhabilidade	1	com adição de $\text{LiNO}_3$	
	1	controle	

\* As 24 amostras são divididas segundo a relação molar utilizada, sendo 3 amostras para cada uma das 8 relações molares utilizadas nesta pesquisa.

\*\* Foram moldados 4 corpos-de-prova para cada dia de ensaio (3, 7 e 28 dias).

A seguir estão detalhadas todas as atividades que serão realizadas no programa experimental, conforme o fluxograma apresentado na Figura 9.

### 3.4. ENSAIOS DE EXPANSÃO DA ARGAMASSA PELO MÉTODO ACELERADO

Os ensaios de expansão foram realizados a fim de analisar o comportamento dos agregados em face da reatividade potencial, e estudar os efeitos do  $\text{LiNO}_3$  na redução da expansibilidade de barras de argamassa comparando também com os efeitos do cinza volante na redução da expansão das mesmas, de acordo com a norma ASTM C-1260.

De acordo com o método de ensaio, foram confeccionadas três barras de argamassa para cada tipo de mistura. As dimensões das barras são de 25mm x 25mm x 285mm, com relação cimento:agregado de 1:2,25 e relação água/cimento de 0,47 (em massa).

Os prismas permaneceram moldados por 24 horas no ambiente de moldagem e, depois da retirada do molde, ficaram totalmente imersos em água, a uma temperatura de 80°C, por mais 24 horas. Após tal procedimento, foi feita a determinação do comprimento de referência e os prismas foram confinados em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1 N a 80°C durante 28 dias.

As leituras da variação do comprimento foram efetuadas periodicamente, sendo os resultados expressos em porcentagem de expansão, correspondendo às médias das três barras de argamassa para cada tipo de adição.

A Figura 10 mostra a fôrma utilizada e as barras de argamassa moldadas. Um modelo de equipamento para verificação da dimensão linear das barras de argamassa está mostrado na Figura 11. A Figura 12 mostra o recipiente de estocagem das barras contendo a solução de hidróxido de sódio 1 N, a 80°C.



Figura 10 - Fôrma e barra de argamassa



Figura 11 - Equipamento para medição de barra de argamassa



Figura 12 - Recipiente de estocagem das barras

Para a realização dos ensaios foram preparadas barras de argamassas de referência, as quais não continham a adição de  $\text{LiNO}_3$ , e barras contendo várias dosagens de  $\text{LiNO}_3$  de acordo com a relação da concentração molar do óxido de lítio pela concentração molar do óxido de sódio ( $\text{Li}/\text{Na}_{\text{eq}}$ ) utilizada. As relações molares utilizadas para a dosagem do  $\text{LiNO}_3$  foram as seguintes:  $\text{Li}/\text{Na}_{\text{eq}} = 0,72; 0,79; 0,86; 0,93; 1,5; 3,0; 4,5$  e  $7,0$ . A equação (2.8) mostra a equação utilizada no cálculo da dosagem de  $\text{LiNO}_3$  e a Tabela 9 mostra a quantidade dos materiais componentes das barras de argamassa para cada dosagem da adição.

$$M = 2 \cdot \frac{M_0}{M_{Na_2O}} \cdot P_m \cdot A_m \cdot B_m \cdot \frac{1}{n_0 \cdot N_0} \quad (2.8)$$

onde, M é a quantidade de LiNO<sub>3</sub> a ser adicionado a mistura (g), M<sub>0</sub> é a massa molar do LiNO<sub>3</sub> (g/mol), M<sub>Na<sub>2</sub>O</sub> é a massa molar do Na<sub>2</sub>O (g/mol), P<sub>m</sub> é a quantidade de cimento que será utilizado na preparação das barras (g), A<sub>m</sub> é a relação molar Li/Na<sub>eq</sub> requerida, B<sub>m</sub> é a quantidade de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> contida no cimento (%), n<sub>0</sub> é a quantidade molar de Li por molar da mistura e N<sub>0</sub> é a pureza do LiNO<sub>3</sub> utilizado (%).

A dosagem do LiNO<sub>3</sub> requerida foi adicionada na água de amassamento, mas se o composto de lítio estiver na forma de uma solução aquosa (solução com 30% de LiNO<sub>3</sub>), a quantidade de água contida na solução deverá ser removida da água de amassamento para manter a mesma relação a/c requerida pela norma (FOLLIARD et al., 2003).

Tabela 9 – Quantidade dos materiais componentes das barras de argamassa (3 barras)

Li/Na <sub>eq</sub>	Cimento (g)	Agregado graduado (g)	Na <sub>2</sub> O (mol)	LiNO <sub>3</sub> (g)	Água (g)
<b>0,00</b>	440	990	0,0113	0	206,8
<b>0,72</b>	440	990	0,0113	5,19	206,8
<b>0,79</b>	440	990	0,0113	5,70	206,8
<b>0,86</b>	440	990	0,0113	6,20	206,8
<b>0,93</b>	440	990	0,0113	6,71	206,8
<b>1,50</b>	440	990	0,0113	10,82	206,8
<b>3,00</b>	440	990	0,0113	21,65	206,8
<b>4,50</b>	440	990	0,0113	32,47	206,8
<b>7,00</b>	440	990	0,0113	50,51	206,8

Também foram preparadas barras de argamassa com uma adição mineral a base de cinza volante, a fim de comparar o comportamento expansivo destas com as barras de argamassa moldadas com a adição química a base de LiNO<sub>3</sub>. A substituição de cinza volante por parte do cimento nas barras de argamassa foi feita em diferentes dosagens

para cada agregado a fim de se obter expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias de ensaio: para o Basalto, 60% de cimento e 40% de cinza volante; e para o Seixo, 70% de cimento e 30% de cinza volante. A Tabela 10 mostra a quantidade dos materiais componentes das barras de argamassa com substituição de parte do cimento por cinza volante para os agregados utilizados.

Tabela 10 – Quantidade dos materiais componentes das barras de argamassa (3 barras) moldadas com cinza volante para os agregados utilizados

Mistura	Dens. Abs. Cim. (g/cm <sup>3</sup> )	Dens. Abs. Cinza Volante (g/cm <sup>3</sup> )	Cimento (g)	Cinza Volante (g)	Agregado (g)	Água (g)
<b>Cimento (60%) + Fly ash (40%) – Basalto</b>	3,14	2,36	264	132,28	990	206,8
<b>Cimento (70%) + Fly ash (30%) – Cacalho</b>	3,14	2,36	308	99,21	990	206,8

### 3.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tanto as adições minerais como as adições químicas podem afetar algumas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, podendo comprometer a durabilidade das estruturas de concreto. Com isto, neste trabalho foi realizado o ensaio de resistência à compressão em argamassa, aos 3, 7 e 28 dias, para verificar a influência do LiNO<sub>3</sub> nesta propriedade, de acordo com a norma NBR 7215.

A preparação da argamassa e moldagem dos corpos-de-prova (CPs) para a determinação da resistência à compressão foi realizada segundo a NBR 7215, onde foram confeccionados vinte e quatro corpos-de-prova de argamassa, sendo doze corpos-de-prova de referência e doze com adição de LiNO<sub>3</sub>, utilizando o seixo Nossa Sra. Aparecida. As dimensões dos corpos-de-prova são de 5cm x 10cm, com relação cimento:agregado de 1:3,0 e relação água:cimento de 0,48 (em massa).

Os corpos-de-prova permaneceram moldados em ambiente apropriado e, depois da retirada do molde, ficaram totalmente imersos em um tanque de água saturada de cal até a data de ruptura.

Os corpos-de-prova moldados foram rompidos em 3, 7 e 28 dias, sendo quatro corpos-de-prova para cada dia e os resultados foram obtidos pela média destes quatro para cada dia, segundo a NBR 7215.

A Tabela 11 mostra a quantidade dos materiais componentes dos corpos-de-prova de controle e com adição moldados para ruptura em 3, 7 e 28 dias.

Tabela 11 – Quantidade dos materiais componentes dos corpos-de-prova moldados

CPs	Nº de CPs	Cimento (g)	Agregado Graduado (g)	LiNO <sub>3</sub> (g)	Água (g)
Referência	12	1306,67	3920	-	627,2
Com Adição	12	1306,67	3920	64,29*	627,2

\*Relação molar (Li/Na<sub>eq</sub>) = 3.0

### 3.6. CONDIÇÕES DE TRABALHABILIDADE

As propriedades do concreto no estado fresco são de muito interesse para a aplicação, sabe-se que elas estão relacionadas e têm grande implicação nas propriedades do concreto endurecido. Algumas propriedades do concreto endurecido dependem fundamentalmente de suas características enquanto no estado fresco. Com isto, neste trabalho foi realizado o ensaio de determinação do índice de consistência da argamassa, para verificar a influência do LiNO<sub>3</sub> nas condições de trabalhabilidade, de acordo com a norma NBR 7215.

Para a realização do ensaio foram utilizadas as mesmas argamassas, com/sem adição de LiNO<sub>3</sub>, preparadas para o ensaio de resistência à compressão .

Após o preparo da argamassa, o molde preenchido e a mesa limpa para a realização do ensaio, o molde foi levantado verticalmente e em seguida fez com que a mesa caísse 30 vezes em aproximadamente 30 segundos.

Terminadas as quedas, mediu-se 2 diâmetros ortogonais da argamassa expandida, sendo que a média destes 2 diâmetros é o índice de consistência da argamassa.

## **4. RESULTADO E DISCUSSÃO**

### **4.1. ENSAIO DE EXPANSÃO PELO MÉTODO ACELERADO**

#### **4.1.1. Expansão das Barras de Argamassa de Controle Preparadas sem a Adição de $\text{LiNO}_3$**

A Figura 12 apresenta o comportamento expansivo das barras de argamassa de referência, sem a adição do  $\text{LiNO}_3$ , preparadas com o Basalto da Pedreira Três Irmãos e o Seixo do P. Nossa Sra. Aparecida, ao longo do tempo, até a idade de ensaio de 30 dias, a partir da metodologia de ensaio apresentada pela ASTM C-1260. Na Tabela 13 encontra-se apresentados os resultados individuais de expansão das barras de argamassa para cada tipo de agregado, obtidos para as idades de 16 e 30 dias, de acordo com a ASTM C-1260. Os resultados individuais ao longo do tempo encontram-se apresentados no Apêndice B.

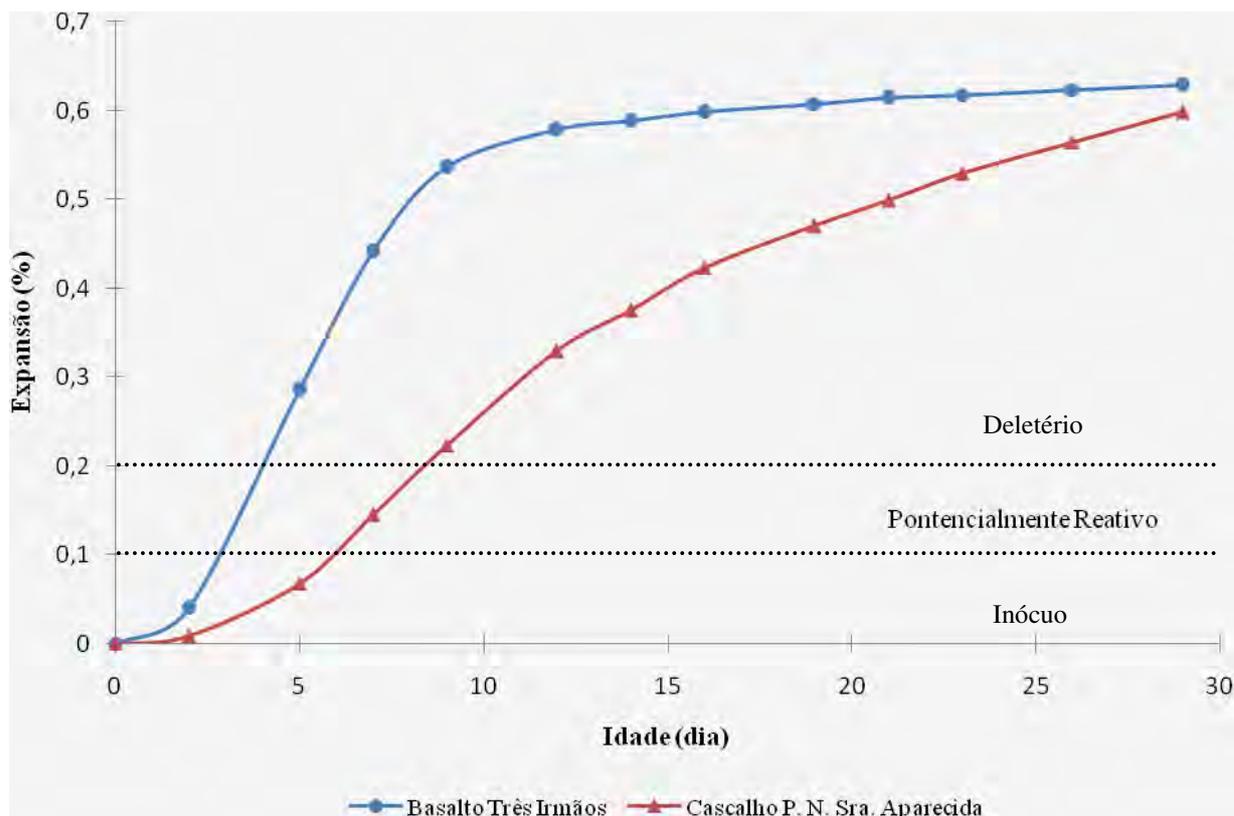


Figura 13 – Comportamento expansivo das barras de argamassa de referência dos dois agregados utilizados

Tabela 12 – Expansões (%) obtidas para o Basalto Três Irmãos e para o Seixo Nossa Sra. Aparecida, método acelerado

Agregado	Idade (dia)	
	16	30
<b>Basalto</b>	0,598	0,632
<b>Seixo</b>	0,423	0,609

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que as expansões na presença do basalto suplantam o limite de 0,20% apresentado pela ASTM C-1260 já na idade de 5 dias. Aos 30 dias de ensaio, as expansões apresentaram-se bastante elevadas, em média igual a 0,632%. Desta forma, define-se para o Basalto Três Irmãos um comportamento deletério, mostrando sua reatividade na presença do cimento utilizado. Já para o seixo, nos resultados obtidos observa-se que as expansões na sua presença suplantam o limite de 0,20% apresentado pela ASTM C-1260 já na idade de 9 dias. Aos

30 dias de ensaio, as expansões apresentaram-se bastante elevadas, em média igual a 0,609%. Desta forma, define-se para o Seixo Nossa Sra. Aparecida um comportamento deletério, mostrando sua reatividade na presença do cimento utilizado.

Como os resultados do comportamento expansivo das barras de argamassa de referência de cada tipo de agregado utilizado mostraram um comportamento deletério, pode-se ser feito as comparações necessárias entre estas barras de referência e as barras com adição de  $\text{LiNO}_3$ , a fim de estudar a eficiência do  $\text{LiNO}_3$  na redução das expansões causadas pela RAS, a partir da metodologia de ensaio apresentada pela ASTM C-1260, comparando também com os efeitos de redução de expansão com adição de cinza volante.

#### **4.1.2. Expansão das Barras de Argamassa com Adição de $\text{LiNO}_3$ para o Basalto da Pedreira Três Irmãos**

A Figura 14 apresenta o comportamento expansivo das barras de argamassa, moldadas com a adição do  $\text{LiNO}_3$ , utilizando o Basalto Três Irmãos, ao longo do tempo, até a idade de ensaio de 30 dias, a partir da metodologia de ensaio apresentada pela ASTM C-1260. As Figuras 15 e 16 mostram as variações na expansão das barras moldadas com as diferentes dosagem de  $\text{LiNO}_3$  para as idades de 16 e 30 dias respectivamente. Na Tabela 13 encontram-se apresentados os resultados de expansão das barras de argamassa moldadas com a adição de  $\text{LiNO}_3$  para cada relação  $\text{Li}/\text{Na}_{\text{eq}}$  utilizada na pesquisa, obtidos para as idades de 16 e 30 dias. Os resultados individuais ao longo do tempo encontram-se apresentados no Apêndice B.

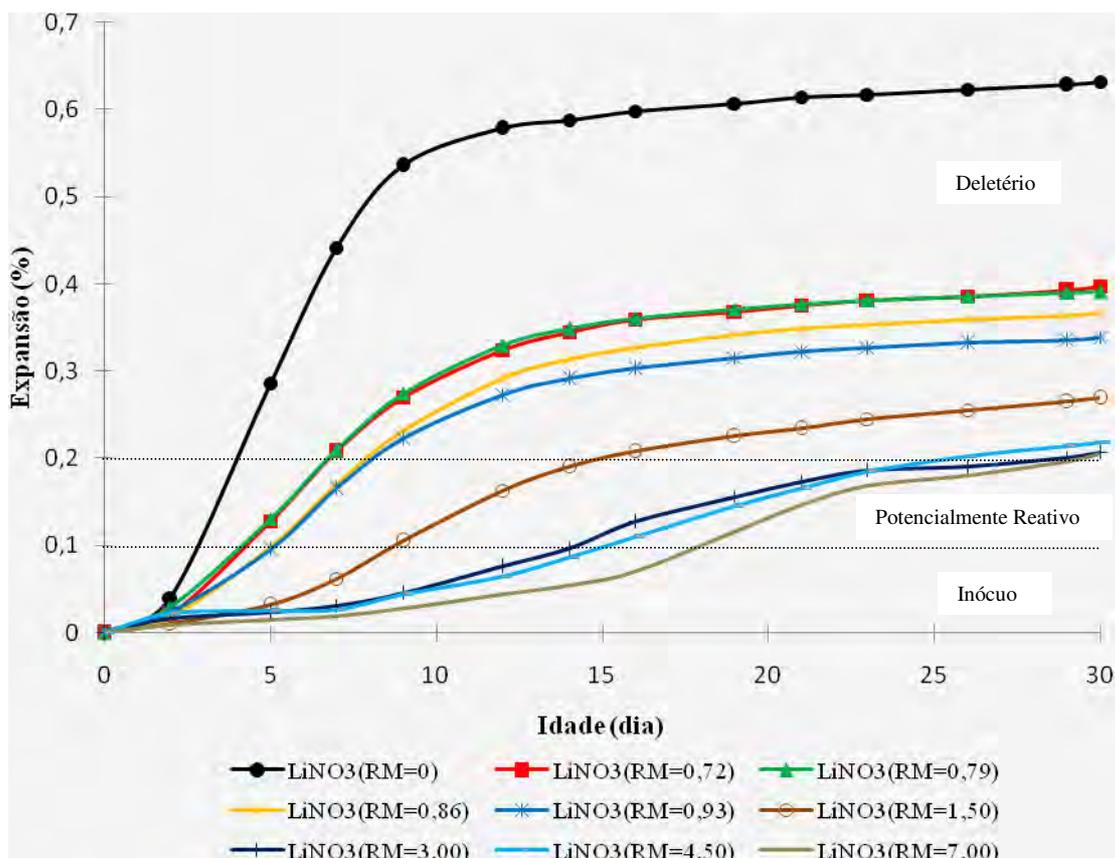


Figura 54 – Expansão das barras de argamassa com/sem adição de  $\text{LiNO}_3$  para o Basalto

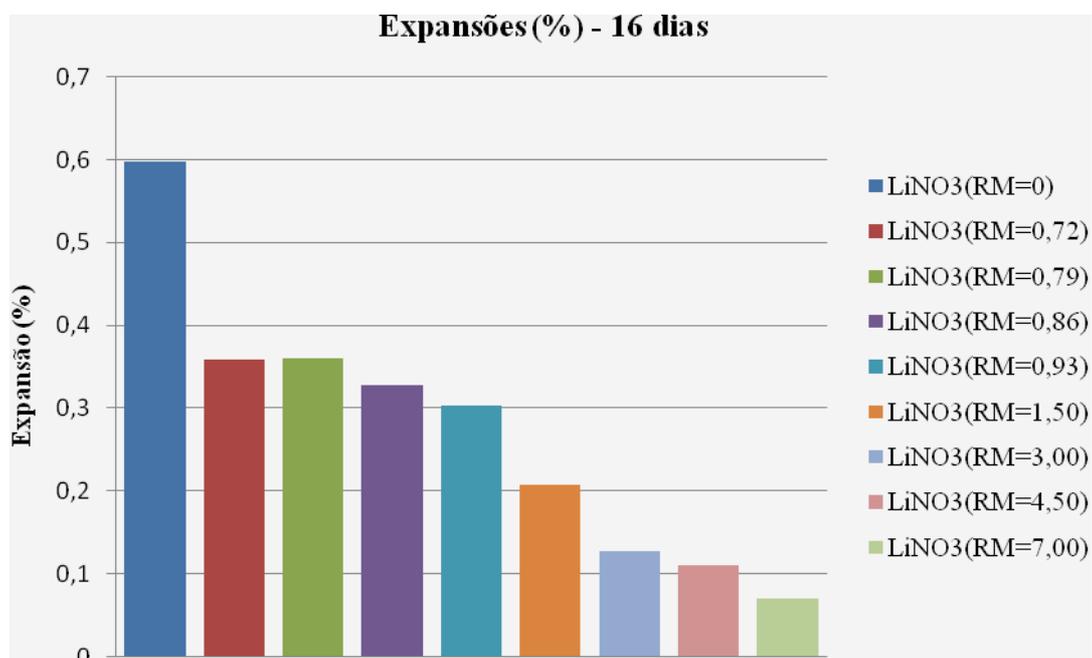


Figura 15 – Variações na expansão das barras de argamassas para diferentes dosagens de  $\text{LiNO}_3$  para o Basalto aos 16 dias

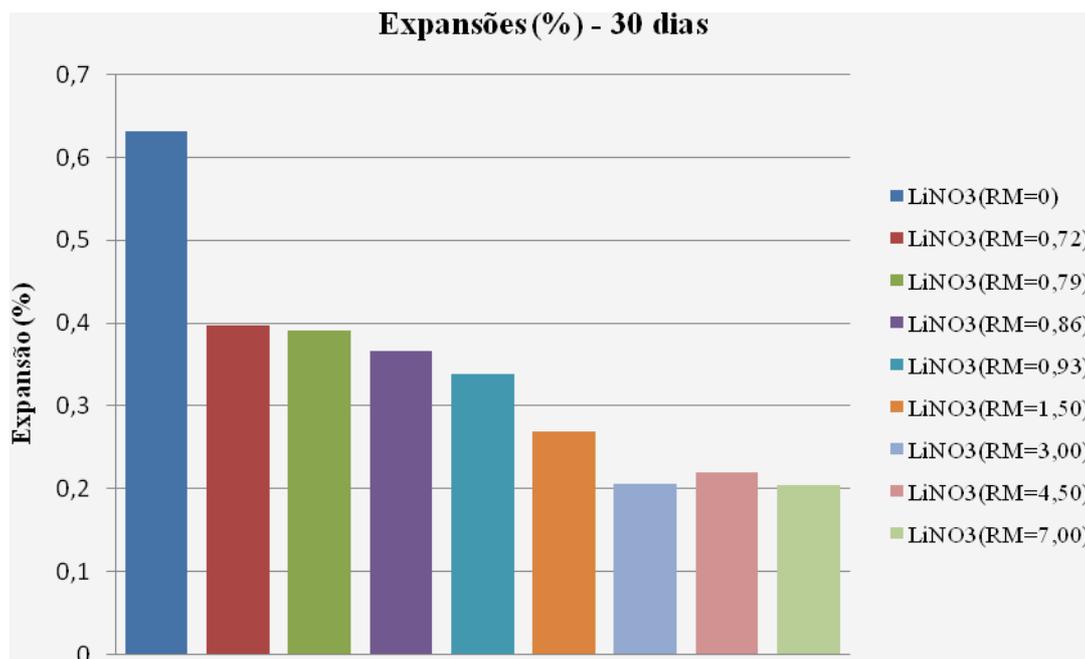


Figura 16 – Variações na expansão das barras de argamassas para diferentes dosagens de LiNO<sub>3</sub> para o Basalto aos 30 dias

Tabela 13 – Expansões (%) aos 16 e 30 dias das barras de argamassa moldadas com/sem LiNO<sub>3</sub> para o Basalto Três Irmãos

RM (Li/Na <sub>eq</sub> )	Idade (dia)	
	16	30
<b>0,00</b>	0,598	0,632
<b>0,72</b>	0,359	0,397
<b>0,79</b>	0,360	0,391
<b>0,86</b>	0,327	0,336
<b>0,93</b>	0,303	0,339
<b>1,50</b>	0,208	0,269
<b>3,00</b>	0,127	0,206
<b>4,50</b>	0,110	0,219
<b>7,00</b>	0,070	0,205

Observa-se que para todas as dosagens testadas, as barras de argamassa apresentaram redução na expansão. As primeiras dosagens com  $\text{Li}/\text{Na}_e$  de 0,72 a 0,93 foram usadas com base na literatura estudada, sendo que na literatura estas relações molares eram suficientes para reduzir a expansão sem ultrapassar o limite ( $>0,10\%$ ) aos 16 dias. Para as barras com basalto estas relações molares reduziram a expansão, mas ultrapassaram o valor limite aos 16 dias alcançando valores elevados de expansão. Segundo Folliard et al. (2003), para que o método de ensaio ASTM C-1260 seja eficiente na dosagem da adição de lítio, a fim de se obter resultados compatíveis com o uso no campo, o cimento usado nas barras de argamassa deve ter  $\text{Na}_2\text{O}_{eq}$  de  $0,9 \pm 1,0\%$ , pois foi demonstrado que os efeitos de alcalinidade da solução (1N de NaOH) excede qualquer efeito de alcalinidade do cimento quando testado com os agregados reativos. Portanto o uso de um cimento com baixo teor de  $\text{Na}_2\text{O}_{eq}$  resultaria num conteúdo baixo de lítio, que seria oprimido pela solução de 1N de NaOH. Ainda segundo Folliard et al. (2003), o uso de uma versão modificada da ASTM C-1260 mostrou ser uma promessa em avaliar a eficácia dos compostos de lítio em reduzir a expansão associada à RAS. Como a ASTM C-1260 requer a imersão das barras de argamassa em uma solução de NaOH 1N, mantida a  $80^\circ\text{C}$ , o gradiente da concentração entre a solução nos poros da argamassa e a solução externa causa a lixiviação dos íons de lítio para fora das barras, que afetarão os resultados da expansão, superestimando a dosagem do composto de lítio eficaz a redução da expansão. Isto pode explicar as diferentes intensidades de redução da expansão das barras de argamassa para as mesmas relações molares desta pesquisa com as da literatura.

Aumentando a relação molar  $\text{Li}/\text{Na}_{eq}$  para 1,50 e 3,00, houve uma maior redução na expansão das barras, sendo que aumentando a relação  $\text{Li}/\text{Na}_{eq}$  de 0,93 a 1,50 as barras apresentaram maior efeito do lítio na redução da expansão, já com o aumento da relação  $\text{Li}/\text{Na}_{eq}$  de 1,50 a 3,00 as barras apresentaram um menor efeito do lítio na redução.

Elevando a relação molar  $\text{Li}/\text{Na}_{eq}$  na mesma proporção de 1,50, de 3,00 para 4,50, as barras de argamassa não apresentaram considerável efeito do lítio sobre a expansão, mantendo quase a mesma redução na expansão da relação molar de 3,00.

Aumentando ainda mais a relação molar de 4,50 para 7,00, houve uma pequena redução na expansão em relação as relações molares de 3,00 e 4,50. Apesar da pequena

redução na expansão esta relação reduziu a expansão ao valor limite aceitável pela norma de 0,10% aos 16 dias, chegando aos 0,070% de expansão.

A diminuição na intensidade de redução da expansão das barras com o aumento da adição de lítio, para as relações molares de 3,00, 4,50 e 7,00, pode ser devido a existência de um limite de adição na qual o lítio não tem mais efeito considerável na redução com o seu aumento, como mostrado por Mo et al. (2003). Pode-se dizer que aumentando ainda mais a relação  $\text{Li}/\text{Na}_{\text{eq}}$  nas barras de argamassa não haverá redução significativa na redução da expansão.

Pode-se observar que para as condições e materiais utilizados na presente pesquisa o lítio foi capaz de reduzir a expansão ao valor limite aceitável pela norma aos 16 dias, utilizando uma relação molar  $\text{Li}/\text{Na}_{\text{eq}}$  de 7,00, mostrando sua eficiência na redução da expansão de argamassas devido a RAS.

#### **4.1.3. Expansão das Barras de Argamassa com Adição de $\text{LiNO}_3$ para o Seixo do P. Nossa Sra Aparecida**

A Figura 17 apresenta o comportamento expansivo das barras de argamassa, moldadas com a adição do  $\text{LiNO}_3$ , utilizando o Seixo Nossa Sra. Aparecida, ao longo do tempo, até a idade de ensaio de 30 dias, a partir da metodologia de ensaio apresentada pela ASTM C-1260. As Figuras 18 e 19 mostram as variações na expansão das barras moldadas com adição de  $\text{LiNO}_3$  para as idades de 16 e 30 dias respectivamente. Na Tabela 14 encontram-se apresentados os resultados de expansão das barras de argamassa moldadas com a adição de  $\text{LiNO}_3$  para cada relação  $\text{Li}/\text{Na}_{\text{eq}}$  utilizada na pesquisa, obtidos para as idades de 16 e 30 dias. Os resultados individuais ao longo do tempo encontram-se apresentados no Apêndice B.

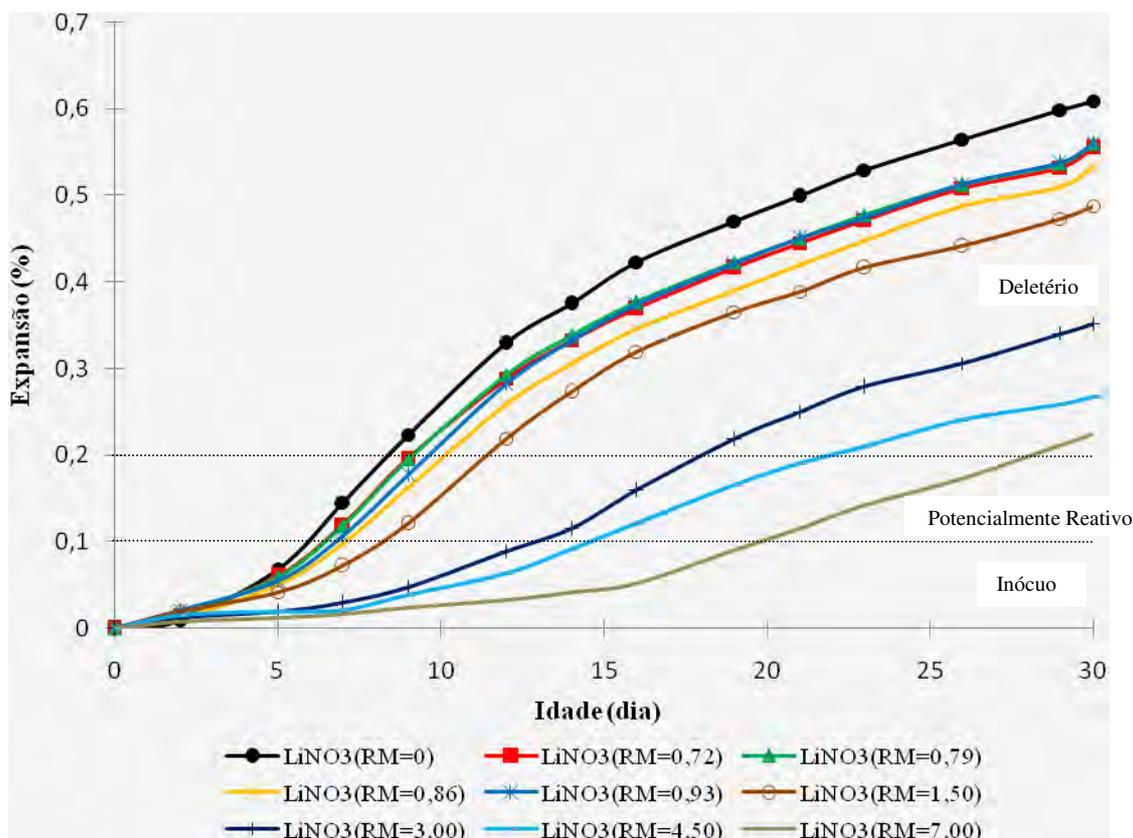


Figura 67 – Expansão das barras de argamassa com/sem adição de  $\text{LiNO}_3$  para o Seixo

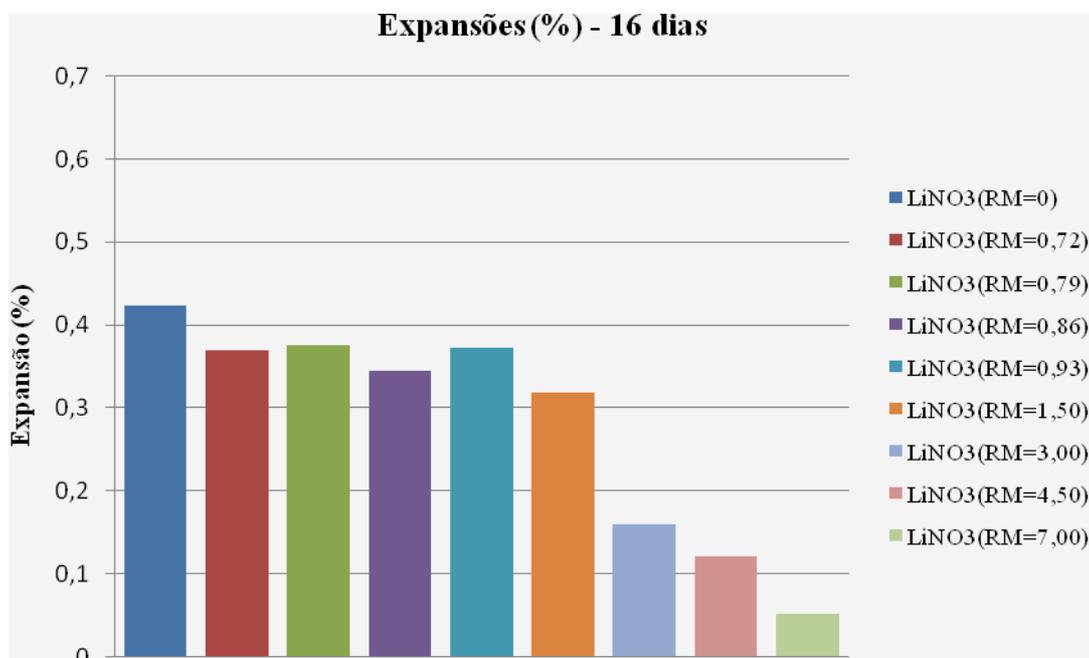


Figura 18 – Variações na expansão das barras de argamassas com/sem adição de  $\text{LiNO}_3$  para o Seixo aos 16 dias

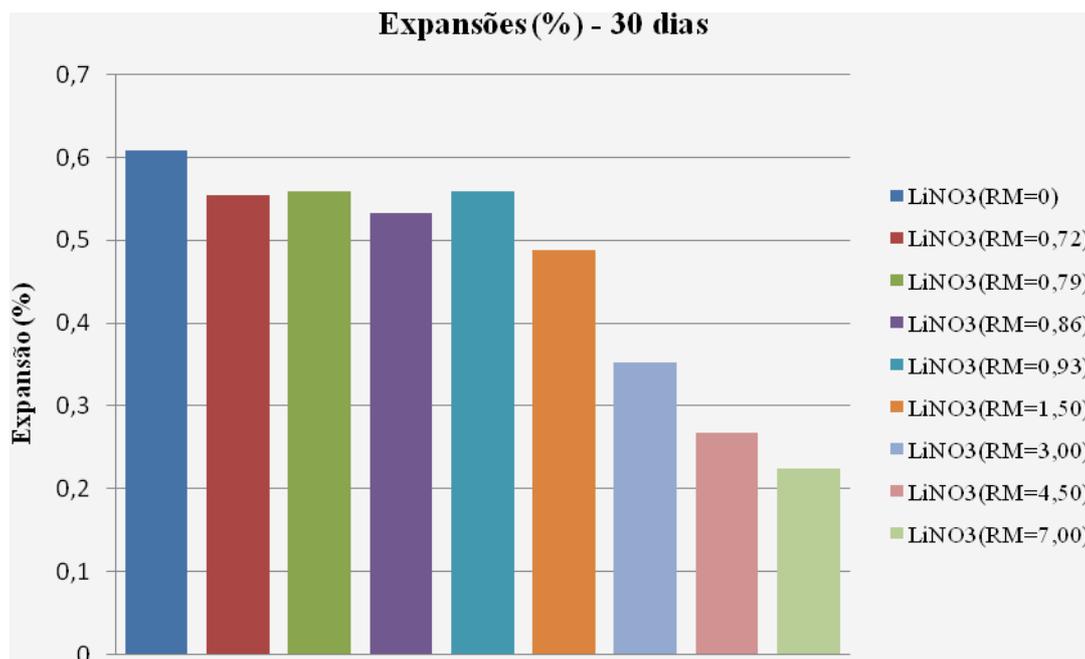


Figura 19 – Variações na expansão das barras de argamassas com/sem adição de  $\text{LiNO}_3$  para o Seixo aos 30 dias

Tabela 14 – Expansões (%) aos 16 e 30 dias das barras de argamassa moldadas com/sem  $\text{LiNO}_3$  para o Seixo Nossa Sra. Aparecida

RM (Li/Na <sub>eq</sub> )	Idade (dia)	
	16	30
<b>0,00</b>	0,423	0,609
<b>0,72</b>	0,369	0,555
<b>0,79</b>	0,376	0,559
<b>0,86</b>	0,345	0,533
<b>0,93</b>	0,373	0,559
<b>1,50</b>	0,319	0,488
<b>3,00</b>	0,159	0,352
<b>4,50</b>	0,121	0,268
<b>7,00</b>	0,052	0,225

Para as barras de argamassa com seixo observou-se que para todas as dosagens testadas, as barras de argamassa apresentaram redução na expansão, como foi observado também para as barras com basalto no item anterior. As barras de argamassa com seixo apresentaram o mesmo comportamento na redução da expansão, com o aumento das relações molares, das barras moldadas com basalto, mas apresentaram intensidades diferentes de redução para as mesmas relações molares. No basalto a redução da expansão diminuiu consideravelmente com o aumento da relação molar de 3,00 para 4,50 e 7,00, sendo que para o seixo esta redução ainda continuou com este aumento na dosagem de lítio, não cessando a redução da expansão com o aumento da relação até 7,00. Isto demonstra que cada tipo de agregado necessita de uma quantidade diferente de adição para reduzir a expansão a valores aceitáveis pela norma e possui também um limite diferente de adição a qual a redução na expansão não tem mais efeito. Segundo Hasparyk (2005), a reatividade do agregado é que governa a eficiência da adição na redução da expansão devido a RAS, sendo assim variável os efeitos das adições na intensidade de redução da expansão.

Apesar da variação da concentração ótima das adições devido reatividade do agregado, o seixo apresentou a mesma dosagem de lítio utilizada no basalto, relação molar igual a 7,00, para reduzir a expansão ao limite aceitável pela norma aos 16 dias, mostrando sua eficiência na redução da expansão de argamassas devido a RAS.

#### **4.1.4. Comparação dos Efeitos do $\text{LiNO}_3$ com o Cinza Volante na reação álcali-sílica**

A Figura 20 e 21 apresenta o comportamento expansivo das barras de argamassa, moldadas com a adição de  $\text{LiNO}_3$  e cinza volante, utilizando o Basalto Três Irmãos e o Seixo Nossa Sra. Aparecida respectivamente, ao longo do tempo, até a idade de ensaio de 30 dias, a partir da metodologia de ensaio apresentada pela ASTM C-1260. Na Tabela 15 e 16 encontram-se apresentados os resultados de expansão das barras de argamassa moldadas com a adição de  $\text{LiNO}_3$  ( $\text{Li}/\text{Na}_{\text{eq}} = 0; 0,72; 1,50; 4,50$  e  $7,00$ ) e cinza volante, obtidos para as idades de 16 e 30 dias para o basalto e o Seixo respectivamente. Os resultados individuais ao longo do tempo encontram-se apresentados no Apêndice B.

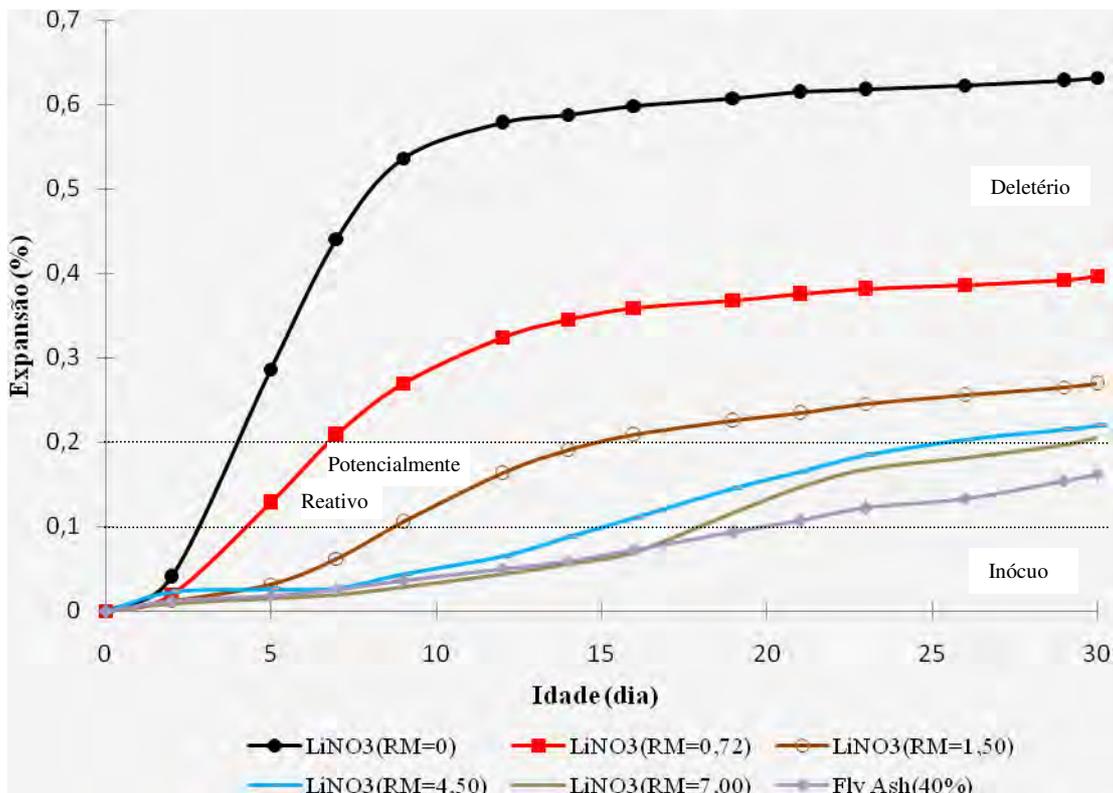


Figura 20 – Expansão das barras de argamassa com/sem adição de  $\text{LiNO}_3$  e Cinza Volante para o Basalto

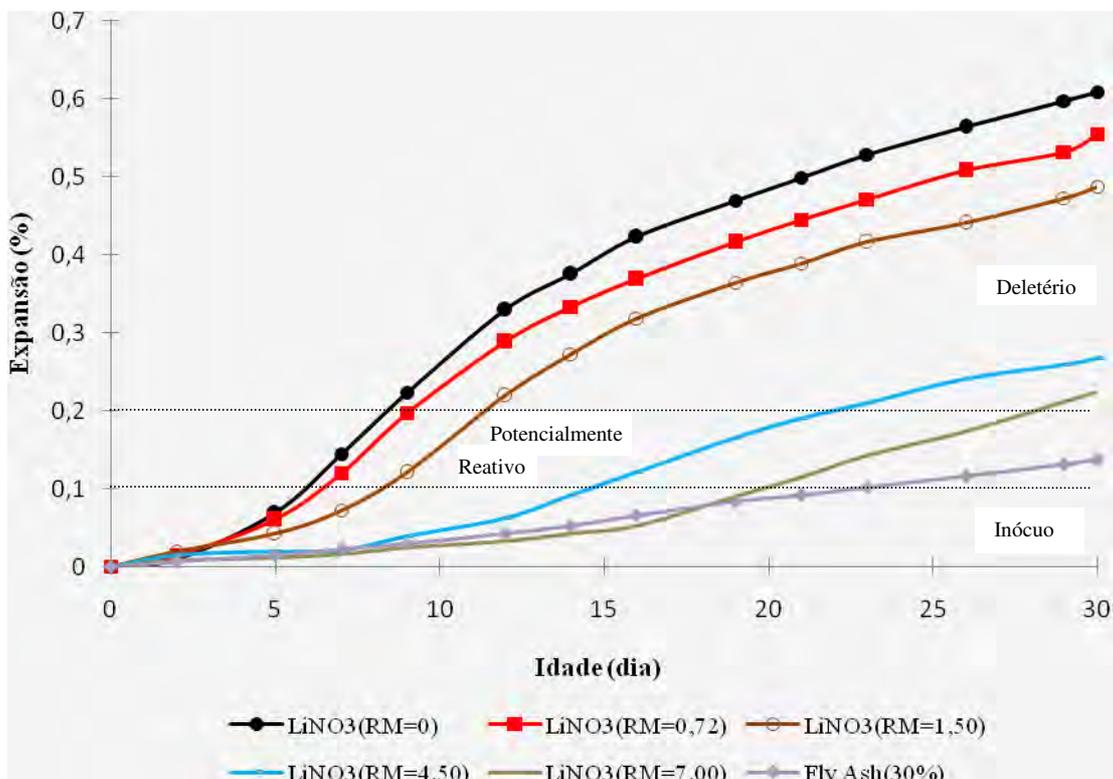


Figura 21 – Expansão das barras de argamassa com/sem adição de  $\text{LiNO}_3$  e Cinza Volante para o Seixo Nossa Sra. Aparecida

Tabela 15 – Expansões (%) aos 16 e 30 dias das barras de argamassa moldadas com/sem  $\text{LiNO}_3$  e Cinza Volante para o Basalto

Adição	Quantidade	Idade (dia)	
		16	30
$\text{LiNO}_3$	RM=0	0,598	0,632
	RM=0,72	0,359	0,397
	RM=1,50	0,208	0,269
	RM=4,50	0,110	0,219
	RM=7,00	0,070	0,205
Cinza Volante	60% cim. + 40% Cinza Volante	0,072	0,162

Tabela 16 – Expansões (%) aos 16 e 30 dias das barras de argamassa moldadas com/sem  $\text{LiNO}_3$  e Cinza Volante para o Seixo

Adição	Quantidade	Idade (dia)	
		16	30
$\text{LiNO}_3$	RM=0,00	0,423	0,609
	RM=0,72	0,369	0,555
	RM=1,50	0,319	0,488
	RM=4,50	0,121	0,268
	RM=7,00	0,052	0,225
Cinza Volante	70% cim. + 30% Cinza Volante	0,066	0,137

As barras de argamassa foram preparadas com cinza volante para comparar os efeitos de uma adição química com uma mineral na expansão devido a RAS. Observou-se um comportamento diferente entre as curvas de expansão das barras com adição de  $\text{LiNO}_3$  e cinza volante. As curvas de expansão das barras com  $\text{LiNO}_3$  tende a acompanhar o desenvolvimento da curva das barras de controle sem o  $\text{LiNO}_3$  para os dois tipos de agregado, já as curvas de expansão do cinza volante apresentam um comportamento de expansão mais retilínea para os dois tipos de agregado. No entanto, pode-se observar, principalmente nas curvas de expansão das barras com basalto, que o  $\text{LiNO}_3$  tende a estabilizar a reação ao longo do ensaio, enquanto que as barras com cinza

volante continuam a expandir ao longo do ensaio. Ramyar et al. (2004) comparou os efeitos de expansão de barras de argamassa moldadas com adição de lítio e cinza volante através da ASTM C-1260 levando o ensaio até 56 dias, no qual demonstrou que as barras contendo lítio cessaram as expansões ao longo dos 28 dias de ensaio, enquanto que nas misturas contendo cinza volante as reações continuaram, aumentando as expansões ao longo dos 56 dias de ensaio.

A diferença da quantidade de adição de cinza volante para reduzir a expansão ao valor limite aceitável aos 16 dias para os dois agregados se deve a diferença de reatividade dos agregados como já explicado no final do item 4.1.3.

## 4.2. CONDIÇÕES DE TRABALHABILIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Tabela 17 mostra os resultados das condições de trabalhabilidade de argamassas moldadas com/sem adição de  $\text{LiNO}_3$ . Na Tabela 19 encontram-se apresentados os resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova de argamassa moldadas com/sem a adição de  $\text{LiNO}_3$ , obtidos para as idades de 3, 7 e 28 dias. A Figura 22 apresenta graficamente os resultados médios de resistência à compressão ao longo do tempo.

Tabela 17 – Condições de Trabalhabilidade de argamassas moldadas com/sem adição de  $\text{LiNO}_3$

<b>Argamassas</b>	<b>Diâmetros Ortogonais (mm)</b>		<b>Média dos Diâmetros Ortogonais (mm)</b>
Referência	194	209	201,5
Com $\text{LiNO}_3$	207	220	213,5

Tabela 18 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova (CPs) de argamassa moldados com/sem adição de  $\text{LiNO}_3$

Idade (dia)	CPs	Resistência à Compressão (MPa)				
		CP1	CP2	CP3	CP4	Média
3	Referência	40,0	40,1	38,9	39,0	39,5
	$\text{LiNO}_3$	37,6	38,0	34,3	36,0	36,4
7	Referência	40,7	41,2	37,7	37,9	39,4
	$\text{LiNO}_3$	36,5	38,3	37,7	38,1	37,6
28	Referência	41,5	41,3	43,9	44,7	42,8
	$\text{LiNO}_3$	43,7	45,7	44,5	42,7	44,1

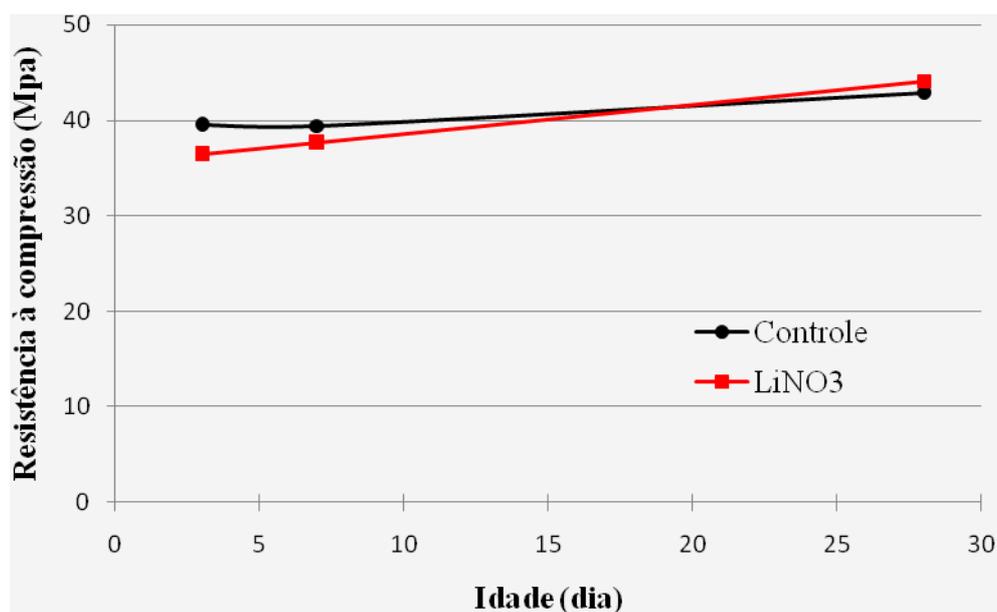


Figura 22 – Resistência à compressão média dos corpos-de-prova ao longo do tempo

A partir da Tabela 17 pode-se verificar que o lítio não afetou as condições de trabalhabilidade, tendo uma diferença de aproximadamente 6,0% entre a condição de trabalhabilidade da argamassa de referência com a da adição de lítio. Segundo Folliard et al. (2003) se o composto de lítio estiver na forma de uma solução aquosa (solução com 30% de  $\text{LiNO}_3$ ), a quantidade de água contida na solução deverá ser removida da água de amassamento para manter a mesma relação a/c requerida pela norma. Como o  $\text{LiNO}_3$  empregado nesta pesquisa não estava em solução aquosa, pode-se fazer o seu emprego na argamassa sem substituição da água de amassamento, não afetando assim suas condições de trabalhabilidade.

A partir da Figura 22, verifica-se que o  $\text{LiNO}_3$  não exerce efeito nas resistências à compressão determinadas nas idades de 3, 7 e 28 dias. Observa-se que houve um retardamento no ganho de resistência nas primeiras idades de 3 e 7 dias, ganhando resistência e ultrapassando a resistência de controle aos 28 dias, mas com diferenças de valores não significativos, podendo considerar que o lítio não afeta a resistência à compressão e nem seu desenvolvimento ao longo do tempo até a idade de 28 dias.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste item estão apresentados as principais conclusões obtidas a partir dos resultados do programa experimental, sendo válidas para as condições e materiais estudados, e algumas sugestões para futuros trabalhos.

### **5.1. CONCLUSÕES**

Para verificar os efeitos de uma adição química a base de  $\text{LiNO}_3$  na reação álcali-sílica em argamassa, foram realizados ensaios de expansão em barras de argamassas utilizando diversas dosagens de lítio. Também foram moldadas barras de argamassa com uma adição mineral a base de cinza volante a fim de comparar os efeitos de redução na expansão de argamassas sujeitas a RAS entre uma adição mineral e

química. Foram verificados também os efeitos do  $\text{LiNO}_3$  em algumas propriedades mecânicas de argamassa, como resistência à compressão e condição de trabalhabilidade.

Com relação aos efeitos do lítio na redução da expansão de argamassas sujeitas a RAS, o lítio mostrou-se eficiente na redução da expansão, reduzindo a expansão ao limite aceitável pela norma de 0,10% aos 16 dias para os dois tipos de agregados reativos utilizados. Sendo necessário uma relação molar  $\text{Li}/\text{Na}_{\text{eq}}$  de 7,00 para reduzir a expansão ao limite aceitável pela norma para os dois agregados utilizados, sendo este valor válido para as condições e materiais estudados nesta pesquisa. Os agregados apresentaram comportamentos semelhantes nas curvas de expansão com o aumento das dosagens de lítio, mas com intensidades diferentes, mostrando que a reatividade do agregado governa o efeito da adição na redução da expansão devido a RAS, sendo variável a intensidade de redução da expansão para cada agregado. Além disto, as barras de argamassa moldadas com basalto apresentaram um limite de adição, na qual a adição do lítio não teve mais efeito significativo na redução da expansão com o seu aumento, como mostrado em uma pesquisa realizada por Mo et al. (2003).

Na comparação dos efeitos de uma adição mineral e uma química na redução da expansão devido a RAS, as curvas de expansão das argamassas moldadas com  $\text{LiNO}_3$  tendiam a estabilizar a reação ao longo do ensaio, principalmente nas barras moldadas com basalto, enquanto que as barras com cinza volante continuaram a expandir ao longo do ensaio, como mostrado por Ramyar et al. (2004).

Na avaliação das propriedades das argamassas moldadas com  $\text{LiNO}_3$ , a adição de lítio não apresentou efeitos nas condições de trabalhabilidade e na resistência à compressão dos corpos-de-prova. Isto demonstra uma vantagem do lítio em relação as adições minerais que afetam algumas propriedades do concreto com o seu emprego na substituição de parte do cimento.

O uso do  $\text{LiNO}_3$  na redução da expansão devido a RAS mostrou-se ser eficiente além de apresentar algumas vantagens em relação as adições minerais, mas ainda existem muitas dúvidas em relação ao uso desta adição química. Com isto, o item a seguir contém algumas sugestões de trabalhos que podem ser realizados futuramente com o emprego destas adições na redução da expansão associadas a RAS.

## 5.2. SUGESTÕES

A seguir, serão apresentados algumas sugestões para futuros trabalhos relacionados ao tema:

- Realização da mesma pesquisa procurando o melhor método de ensaio para quantificar a adição de lítio a valores compatíveis com o uso em campo, comparando o método de ensaio da ASTM C-1260, o método de ensaio modificado da ASTM C-1260 segundo Folliard et al. (2003) e o método de ensaio da ASTM C-1293.
- Análise dos produtos formados na RAS com a adição de lítio através do microscópio eletrônico de varredura (MEV), para melhor entendimento da ação do lítio na RAS;
- Simulação da RAS em laboratório utilizando a adição de lítio, buscando entender seus mecanismos de controle sobre a RAS;
- Estudar os efeitos do lítio na expansão devido a RAS ao longo prazo; e
- Correlacionar todas as vantagens, desvantagens entre as adições minerais e químicas para auxiliar na escolha da melhor adição para a utilização prática na construção de um empreendimento sujeito a ocorrência da RAS e do uso conjunto destas adições.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-150**: Standard specification for Portland cement. West Conshohocken, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-289**: Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (chemical method). West Conshohocken, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-295**: Standard Guide for petrographic examination of aggregates for concrete. West Conshohocken, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-1260**: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). West Conshohocken, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-1293**: Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction. West Conshohocken, 2001.

ALMEIDA, I. R.; RIBEIRO, E. M.; SHEHATA, L. C. D. Caracterização petrográfica dos agregados graúdos do Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006, p. 1-15.

ANDRADE, W. P. (Ed). Reatividade potencial álcali-agregado. In: \_\_\_\_\_. **Concretos**: massa, estrutural, projetado e compactado com solo. São Paulo: Pini, 1997. Cap. 17, p.1 - 47.

ANDRADE, T. Histórico de casos da RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na região metropolitana de Recife. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006, p. 1-13.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5747**: Cimento Portland: determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 9774**: Agregado: verificação da reatividade potencial pelo método químico. Rio de Janeiro, 1987.

BÉRUBÉ, M. A.; SMAOUI, N.; CÔTÉ, T. Expansion tests on concrete cores from ARS-affected structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12, 2004, China. **Proceedings...** China: International Academic Publishers, 2004. p. 821-832.

CARRAZEDO, R. **Modelagem numérica da expansão do concreto devido à reação álcali-agregado**. 2004. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

CAVALCANTE, A. J. T. et al. Reações expansivas em estruturas de concreto. **Concreto**, São Paulo, n. 39, p. 30-32, 2005.

COLLINS, C. L.; IDEKER, J. H.; WILLIS, G. S.; KURTIS, K. E. Examination of the effects of LiOH, LiCl and LiNO<sub>3</sub> on alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 34, n. 13, p. 1403-1415, 2004.

FENG, X.; THOMAS, M. D. A.; BREMNER, T. W.; BALCOM, B. J.; FOLLIARD, K. J. Studies on lithium salts to mitigate ARS-induced expansion in new concrete: a critical review. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 35, n. 8, p. 1789-1796, 2005.

FOLLIARD, K. J.; THOMAS, M. D. A.; FOUNIER, B.; KURTS, K. E.; IDEKER, J. H. **Report No.FHWA-HRT-06-073**: research, development, and technology: interim recommendations for the use of lithium to mitigate or prevent alkali-silica reaction (ASR), Office of Infrastructure Research and Development, FHWA – Federal Highway Administration, 2006, 84p.

FOLLIARD, K. J.; THOMAS, M. D. A.; KURTS, K. E. **Report No.FHWA-RD-03-047**: research, development, and technology: guidelines for the use of lithium to mitigate or prevent alkali-silica reaction (ASR), - Turner-Fairbank Highway Research Center, FHWA – Federal Highway Administration, 2003, 86p.

GROSBOIS, M.; FONTAINE, E. Evaluation of potential alkali reactivity of concrete aggregates: performance of testing methods and a producer's point of view. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11, 2000, Québec City, Canadá. **Proceedings...** Québec City: Edited by M. A. Bérubé, B. Fournier & B. Durand, 2000, p. 267-276.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N. P.; MONTEIRO, P. J. M.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação das propriedades mecânicas e análise da microestrutura de concretos afetados pela RAA da UHE Furnas. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006, p. 1-15.

HASPARYK, N. P.; MONTEIRO, P. J. M.; DAL MOLIN, D. C. C. Determinação das expansões residuais em testemunhos de concreto e efeito do lítio na redução das expansões da RAA. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2006, 2, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006, p. 1-15.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G. (Org.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005, v. 1, p. 1-31.

McCOY, W. J.; CALDWELL, A. G. New approach to inhibiting alkali-aggregate expansion. **Journal of the American Concrete Institute**, Detroit, v. 22, n. 9, p. 693-706, 1951.

MO, X. Laboratory study of LiOH in inhibiting alkali-silica reaction at 20°C: a contribution. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 35, n. 6, p. 499-504, 2005.

MONTEIRO, P. J. M.; KURTIS, K. E. Chemical additives to control expansion of alkali-silica reaction gel: proposed mechanisms of control. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 38, n. 10, p. 2027-2036, 2003.

LOPES, L. E. **Modelagem mecânica e numérica da reação álcali-agregado com aplicação a barragens de concreto**. 2004. 157 f Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

PECCHIO, M.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F.; ANDRADE, T. Produtos da reação álcali-silicatos em concretos de edificações da região do Grande Recife – PE. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006, p. 1-10.

RAMACHANDRAN, V. S. Alkali-aggregate expansion inhibiting admixtures. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 20, n. 13, p. 149-161, 1998.

RAMYAR K.; ÇOPUROĞLU O.; ANDIÇ Ö.; FRAAIJ A. L. A., Comparison of alkali-silica reaction products of fly-ash or lithium-salt-bearing mortar under long-term accelerated curing. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 34, n.5, p. 1179 – 1183, 2004.

SILVEIRA, J. F. A. A deterioração de barragens e usinas hidroelétricas provocadas pela reatividade álcali-agregado. **Revista do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens**, São Paulo, n.2, p.59-74, 1996.

SOBBAG, A. F. **Verificação da existência de reação álcali-agregado no concreto na UHE de Mascarenhas**. 2003. 119 f. Tese (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

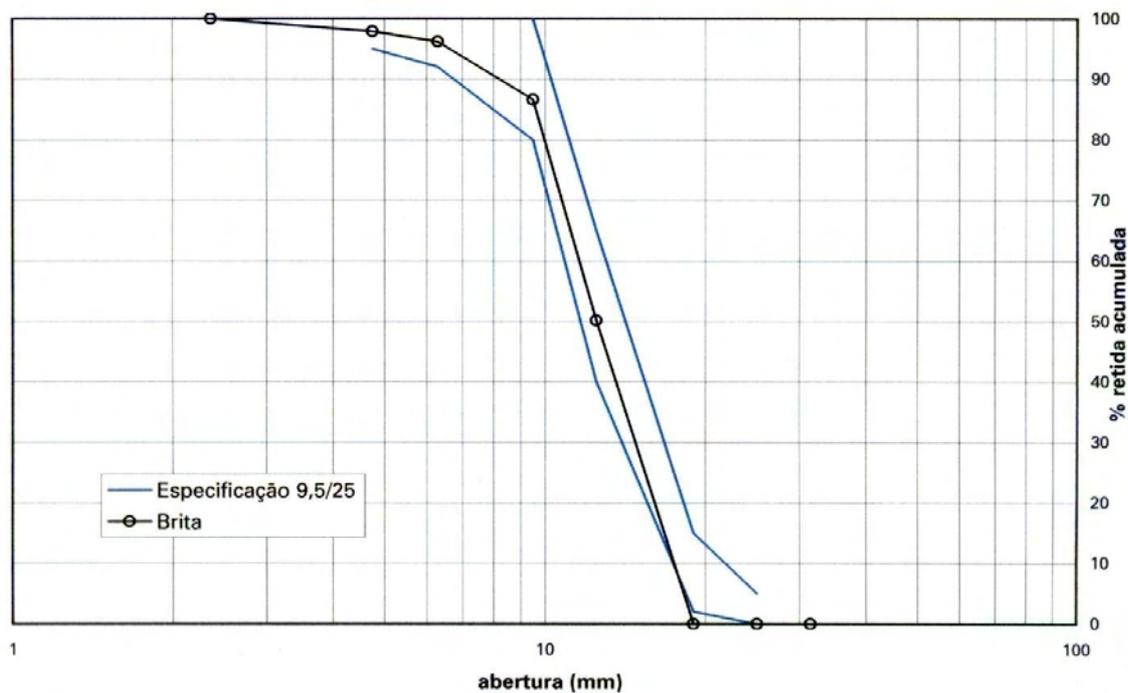
STANTON, T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, New York, v. 66, p. 1781-1811, 1940.

STARK, D.C.; MORGAN, B.; OKAMOTO, P.; DIAMOND, S. Eliminating or minimizing alkali-silica reactivity, SHRP-C-343. **National Research Council**, Washington, DC, 1993.

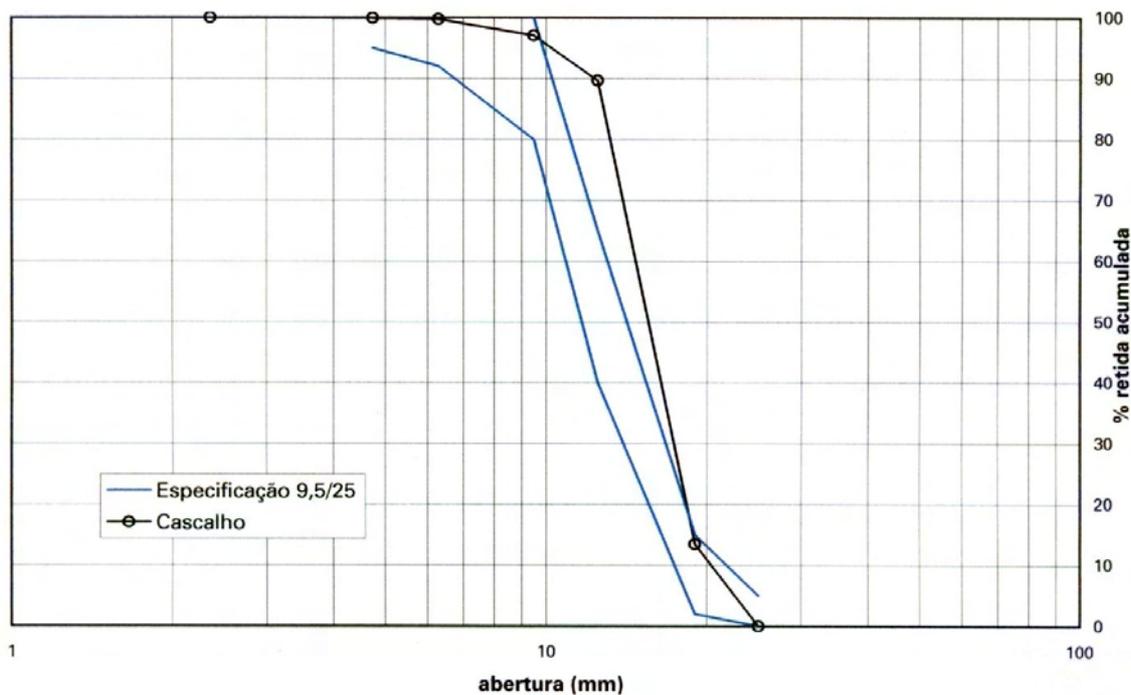
VIVIAN, H. E. Studies in cement-aggregate reaction. XIX: the effect on mortar expansion of the particle size of the reactive component in the aggregate. **Australian Journal of the Applied Science**, Melbourne, v. 2, p. 488-494, 1951.

**APÊNDICE A – DADOS DA GRANULOMETRIA DOS  
AGREGADOS**

Granulometria do basalto (19 mm) procedente da Pedreira Três Irmãos de Andradina – SP que foi empregado



Granulometria do seixo (25 mm) procedente do Porto N. Sra. de Aparecida de Três Lagoas – MS que foi empregado



**APÊNDICE B – DADOS DE EXPANSÃO PELO MÉTODO DA  
ASTM C-1260 DO BASALTO DA PEDREIRA TRÊS IRMÃOS**

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do basalto para as 3 barras de argamassa de controle, até 30 dias.

IDADE	BASALTO			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,040	0,044	0,036	0,040
5	0,274	0,285	0,299	0,286
7	0,403	0,445	0,476	0,441
9	0,526	0,522	0,559	0,536
12	0,575	0,559	0,600	0,578
14	0,587	0,567	0,611	0,588
<b>16</b>	<b>0,596</b>	<b>0,577</b>	<b>0,621</b>	<b>0,598</b>
19	0,605	0,586	0,631	0,607
21	0,611	0,592	0,638	0,614
23	0,615	0,595	0,641	0,617
29	0,627	0,606	0,652	0,628
<b>30</b>	<b>0,630</b>	<b>0,609</b>	<b>0,656</b>	<b>0,632</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do basalto para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 0.72, até 30 dias.

IDADE (dia)	Li/Na <sub>e</sub> = 0,72			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,020	0,020	0,021	0,020
5	0,121	0,126	0,137	0,128
7	0,198	0,206	0,219	0,208
9	0,261	0,265	0,285	0,270
12	0,317	0,316	0,339	0,324
14	0,340	0,336	0,360	0,345
<b>16</b>	<b>0,354</b>	<b>0,349</b>	<b>0,372</b>	<b>0,359</b>
19	0,364	0,358	0,381	0,368
21	0,372	0,365	0,389	0,375
23	0,377	0,372	0,394	0,381
26	0,382	0,373	0,403	0,386
28	0,386	0,380	0,408	0,392
<b>30</b>	<b>0,389</b>	<b>0,398</b>	<b>0,404</b>	<b>0,397</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do basalto para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 0.79, até 30 dias.

IDADE	Li/Na <sub>e</sub> = 0,79			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,030	0,030	0,030	0,030
5	0,128	0,134	0,132	0,131
7	0,206	0,213	0,209	0,209
9	0,270	0,277	0,276	0,274
12	0,325	0,331	0,331	0,329
14	0,344	0,349	0,350	0,348
<b>16</b>	<b>0,356</b>	<b>0,360</b>	<b>0,363</b>	<b>0,360</b>
19	0,367	0,371	0,375	0,371
21	0,373	0,377	0,381	0,377
23	0,377	0,380	0,385	0,381
26	0,382	0,385	0,390	0,386
28	0,386	0,389	0,395	0,390
<b>30</b>	<b>0,388</b>	<b>0,391</b>	<b>0,396</b>	<b>0,391</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do basalto para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 0.86, até 30 dias.

IDADE (dia)	Li/Na <sub>e</sub> = 0,86			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,019	0,018	0,017	0,018
5	0,098	0,100	0,097	0,098
7	0,173	0,167	0,168	0,170
9	0,237	0,229	0,229	0,232
12	0,296	0,290	0,286	0,291
14	0,320	0,312	0,308	0,313
<b>16</b>	<b>0,333</b>	<b>0,326</b>	<b>0,322</b>	<b>0,327</b>
19	0,347	0,341	0,336	0,342
21	0,354	0,349	0,344	0,349
23	0,359	0,353	0,349	0,353
26	0,365	0,359	0,354	0,359
28	0,368	0,365	0,358	0,364
<b>30</b>	<b>0,371</b>	<b>0,368</b>	<b>0,361</b>	<b>0,366</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do basalto para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 0,93, até 30 dias.

IDADE	Li/Na <sub>e</sub> = 0,93			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,021	0,025	0,023	0,023
5	0,094	0,098	0,094	0,095
7	0,163	0,170	0,163	0,165
9	0,220	0,231	0,218	0,223
12	0,269	0,281	0,267	0,273
14	0,286	0,301	0,286	0,291
<b>16</b>	<b>0,297</b>	<b>0,313</b>	<b>0,298</b>	<b>0,303</b>
19	0,310	0,326	0,310	0,315
21	0,317	0,335	0,316	0,323
23	0,321	0,338	0,322	0,327
26	0,327	0,342	0,326	0,332
28	0,330	0,347	0,330	0,335
<b>30</b>	<b>0,333</b>	<b>0,350</b>	<b>0,334</b>	<b>0,339</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do basalto para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 1.50, até 30 dias.

<b>IDADE</b>	<b>Li/Na<sub>e</sub> = 1,50</b>			
<b>(dia)</b>	<b>BAR. 1</b>	<b>BAR. 2</b>	<b>BAR. 3</b>	<b>BAR. m</b>
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,011	0,011	0,011	0,011
5	0,033	0,032	0,031	0,032
7	0,068	0,061	0,058	0,062
9	0,112	0,103	0,100	0,105
12	0,169	0,162	0,158	0,163
14	0,194	0,190	0,187	0,190
<b>16</b>	<b>0,210</b>	<b>0,207</b>	<b>0,208</b>	<b>0,208</b>
19	0,226	0,224	0,225	0,225
21	0,235	0,233	0,234	0,234
23	0,245	0,245	0,246	0,245
28	0,256	0,257	0,269	0,261
<b>30</b>	<b>0,266</b>	<b>0,268</b>	<b>0,272</b>	<b>0,269</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do basalto para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 3,00, até 30 dias.

IDADE (dia)	Li/Na <sub>e</sub> = 3,00			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,016	0,016	0,016	0,016
5	0,022	0,023	0,024	0,023
7	0,031	0,033	0,030	0,031
9	0,044	0,048	0,044	0,045
14	0,095	0,101	0,096	0,097
<b>16</b>	<b>0,120</b>	<b>0,132</b>	<b>0,129</b>	<b>0,127</b>
19	0,145	0,162	0,160	0,156
21	0,163	0,178	0,177	0,173
23	0,176	0,191	0,191	0,186
26	0,181	0,196	0,196	0,191
28	0,186	0,202	0,204	0,197
<b>30</b>	<b>0,194</b>	<b>0,211</b>	<b>0,213</b>	<b>0,206</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do basalto para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 4.50, até 30 dias.

IDADE (dia)	Li/Na <sub>e</sub> = 4,50			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,022	0,022	0,020	0,022
5	0,026	0,023	0,024	0,025
7	0,028	0,026	0,028	0,027
9	0,044	0,044	0,044	0,044
12	0,063	0,068	0,064	0,065
14	0,088	0,082	0,090	0,087
<b>16</b>	<b>0,110</b>	<b>0,106</b>	<b>0,114</b>	<b>0,110</b>
19	0,143	0,143	0,150	0,145
21	0,161	0,162	0,173	0,165
23	0,180	0,180	0,191	0,184
26	0,200	0,201	0,209	0,203
28	0,207	0,209	0,215	0,210
<b>30</b>	<b>0,216</b>	<b>0,217</b>	<b>0,224</b>	<b>0,219</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do basalto para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 7.00, até 30 dias.

IDADE (dia)	Li/Na <sub>e</sub> = 7.00			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,009	0,009	0,009	0,009
5	0,015	0,015	0,015	0,015
7	0,019	0,019	0,020	0,019
9	0,030	0,028	0,027	0,028
12	0,046	0,043	0,042	0,044
14	0,058	0,054	0,051	0,055
<b>16</b>	<b>0,075</b>	<b>0,069</b>	<b>0,065</b>	<b>0,070</b>
21	0,151	0,146	0,141	0,146
23	0,169	0,170	0,164	0,168
26	0,181	0,185	0,170	0,181
28	0,187	0,194	0,187	0,189
<b>30</b>	<b>0,204</b>	<b>0,209</b>	<b>0,202</b>	<b>0,205</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do basalto para as 3 barras de argamassa com adição de Cinza Volante de 40%, até 30 dias.

IDADE (dia)	Cinza Volante 40%			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,012	0,013	0,010	0,012
5	0,017	0,018	0,018	0,018
7	0,024	0,026	0,024	0,025
9	0,035	0,037	0,035	0,036
14	0,060	0,059	0,059	0,059
<b>16</b>	<b>0,071</b>	<b>0,071</b>	<b>0,073</b>	<b>0,072</b>
19	0,092	0,093	0,093	0,093
21	0,105	0,107	0,108	0,107
23	0,118	0,122	0,124	0,122
26	0,132	0,134	0,135	0,133
28	0,145	0,145	0,148	0,146
<b>30</b>	<b>0,161</b>	<b>0,160</b>	<b>0,164</b>	<b>0,162</b>

**APÊNDICE C – DADOS DE EXPANSÃO PELO MÉTODO DA  
ASTM C-1260 DO SEIXO DO P. NOSSA Sra. DE APARECIDA**

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do procedente da P. Nossa Sra.  
Aparecida para as 3 barras de argamassa de controle, até 30 dias.

IDADE (dia)	SEIXO			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,010	0,010	0,008	0,009
5	0,067	0,071	0,066	0,068
7	0,142	0,149	0,143	0,145
9	0,219	seixo 0,227	0,223	0,223
12	0,324	0,336	0,328	0,329
14	0,369	0,378	0,378	0,375
<b>16</b>	<b>0,431</b>	<b>0,419</b>	<b>0,420</b>	<b>0,423</b>
19	0,463	0,469	0,476	0,470
21	0,493	0,499	0,505	0,499
23	0,524	0,528	0,536	0,529
29	0,594	0,598	0,603	0,598
<b>30</b>	<b>0,603</b>	<b>0,608</b>	<b>0,616</b>	<b>0,609</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do seixo para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 0.72, até 30 dias.

IDADE	Li/Na <sub>e</sub> = 0,72			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,015	0,015	0,015	0,015
5	0,057	0,063	0,059	0,060
7	0,115	0,128	0,117	0,120
9	0,194	0,210	0,188	0,197
12	0,280	0,309	0,275	0,288
14	0,323	0,359	0,317	0,333
<b>16</b>	<b>0,358</b>	<b>0,397</b>	<b>0,351</b>	<b>0,369</b>
19	0,404	0,450	0,394	0,416
21	0,432	0,480	0,422	0,445
23	0,457	0,508	0,447	0,471
26	0,493	0,547	0,483	0,508
28	0,516	0,573	0,506	0,532
<b>30</b>	<b>0,539</b>	<b>0,597</b>	<b>0,528</b>	<b>0,555</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do seixo para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 0.79, até 30 dias.

<b>IDADE</b>	<b>Li/Na<sub>e</sub> = 0,79</b>			
<b>(dia)</b>	<b>BAR. 1</b>	<b>BAR. 2</b>	<b>BAR. 3</b>	<b>BAR. m</b>
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,016	0,016	0,016	0,016
5	0,059	0,059	0,060	0,059
7	0,119	0,116	0,121	0,119
9	0,196	0,188	0,200	0,195
12	0,290	0,285	0,303	0,293
14	0,335	0,329	0,351	0,338
<b>16</b>	<b>0,373</b>	<b>0,366</b>	<b>0,390</b>	<b>0,376</b>
19	0,418	0,412	0,439	0,423
21	0,445	0,439	0,466	0,450
23	0,470	0,466	0,494	0,477
26	0,504	0,500	0,531	0,512
28	0,527	0,525	0,556	0,536
<b>30</b>	<b>0,551</b>	<b>0,547</b>	<b>0,580</b>	<b>0,559</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do seixo para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 0.86, até 30 dias.

IDADE (dia)	Li/Na <sub>e</sub> = 0,86			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,012	0,010	0,012	0,012
5	0,049	0,051	0,052	0,050
7	0,092	0,098	0,100	0,097
9	0,152	0,168	0,169	0,163
12	0,242	0,263	0,268	0,258
14	0,288	0,314	0,318	0,306
<b>16</b>	<b>0,326</b>	<b>0,353</b>	<b>0,357</b>	<b>0,345</b>
19	0,369	0,398	0,403	0,390
21	0,399	0,429	0,434	0,420
23	0,425	0,456	0,460	0,447
26	0,471	0,494	0,496	0,487
28	0,487	0,519	0,521	0,509
<b>30</b>	<b>0,509</b>	<b>0,543</b>	<b>0,546</b>	<b>0,533</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do seixo para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 0,93, até 30 dias.

IDADE (dia)	Li/Na <sub>e</sub> = 0,93			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,019	0,021	0,021	0,021
5	0,052	0,057	0,057	0,055
7	0,102	0,110	0,109	0,107
9	0,170	0,184	0,177	0,177
12	0,271	0,295	0,280	0,282
14	0,320	0,348	0,330	0,333
<b>16</b>	<b>0,359</b>	<b>0,391</b>	<b>0,369</b>	<b>0,373</b>
19	0,404	0,443	0,417	0,421
21	0,431	0,472	0,447	0,450
23	0,453	0,499	0,470	0,474
26	0,490	0,540	0,507	0,513
28	0,514	0,566	0,530	0,537
<b>30</b>	<b>0,536</b>	<b>0,590</b>	<b>0,552</b>	<b>0,559</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do seixo para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 1.50, até 30 dias.

IDADE (dia)	Li/Na <sub>e</sub> = 1,50			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,019	0,021	0,021	0,020
5	0,043	0,046	0,038	0,042
7	0,075	0,075	0,066	0,072
9	0,128	0,122	0,113	0,121
12	0,232	0,217	0,206	0,219
14	0,292	0,269	0,259	0,273
<b>16</b>	<b>0,341</b>	<b>0,315</b>	<b>0,302</b>	<b>0,319</b>
19	0,391	0,360	0,344	0,365
21	0,417	0,383	0,367	0,389
23	0,445	0,409	0,392	0,416
28	0,499	0,448	0,428	0,458
<b>30</b>	<b>0,525</b>	<b>0,480</b>	<b>0,459</b>	<b>0,488</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do seixo para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 3,00, até 30 dias.

<b>IDADE</b>	<b>Li/Na<sub>e</sub> = 3,00</b>			
<b>(dia)</b>	<b>BAR. 1</b>	<b>BAR. 2</b>	<b>BAR. 3</b>	<b>BAR. m</b>
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,011	0,013	0,013	0,012
5	0,018	0,018	0,020	0,019
7	0,028	0,029	0,030	0,029
9	0,047	0,048	0,048	0,048
14	0,114	0,117	0,118	0,116
<b>16</b>	<b>0,157</b>	<b>0,159</b>	<b>0,162</b>	<b>0,159</b>
19	0,212	0,215	0,229	0,219
21	0,246	0,246	0,258	0,250
23	0,275	0,274	0,289	0,279
26	0,299	0,298	0,320	0,306
28	0,321	0,317	0,343	0,327
<b>30</b>	<b>0,346</b>	<b>0,342</b>	<b>0,369</b>	<b>0,352</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do seixo para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 4.50, até 30 dias.

IDADE	Li/Na <sub>e</sub> = 4,50			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,016	0,014	0,015	0,015
5	0,019	0,017	0,019	0,019
7	0,022	0,020	0,022	0,021
9	0,038	0,039	0,040	0,039
12	0,061	0,064	0,062	0,063
14	0,089	0,096	0,091	0,092
<b>16</b>	<b>0,117</b>	<b>0,129</b>	<b>0,120</b>	<b>0,122</b>
19	0,158	0,173	0,163	0,165
21	0,183	0,199	0,189	0,190
23	0,201	0,220	0,209	0,210
26	0,232	0,250	0,241	0,241
28	0,242	0,261	0,248	0,250
<b>30</b>	<b>0,258</b>	<b>0,280</b>	<b>0,266</b>	<b>0,268</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do seixo para as 3 barras de argamassa com relação molar Li/Na<sub>e</sub> de 7.00, até 30 dias.

<b>IDADE</b>	<b>Li/Na<sub>e</sub> = 7.00</b>			
<b>(dia)</b>	<b>BAR. 1</b>	<b>BAR. 2</b>	<b>BAR. 3</b>	<b>BAR. m</b>
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,009	0,007	0,009	0,008
5	0,014	0,011	0,012	0,012
7	0,017	0,015	0,017	0,016
9	0,023	0,024	0,025	0,024
12	0,033	0,032	0,035	0,033
14	0,040	0,041	0,044	0,042
<b>16</b>	<b>0,050</b>	<b>0,051</b>	<b>0,055</b>	<b>0,052</b>
21	0,111	0,113	0,121	0,115
23	0,136	0,142	0,148	0,142
26	0,167	0,172	0,181	0,173
28	0,194	0,194	0,203	0,197
<b>30</b>	<b>0,220</b>	<b>0,223</b>	<b>0,232</b>	<b>0,225</b>

Resultados de expansão (%), ao longo do tempo, do seixo para as 3 barras de argamassa com adição de Cinza Volante de 30%, até 30 dias.

IDADE (dia)	Cinza Volante 30%			
	BAR. 1	BAR. 2	BAR. 3	BAR. m
0	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,007	0,007	0,007	0,007
5	0,017	0,015	0,014	0,015
7	0,023	0,022	0,022	0,022
9	0,031	0,030	0,031	0,030
14	0,046	0,039	0,045	0,043
<b>16</b>	<b>0,056</b>	<b>0,051</b>	<b>0,052</b>	<b>0,053</b>
19	0,068	0,064	0,065	0,066
21	0,088	0,084	0,081	0,084
23	0,095	0,089	0,089	0,091
28	0,131	0,123	0,122	0,125
<b>30</b>	<b>0,142</b>	<b>0,135</b>	<b>0,134</b>	<b>0,137</b>