

Effects of LiNO_3 on Alkali-Silica Reaction and Comparison with the Effects of Fly Ash on Reaction

Estudo dos Efeitos do LiNO_3 na Reação Álcali-Sílica e Comparação com os Efeitos da Cinza Volante na Reação

D. J. F. SILVA ^a
eng_djfsilva@hotmail.com

V. FAZZAN ^b
jvfazzan@hotmail.com

C. F. FIORITI ^c
cffioriti@hotmail.com

J. L. AKASAKI ^d
akasaki@dec.feis.unesp.br

H. M. BERNARDES ^e
haroldom@dec.feis.unesp.br

Abstract

Lithium-based additives have shown satisfactory results in the expansion reduction due to alkali-silica reaction (ASR), but many doubts remain about the mechanisms of ASR. The study herein assessed the effects of a lithium nitrate based (LiNO_3) chemical addition, using several dosages, in order to understand its expansion mechanisms due to ASR. The study of the effects of LiNO_3 on ASR was conducted by the accelerated mortar bar method (ASTM C-1260), using two kinds of reactivated aggregates, consequently, the test lasted up to 30 days. Mortar bars were also molded with a fly ash (FA) based mineral addition to compare the effects of a mineral addition with a chemical one on the expansion due to ASR. The results from the ASTM C-1260 test indicated that the LiNO_3 addition was effective in the expansion reduction, but presented different addition values for the acceptable threshold of 0.10% at 14 days for each kind of aggregate. It was also observed that mixtures containing LiNO_3 reduced the expansion up to 30 days, while for the mixtures containing fly ash the expansion continued to increase throughout the test. The test indicated that the dosages of lithium addition ($\text{Li}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$), efficient in the expansion reduction for the acceptable threshold of 0.10% at 14 days, were very high when compared to those found in the literature. Folliard et al. (2003), states that the use of cement with a high alkali content ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0.9 \pm 1.0\%$) and the modification of the ASTM C-1260, would be the best solution to obtain lithium addition values compatible with field applications.

Keywords: alkali-aggregate reaction, expansion, lithium composed, mortar.

Resumo

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 (LiNO_3), utilizando várias dosagens, com o objetivo de entender seus mecanismos de ação sobre a expansão associada a RAS. O estudo dos efeitos do LiNO_3 na RAS foi feito pelo método acelerado das barras de argamassa (ASTM C-1260), utilizando dois tipos de agregado reativo, levando o ensaio até 30 dias. Foram moldadas também barras de argamassa com uma adição mineral a base de cinza volante com o objetivo de comparar os efeitos de uma adição mineral com uma química na expansão devido a RAS. Os resultados do ensaio da ASTM C-1260 indicaram que as adições de lítio foram efetivas na redução da expansão, mas apresentaram valores de adição diferentes para o limite aceitável de 0.10% aos 14 dias para cada tipo de agregado. Foi observado também que as misturas contendo LiNO_3 reduziram a expansão ao longo dos 30 dias, enquanto nas misturas contendo cinza volante a expansão continuou a aumentar ao longo do teste. O ensaio indicou que as dosagens de adição do lítio ($\text{Li}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) eficazes na redução da expansão foram muito elevado em relação aos encontrados na literatura, mostrando que segundo Folliard et al. (2003), o uso de cimento com elevado teor de álcalis ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0.9 \pm 1.0\%$) e a modificação da ASTM C-1260, seria a melhor solução para obter valores de adição de lítio compatíveis com o de uso em campo.

Palavras-chave: reação álcali-agregado, expansão, compostos de lítio, argamassa.

^a Civil Engineer, Universidade Estadual Paulista, Department of Civil Engineering, Ilha Solteira Campus, eng_djfsilva@hotmail.com, Rua Oliveira Marques n° 3924, CEP: 79830-040, Dourados-MS, Brasil.

^b Civil Engineer, Universidade Estadual Paulista, Department of Civil Engineering, Ilha Solteira Campus, jvfazzan@hotmail.com, Alameda Bahia n° 550, CEP: 15385-000, Ilha Solteira-SP, Brasil.

^c Professor, Universidade Estadual Paulista, Department of Environmental Planning and Urbanism, Presidente Prudente Campus, cffioriti@hotmail.com, Rua Roberto Simonsen, n° 305, CEP: 19060-900, Presidente Prudente-SP, Brasil.

^d Assistant Professor, Universidade Estadual Paulista, Department of Civil Engineering, Ilha Solteira Campus, akasaki@dec.feis.unesp.br, Alameda Bahia n° 550, CEP: 15385-000, Ilha Solteira-SP, Brasil.

^e Assistant Professor, Universidade Estadual Paulista, Department of Civil Engineering, Ilha Solteira Campus, haroldom@dec.feis.unesp.br, Alameda Bahia n° 550, CEP: 15385-000, Ilha Solteira-SP, Brasil.

1. Introdução

A Reação Álcali-Silica (RAS) 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. Esta reação é o tipo mais predominante de Reação Álcali-Agregado (RAA) e este fenômeno particular tem mais sido examinado e é mais bem compreendido, sendo a que normalmente ocorre mais rapidamente, em função das formas minerais de sílica reativa envolvidas. A realização de estudos prévios para conhecer as características dos materiais componentes do concreto de um novo empreendimento pode reduzir a possibilidade de ocorrência da RAS quando adotadas medidas que atenuem as condições favoráveis à sua ocorrência, evitando possíveis danos às estruturas de concreto. Estas medidas podem ser divididas em três: o uso de cimento com baixo teor de álcalis, o uso de agregados não reativos, e a incorporação de adições minerais ou químicas no concreto. Entretanto, cada uma destas medidas tem suas limitações. Por exemplo, o uso de adições minerais como a sílica, cinza volante e pozolanas já estão sendo empregadas em muitas construções de concreto de modo a prevenir a RAS, porém nem todas as adições minerais são igualmente efetivas neste papel e a quantidade destas adições no controle da RAS pode não ser aceitável por outras razões.

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 [1] 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 subsequentes mostraram que certas substâncias químicas, como os compostos de lítio, podem reduzir as expansões causadas pela RAS. A falta de entendimento do mecanismo ou mecanismos pelas quais estas substâncias químicas reduzem as expansões e os seus efeitos nas propriedades do concreto é talvez o obstáculo fundamental para o uso prático de tais adições químicas. Sem conhecer o mecanismo de controle e os seus efeitos nas propriedades do concreto, é difícil prever a eficiência de uma adição química, para prever a atuação de seu controle ou para recomendar dosagens (MONTEIRO e KURTIS [2]). 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. 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, LiOHxH₂O, LiNO₃, LiNO₂, Li₂CO₃, Li₂SO₄, Li₂HPO₄ e Li₂SiO₃, são eficientes na redução das expansões causadas pela RAS no concreto, contanto que sejam usadas nas dosagens apropriadas. Vários mecanismos foram propostos descrevendo os efeitos dos compostos a base de lítio na redução das expansões associadas a RAS, sendo que pesquisas como as de Ramyar et al. [3], Feng et al. [4] e Shneider et al. [5] mostraram que o lítio altera a composição do gel da RAS, resultando em um produto com pequena ou nenhuma capacidade de absorver água e expandir. Comparando com os outros compostos a base de lítio, os pesquisadores consideram que o nitrato de lítio (LiNO₃) representa o mais promissor. O uso do LiNO₃, 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 [6]).

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 presente pesquisa tem o objetivo de contribuir com o estudo de uma adição química a base de LiNO₃ na expansão devido a RAS, através do método acelerado das barras de argamassa, observando seus efeitos na redução da expansão e comparando com uma adição mineral a base de cinza volante.

2. Materiais e programa experimental

2.1 Materiais

As barras de argamassa foram preparadas com um tipo de cimento e dois tipos de agregados reativos, de acordo com a ASTM [7]. O Nitrato de lítio e a cinza volante foram utilizados como adições nas misturas. O cimento utilizado foi o CPV-ARI-PLUS com teor de álcalis (%Na₂O_{eq}) de 0,70%. Os agregados utilizados apresentaram elevados valores de reatividade segundo o ensaio de expansão de barras de argamassa, de acordo com a norma ASTM [7], e são os seguintes: basalto e cascalho. A composição química do cimento e da cinza volante é apresentada na Tabela [1]. O nitrato de lítio utilizado foi um produto comercialmente vendido no mercado com 95% de pureza.

2.2 Mistura características das barras de argamassa

Os ensaios de expansão foram realizados a fim de analisar o comportamento dos agregados em face da reatividade potencial, e estudar os efeitos do LiNO₃ na redução da expansibilidade de barras de argamassa, de acordo com a norma ASTM [7]. De acordo com

Tabela 1 - Composição química do cimento e cinza volante (wt, %)

Material	Composição (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O _{eq} ^(*)
Cimento	18,97	4,80	2,52	59,17	5,30	3,53	0,13	0,87	0,70
Cinza volante	44,26	21,73	13,15	2,22	0,23	0,19	-	-	0,48

(*) %Na₂O_{eq} = %Na₂O + 0,658.%K₂O

o método de ensaio, foram confeccionadas três barras de argamassa para cada tipo de mistura. As dimensões das barras foram 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 em ambiente apropriado e, depois da retirada do molde, ficaram totalmente imersos em água, a uma temperatura de 80oC, 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.

Para a realização dos ensaios foram preparadas barras de argamassas de controle, as quais não continham a adição de LiNO₃, e barras contendo várias dosagens de LiNO₃ de acordo com a relação da concentração molar do óxido de lítio pela concentração molar do óxido de sódio (Li/Na_{eq}) utilizada. As relações molares utilizadas para a dosagem do LiNO₃ foram as seguintes: Li/Na_{eq} = 0,72; 0,79; 0,86; 0,93; 1,5; 3,0 e 4,5. Foi utilizada a Equação [1] no cálculo da dosagem de LiNO₃, e a Tabela [2] mostra a quantidade dos materiais componentes das barras de argamassa para cada dosagem da adição.

$$M = 2 \cdot \frac{M_0}{M_{Na_2O}} \cdot P_m \cdot A_m \cdot B_m \cdot \frac{1}{n_O N_O} \quad (1)$$

onde, M é a quantidade de LiNO₃ a ser adicionado a mistura (g), M₀ é a massa molar do LiNO₃ (g/mol), MNa₂O é a massa molar do Na₂O (g/mol), P_m é a quantidade de cimento que será utilizado na preparação das barras (g), A_m é a relação molar Li/Na_{eq} requerida, B_m é a quantidade de Na₂O_{eq} contida no cimento (%), n_O é a quantidade molar de Li por molar da mistura e N_O é a porcentagem pura de Li contida na mistura.

A dosagem do LiNO₃ requerida foi adicionado na água de amassamento, mais se o composto de lítio estiver na forma de uma solução aquosa (solução com 30% de LiNO₃), a quantidade de água contida na solução deverá ser removida da água de amassamento para manter a mesma relação água/cimento requerida pela norma (FOLLIARD et al. [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 LiNO₃. A substituição de cinza volante por parte do cimento nas barras de argamassa foi feita em diferentes dosagens para cada agregado e sem o uso de qualquer tipo de aditivo a fim de se obter expansões inferiores a 0,10% aos 14 dias de ensaio: para o basalto, 60% de cimento e 40% de cinza volante; e para o cascalho, 70% de cimento e 30% de cinza volante. A Tabela [3] mostra a quantidade dos materiais componentes das barras de argamassa com substituição de parte do cimento por cinza volante para os agregados utilizados.

Tabela 2 - Componentes das barras de argamassa com LiNO₃

Li/Na _{eq}	Cimento (g)	Agregado (g)	Na ₂ O (mol)	Adição de Li (g)	Água (g)
0,00	440	990	0,0113	0,00	206,8
0,72	440	990	0,0113	5,19	206,8
0,79	440	990	0,0113	5,70	206,8
0,86	440	990	0,0113	6,20	206,8
0,93	440	990	0,0113	6,71	206,8
1,50	440	990	0,0113	10,82	206,8
3,00	440	990	0,0113	21,65	206,8
4,50	440	990	0,0113	32,47	206,8

Tabela 3 – Componentes das barras de argamassa com cinza volante

Mistura	Densidade Absoluta Cimento (g/cm ³)	Densidade Absoluta Cinza Volante (g/cm ³)	Cimento (g)	Cinza Volante (g)	Agregado (g)	Água (g)
Cinza volante (40%) Basalto	3,14	2,36	264	132,28	990	206,8
Cinza volante (30%) Cascalho	3,14	2,36	308	99,21	990	206,8

3. Resultados e discussões

3.1 Expansão nas barras de argamassa com LiNO₃

Os corpos de prova (barras) de argamassa foram preparadas para observar os efeitos do LiNO₃ na redução da expansão devido a RAS. As Figuras [1a] e [1b] mostram a expansão das barras de argamassa preparadas com o LiNO₃ comparada com a expansão das barras de argamassa de controle preparadas sem a adição de LiNO₃, para o basalto e o cascalho respectivamente. Observa-se que para todas as dosagens testadas, as barras de argamassa apresentaram redução na expansão para os dois tipos de agregados. As primeiras dosagens com [Li/Na_{eq}] de 0,72 a 0,93 foram usadas com base na literatura referenciada neste trabalho, sendo que na literatura estas relações molares eram suficientes para reduzir a expansão sem ultrapassar o limite (>0,10%) aos 14 dias. Para os dois tipos de agregados estas relações molares reduziram a expansão, mas ultrapassaram o valor limite aos 14 dias alcançando valores elevados de expansão. Segundo Folliard et al. [8], para que o método de ensaio ASTM [7] seja eficiente na dosagem do lítio, o cimento usado nas barras de argamassa deve ter Na₂O_{eq} de 0,9 ± 1,0%, porque o conteúdo de álcalis do cimento Portland atualmente não é

especificado na ASTM [7], pois foi demonstrado que os efeitos de alcalinidade da solução (1N de NaOH) longe excede qualquer efeito de alcalinidade do cimento quando testado com os agregados reativos. Portanto o uso de um cimento com baixo teor de Na₂O_{eq} resultaria num conteúdo baixo de lítio, que seria oprimido pela solução de 1N de NaOH. Ainda segundo Folliard et al. [8] o lítio deve ser adicionado na solução de imersão das barras de argamassa de modo a alcançar mesma relação molar no interior das barras (baseado na alcalinidade do cimento), isto evitaria a lixiviação do lítio das barras para a solução devido a diferença de concentração, evitando valores elevados de adição de lítio. Como no ensaio ASTM [7] do trabalho foi usado um cimento com baixo teor de Na₂O_{eq} igual a 0,70% e na solução de imersão das barras não foi adicionado lítio com a mesma relação molar contidas nas barras, as primeiras relações molares tiradas da literatura não apresentaram os mesmos efeitos nesta pesquisa. Com isto, a relação molar [Li/Na_{eq}] foi aumentada até conseguir expansão inferior ao valor limite aos 14 dias. Ainda em relação às primeiras relações molares, houve uma pequena diferença na redução da expansão com o aumento da relação para os dois tipos de agregados, sendo que para o basalto estas relações tiveram maior efeito na redução da expansão das barras do que no cascalho.

Figura 1a – Expansão das barras de argamassa (basalto) ao longo do tempo com/sem LiNO₃

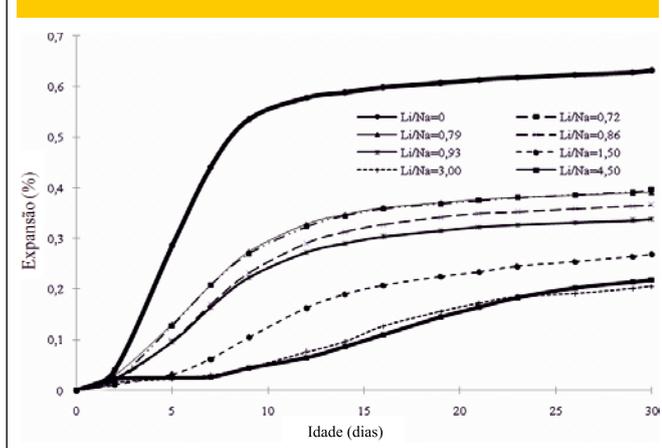
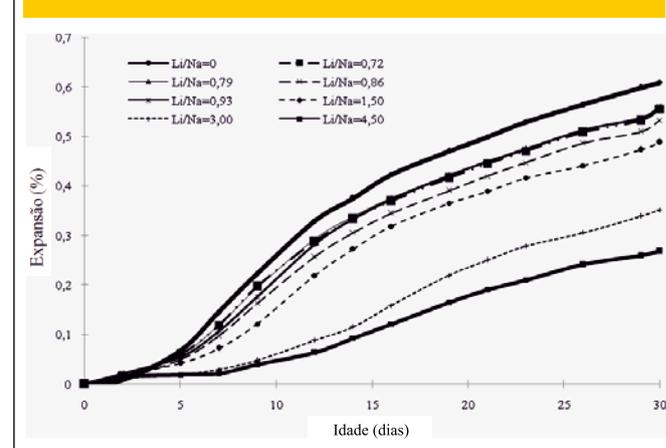


Figura 1b – Expansão das barras de argamassa (cascalho) ao longo do tempo com/sem LiNO₃



Aumentando a relação molar [Li/Naeq] para 1,50; houve uma maior redução na expansão das barras para os dois tipos de agregado, sendo que para o basalto o efeito do lítio na redução foi maior. Apesar da redução na expansão das barras de argamassa esta relação ainda ultrapassou o valor limite de expansão aos 14 dias. Para uma relação molar [Li/Naeq] de 3,00; houve uma elevada redução na expansão das barras para os dois tipos de agregado. Apesar das barras terem apresentada a mesma reação com o aumento da relação molar para os dois tipos de agregado, só as barras moldadas com o basalto reduziram a expansão no valor limite aceitável aos 14 dias, enquanto que as barras contendo o cascalho ainda ultrapassaram este limite.

Elevando a relação molar [Li/Naeq] na mesma proporção (de 1,50 para 3,00 e depois 4,50), as barras de argamassa apresentaram reações diferentes na redução da expansão para os dois tipos de agregados. As barras com cascalho apresentaram redução na expansão ao valor limite aceitável aos 14 dias, já as barras com basalto, com o aumento no valor da relação molar, não houve efeito sobre a expansão em relação ao [Li/Naeq] igual a 3,00; mais ainda manteve a expansão no valor limite aceitável aos 14 dias.

Outra observação a ser feita é que aumentando a relação molar [Li/Naeq] na proporção de 1,50 (de 1,50 a 4,50), as barras de argamassa apresentaram comportamentos diferentes na expansão. Com o aumento de [Li/Naeq] de 1,50 para 3,00; houve uma considerável redução na expansão das barras para os dois tipos de agregados, já com o aumento de [Li/Naeq] de 3,00 para 4,50 esta redução foi menor. As barras contendo cascalho apresentaram maiores reduções na expansão com o aumento nas mesmas proporções da relação molar [Li/Naeq], já para as barras moldadas com basalto esta redução foi menor, sendo que para a relação molar de 3,00 para 4,50 o aumento de lítio não teve efeito considerável na redução. Esta diminuição na intensidade de redução da expansão das barras, com o aumento da adição de lítio, pode ser devido a existência de um limite de adição na qual o lítio não tem mais efeito na redução com o seu aumento, como mostrado por Collins et al. [9].

Observou-se também que apesar dos dois tipos de agregados

apresentarem reações semelhantes com o aumento da relação molar [Li/Naeq], a intensidade na redução das expansões foi diferente. Isto demonstra que cada tipo de agregado necessita de uma quantidade diferente de adição para reduzir a expansão a valores aceitáveis segundo a norma. Segundo Hasparyk [10], a reatividade do agregado é que governa a eficiência da adição na redução da solubilidade da sílica, sendo assim variável a concentração ótima das adições a serem empregadas.

3.2 Comparação dos efeitos do LiNO_3 com a cinza volante na reação álcali-silica

As barras de argamassa foram preparadas com cinza volante para comparar os efeitos do LiNO_3 com a cinza volante na expansão devido a RAS. As Figuras [2a] e [2b] mostram a expansão das barras de argamassa preparadas com/sem LiNO_3 e com adição de cinza volante, para o basalto e o cascalho respectivamente. Observou-se um comportamento diferente entre as curvas de expansão das barras com adição de LiNO_3 e cinza volante. As curvas de expansão das barras com LiNO_3 tende a acompanhar o desenvolvimento da curva das barras de controle sem o LiNO_3 para os dois tipos de agregado, já as curvas de expansão da cinza volante apresentam um desenvolvimento 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 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. [11] compararam os efeitos de expansão de barras de argamassa moldadas com adição de lítio e cinza volante através da ASTM [7] 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 14 dias para os dois agregados se deve a diferença de reatividade dos agregados como já explicado no final do item 3.1.

Figura 2a - Expansão das barras de argamassa (basalto) ao longo do tempo com/sem LiNO_3 e cinza volante

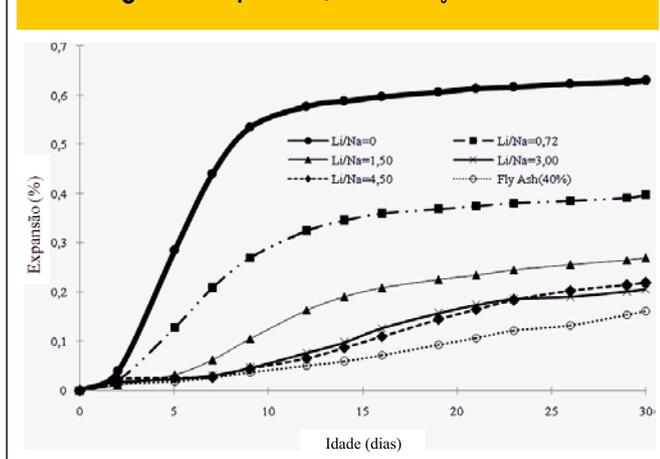
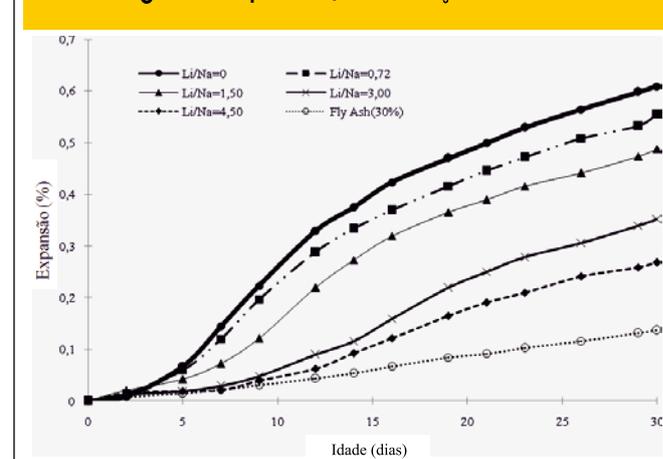


Figura 2b - Expansão das barras de argamassa (cascalho) ao longo do tempo com/sem LiNO_3 e cinza volante



4. Conclusões

Com os materiais utilizados e o método de ensaio aplicado no estudo, às seguintes conclusões podem ser tiradas:

- 1. As expansões são reduzidas com o aumento da adição de LiNO_3 ;
- 2. O método de ensaio segundo da ASTM [7] deve ser modificado mantendo a mesma relação molar $[\text{Li}/\text{Na}_q]$ do interior das barras com a solução de imersão e deve-se usar cimento com teor de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ entre $0,9 \pm 1,0$ para obter valores de adição de lítio compatíveis com o de uso em campo;
- 3. Pode existir um valor limite de adição de lítio no qual não ocorre mais aumento na redução da expansão;
- 4. As adições com lítio tende a estabilizar a expansão ao longo do tempo, enquanto nas adições de cinza volante a expansão continua a aumentar ao longo do tempo;
- 5. A quantidade de adição de lítio e cinza volante para reduzir a expansão a valores aceitáveis pela norma variam em função da reatividade do agregado utilizado.

5. Referências bibliográficas

- [01] McCOY, W. J.; CALDWELL, A. G. New approach to inhibiting alkali-aggregate expansion. *Journal of the American Concrete Institute*, Detroit, v. 22, n. 9, 1951, p.693-706.
- [02] 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*, v. 38, n. 10, 2003, p. 2027-2036.
- [03] Ramyar, K. et al. Comparison of alkali-silica reaction products of fly-ash or lithium-salt-bearing mortar under long-term accelerated curing. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 5, 2004, p. 1179-1183.
- [04] Feng, X. et al. New observations on the mechanism of lithium nitrate against alkali-silica reaction (ASR). *Cement and Concrete Research*, in press, corrected proof, available online 15 august 2009.
- [05] Schneider, J. F. et al. Effect of lithium nitrate on the alkali-silica reaction gel. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 9, n. 10, 2008, p. 3370-3374.
- [06] Mo, X. Laboratory study of LiOH in inhibiting alkali-silica reaction at 20°C : a contribution. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 6, 2005, p. 499-504.
- [07] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-1260: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). West Conshohocken, 2005.
- [08] Folliard, K. J. et al. 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.
- [09] Collins, C. L. et al. Examination of the effects of LiOH , LiCl and LiNO_3 on alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 13, 2004, p. 1403-1415.
- [10] Hasparyk, N. P. Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2005, 326 p.