

REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA SOB UMA PERSPECTIVA TERMODINÂMICA: EFEITOS DO TEMPO DE CURA NO ENSAIO DE EXPANSÃO DE ARGAMASSAS

Farias, Marcelo Miranda ¹; Guardezi, Paloma Cristina ²; Medeiros, Marcelo Henrique Farias de ³; Pereira, Eduardo ⁴

¹ Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, marcelofarias@ufpr.com

² Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa, palomacguardezi@hotmail.com

³ Professor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, medeiros.ufpr@gmail.com

⁴ Professor, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa, eduardopereira@uepg.br

Resumo: O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do tempo de cura no comportamento expansivo de argamassas frente à reação álcali-sílica (RAS). Foram realizados ensaios acelerados conforme a NBR 15577-4, utilizando amostras com 2, 30 e 60 dias de cura. Paralelamente, foi empregada modelagem termodinâmica com o software GEM-Selektor para simular a hidratação do cimento e a formação de produtos da RAS. Os resultados mostraram que argamassas curadas por 2 dias e expostas à solução alcalina apresentaram uma expansão média de 0,207%, enquanto as curadas por 30 e 60 dias apresentaram a mesma expansão média (0,128%). A modelagem indicou volumes totais semelhantes de produtos deletérios entre as idades. Observou-se que a menor expansão observada não se deve à redução da formação de produtos, mas sim à maior resistência da matriz cimentícia nas idades mais avançadas, que limita a manifestação da reação. Assim, a integração entre ensaio experimental e modelagem termodinâmica permitiu uma análise mais abrangente do fenômeno, evidenciando que o desempenho frente à RAS depende não apenas da reatividade química, mas também da capacidade do material em resistir às tensões geradas.

Palavras-chave: Argamassas, Reação álcali-agregado, Modelagem termodinâmica.

Abstract: This study evaluated the influence of curing age on the expansive behavior of mortar samples subjected to the alkali-silica reaction (ASR). Accelerated expansion tests were performed by NBR 15577-4, using specimens cured for 2, 30, and 60 days. In parallel, thermodynamic modeling with GEM-Selektor software was employed to simulate cement hydration and ASR product formation. The results showed that mortars cured for 2 days exhibited an average expansion of 0.207%, while those cured for 30 and 60 days expanded by 0.128%. Modeling predicted similar total volumes of deleterious phases across all ages. The reduced expansion in more mature samples was attributed not to decreased product formation but to the increased strength and compactness of the cementitious matrix, which restrained gel-induced stresses. Integrating experimental testing and computational modeling provided a comprehensive understanding, highlighting that ASR performance depends as much on the material's mechanical resistance as on its chemical reactivity.

Keywords: Mortars, Alkali-aggregate reaction, Thermodynamic modeling.

1. Introdução

Dentre os processos deletérios que afetam a longevidade das estruturas de concreto, a reação álcali-sílica (RAS) se destaca como um fenômeno progressivo, cuja evolução lenta pode comprometer significativamente o desempenho estrutural ao longo da vida útil da construção. Ela ocorre pela reação entre álcalis presentes na solução de poros da matriz cimentícia e formas de sílica reativa em certos agregados, resultando na formação de um gel higroscópico que, ao absorver água, se expande e gera tensões internas capazes de causar fissuras e reduzir o desempenho mecânico da estrutura [1][2].

Diversas pesquisas buscam compreender os mecanismos da RAS. O mecanismo mais aceito consiste do ataque da sílica por íons hidroxilas (OH^-), com consequente formação de íons $\text{Si-O}_{-5/2}$. Esses íons, inicialmente com cargas negativas, são balanceados pela penetração de álcalis (Na^+ , K^+ e Ca^{2+}), permitindo a formação do gel [1][2]. Nesse contexto, trabalhos recentes buscam compreender a estrutura do gel e, conforme demonstrado no trabalho de [3], o produto apresenta uma estrutura cristalina semelhante ao do mineral shlykovita.

Dentre os métodos utilizados para avaliação da reatividade dos agregados, destaca-se o ensaio acelerado de barras de argamassa, conforme normatizado pela NBR 15577-4 [5]. Essa norma prevê o início do ensaio com apenas dois dias de cura, quando a hidratação da matriz ainda está em estágio inicial. Por outro lado, estudos sugerem que a microestrutura, o tempo de cura e o grau de hidratação influenciam significativamente a manifestação da RAS [6][7]. Nesse contexto, há uma lacuna quanto ao efeito do tempo de cura inicial no comportamento expansivo em ensaios acelerados. Poucos estudos analisam como diferentes períodos de cura das argamassas influenciam tanto na formação dos produtos da RAS, quanto na manifestação da expansão.

Paralelamente, a modelagem termodinâmica tem se mostrado uma ferramenta útil nos estudos sobre RAS. Essa técnica permite simular a formação de fases sólidas com base nas condições químicas do sistema, como a composição da solução de poros e o estágio de hidratação. Assim, é possível prever não apenas quais produtos deletérios são formados, mas também seus volumes e potenciais de expansão, contribuindo para uma compreensão mais profunda do fenômeno [8][9].

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do tempo de cura inicial no comportamento expansivo de argamassas frente à RAS, integrando ensaios acelerados com modelagem termodinâmica. A proposta tem como objetivo ampliar o entendimento dos fatores que controlam a expansão e oferecer subsídios para uma interpretação mais precisa dos resultados de ensaios acelerados.

2. Modelagem termodinâmica

Neste estudo, a modelagem termodinâmica foi realizada por meio do software livre GEM-Selektor [10], que calcula a formação de fases e as interações iônicas com base na minimização da energia livre de Gibbs. O cálculo considera o coeficiente de atividade (γ) das espécies iônicas (i), utilizando a equação estendida de Debye-Hückel, apresentada na Eq. 1.

$$\log_{10} \gamma_i = \frac{-A_\gamma z_i^2 \sqrt{I}}{1 + a B_\gamma \sqrt{I}} + b_\gamma I \quad (1)$$

Nessa equação, os coeficientes A_γ e B_γ são funções da temperatura e pressão do sistema, enquanto o parâmetro a e b_γ variam de acordo com a composição da solução. Para soluções predominantemente compostas por KOH, os valores de a e b_γ são, respectivamente, 3,67 Å e 0,123 kg/mol. Já para soluções com NaOH, os valores adotados são 3,31 Å e 0,098 kg/mol [11]. O termo z_i representa a carga da espécie iônica i , e I refere-se à força iônica da solução, determinada pela Eq. 2.

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n c_i z_i^2 \quad (2)$$

Onde c_i é a concentração da espécie i .

Para a modelagem realizada, foi utilizada a base de dados Cemdata18, a qual, conforme [11], abrange uma vasta gama de hidratos normalmente encontrados em sistemas cimentícios em temperaturas de 0 a 100 °C. Entre eles estão o C-S-H, as fases AFm e AFt, hidrotalcitas, zeólitas e demais soluções sólidas associadas. Além disso, foram empregados dados disponibilizados por [8] para a simulação de fases cristalinas do gel, como a shlykovita, bem como os estudos de [12][13][14] para representar a interação entre o C-S-H e os íons alcalinos.

3. Materiais e métodos

Para atingir os objetivos do estudo, foram empregados ensaios acelerados de barras de argamassa, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 15577-4 [5]. Argamassas foram moldadas e curadas por três diferentes períodos: 2 dias (conforme especificado na norma para início do ensaio), 30 dias e 60 dias. Após os respectivos períodos de cura, as barras foram submetidas ao ensaio de expansão acelerada, e as variações dimensionais foram monitoradas ao longo do tempo. Paralelamente, foram moldadas pastas de cimento com as mesmas idades de cura, com o objetivo de avaliar a evolução da resistência mecânica ao longo do tempo, permitindo associar o desempenho mecânico da matriz cimentícia ao comportamento expansivo observado. Adicionalmente, foi realizada a modelagem termodinâmica com o auxílio do *software* GEM-Selektor, com o intuito de prever a formação de fases relacionadas à RAS, em função das diferentes idades de cura. Essa abordagem permitiu correlacionar o volume de produtos formados com o comportamento expansivo observado experimentalmente.

3.1 Ensaios laboratoriais

As argamassas utilizadas nos ensaios acelerados foram confeccionadas com cimento Portland composto CP II-F-32, cuja caracterização química e física está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização físico-química do cimento

Ensaios químicos											
CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CaO Livre (%)	Perda ao fogo (%)	Equiv. Alcalino (%)	Resíduo Insolúvel (%)		
61,29	18,37	4,05	2,83	2,79	2,58	1,33	6,87	0,65	1,41		
Ensaios físicos											
Massa espec. (g/cm ³)	Exp. quent e (mm)	Início da pega (min)	Fim de pega (min)	Cons. Norma I (%)	Blaine (cm ² /g)	Retido na #200 (%)	Retido na #325 (%)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
2.93	0.61	203	268	26.1	3.388	1.59	9.97	14.4	27.9	32.8	41.1

Fonte: [15]

O agregado miúdo utilizado foi areia natural quartzosa, cuja caracterização física e química está apresentada na Tabela 2. A distribuição granulométrica seguiu os requisitos estabelecidos pela norma de ensaio acelerado.

Tabela 2: Caracterização físico-química do agregado

Caracterização física										
Massa específica na condição seca (g/cm³)			Massa específica na condição saturada superfície seca (g/cm³)				Massa unitária (g/cm³)		Absorção de água (%)	
2,61			2,65				1,56		2,16	
Caracterização química por FRX										
SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	CO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	SO ₃ (%)	SiO ₂ (%)
53,90	14,00	5,04	4,45	3,77	3,25	3,03	1,12	0,66	0,06	53,90

As argamassas foram misturadas conforme a NBR 7215 [4] e moldadas conforme especificado na NBR 15577-4 [5]. Após desmoldagem, elas foram submetidas a três diferentes tempos de cura: 2 dias (procedimento padrão conforme a norma), 30 dias e 60 dias. Para o ensaio padrão de 2 dias, as amostras passaram por 24 horas em cura úmida, seguidas de 24 horas submersas em água a temperatura de 80 °C, dando, após isso, início ao ensaio propriamente dito. As demais séries (30 e 60 dias) foram armazenadas em câmara úmida durante as primeiras 24h. Após isso, foram curadas de forma selada, conforme descrito no trabalho de [16], até a data de ensaio. Durante o ensaio, a expansão das barras foi aferida a cada dois dias com o uso de um pórtilho com comparador digital, por um período de 30 dias.

Corpos de prova de pasta de cimento, com o mesmo traço das argamassas (sem adição de areia), foram moldados para avaliação da resistência mecânica. A mistura seguiu o mesmo procedimento adotado para as argamassas, e a moldagem foi feita

em moldes cilíndricos de 2 cm de diâmetro por 4 cm de altura, sem compactação, devido à baixa viscosidade das pastas. As resistências à compressão e à tração por compressão diametral foram determinadas com base nas normas NBR 5739 [17] e NBR 7222 [18], respectivamente, adaptando-se, para isso, apenas o tamanho das amostras. Já os demais parâmetros das normas foram mantidos. As idades de rompimento foram de 30 e 60 dias. A cura de 30 dias simulou a condição de corpos de prova curados por 2 dias e expostos por 30 dias em solução de NaOH. A cura de 60 dias simulou a condição de corpos de prova curados por 30 dias e expostos por 30 dias em NaOH. A cura de 90 dias, que simularia a condição de 60 dias de cura mais 30 dias de exposição, não foi realizada, uma vez que o intervalo entre 30 e 60 dias já proporciona uma avaliação adequada da evolução da resistência ao longo do tempo, sendo representativo para a análise do desenvolvimento das propriedades mecânicas no período mais relevante do processo de hidratação.

3.2 Modelagem

A modelagem termodinâmica foi empregada com o intuito de prever as fases de hidratação formadas na pasta de cimento presente nas argamassas e a formação de produtos da RAS. Para possibilitar a simulação, algumas suposições iniciais foram adotadas. Para avaliar a formação dos produtos em diferentes idades de cura, foram atribuídos graus de hidratação distintos para cada idade de cura analisada: 30 dias (amostras com 2 dias de cura seguidos de 30 dias de exposição à solução de NaOH), 60 dias (cura de 30 dias + 30 dias de exposição) e 90 dias (cura de 60 dias + 30 dias de exposição). Essa abordagem permitiu incorporar à modelagem as variações na evolução da hidratação ao longo do tempo, refletindo seu impacto na formação de fases e, conseqüentemente, na suscetibilidade à RAS.

3.2.1 Parâmetros de Entrada

A composição química do cimento utilizado na modelagem é apresentada na Tabela 3. As informações relativas ao cimento foram obtidas a partir de dados fornecidos pelo fabricante, ajustados com base no teor de CaO. Em relação à reatividade do cimento, para simplificação, adotou-se um grau de hidratação de 100% para o cimento Portland em um tempo infinito.

Tabela 3: Composição química do cimento para modelagem

%	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CO ₂
Cimento	50,14	18,37	4,05	2,83	2,79	0,75	0,19	2,58	6,29

3.2.2 Premissas do Modelo

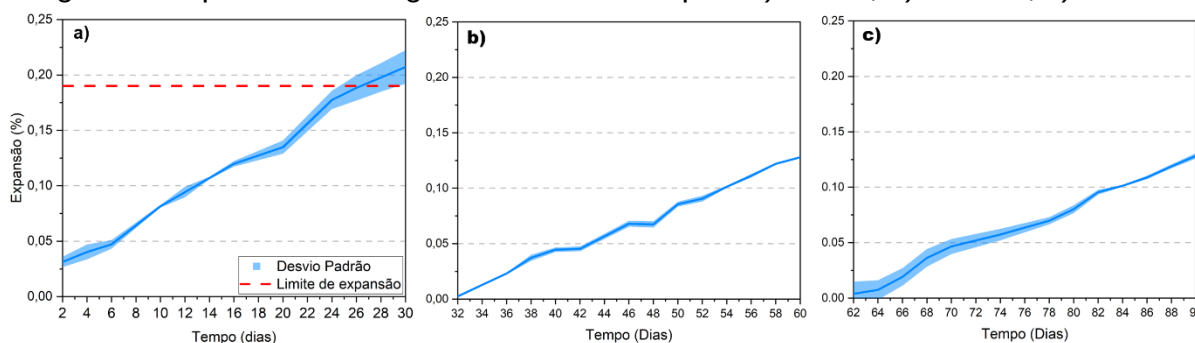
A modelagem foi dividida em duas etapas principais. Na Etapa 1, foram simuladas as fases de hidratação do cimento para cada uma das idades consideradas, utilizando-se uma relação água/cimento (a/c) de 0,47, igual à empregada nas argamassas reais. Fases como hidrogranada, taumasita, hematita e magnetita foram propositalmente excluídas dos modelos por não serem esperadas nas condições ambientais adotadas neste estudo.

Com base nos resultados obtidos na Etapa 1, a Etapa 2 consistiu na simulação da formação dos produtos da RAS. Nesta modelagem não se promoveu qualquer aumento artificial da concentração de álcalis. Para essa etapa, considerou-se uma solução de poros com volume de 1 litro, na qual foram adicionadas as quantidades de portlandita $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ obtidas na Etapa 1, juntamente com um teor de sílica amorfa de 120 g, valor que garante com que a modelagem considere a reação que ocorre no interior do agregado reativo, devido à sua maior concentração de sílica. A modelagem foi realizada a 80 °C, assumindo-se que a RAS resultaria na formação das fases K-Shlykovita e Na-Shlykovita. Embora [13] ressaltem que Na- e K-Shlykovita não costumam se formar simultaneamente em condições reais, optou-se por manter ambas as fases no modelo, com o objetivo de avaliar o potencial teórico de formação desses produtos. Estratégia semelhante foi adotada por [8].

4. Resultados e discussões

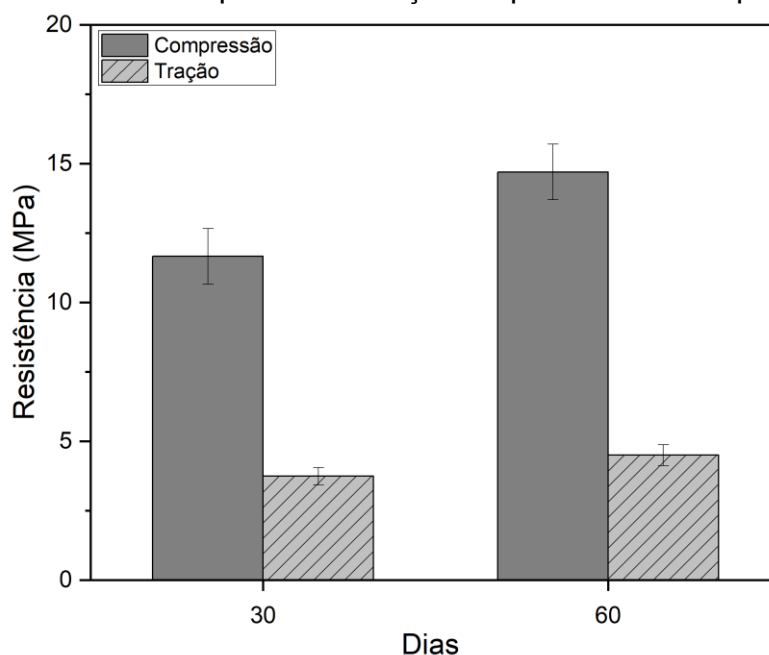
Os ensaios de expansão acelerada permitiram avaliar a influência da idade de cura no comportamento expansivo associado à RAS. Como ilustrado na Figura 1, as argamassas apresentaram uma expansão de 0,207% aos 30 dias de exposição em solução de NaOH, classificando o agregado como “reativo grau R0”, de acordo com os critérios estabelecidos pela norma. As argamassas curadas por 30 dias antes do início do ensaio apresentaram uma expansão média de 0,128% após 30 dias de exposição à solução alcalina. De forma semelhante, as argamassas curadas por 60 dias também apresentaram uma expansão média de 0,128% ao final do mesmo período de ensaio. Assim, observou-se uma redução de 38% na expansão das argamassas curadas por 30 e 60 dias.

Figura 1: Expansão das argamassas curadas por: a) 2 dias; b) 30 dias; c) 60 dias



Essa redução nas expansões pode estar associada à formação de produtos secundários durante a cura prolongada, que podem reduzir a absorção por capilaridade das argamassas, reduzindo a formação do gel, e que também atuam como barreira física à difusão de íons agressivos, conforme descrito por [19]. Além disso, a hidratação mais avançada da matriz cimentícia pode ter contribuído para uma maior resistência mecânica da argamassa. Esse efeito é demonstrado na Figura 2, onde é observado um aumento em 25,6% na resistência à compressão e de 21,6% na de tração, ao comparar as pastas provenientes das argamassas com 30 dias e 60 dias de cura.

Figura 2: Resistência à compressão e tração de pastas curadas por 30 e 60 dias



A modelagem termodinâmica da hidratação do cimento permitiu prever a evolução das principais fases sólidas formadas ao longo do tempo. Conforme ilustrado na Figura 3, observa-se a decomposição progressiva dos compostos anidros como C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF , com consequente formação de produtos hidratados, entre eles C-S-H, portlandita, etringita, gipisita, hidrotalcita, monocarbonato, além da presença de fases como calcita, brucita e MgO .

A formação de C-S-H, principal responsável pela resistência da matriz cimentícia, é acentuada nas primeiras semanas, estabilizando-se após aproximadamente 30 dias. A portlandita, por sua vez, também apresenta aumento expressivo nas idades iniciais, estabilizando-se entre 30 e 60 dias. Fases secundárias como hidrotalcita e monocarbonato mostram crescimento progressivo, indicando reações de hidratação complementares.

As idades de 30, 60 e 90 dias, destacadas na Figura 3 pelas linhas verticais vermelhas, foram utilizadas como marcos para a extração das composições da solução de poros das respectivas idades, conforme apresentadas na Tabela 4. Com base nessas soluções, também obtidas via modelagem, foram realizadas simulações específicas para prever a formação de produtos associados à RAS. Essa abordagem possibilitou correlacionar a disponibilidade iônica e o ambiente químico do sistema nas diferentes idades de cura com o potencial de formação de géis expansivos da RAS.

Figura 3: Fases formadas durante a hidratação do cimento obtidas por modelagem

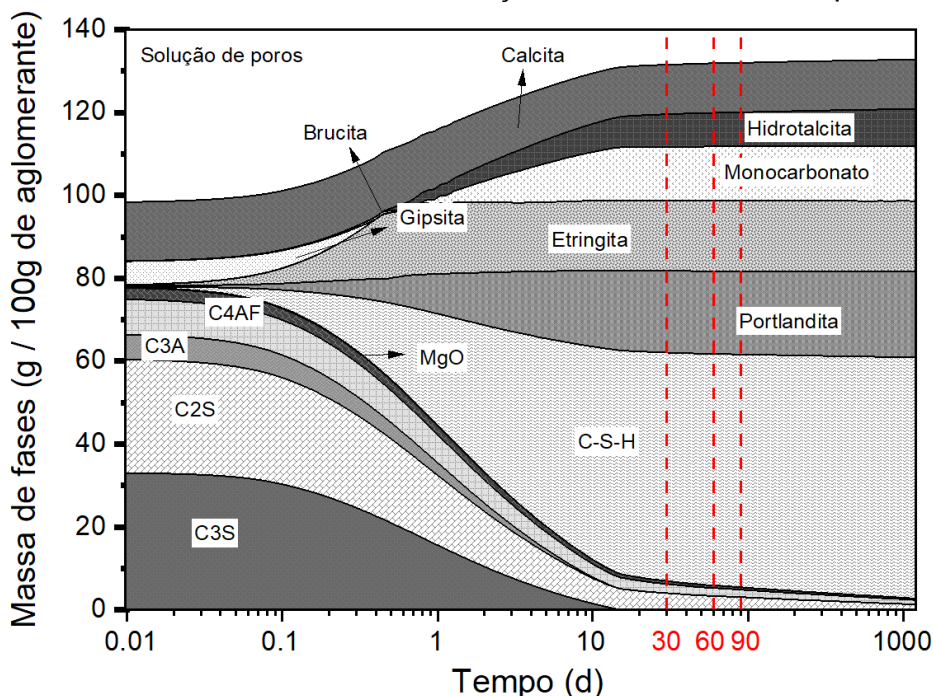
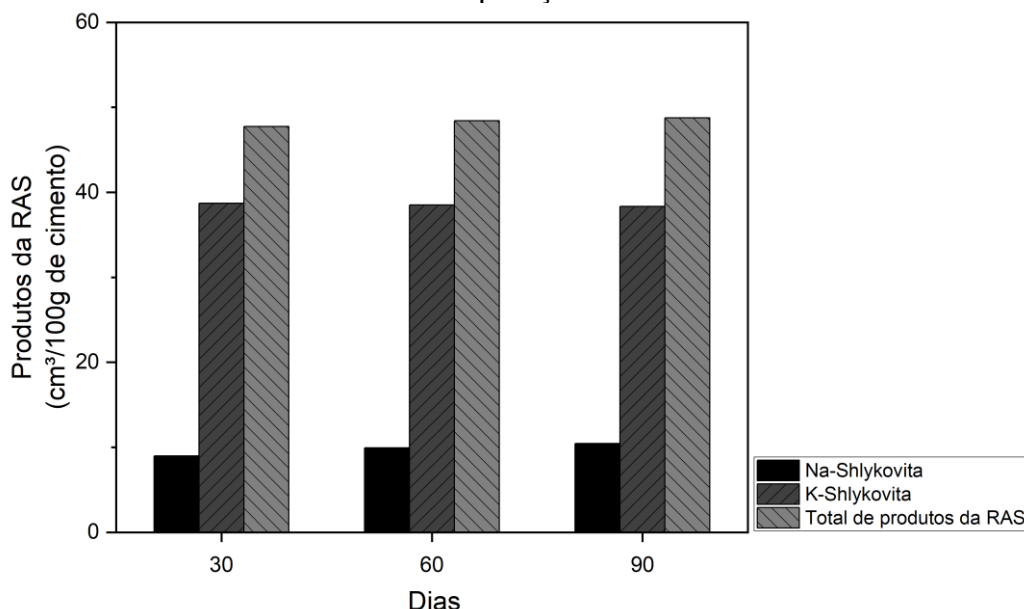


Tabela 4: Parâmetros utilizados na modelagem da RAS

Concentração iônica (mol/L de solução)					
Dias de cura	Al ³⁺	C ⁴⁺	Ca ²⁺	Fe ²⁺	K ⁺
30 dias	3,66E-05	1,11E-04	1,78E-03	7,02E-02	2,92E-01
60 dias	3,21E-05	8,95E-05	2,27E-03	1,39E-01	3,20E-01
90 dias	3,01E-05	8,05E-05	2,57E-03	1,73E-01	3,35E-01
Concentração iônica (mol/L de solução)					
Dias de cura	Mg ²⁺	Na ⁺	S ²⁻	Si ⁴⁺	OH ⁻
30 dias	2,00E-09	5,50E-02	1,69E-05	4,72E-05	2,64E-01
60 dias	2,33E-09	6,07E-02	7,99E-06	4,35E-05	2,30E-01
90 dias	2,52E-09	6,38E-02	5,95E-06	4,19E-05	2,15E-01

A Figura 4 apresenta os volumes formados de produtos da RAS para as soluções de poros correspondentes às idades de 30, 60 e 90 dias. Observa-se que os volumes totais formados foram semelhantes nas três condições avaliadas. O volume total de produtos foi de 47,7 cm³/100g de cimento aos 30 dias, 48,4 cm³ aos 60 dias e 48,8 cm³ aos 90 dias. A pequena variação nesses valores sugere que o ambiente químico da solução de poros, ligeiramente alterado com o avanço da cura, não causa alterações significativas na formação dos produtos da RAS.

Figura 4: Volume de produtos formados pela RAS nas diferentes idades de cura e exposição



Outro ponto importante é que, em todas as idades analisadas, a K-Shlykovita foi o principal produto formado, em volume significativamente maior do que a Na-Shlykovita. Isso indica uma maior participação do íon potássio (K^+) na formação dos géis expansivos, o que pode estar associado à maior concentração relativa deste cátion na solução de poros, conforme pode ser observado na Tabela 4.

Dessa forma, os resultados da modelagem indicam que a redução da expansão observada experimentalmente nas argamassas com maior tempo de cura não está associada a uma menor formação de produtos da RAS, mas sim ao aumento da resistência da matriz cimentícia, conforme demonstra a Figura 2. A maior hidratação proporciona uma estrutura mais densa e resistente, dificultando a propagação de tensões internas induzidas pelos produtos da RAS.

Essa discussão é particularmente relevante, pois a abordagem integrada adotada neste estudo, combinando ensaios acelerados com modelagem termodinâmica, permitiu uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos concorrentes que atuam na expansão por RAS, revelando que o comportamento expansivo está condicionado não apenas à formação dos produtos da reação, mas também à capacidade do sistema cimentício de resistir às tensões geradas. No entanto, ressalta-se que a expansão não depende exclusivamente da hidratação, mas também da absorção e da microestrutura do material, especialmente do tipo, tamanho e distribuição dos poros, aspectos que não foram avaliados neste trabalho. Cabe ressaltar ainda que a modelagem realizada apresenta diversas simplificações, como a hidratação total do cimento em um tempo infinito e a não consideração do efeito da solução alcalina externa na hidratação deste. Tais simplificações, embora úteis para isolar os efeitos principais da reação, limitam a representação de condições mais complexas e realistas de exposição, devendo, portanto, ser discutidas de forma mais aprofundada em estudos futuros que ampliem a abordagem adotada.

5. Conclusões

Este estudo avaliou a influência da idade de cura inicial no comportamento expansivo de argamassas frente à RAS, integrando ensaios acelerados e modelagem termodinâmica. Com base nos resultados, conclui-se que:

- A cura prolongada das argamassas (30 e 60 dias) não reduziu significativamente o volume de produtos da RAS formados, que se manteve estável entre 47,7 e 48,8 cm³/100g de cimento.
- A principal diferença entre os sistemas foi o desempenho mecânico da matriz, que se mostrou mais resistente e compacta nas idades mais avançadas. Isso ajudou a conter a expansão, mesmo com a formação semelhante de produtos da RAS.
- A predominância da K-Shlykovita em relação à Na-Shlykovita foi observada em todas as idades, evidenciando o papel relevante da solução de poros na formação dos géis expansivos.
- A abordagem adotada mostra que a redução das expansões pode estar associado não apenas à química da reação, mas também à capacidade do material em resistir às tensões geradas. Recomenda-se que trabalhos futuros incluam a caracterização da microestrutura e da absorção dos materiais e o aperfeiçoamento da modelagem, considerando a influência da solução externa na evolução da hidratação.

4. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), à Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC) e à CAPES e CNPq pelo apoio institucional e financeiro.

5. Referências

- [1] Rajabipour, F. et al. (2015) Alkali–silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps, *Cement and Concrete Research*, 76:130-146.
- [2] Saha, A.K. (2018) Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete, *Sustainable Environment Research*, 28(1):25–31.
- [3] Shi, Z. et al. (2019) Synthesis, characterization, and water uptake property of alkali–silica reaction products, *Cement and Concrete Research*, 121:58–71.
- [4] NBR 7215 (2019) Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [5] NBR 15577-4 (2018) Agregados – Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.

- [6] Sacconi, A.; Manzi, S. (2022) The role of microstructure in alkali–silica reaction tests, *Crystals*, 12(5):646.
- [7] Li, B. et al. (2019) Meso-mechanical research on alkali–silica reaction expansion in Pyrex glass and silica sand at different temperatures and curing times, *Construction and Building Materials*, 223:377–393.
- [8] Jin, H., Ghazizadeh, S. & Provis, J.L. (2023) Assessment of the thermodynamics of Na,K-shlykovite as potential alkali–silica reaction products in the $(\text{Na,K})_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ system, *Cement and Concrete Research*, 172:107253.
- [9] Honorio, T. & Wei, W. (2024) Atomic structure of nanocrystalline and amorphous ASR products, *Cement and Concrete Research*, 181:107521.
- [10] GEMS (2025) Gibbs Energy Minimization Software for Geochemical Modeling. Disponível em: <http://gems.web.psi.ch> (acessado em: abril de 2024).
- [11] Lothenbach, B. et al. (2019) Cemdata18: A chemical thermodynamic database for hydrated Portland cements and alkali-activated materials, *Cement and Concrete Research*, 115:472–506.
- [12] Myers, R.J., Bernal, S.A. & Provis, J.L. (2014) A thermodynamic model for C-(N)-A-S-H gel: CNASH_{ss}. Derivation and validation, *Cement and Concrete Research*, 66:27–47.
- [13] Shi, Z.; Lothenbach, B. (2019) The role of calcium on the formation of alkali–silica reaction products, *Cement and Concrete Research*, 126:105898.
- [14] Kulik, D.A., Miron, G.D.; Lothenbach, B. (2022) A structurally-consistent CASH+ sublattice solid solution model for fully hydrated C-S-H phases: Thermodynamic basis, methods, and Ca-Si-H₂O core sub-model, *Cement and Concrete Research*, 151:106585.
- [15] Itambé (2021) Relatórios de ensaio. Disponível em: cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=368&chave=2021-2 (Acessado em: março de 2021).
- [16] Haque, M.I. et al. (2022) A comparative investigation on the effects of nanocellulose from bacteria and plant-based sources for cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, 125:104316.
- [17] NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [18] NBR 7222 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [19] Alasali, M.M. & Malhotra, V.M. (1991) Role of concrete incorporating high volumes of fly ash in controlling expansion due to alkali–aggregate reaction, *ACI Materials Journal*, 88(2).