

EFEITO DA GEOMETRIA DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO NA EXPANSÃO DEVIDO À REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

Langaro, Eloise Aparecida¹; Macioski, Gustavo²; Frare, Andreza³; Medeiros, Marcelo Henrique
Farias⁴

¹ Doutora, Universidade Estadual de Ponta Grossa, ealangaro@uepg.br

² Doutor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, gmacioski@utfpr.edu.br

³ Doutora, Universidade Federal do Paraná, frareandreza@gmail.com

⁴ Doutor, Universidade Federal do Paraná, medeiros.ufpr@gmail.com

Resumo: A reação álcali-sílica (RAS) é um fenômeno deletério que compromete a durabilidade de estruturas de concreto. Este estudo investiga a influência da geometria dos corpos de prova nos resultados de expansão associados à RAS, por meio da comparação entre amostras cilíndricas e prismáticas moldadas com concreto Portland convencional e concreto álcali-ativado. Os ensaios de expansão acelerada seguiram a NBR 15577-6, com leituras periódicas por pinos metálicos embutidos. Os resultados evidenciaram que a geometria afeta significativamente os níveis de expansão observados, sendo os corpos cilíndricos mais suscetíveis à expansão, possivelmente devido à menor lixiviação de álcalis. Observou-se ainda que a forma de moldagem influencia a orientação da fissuração e a retenção de umidade. Os concretos álcali-ativados apresentaram comportamento distinto, com menor sensibilidade à variação geométrica. Os achados reforçam a necessidade de considerar a geometria dos corpos de prova como variável crítica na interpretação de resultados laboratoriais para RAS, contribuindo para a revisão de protocolos normativos e práticas de diagnóstico.

Palavras-chave: Reação álcali agregado, Durabilidade, Diagnóstico, Lixiviação

Abstract: The alkali-silica reaction (ASR) is a deleterious phenomenon that affects the durability of concrete structures. This study investigates the influence of specimen geometry on ASR-induced expansion by comparing cylindrical and prismatic samples cast with conventional Portland cement concrete and alkali-activated concrete. Accelerated expansion tests were conducted according to NBR 15577-6, with periodic deformation readings obtained through embedded metallic studs. The results revealed that specimen geometry significantly influences the expansion behavior, with cylindrical specimens exhibiting higher expansion, likely due to reduced alkali leaching. The molding direction also affected crack propagation and moisture retention. Alkali-activated concretes showed distinct behavior, demonstrating reduced sensitivity to geometry. These findings highlight the importance of considering specimen geometry as a critical variable in ASR testing and support the need to revise normative protocols to improve the reliability of diagnostic procedures.

Keywords: Alkali-aggregate reaction, Durability, Diagnosis, Leaching

1. Introdução

A reação álcali-sílica (RAS) é um processo deletério que ocorre entre sílicas reativas presentes em certos agregados e os hidróxidos alcalinos dissolvidos na solução de poros do concreto. Como produto dessa reação, forma-se um gel higroscópico que, ao se expandir na presença de umidade, induz tensões internas capazes de comprometer a integridade estrutural de elementos de concreto [1].

A forma mais eficaz de prevenir a RAS em obras novas seria evitar o uso de agregados reativos. No entanto, essa premissa é de difícil execução prática, especialmente em regiões onde há limitação de jazidas inertes. Diante disso, diversos ensaios normatizados vêm sendo adotados para prever o comportamento expansivo dos agregados antes da aplicação em obras, como os testes acelerados em barras de argamassa e em prismas de concreto, definidos por normas nacionais e internacionais, como na NBR 15577-5 [2], NBR 15577-6 [3], ASTM C1260 [4], ASTM C1293 [5], CSA A23.2-25A [6], CSA. A23.2-14A-14 [7], entre outras.

Embora tais ensaios sejam amplamente utilizados, ainda existem lacunas críticas associadas à representatividade geométrica dos corpos de prova. A grande maioria dos protocolos normativos adota o uso de corpos prismáticos (75×75×280mm), enquanto outras metodologias complementares, como o Stiffness Damage Test (SDT), Damage Rating Index (DRI) e ensaios de compressão, comumente utilizam corpos cilíndricos (Ø100x200mm) [8], [9]. Essa divergência geométrica pode reduzir a precisão de comparação entre as técnicas de ensaio, comprometer a correlação entre diferentes indicadores de dano e gerar variações significativas nos resultados de expansão, dificultando o diagnóstico integrado da RAS.

Estudos como os de Gao *et al.* [10] e Sinno e Shehata [11], evidenciam que o tamanho do agregado e a geometria dos corpos de prova afetam não apenas o desenvolvimento das tensões internas, mas também a forma de propagação das fissuras. No entanto, o efeito da geometria sobre os resultados dos ensaios normativos permanece pouco explorado e raramente é tratado como variável crítica em protocolos laboratoriais.

Neste contexto, este estudo aprofunda a análise do impacto da geometria dos corpos de prova (prismáticos vs. cilíndricos) nos valores de expansão obtidos em concretos produzidos com agregados potencialmente reativos, utilizando tanto cimento Portland convencional quanto sistemas de ligantes ativados alcalinamente. A variabilidade de agregados também afeta diretamente os resultados da expansão, sendo necessária esta avaliação com diferentes mineralogias para que uma conclusão generalizada possa ser traçada.

Assim, este estudo propõe uma análise sobre a representatividade dos ensaios normatizados e seus impactos na avaliação global do desempenho de concretos frente à RAS, considerando os diferentes formatos dos corpos de prova, a fim de contribuir com evidências para a revisão crítica de metodologias de ensaio e para o aprimoramento das práticas de diagnóstico preventivo em projetos de engenharia.

2. Materiais e métodos

Para a moldagem do concreto convencional (CC) foi utilizado CPV-ARI (massa específica 3,13 g/cm³, área específica Blaine 4,443 cm³/g e equivalente alcalino de 0,66%), enquanto os concretos álcali-ativados (CAA) foram produzidos com escória de alto forno (massa específica 2,85 g/cm³) e cinza de casca de arroz (massa específica 2,02 g/cm³), área específica de 4,361 cm³/g e 9,749 cm³/g, respectivamente e equivalente alcalino de 3,85%. Como agregados, foram utilizados areia natural (previamente testada como inócua) e 2 agregados graúdos reativos diferentes para os testes de expansão. As características físicas dos agregados estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Características físicas dos agregados utilizados

Agregados	Massa específica (g/cm ³)	Absorção (%)	Material <0,075mm (%)
Brita A – Gnaisse	2,60	0,77	0,67
Brita B – Granito	2,73	0,14	0,06
Areia natural	2,69	1,40	3,01

A dosagem e moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com a NBR 15577-6 [3]. Para tanto, foram mantidos os volumes de agregados iguais, relação água/cimento de 0,45 e consumo de cimento de 420 kg/m³. A quantidade de álcalis total para o cimento Portland foi ajustada para 1,25% da massa de cimento, na forma de NaOH dissolvido na água de amassamento. Já para o CAA, manteve-se o equivalente alcalino de 3,85%. O consumo de materiais para os concretos é apresentado na Tabela 2.

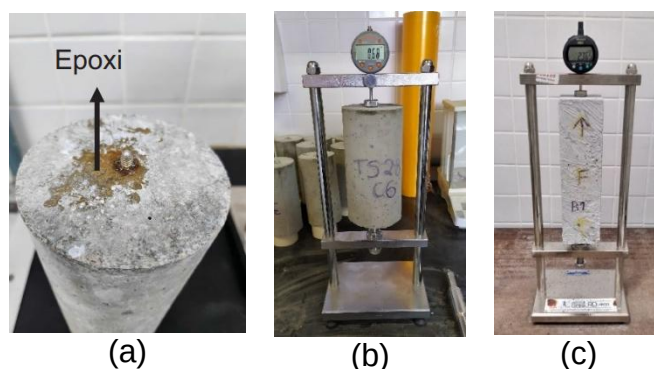
Tabela 2: Consumo de materiais para os concretos (em kg/m³)

Material	Concreto convencional			Concreto álcali-ativado	
	CC1	CC2	CC3	CAA1	CAA2
Cimento	420	420	420	420	420
Areia	706	734	747	622	622
Brita A	1050	-	1056	1168	1168
Brita B	-	1078	-	-	-
Escória	-	-	-	90%	100%
Cinza volante	-	-	-	10%	-
NaOH	3,14	3,14	3,14	5%	5%
Água	189	189	189	189	189

Foram moldados corpos de prova cilíndricos (Ø100x200mm) e prismáticos (75x75x280mm) utilizando o mesmo traço de cada concreto. Nos corpos de prova prismáticos, os pinos foram inseridos antes da moldagem na forma metálica, enquanto os cilíndricos tiveram os pinos fixados no topo durante a moldagem e embutidos com cola epóxi na face oposta após a desmoldagem – como pode ser observado na Figura 1a.

Os procedimentos de cura em temperatura ambiente (22°C e 100% U.R.), armazenamento em câmara úmida à 38°C e medidas de expansão seguiram as prescrições da norma brasileira [3]. As leituras em cada amostra foram realizadas mensalmente até atingir a idade de 365 dias para o CC e 720 dias o CAA, utilizando relógio comparador digital (Mitutoyo) com precisão de 0,001 mm, como apresentado na Figura 1b e 1c, após adequado resfriamento das amostras. O ensaio foi conduzido até os 720 dias para o CAA visto que este sistema é produzido a partir de adições minerais e, portanto, a visualização dos resultados de expansão devido a RAS, com base na literatura existente, pode surgir em idades superiores a 1 ano.

Figura 1: Detalhe do (a) embutimento dos pinos metálicos nas amostras cilíndricas e leituras de expansão em (b) amostras cilíndricas e (c) prismáticas



O número de amostras para cada tipo de agregado e geometria variou de 3 (valor mínimo exigido pela norma brasileira) a 8 amostras, a depender do estudo realizado por Langaro [12] e Macioski [13].

3. Resultados e Discussão

A partir dos resultados de expansão obtidos foi possível observar o mecanismo da reação álcali-sílica ao longo do tempo nas amostras (Figura 2) cilíndricas e prismáticas (Figura 3).

Figura 2: Expansão em amostras cilíndricas

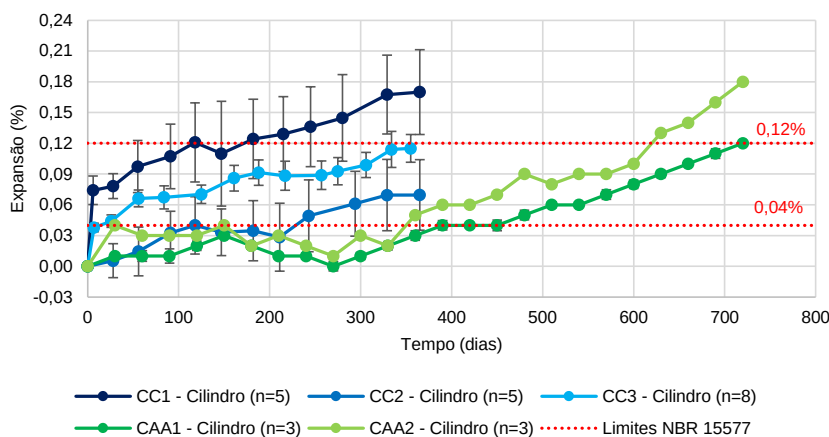
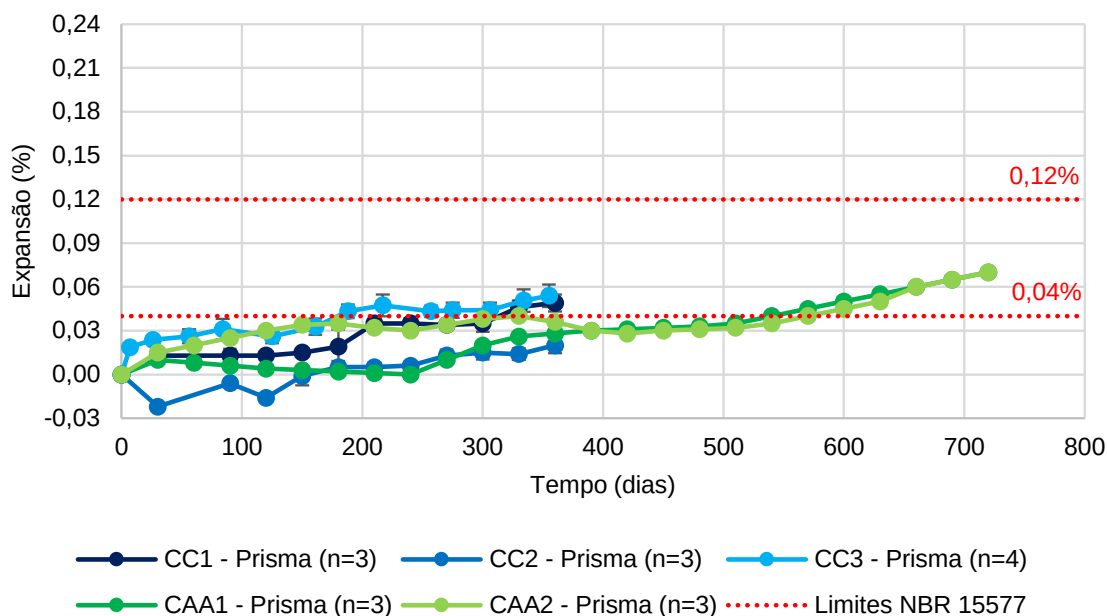


Figura 3: Expansão em amostras prismáticas



Os limites de expansão definidos pela NBR15577 para o ensaio em concreto são representados nos gráficos por linhas vermelhas tracejadas (Abaixo de 0,04% aos 365 dias – agregado potencialmente inócuo grau R0; entre 0,04% e 0,12% aos 365 dias – agregado potencialmente reativo grau R1). Considerando os resultados obtidos para os concretos convencionais (CC) e álcali-ativados (CAA), utilizando as britas A e B de mineralogias diferentes, podem-se traçar algumas observações importantes. Para os CC, os corpos de prova cilíndricos apresentaram expansão superior aos corpos de prova prismáticos, desde as idades iniciais. Isso evidencia que há diferenças significativas na forma como a expansão se propaga dependendo do formato do corpo de prova.

Para o CAA, nos primeiros 12 meses de exposição, os corpos de prova apresentaram comportamento expansivo semelhante para ambas as geometrias. No entanto, após esse período, foi observado um aumento nas expansões dos corpos cilíndricos. Aos 24 meses, o traço CAA2 apresentou uma expansão 157% maior e o traço CAA1, 71% maior em corpos cilíndricos, quando comparados aos prismáticos.

A hipótese de que o CAA apresenta uma cinética de reação expansiva mais lenta em comparação ao cimento Portland e, pode ser atribuída, em parte, à formação de uma microestrutura mais densa e refinada. Embora o presente estudo não tenha realizado análises experimentais específicas, como Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (MIP), Difração de raios X (DRX) ou Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a hipótese encontra-se fundamentada em diversos trabalhos da literatura, os quais indicam que os CAA tendem a desenvolver uma matriz cimentícia mais densa, caracterizada por poros mais finos, menor conectividade capilar e permeabilidade reduzida. Essas características dificultam a mobilidade dos íons envolvidos na RAS [14-17].

Outro fator essencial na mitigação da RAS, nos sistemas à base de CAA, é a virtual ausência de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ao contrário do cimento Portland, cuja hidratação gera significativa quantidade de hidróxidos de cálcio, que aumentam o pH dos poros e fornecem cálcio para a formação de géis expansivos, os CAA formam predominantemente gel C-(N)-A-S-H, com baixo teor de cálcio livre. Essa característica limita a disponibilidade de íons Ca^{2+} e reduz o potencial de formação de produtos expansivos ricos em cálcio [18], [19].

Portanto, mesmo que ocorra a RAS neste tipo de material, os efeitos macroscópicos, como a expansão volumétrica, demoram mais a se manifestar, fazendo com que a fase mais intensa de expansão aconteça em estágios mais avançados da exposição. Assim, a diferença entre as geometrias, torna-se mais evidente apenas a partir do segundo ano de ensaio.

Outro ponto importante a se destacar é o uso dos dois agregados diferentes. Cabe salientar, neste aspecto, que os agregados utilizados possuem diferentes graus de reatividade e a sua classificação é distinta para amostras cilíndricas e prismáticas. Isso evidencia a importância de adotar limites diferentes de classificação a depender da geometria utilizada. As correlações lineares entre os resultados de expansão para as amostras (independente e por tipo de concreto) são apresentadas nas Figuras 4 e 5. Os ajustes lineares podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3: Ajuste linear dos dados

	Concreto	Equação	R ²
Independente	CC1	$y=0,2314x$	0,934
	CC2	$y=0,1678x$	0,331
	CC3	$y=0,4573x$	0,991
	CAA1	$y=0,6154x$	0,957
	CAA2	$y=0,4448x$	0,858
Tipo	CC	$y=0,2847x$	0,829
	CAA	$y=0,499x$	0,880

Figura 4: Correlação entre geometrias (independentes)

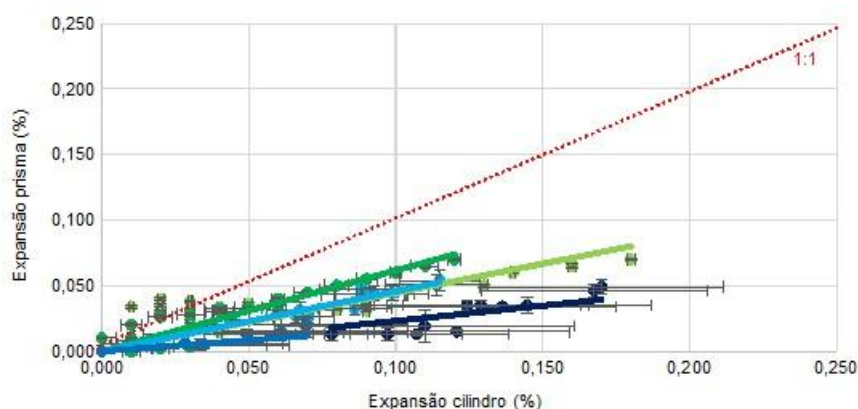
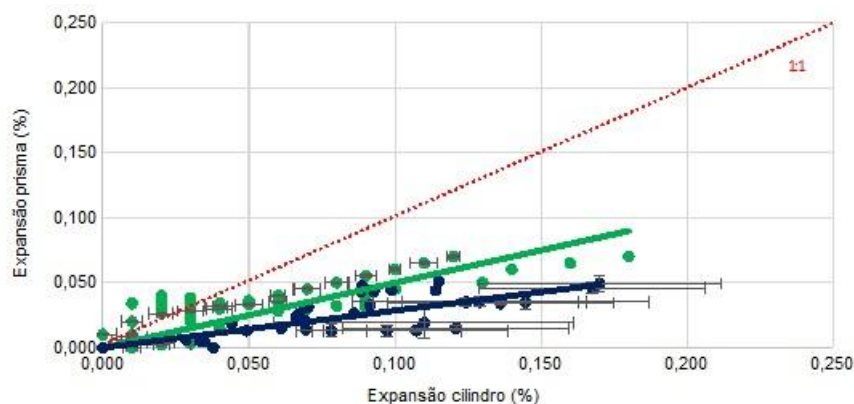


Figura 5: Correlação entre geometrias (tipo de concreto)



O aumento de 3,51 vezes para o CC e 2 vezes para o CAA, observado na expansão das amostras cilíndricas em relação as prismáticas, pode estar relacionado à lixiviação de álcalis das amostras e à orientação da concretagem. Em corpos de prova prismáticos, as formas são posicionadas horizontalmente, e as camadas de concreto são lançadas nessa mesma orientação. Por outro lado, nos corpos de prova cilíndricos, a moldagem é realizada na posição vertical, assim como o lançamento das camadas. Expansões superiores em amostras cilíndricas quando comparadas a amostras prismáticas já foram observadas para diferentes condições: aumento de 40% em câmara úmida, 100% quando submersa e 120% nas amostras seladas [20]. Já a lixiviação exerce influência nas variações observadas para as diferentes geometrias devido à solubilização dos álcalis pela umidade condensada na superfície das amostras [21].

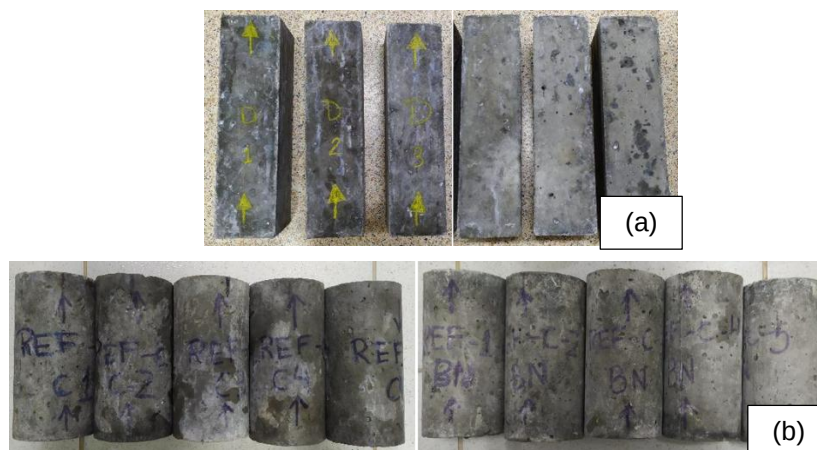
Sinno e Shehata [11] demonstraram, em concretos de diferentes formatos contendo dois tipos de agregados e diferentes adições minerais, que prismas tiveram o dobro de lixiviação de álcalis quando comparado a cilindros, associado à redução entre 15% e 20% na expansão. Os autores observaram que prismas tenderam a lixiviar mais álcalis do que os cilindros, mascarando assim os resultados de expansão. A diferença na lixiviação dos álcalis nas amostras de referência (ou seja, sem adições minerais) em prismas chegou a valores de até 41% em relação aos cilindros. Assim, a lixiviação aumenta com a redução da seção transversal das amostras [22], [23].

Quanto a lixiviação alcalina, se pode observar que de fato os corpos de prova prismáticos apresentaram indícios de lixiviação, visto que na análise visual das amostras foi possível observar tal diferença (Figura 6).

Como os agregados utilizados neste trabalho também apresentam baixa reatividade, o impacto da lixiviação pode ter sido maior, e a diferença na expansão em ambos os corpos de prova (cilíndricos e prismáticos) tenderiam a apresentar resultados mais distantes, fato este constatado também por Sinno e Shehata [11]. Nos corpos de prova prismáticos, uma quantidade importante de álcalis pode ter sido lixiviada para fora do concreto devido aos efeitos de difusão e, interrompido ou reduzido prematuramente a expansão dos corpos de prova nos ensaios. Entretanto, são

necessários mais estudos para avaliar essa condição, pois a lixiviação alcalina não foi mensurada, apesar de observada.

Figura 6: Fotos dos corpos de prova CC1 e CC2 (a) prismáticos e (b) cilíndricos

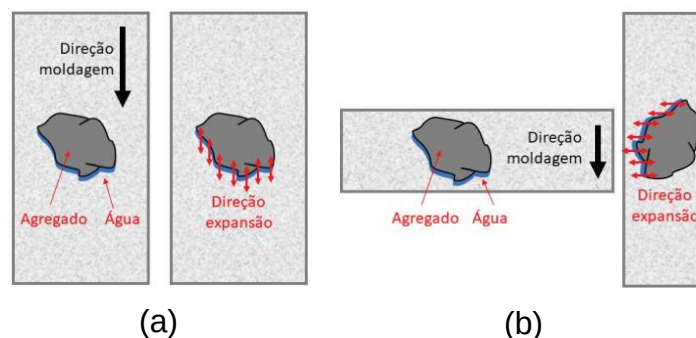


Embora tenham sido identificados indícios visuais de lixiviação alcalina nas superfícies dos corpos de prova prismáticos — como o esbranquiçamento superficial e a formação de depósitos salinos —, é importante destacar que tais observações não foram acompanhadas por análises químicas quantitativas. Assim, os efeitos atribuídos à lixiviação neste estudo baseiam-se exclusivamente em avaliação visual qualitativa, não havendo medição direta da concentração de álcalis lixiviados ou da variação de massa. Esta limitação metodológica reforça a necessidade de investigações complementares que incorporem ensaios específicos para quantificação da lixiviação e sua correlação com os níveis de expansão observados.

Sabe-se que a fissuração durante a RAS ocorre preferencialmente na direção perpendicular ao lançamento do concreto no molde, devido ao acúmulo de água sob os agregados. Devido à anisotropia do concreto, gerada durante o processo de moldagem e vibração, existe uma diferença nos resultados das amostras prismáticas moldadas na horizontal, e amostras cilíndricas moldadas na vertical [24]. Esse fato é ilustrado na Figura 7, na qual são indicadas a direção da moldagem e a direção em que ocorre a expansão devido ao acúmulo de água.

Diab, Soliman, Nokken [25] observaram aos 28 dias que amostras cilíndricas contendo sílica ativa apresentam expansões até 43% superiores às amostras prismáticas, enquanto aos 365 dias esta proporção foi reduzida para 10%. Os autores discutem possíveis efeitos da direção da moldagem e taxa de lixiviação diferentes para as duas geometrias. Outro ponto observado pelos autores [25] foi o ganho de massa superior nos corpos cilíndricos em comparação aos prismáticos, seguindo a tendência dos resultados de expansão.

Figura 7: Efeito de acúmulo de água em amostras (a) cilíndricas e (b) prismáticas



Smaoui *et al.* [26] comprovaram que a expansão da RAS é afetada pela geometria, direção de lançamento do concreto e tipo de adensamento, sendo que a variação da geometria do concreto (prisma para cilindro), associada ao adensamento em diferentes direções, gerou aumento de 1,63 a 2,13 vezes nos resultados de expansão de cilindros avaliados pelos autores.

Cabe ressaltar que diversos estudos em concreto afetado por RAS são realizados apenas em amostras cilíndricas [8], [9], [27 - 29], todavia as normativas utilizam amostras prismáticas para avaliar o potencial reativo de agregados, e os limites impostos nas normas atendem a este formato. Destaca-se, portanto, a necessidade de validação dos limites para diferentes geometrias, além do controle da lixiviação das amostras durante a realização de ensaios para avaliação da RAS.

4. Conclusões

Os resultados deste estudo evidenciam que a geometria dos corpos de prova influencia de forma significativa os níveis de expansão obtidos em ensaios acelerados para avaliação da reação álcali-sílica. Os corpos cilíndricos apresentaram maiores valores de expansão em comparação aos prismáticos, comportamento atribuído à menor lixiviação de álcalis e à orientação do molde durante a concretagem. Esse efeito foi observado mesmo para diferentes tipos de agregados potencialmente reativos.

No CC, os corpos cilíndricos apresentaram maior expansão desde os primeiros meses. Já no CAA, essa diferença entre geometrias só se tornou evidente após 1 ano de ensaio, devido a microestrutura mais densa e a cinética mais lenta da reação deletéria nesse tipo de ligante.

Apesar das observações visuais indicarem lixiviação nas amostras prismáticas, o fenômeno não foi quantificado, o que limita conclusões definitivas. Reforça-se a necessidade de estudos complementares que avaliem quantitativamente a lixiviação de álcalis e explorem diferentes formatos e dimensões de corpos de prova, com o objetivo de aprimorar os métodos de diagnóstico da RAS e fornecer subsídios técnicos para a revisão das normas vigentes e limites de expansão impostos.

5. Agradecimentos

Os autores expressam a sua gratidão às agências brasileiras CNPq, CAPES e Fundação Araucária pela bolsa e apoio financeiro, à Universidade Federal do Paraná, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC), ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) e ao grupo de pesquisa de Patologia e Recuperação das Construções (PRC).

Referências

- [1] Fournier, B.; Bérubé, M. A. (2000) Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27:167–191.
- [2] NBR 15577-5 (2018) Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [3] NBR 15577-6 (2018) Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [4] ASTM C1260 (2014) Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). American Society for Testing and Materials-ASTM, Pennsylvania, Estados Unidos.
- [5] ASTM C1293 (2018) Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali Silica Reaction. American Society for Testing and Materials – ASTM, Pennsylvania, Estados Unidos.
- [6] CSA A23.2-25A (2014) Test Method for Detection of Alkali-Silica Reactive Aggregate by Accelerated Expansion of Mortar Bars, Canadian Standards Association – CSA, Toronto, Canada.
- [7] CSA A23.2-14A (2014) Potential Expansivity of Aggregates; Procedure for Length Change Due to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Prisms, Canadian Standards Association - CSA, Toronto, Canada.
- [8] Sanchez, L. F. M.; Drimalas, T.; Fournier, B. (2000) Assessing condition of concrete affected by internal swelling reactions (ISR) through the Damage Rating Index (DRI). *Cement*, 1–2:100001.
- [9] Sanchez, L. F. M.; Fournier, B.; Jolin, M.; Bastien, J. (2014) Evaluation of the stiffness damage test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to ASR: Test loading and output responses for concretes incorporating fine or coarse reactive aggregates, *Cement and Concrete Research*, 56:213–229.
- [10] Gao, X. X.; Cyr, M.; Multon, S.; Sellier, A. (2013) A comparison of methods for chemical assessment of reactive silica in concrete aggregates by selective dissolution, *Cement and Concrete Composites*, 37:82–94.

- [11] Sinno, N.; Shehata, M. H. (2019) Effect of sample geometry and aggregate type on expansion due to alkali-silica reaction, *Construction and Building Materials*, 209:738–747.
- [12] Langaro, E. A. (2023) *Estudo de diagnóstico e inibição da reação álcali-sílica utilizando cinza volante e proteção de superfície com silicatos*. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- [13] Macioski, G. (2023) *Aplicação de sensores em fibra ótica com rede de Bragg na avaliação da reação álcali-sílica*. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- [14] Wang, W.; Noguchi, T.; Maruyama, I. (2022) Mechanism understanding of alkali-silica reaction in alkali-activated materials system. *Cement and Concrete Research*, 156:106768.
- [15] Xing, Y.; Wang, B.; Yu, H. (2025) Effect of alkali-activation conditions on microstructure and heavy metal solidification of alkali-activated converter steel slag and municipal solid waste incineration fly ash. *Environmental Research*, 267:120654.
- [16] Aziz, I.H.; Abdullah, M.M.A.B.; Mohd Salleh, M.A.A.; Yoriya, S.; Chaiprapa, J.; Rojviriyaya, C.; Li, L.Y. (2020) Microstructure and porosity evolution of alkali activated slag at various heating temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6):15894–15907.
- [17] Nguyen, T.N.; Phung, Q.T.; Yu, Z.; Frederickx, L.; Jacques, D.; Sakellariou, D.; Dauzeres, A.; Elsen, J.; Pontikes, Y. (2022) Alteration in molecular structure of alkali activated slag with various water to binder ratios under accelerated carbonation. *Scientific Reports*, 12:5524.
- [18] Shi, Z.; Shi, C.; Zhao, R.; Wan, S. (2015) Comparação de reações álcali-sílica em escória ativada por álcali e argamassas de cimento Portland. *Materiais e Estruturas*, 48:743–751.
- [19] Wang, W.; Noguchi, T. (2020) Alkali-silica reaction (ASR) in the alkali-activated cement (AAC) system: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 252:119105.
- [20] Multon, S.; Barin, F.X.; Godart, B.; Toutlemonde, F. (2008) Estimation of the Residual Expansion of Concrete Affected by Alkali Silica Reaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20:54–62.
- [21] Rivard, P.; Bérubé, M.; Ollivier, J.; Ballivy, G. (2003) Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali–aggregate reactivity. *Cement and Concrete Research*, 33:1147–1153.
- [22] Costa, U.; Mangialardi, T.; Paolini, A. E. (2017) Minimizing alkali leaching in the concrete prism expansion test at 38°C. *Construction and Building Materials*, 146:547–554.
- [23] Lindgård, J.; Thomas, M. D. A.; Sellevold, E. J.; Pedersen, B.; Andiç-Çakir, Ö.; Justnes, H.; Rønning, T. F. (2013) Alkali–silica reaction (ASR) - performance

- testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion. *Cement and Concrete Research*, 53:68-90.
- [24] Larive, C.; Laplaud, A.; Coussy, O. (2000) The role of water in alkali-silica reaction. In: Proceedings of the eleventh International Conference on AAR, Québec City.
- [25] Diab, S. H.; Soliman, A. M.; Nokken, M. R. (2021) Effect of triggering material, size, and casting direction on ASR expansion of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 269:121323.
- [26] Smaoui, N.; Bérubé, M.-A.; Fournier, B.; Bissonnette, B. (2004) Influence of Specimen Geometry, Orientation of Casting Plane, and Mode of Concrete Consolidation on Expansion Due to ASR. *Cement, Concrete, and Aggregates*, 26:1–13.
- [27] Sanchez, L. F. M.; Fournier, B.; Jolin, M.; Bastien, J. (2015) Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to alkali-silica reaction (ASR): Input parameters and variability of the test responses. *Construction and Building Materials*, 77:20–32.
- [28] Frare, A.; Langaro, E. A.; De Souza, D. J.; Medeiros, M. H. F. (2022) Revisão sistemática sobre reação álcali-agregado: panorama comparativo dos estudos realizados no Canadá e no Brasil. *Revista Alconpat*, 13:1–27.
- [29] Macioski, G.; Sanchez, L. F. M.; Bao, X.; Medeiros, M. H. F. (2021) Monitoring alkali aggregate reaction (AAR) induced expansion through the use of fiber Bragg grating sensors. In: 16Th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – ICAAR 2021, Lisboa, Portugal.