CAPÍTULO 19 · Parte II · Materiais
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/w7zmkx58
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/v72zy876

INFLUÊNCIA DO SILICATO DE ETILA EM BARRAS DE ARGAMASSA NA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

Bárbara Rebonato Carrijo[1]*, Leticia Oliveira Almanso[1], Eloise Aparecida Langaro[1], Andressa Gobbi[2], Giovana Costa Réus[2]
*Autor de contato: ba.r.carrijo@gmail.com

[1] Universidade Estadual de Ponta Grossa
[2] Universidade Federal do Paraná

RESUMO

A reação álcali-sílica (RAS) é uma manifestação patológica que compromete a durabilidade de estruturas de concreto, sendo a expansão um de seus principais efeitos deletérios. Neste estudo, avaliou-se a influência da adição de silicato de etila na mitigação da RAS em barras de argamassa, por meio da análise da expansão e da variação de massa. Foram moldadas barras de argamassa contendo agregado potencialmente reativo, com incorporação de silicato de etila nos teores de 5% e 10%, além de um traço de referência, sendo os ensaios conduzidos conforme o método acelerado de barras de argamassa. Os resultados indicaram que a incorporação de silicato de etila em teores iguais ou superiores a 5% promoveu redução significativa da expansão, associada a menores variações de massa, quando comparada à argamassa de referência. Observou-se ainda que o teor de 10% apresentou desempenho compatível com os limites normativos de expansão, evidenciando o potencial do silicato de etila como agente mitigador da reação álcali-agregado.
Palavras-chave: reação álcali-agregado; silicato de etila; expansão; variação de massa.

ABSTRACT

The alkali–silica reaction (ASR) is a pathological phenomenon that compromises the durability of concrete structures, with expansion being one of its main deleterious effects. In this study, the influence of ethyl silicate addition on the mitigation of ASR in mortar bars was evaluated through the analysis of expansion and mass variation. Mortar bars containing potentially reactive aggregate were cast, with the incorporation of ethyl silicate at contents of 5% and 10%, in addition to a reference mix, and the tests were conducted in accordance with the accelerated mortar bar method. The results indicated that the incorporation of ethyl silicate at contents equal to or greater than 5% promoted a significant reduction in expansion, associated with lower mass variations, when compared to the reference mortar. It was also observed that the 10% content presented performance compatible with normative expansion limits, demonstrating the potential of ethyl silicate as a mitigating agent for the alkali–aggregate reaction.
Keywords: alkali–aggregate reaction; ethyl silicate; expansion; mass variation.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto está diretamente associada à estabilidade química de seus constituintes ao longo do tempo. Dentre os mecanismos de deterioração de origem interna, a reação álcali-agregado (RAA) destaca-se como uma das manifestações patológicas que pode comprometer o desempenho estrutural mesmo na ausência de agentes externos agressivos. A reação álcali-sílica (RAS) é um tipo de RAA, na qual ocorre um processo químico entre formas reativas de sílica presentes nos agregados e os componentes alcalinos dissolvidos na solução dos poros do concreto, na presença de umidade (Fournier; Bérube, 2000; Mehta; Monteiro, 2008). Como consequência dessa reação, formam-se produtos expansivos que provocam aumento das tensões internas, podendo resultar em fissuração, deslocamentos e redução da durabilidade do concreto (Mehta; Monteiro, 2008). Esses danos podem se manifestar ao longo do tempo e, em determinados casos, comprometer a eficiência estrutural dos elementos afetados.

Entre os métodos de avaliação do potencial reativo dos agregados, o ensaio acelerado de barras de argamassa, normalizado no Brasil pela NBR 15577-4 (ABNT, 2018), é amplamente empregado como ensaio preliminar, por permitir uma análise do comportamento expansivo em curto período de tempo.

Nos últimos anos, diferentes estratégias de mitigação da RAS têm sido investigadas, incluindo o uso de materiais pozolânicos, estes já consolidados na literatura, além do uso de aditivos químicos e tratamentos superficiais voltados à redução da permeabilidade do concreto (Gomes, 2008; Shafaatian *et al.,* 2013; Magri; Berton, 2016; Saha *et al.,* 2018; Langaro 2023). Nesse contexto, o silicato de etila tem despertado interesse devido à sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio (Sandrolini *et al.*, 2012) presente na matriz cimentícia, promovendo a formação de produtos do tipo silicato de cálcio hidratado e contribuindo para o bloqueio de poros e microfissuras (Silva; Liborio, 2005; Langaro, 2023). Tal comportamento pode limitar a penetração de água e a mobilidade iônica, interferindo diretamente na cinética da reação álcali-agregado.

Embora existam indícios do potencial do silicato de etila como agente mitigador da RAS (Brown, 2009; Langaro, 2023), ainda são escassos os estudos que avaliem de forma direta sua influência no comportamento expansivo de barras de argamassa submetidas ao ensaio acelerado, especialmente quando associada à análise simultânea da variação de massa.

Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo avaliar a influência da adição de dois tipos de silicato de etila (TS40 e TS28) na mitigação da reação álcali-agregado em barras de argamassa, por meio da análise da expansão e da variação de massa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados foram cimento CP-V de alta resistência inicial (ARI), agregado potencialmente reativo (Tabela 1) e silicato de etila (TEOS) na forma de TS28 e TS40 (Tabela 2). O agregado foi obtido da região de Curitiba e foi coletado o resíduo de processamento de britas (popularmente conhecido como pó de pedra). Para os ensaios ele foi peneirado e utilizado nas

frações requeridas da NBR 15577-4 (ABNT, 2018b), caracterizado conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021a) e NBR 16973 (2021b).

Tabela 1 – Características do agregado.

Tipo de agregado	Massa específica (g/cm³)	Absorção (%)	Teor de material pulverulento (%)
Gnaisse	2,59	1,0	0,34

Fonte: os autores.

Tabela 2 – Características físico-químicas dos silicato de etila.

Tipo de silicato	Composição química	Aspecto	Densidade (g/cm³) 20 °C	% SiO_2	Viscosidade a 25 °C (cps)	Índice de refração a 25 °C	Proporção de sólidos[1] (%)
Siliethyl TS28	Orto silicato de tetraetila	Claro	0,93 a 0,94	Mín. 28	Aprox. 1	1,381 a 1,383	10,91
Siliethyl TS40	Poli etóxi siloxano	Claro	1,055 a 1,065	Mín. 40	Aprox. 5	1,393 a 1,398	53,13

Fonte: Adaptado de Datiquim (2019) e os autores[1].

2.2 Métodos

As barras de argamassa foram moldadas conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 15577-4 (ABNT, 2018), com traço de 1: 2,25, relação água/cimento de 0,47, sendo 440 g de cimento (CP V ARI), 206,8 g de água e 990 g de agregado miúdo. A preparação das argamassas foi realizada em misturador mecânico de eixo vertical. O TEOS foi adicionado a água de amassamento, quando aplicável, respeitando os teores de 5% e 10% em relação à massa de cimento.

Figura 2 – Procedimento de mistura conforme NBR 15577-4 (ABNT, 2018b).



Fonte: os autores.

A argamassa fresca foi lançada em moldes prismáticos metálicos com dimensões de 25 × 25 × 280 mm. As barras de argamassa permaneceram nos moldes por 24 ± 2 horas, armazenadas em câmara úmida com temperatura controlada (aproximadamente 30 °C). Após esse período, procedeu-se à desmoldagem e à imersão das barras em água a 80 °C, onde permaneceram por 24 horas, até a realização da leitura inicial de comprimento e da pesagem, utilizadas como referência para o

cálculo da expansão e da variação de massa ao longo do ensaio. Em seguida, as barras de argamassa foram imersas em solução de hidróxido de sódio (NaOH) com concentração de 1 N, mantida à temperatura constante de 80 °C, em recipiente apropriado e fechado, garantindo condições homogêneas de ensaio. As barras permaneceram completamente submersas durante todo o período de exposição (Figura 2).

Figura 2 – Barras de argamassa moldadas, imersas no tanque de RAA e relógio comparador utilizado para verificação da expansão.



Fonte: os autores.

O ensaio acelerado de barras de argamassa foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 15577-4 (ABNT, 2018), método equivalente ao ASTM C1260, com o objetivo de avaliar a expansão associada à reação álcali-agregado. Paralelamente, a variação de massa das barras de argamassa foi monitorada ao longo do ensaio, visando à avaliação do ganho de massa associado à absorção da solução alcalina. As pesagens foram realizadas em balança eletrônica de precisão, sendo efetuadas antes da imersão das barras na solução de hidróxido de sódio (NaOH), valor adotado como massa inicial para o cálculo da variação de massa ao longo do ensaio.

As medições de expansão e variação de massa foram realizadas nas idades de 16 e 30 dias (conforme requisito da NBR 15577-4), com leituras intermediárias, sempre aproximadamente no mesmo horário, de modo a minimizar variações associadas à temperatura. A expansão longitudinal foi determinada como a variação relativa do comprimento em relação à leitura inicial, sendo os resultados expressos em porcentagem. Para cada traço, os valores apresentados correspondem à média das leituras das três barras ensaiadas.

Os resultados de expansão foram analisados de forma comparativa entre a argamassa de referência e aquelas com incorporação de silicato de etila, sendo também confrontados com os limites normativos estabelecidos pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018a) para a classificação do potencial reativo do agregado.

Durante o período de exposição à solução alcalina, as barras foram retiradas do meio de imersão nos mesmos instantes das leituras de expansão para a realização das pesagens. Antes de cada medição, as superfícies dos corpos de prova foram secas superficialmente com pano absorvente, de forma a remover o excesso de solução e evitar interferências nos valores de massa.

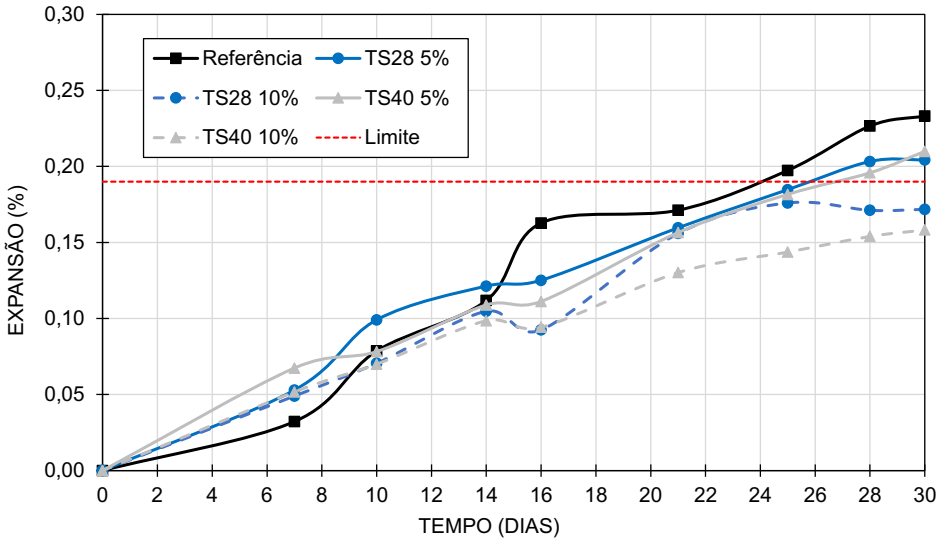
A variação de massa foi calculada pela diferença entre a massa medida em cada idade e a massa

inicial, sendo expressa de forma relativa em porcentagem. Os valores apresentados correspondem à média das três barras ensaiadas para cada traço analisado. A análise da variação de massa foi empregada como parâmetro complementar à expansão, permitindo correlacionar o comportamento expansivo das barras com o grau de absorção da solução alcalina e contribuir para a interpretação do efeito do silicato de etila na mitigação da reação álcali-agregado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a evolução da expansão média das barras de argamassa ao longo do ensaio acelerado, para o traço de referência e para as argamassas com incorporação de silicato de etila nos teores de 5% e 10%. Observa-se que a argamassa de referência apresentou comportamento expansivo crescente ao longo do período de exposição à solução alcalina, atingindo valores superiores aos limites estabelecidos pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018a) para a classificação de agregados potencialmente reativos, e superiores as barras de argamassa contendo o TEOS.

Figura 3 – Expansão média das barras de argamassa ao longo do tempo.



Fonte: os autores.

A incorporação de silicato de etila promoveu redução significativa da expansão das barras de argamassa quando comparada ao traço de referência. Para o teor de 5%, verificou-se diminuição 12,4% e 10% da taxa de expansão, para as barras com TS28 e TS40 respectivamente, ao final do ensaio, indicando interferência do aditivo na cinética da reação álcali-agregado. Esse efeito tornou-se ainda mais evidente para o teor de 10%, cujos valores de expansão se mantiveram abaixo do limite normativo estabelecido para o ensaio acelerado, reduzindo 26,3% (TS28) e 32,13% (TS40), aos 30 dias de análise.

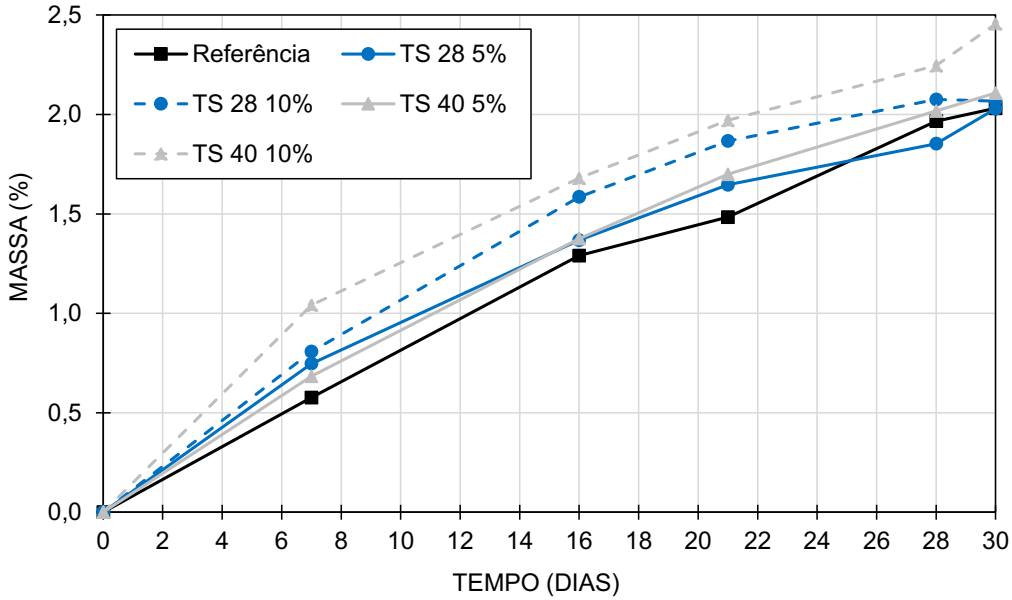
Esse comportamento sugere que o silicato de etila pode contribuir para a mitigação da reação álcali-sílica, possivelmente por limitar a disponibilidade de água e de íons hidroxila no interior da matriz cimentícia, fatores essenciais para o desenvolvimento da reação expansiva. Brown (2009) propôs que o TEOS pode ser utilizado como fonte de sílica em sistemas cimentícios e que seu mecanismo de reação, baseado na hidrólise, consome íons hidroxila da solução de poros, reduzindo a alcalinidade disponível para a reação álcali-sílica. Além disso, o TEOS pode reagir com o $Ca(OH)_2$ presente no sistema, formando C–S–H. Sandrolini *et al.* (2012) demonstraram a ocorrência de

reação pozolânica entre o silicato de etila e a cal hidratada, resultando na formação de C–S–H. Resultados semelhantes foram reportados por Pigino *et al.* (2012), Guo *et al.* (2018) e Langaro (2023), quando o silicato de etila foi aplicado como tratamento de superfície em concretos.

A reação do TEOS (Cihlar, 1993; Brown, 2008; Sandrolini *et al.,* 2012) ocorre em duas etapas principais. A primeira é chamada de hidrólise, na qual os grupos etóxi são progressivamente substituídos por grupos hidroxila, levando à formação de silanóis, frequentemente representadas como ácido ortossilícico ($Si(OH)_4$). Após a hidrólise, ocorre a polimerização, caracterizada por reações de condensação entre grupos silanol, resultando na formação de uma rede tridimensional de sílica gel. Nesse processo, o pH exerce forte influência sobre a cinética e o mecanismo das reações (Cihlar, 1993). Em meio alcalino, a hidrólise ocorre rapidamente, com consumo de íons hidroxila da solução de poros, o que pode reduzir a alcalinidade e, consequentemente, limitar a dissolução da sílica reativa do agregado e a mobilidade iônica no sistema. No caso do ensaio, além da alcalinidade intrínseca da argamassa, o ambiente é fortemente alcalino devido à presença de solução de NaOH (1 M). A elevada disponibilidade de íons Na^+ pode acelerar a dissolução da sílica formada a partir do TEOS e da sílica do agregado potencialmente reativo, além de alterar a estrutura do gel de sílica formado e modificar a distribuição de poros da argamassa (Wang *et al.,* 2020).

A Figura 4 apresenta a variação de massa das barras de argamassa ao longo do ensaio acelerado. Todas as argamassas apresentaram aumento progressivo de massa ao longo do tempo, associado à absorção da solução alcalina. A análise conjunta dos resultados de expansão e variação de massa não evidencia uma relação direta entre a absorção da solução alcalina e o comportamento expansivo das barras de argamassa, uma vez que as argamassas que apresentaram menores valores de expansão foram justamente aquelas que exibiram maiores ganhos de massa ao longo do ensaio. Esse comportamento indica que, neste sistema, a quantidade de solução absorvida não é o fator determinante para a expansão observada.

Figura 4 – Variação de massa das barras de argamassa ao longo do tempo.



Fonte: os autores.

Diferentemente do efeito de um tratamento de superfície, a incorporação interna do TEOS não limita o acesso da solução de NaOH ao interior da argamassa. No entanto, com o desenvolvimento

das reações, a presença do TEOS pode contribuir para a redução da mobilidade iônica, bem como para a alteração da natureza dos produtos formados, incluindo o gel associado à reação álcali-sílica e os produtos de hidratação da matriz cimentícia. Essas modificações podem resultar em uma microestrutura mais refinada e em géis menos propensos à expansão, mesmo na presença de elevada absorção de solução alcalina. Além disso, tais efeitos estão diretamente relacionados à quantidade de TEOS disponível no sistema, o que explica a ausência de uma correlação direta entre variação de massa e expansão neste caso.

4. CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho foi avaliar a adição de dois diferentes tipos de silicato de etila (TS40 e TS28) na mitigação da reação álcali-agregado em barras de argamassa.

Os resultados obtidos indicaram que a incorporação de silicato de etila promoveu uma redução significativa da expansão das barras submetidas ao ensaio acelerado de reação álcali-agregado, em comparação com o traço de referência. Observou-se que o aumento do teor de silicato de etila resultou em melhor desempenho na mitigação da expansão, sendo o teor de 10% o mais eficaz entre as dosagens avaliadas, independentemente do tipo de silicato de etila utilizado.

A análise da variação de massa mostrou que não houve correlação direta entre a absorção da solução alcalina e o comportamento expansivo das argamassas, indicando que a redução da expansão não está associada à limitação do ingresso da solução no material.

Esses resultados sugerem que a incorporação interna do TEOS, associada à elevada alcalinidade do ensaio, pode alterar a cinética da reação álcali-sílica, influenciar a dissolução da sílica reativa do agregado, bem como os processos de hidrólise e polimerização do silicato de etila. Adicionalmente, tais alterações podem contribuir para a redução da mobilidade iônica e para a modificação da natureza dos produtos formados, resultando em uma menor propensão à expansão associada à reação álcali-sílica.

Quanto à aplicabilidade, os resultados indicam que o silicato de etila possui potencial como estratégia complementar de mitigação da reação álcali-sílica, especialmente em situações com uso inevitável de agregados reativos. Em termos práticos, sua aplicação mostra-se promissora em estruturas como fundações, barragens, pavimentos e obras hidráulicas, nas quais a durabilidade frente à RAS é crítica. Ressalta-se, contudo, a necessidade de validação em concreto e em escala real, incluindo avaliação de desempenho a longo prazo e viabilidade técnico-econômica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Paraná, à Universidade Estadual de Ponta Grossa, ao Laboratório de Materiais de Construção e ao Laboratório Multiusuário (LABMU) pelo apoio prestado no desenvolvimento dos ensaios. Agradecem, ainda, à empresa Datiquim pela disponibilização dos produtos utilizados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1: **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**. Rio de Janeiro, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-4: **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 4: Método acelerado para determinação da expansão em barras de argamassa.** Rio de Janeiro, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: **Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16973: **Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 m por lavagem.** Rio de Janeiro, 2021b.

BROWN, P. W. **Pore reducing technology for concrete.** United States Patent Application US 2008/0163797 A1. Depósito: 14 jun. 2006. Concessão: 10 jul. 2008.

BROWN, P. W. **Methods of reducing hydroxyl ions in concrete pore solutions.** United States Patent US 7,608,143 B2. Depósito: 21 jun. 2005. Concessão: 27 out. 2009.

CIHLÁŘ, J. **Hydrolysis and polycondensation of ethyl silicates: 1. Effect of pH and catalyst on on the hydrolysis and polycondensation of tetraethoxysilane (TEOS).** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 70. n. 3, p. 239-251, 1993.

DATIQUIM. Catálogo TS28 e TS40 – Hergrand. São Paulo, 2019.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M.-A. **Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications.** Canadian Journal of Civil Engineering, v. 27, n. 2, p. 167–191, 2000.

GOMES, E. A. O. **Recuperação estrutural de blocos de fundação afetados pela reação álcali-agregado - a experiência do Recife**. 2008. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

GUO, Z.; HOU, P.; HUANG, S.; XIE, N.; CHENG, X.; SINGH, L. P.; VALERIYA, S.; VIKTORIYA, N. **Surface Treatment of concrete with tetraethil orthosilicate, Na2SiO3 and Silane: Comparasion of their effects on durability.** Ceramics-Silikáty, v. 62, n. 4, p. 332–341, 2018.

ITAMBÉ. Relatórios de ensaio – Cimento CP V-ARI. Disponível em: https://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=371. Acesso em: abr. 2025.

LANGARO, E. A. **Estudo de diagnóstico e inibição da reação álcali-sílica utilizando cinza volante e proteção de superfície com silicatos**. 2023. 196 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

MAGRI, C. H. R.; BERTON, R. **Efeito da redução do teor de cimento no desempenho de matrizes e compósitos cimentícios**. 2016. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

PIGINO, B.; LEEMANN, A.; FRANZONI, E.; LURA, P. **Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part II: Characteristics and performance.** Cement and Concrete Composites, v. 34, n. 3, p. 313–321, 2012.

SAHA, A. K.; KHAN, M. N.; SARKER, P. K.; SHAIKH, F. A.; PRAMANIK, A. **The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: A critical review.** Construction and Building Materials, Elsevier Ltd, v. 171, p. 743– 758, 2018.

SANDROLINI, F.; FRANZONI, E.; PIGINO, B. **Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part I: Pozzolanic effect of ethyl silicate.** Cement and Concrete Composi**tes**, v. 34, n. 3, p. 306–312, 2012.

SHAFAATIAN, S. M. H.; AKHAVAN, A.; MARAGHECHI, H.; RAJABIPOUR, F. **How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)?.** Cement and Concrete Composites, v. 37, p. 143–153, 2013.

SILVA, F. G.; LIBORIO, J. B. L. **Durabilidade do concreto de alto desempenho com sílica de Fe-Si ou silício metálico em ambientes marinhos.** VETOR - Revista De Ciências Exatas E Engenharias, v. 15, n. 2, p. 35–47, 2005.

WANG, J.; HAN, J.; ZHAI, J.; YANG, D. **The effect of different alkaline catalysts on the formation of silica aerogels prepared by the sol–gel approach.** Journal of the Ceramic Society of Japan, v. 128, N. 7, P. 395-403, 2020.