



Reação álcali-agregado em concretos de estruturas hidráulicas de usinas hidrelétricas: revisão bibliográfica aplicada à avaliação experimental de concreto em serviço

Matheus Moskwyn Iurkiv | matheus.mi07@aluno.ifsc.edu.br¹
Felipe Jenzura Luiz | felipe.i05@aluno.ifsc.edu.br²
Neusa Aparecida Munhak Beltrame | neusa.beltrame@ifsc.edu.br³
Daiane Caroline Wagner | daiane.caroline@ifsc.edu.br⁴
Andreza Frare | andreza.frare@ifsc.edu.br⁵

Trabalho de Ensino e Pesquisa
DT 4 - Inovação Tecnológica, Processos Produtivos e Futuro das Tecnologias

Resumo:

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica teórico-aplicada sobre a reação álcali-agregado (RAA) em concretos de estruturas hidráulicas de usinas hidrelétricas, com foco na avaliação futura de concreto em serviço. O estudo toma como referência amostras provenientes de um dissipador de energia com aproximadamente 15 anos de operação. A RAA é um mecanismo deletério associado à interação entre álcalis, agregados reativos e umidade, podendo causar expansão, fissuração, perda de rigidez e redução da durabilidade. Em estruturas hidráulicas, esses efeitos podem ser agravados pela presença constante de água, variações térmicas, escoamentos de alta velocidade e longo tempo de exposição. A discussão aborda manifestações patológicas em vertedouros e dissipadores de energia, mecanismos da RAA e métodos de avaliação. Destaca-se a importância de uma abordagem integrada, envolvendo inspeção visual, ensaios mecânicos, análise petrográfica, MEV/EDS e reconstituição de traço.

Palavras-chave: reação álcali-agregado; concreto; usinas hidrelétricas; estruturas hidráulicas; durabilidade.

¹ Estudante do curso Técnico de Edificações Integrado do Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Canoinhas.

² Estudante do curso Técnico de Edificações Integrado do Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Canoinhas.

³ Docente do Eixo de Infraestrutura/Edificações do Instituto Federal de Santa Catarina – Campus de Canoinhas.

⁴ Docente do Eixo de Infraestrutura/Edificações do Instituto Federal de Santa Catarina – Campus de Canoinhas.

⁵ Docente do Eixo de Infraestrutura/Edificações do Instituto Federal de Santa Catarina – Campus de Canoinhas.

Introdução

O concreto é amplamente utilizado em estruturas hidráulicas de usinas hidrelétricas. Essas estruturas devem apresentar resistência, estabilidade e durabilidade, pois estão associados à geração de energia, ao controle de vazões e à segurança dos barramentos (Zuch, 2008).

No Brasil, as usinas hidrelétricas possuem grande relevância econômica e estratégica, uma vez que envolvem estruturas de grande porte cuja deterioração ou paralisação pode gerar impactos operacionais, ambientais e de segurança. Entre os elementos mais expostos à deterioração estão vertedouros, bacias de dissipação e dissipadores de energia, sujeitos a impacto hidráulico, abrasão, cavitação, lixiviação e fissuração (Viessiri, 2022).

Nesse contexto, destaca-se a reação álcali-agregado (RAA), manifestação patológica associada à interação entre álcalis da solução dos poros e minerais reativos dos agregados. Essa reação forma produtos expansivos que, na presença de umidade, podem gerar fissuração, expansão e redução do desempenho mecânico e da durabilidade do concreto. Em estruturas hidráulicas, a presença recorrente de água, o grande volume de concreto e o longo período de exposição podem favorecer seu desenvolvimento (Fournier, Bérubé, 2000).

Este trabalho tem como objetivo sistematizar, por meio de revisão bibliográfica narrativa, os principais mecanismos, manifestações patológicas e métodos de avaliação da reação álcali-agregado em concretos de estruturas hidráulicas, de modo a subsidiar a definição metodológica de uma investigação experimental futura em amostras provenientes de um dissipador de energia de usina hidrelétrica com aproximadamente 15 anos de operação.

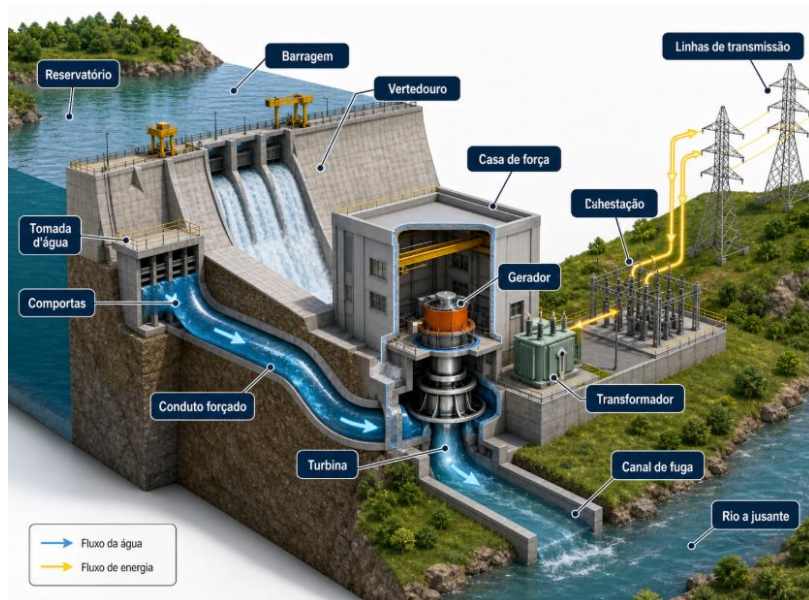
Fundamentação teórica

Estruturas hidráulicas de usinas hidrelétricas e manifestações patológicas

As usinas hidrelétricas são compostas por estruturas civis e equipamentos destinados ao aproveitamento do potencial hidráulico para geração de energia elétrica

(Figura 1). Entre seus principais elementos estão barragem, reservatório, sistema de adução, casa de força, vertedouros, bacias de dissipação e sistemas de restituição, que devem atuar de forma integrada para garantir segurança, eficiência operacional e durabilidade (Zuch, 2008).

Figura 1 – Esquema da estrutura de uma usina hidrelétrica



Fonte: Autor, 2026.

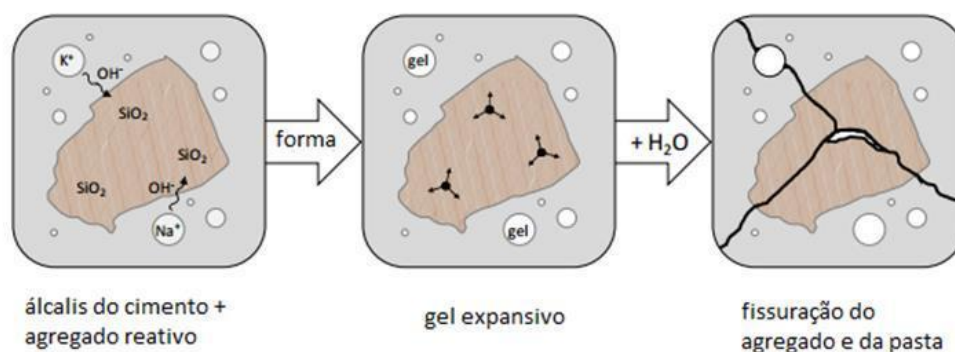
Os vertedouros e dissipadores de energia possuem papel essencial na segurança hidráulica das barragens, pois permitem a descarga controlada do excesso de água e reduzem a energia cinética do escoamento antes de sua restituição ao leito natural do rio. Por estarem expostas à umidade, escoamentos de alta velocidade, variações térmicas e partículas transportadas pela água, essas estruturas podem apresentar fissuras, deslocamentos, lixiviação, exposição de agregados, abrasão, cavitação e reações expansivas (Viessiri, 2022).

Reação álcali-agregado em concretos de estruturas hidráulicas

A reação álcali-agregado é um processo químico expansivo que depende da presença simultânea de agregados potencialmente reativos, álcalis disponíveis na solução

dos poros e umidade (Figura 2). Nessas condições, minerais dos agregados reagem com os hidróxidos alcalinos, formando um gel higroscópico que, ao absorver água, pode expandir e provocar microfissuração, fissuração visível, expansão e perda de propriedades mecânicas (SANCHEZ et al., 2017).

Figura 2 – Esquema de deterioração por RAA



Fonte: Deschenes, 2009.

As consequências da RAA variam conforme o tipo de agregado, o teor de álcalis, a umidade, a temperatura, a porosidade do concreto e o grau de restrição à expansão. Em estruturas hidráulicas, sua relevância é maior porque barragens, vertedouros, dissipadores de energia e elementos submersos permanecem em contato com água por longos períodos, criando condições favoráveis para a evolução da reação e exigindo avaliação considerando as condições reais de exposição e operação (Zuch, 2008).

Métodos de avaliação da reação álcali-agregado em concretos em serviço

A RAA não deve ser diagnosticada com base em uma única manifestação visual ou em um único ensaio, pois fissuras, lixiviação, deslocamentos e exposição de agregados podem estar associados a diferentes mecanismos de deterioração. Por isso, a interpretação de seus indícios exige abordagem integrada, combinando inspeção visual, avaliação mecânica, análise petrográfica e técnicas microestruturais (Frare et al., 2023).

A análise petrográfica permite identificar a composição mineralógica dos agregados, minerais potencialmente reativos, fissuras internas, produtos de reação e alterações na interface pasta-agregado. Esse método é especialmente relevante para concretos extraídos

de estruturas reais, pois possibilita avaliar o material em sua condição de serviço (Frare et al., 2023).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) complementa a análise petrográfica ao permitir a caracterização microestrutural e química de produtos de reação, fissuras, porosidade e alterações na matriz cimentícia. Além disso, ensaios mecânicos, como resistência à compressão e módulo de elasticidade, podem indicar perdas de desempenho associadas à fissuração interna e à degradação do concreto (Zuch, 2008).

A reconstituição do traço original também pode auxiliar na avaliação de concretos em serviço, ao permitir a comparação entre o material envelhecido e misturas de referência produzidas em laboratório. Essa estratégia contribui para interpretar possíveis efeitos do tempo de exposição e das condições ambientais sobre as propriedades do concreto.

A investigação da RAA em estruturas em serviço deve combinar métodos voltados à identificação da reatividade potencial dos materiais e à avaliação dos danos instalados.

Procedimentos metodológicos

O presente trabalho foi desenvolvido por revisão bibliográfica narrativa, de caráter teórico-aplicado, com foco na reação álcali-agregado em concretos de estruturas hidráulicas de usinas hidrelétricas. Foram considerados artigos científicos, dissertações, teses e trabalhos técnicos sobre mecanismos da RAA, manifestações patológicas, métodos de avaliação de concretos deteriorados e investigação de reações expansivas.

A análise foi qualitativa e descritiva, buscando sistematizar aspectos relevantes para o diagnóstico da RAA em concretos em serviço. Essa sistematização pretende subsidiar etapa posterior da pesquisa, voltada à definição de procedimentos experimentais, como inspeção visual, ensaios mecânicos, investigação de expansões, análise petrográfica, MEV/EDS, estimativa de traço e comparação com concretos de referência.

Resultados e discussões

A associação entre ensaios mecânicos, análise petrográfica e MEV/EDS permite uma interpretação mais consistente do concreto em serviço, ao possibilitar a avaliação do

desempenho residual, a identificação de fissuras internas, produtos de reação e alterações na interface pasta-agregado. Essa integração é importante porque a RAA pode ocorrer de forma heterogênea, dependendo dos agregados, da umidade e do histórico de exposição (Frare *et al.*, 2023).

A reconstituição do traço original também contribui para a análise, ao permitir a comparação entre o concreto extraído da estrutura e misturas produzidas em laboratório. Dessa forma, a avaliação de concreto proveniente de um dissipador de energia com aproximadamente 15 anos de operação apresenta relevância técnica e científica, pois integra diferentes escalas de análise e pode subsidiar futuras decisões relacionadas à durabilidade, ao monitoramento e à conservação de estruturas hidráulicas de concreto.

Considerações finais

A revisão realizada evidenciou que a investigação da RAA deve ser conduzida de forma integrada, associando inspeção visual, ensaios mecânicos, análise petrográfica e caracterização microestrutural. A inspeção visual auxilia na identificação inicial de manifestações patológicas, mas não é suficiente para confirmar a ocorrência da reação.

A proposta de avaliação de concreto proveniente de um dissipador de energia de usina hidrelétrica com aproximadamente 15 anos de operação apresenta potencial para contribuir com a compreensão do desempenho de concretos em condições reais de exposição. A sistematização teórica apresentada fornece base para orientar a escolha dos métodos e a interpretação futura dos resultados experimentais.

Além da contribuição técnica, o estudo favorece a formação científica dos estudantes envolvidos, ao aproximá-los de um problema real da engenharia civil e de práticas de pesquisa aplicada.

Referências

Deschenes, D. J. **ASR/DEF-damaged bent caps: shear tests and field implications**. 2009. Thesis (Master of Science in Engineering) — The University of Texas at Austin, Austin, 2009.



Frare, A.; Langaro, E. A.; Souza, D. J. de; Medeiros, M. H. F. de. Systematic review on alkali-aggregate reactions: comparative overview of studies carried out in Canada and Brazil. **Revista ALCONPAT**, v. 13, n. 1, p. 1-27, 2023.

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.

Sanchez, L. F. M. et al. Reliability of the Stiffness Damage Test for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Composites**, v. 84, p. 160-169, 2017.

Viessiri, J. H. G. **Metodologia de classificação de risco de estruturas hidráulicas descarregadoras de cheias**. 2022. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

Zuch, R. A. **Manifestações patológicas nas estruturas em concreto de usinas hidrelétricas: levantamento de ocorrências e estratégias de reparo utilizadas**. 2008. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.