

Reações expansivas em barragens de concreto **causadas por agregados reativos**

GUSTAVO MACIOSKI – MESTRE – ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8489-4328> (gmacioski@gmail.com);

ELOISE APARECIDA LANGARO – MESTRE – ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0694-3531>;

ANDRESSA GOBBI – PROF. – ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6696-3331>;

ANA PAULA BRANDÃO CAPRARO – PROF. – ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6270-6568>;

MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS – PROF. – ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3112-9715> | UFPR

RESUMO

SÃO DIVERSOS OS MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO QUE PODEM AGIR EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, CONTUDO, AS REAÇÕES EXPANSIVAS ORIUNDAS DE AGREGADOS CONTENDO MINERAIS SUSCEPTÍVEIS À REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA (RAS) EM SITUAÇÕES FAVORÁVEIS A ESSE FENÔMENO, BEM COMO O ATAQUE INTERNO POR SULFATOS (RSI), SÃO CONSIDERADAS AS MAIS PREOCUPANTES. ISTO SE DEVE ÀS REAÇÕES AINDA NÃO SEREM INTEIRAMENTE COMPREENDIDAS, OCORREREM DE FORMA GERALMENTE LENTA, E NÃO HAVER MÉTODOS PARA SUA MITIGAÇÃO QUANDO JÁ INSTALADAS EM OBRAS EXISTENTES. ESTE ARTIGO APRESENTA UM PANORAMA GERAL SOBRE ALGUNS DOS MECANISMOS DAS REAÇÕES EXPANSIVAS EM CONCRETO DEVIDO À OCORRÊNCIA DE AGREGADOS POTENCIALMENTE REATIVOS, NORMAS BRASILEIRAS VIGENTES, TÉCNICAS COMPLEMENTARES PARA DIAGNÓSTICO, LACUNAS EXISTENTES E ESTUDOS EM ANDAMENTO SOBRE O TEMA. DESTA FORMA, SÃO APRESENTADAS INFORMAÇÕES RELEVANTES PARA O ENTENDIMENTO DA SEVERIDADE DAS REAÇÕES E SUAS CONSEQUÊNCIAS, BEM COMO POSSÍVEIS MÉTODOS PARA MITIGAÇÃO DE SUA OCORRÊNCIA E PARA O DIAGNÓSTICO PRECOCE EM ESTRUTURAS.

PALAVRAS-CHAVE: EXPANSÃO, ÁLCALI-SÍLICA, ÁLCALI-AGREGADO, SULFATO, DURABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

As barragens são edificações de grande importância para a infraestrutura das cidades, pois permitem o abastecimento, irrigação, produção de energia, controle de cheias, entre outros aspectos. Por razões técnicas e econômicas, agregados locais costumam ser utilizados na construção de barragens de concreto, contudo, a quali-

dade e composição mineralógica destes podem dar origem a reações expansivas deletérias durante a vida útil da estrutura, podendo comprometer a segurança ou afetar as operações diárias das unidades geradoras de energia.

Nestas estruturas, as reações expansivas oriundas de agregados potencialmente reativos, como a álcali-silica (RAS) e o ataque interno por sulfatos (RSI), são consideradas as mais preocupantes, pois sua cinética de reação ainda não é inteiramente compreendida, ocorrem geralmente de forma lenta e não homogênea nas estruturas. Além disso, não existem métodos efetivos para sua mitigação quando já instaladas em obras existentes e possuem grande ocorrência em obras de infraestrutura como barragens devido à presença constante de umidade. As tensões internas ocorridas nos elementos de concreto, devido às reações expansivas, contribuem para a redução do módulo de elasticidade, da resistência à flexão e à compressão, além de ativar/intensificar outros processos de deterioração do concreto devido à propagação de fissuras, facilitando assim a penetração de agentes agressivos.

Em termos simples, a reação álcali-silica (RAS) no concreto é uma reação química entre a sílica amorfa presente em certos agregados e íons presentes na solução de poros do concreto (OH^- , Na^+ e K^+), formando um gel que, na presença de água, torna-se expansivo. O ataque interno de sulfatos, também conhecido como Reação Sulfática Interna (RSI), é um tipo de reação expansiva menos frequente que a reação

álcali-silica. As fontes internas de sulfatos podem ser o cimento, a água de amassamento ou agregados contendo sulfetos (pirrotita, pirita, calcopitita e marcassita), que, ao oxidarem, originam íons sulfatos que reagem com os constituintes da pasta cimentícia (Portlandita e C-S-H), gerando produtos com potencial expansivo como gipsita e etringita.

Neste sentido, a correta avaliação dos agregados é essencial para prevenir que reações expansivas ocorram nos elementos de concreto, uma vez que, após a ocorrência, não existem soluções que possam cessar por completo o dano causado. O estudo prévio dos agregados em laboratório e a utilização de medidas preventivas, detalhadamente especificadas pela norma ABNT NBR 15577-1, no caso da RAS, são facilmente aplicáveis na prevenção dessas manifestações patológicas. Ao contrário, se tais ações forem negligenciadas, haverá necessidade de intervenção nas barragens e seu monitoramento para detecção de deformações e deslocamentos no maciço. O monitoramento do comportamento estrutural pode detectar anomalias a tempo, permitindo a implementação de ações mais eficientes de manutenção e reparo. Além disso, o correto diagnóstico dessas estruturas impacta diretamente nos custos operacionais de manutenção das plantas.

Neste contexto, este artigo apresenta um panorama geral sobre alguns dos mecanismos das reações expansivas em concreto, como a RAS e a RSI, devido às características dos agregados, discute as normas existentes sobre o tema, apresenta

TABELA 1

LEVANTAMENTO NACIONAL SOBRE O POTENCIAL REATIVO DOS AGREGADOS

Publicação	Estado	Número de agregados testados	Potencial reativo das amostras testadas
Valduga (2002)	São Paulo	36	60%
Tiecher (2006)	Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul	40	100%
Couto (2008)	Goiás	22	60%
Portella <i>et al.</i> (2021)	Paraná	11	73%

FONTE: DADOS COMPILADOS POR HASPARYK (2022)

algumas técnicas complementares para diagnóstico de estruturas afetadas, aborda também lacunas existentes e estudos em andamento sobre a temática na Universidade Federal do Paraná (UFPR).

2. REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA (RAS)

A reação álcali-agregado (RAA) pode ser dividida em dois tipos: reação álcali-sílica (RAS) e reação álcali-carbonato (RAC). No Brasil, a reação álcali-sílica costuma ocorrer em rochas contendo minerais silicosos potencialmente reativos e produz o gel álcali-sílica, que pode causar expansão anormal e fissuração do concreto em serviço. Já a reação álcali-carbonato, reconhecida atualmente como um tipo lento da reação álcali-agregado, envolve a desdolomitização dos calcários dolomíticos argilosos sem formação de gel, que pode causar expansão. Dada a especificidade da reação álcali-carbonato, além de sua baixa ocorrência, essa reação não é tratada pelas normas brasileiras da série ABNT NBR 15577:2018.

A adoção de medidas sistemáticas de prevenção à RAS no Brasil já ocorreu nas barragens de Jupia (1963), Água Vermelha (1979), Salto Osório (1975), Tucuruí (1984), Itaipu (1982), dentre outras - onde foram utilizados materiais pozolânicos para inibir a expansão devido ao uso de agregados reativos locais. A partir de 1985, o meio técnico brasileiro tomou conhecimento da ocorrência desse fenômeno nas barragens de Moxotó e Joanes II, ambas localizadas na Região Nordeste. De acordo com os dados publicados por Battagin *et al.* (2016), das 1994 amostras analisadas rotineiramente pela ABCP até 2016, 42% dos agregados graúdos e 26% dos agregados miúdos

apresentaram resultados potencialmente reativos. O Rio Grande do Sul (RS) foi o estado com o maior número de casos positivos para reatividade de agregados. Além disso, 10% dos agregados graúdos avaliados no Brasil apresentaram expansões superiores a 0,6% no ensaio acelerado em argamassa e, atualmente, estariam classificados pela ABNT NBR 15577:2018 como grau 3 e exigiriam forte ação preventiva.

A recente publicação de Hasparyk (2022) apresenta diversos estudos que levantaram dados nacionais sobre o potencial reativo dos agregados. A Tabela 1 apresenta essas informações.

Essas estatísticas, contudo, devem ser observadas com as devidas ressalvas, pois geralmente os agregados utilizados nesses estudos costumam ser suspeitos de serem potencialmente reativos, não se podendo afirmar, por exemplo, que todos os agregados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul são potencialmente reativos.

No Brasil, a reação álcali-sílica costuma ocorrer em agregados contendo opalas, cherts, quartzo microcristalino, quartzo

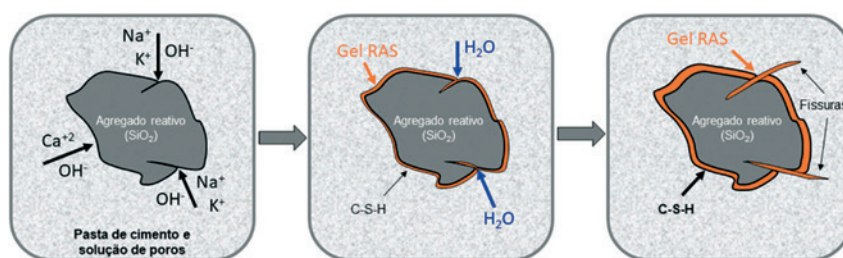
deformado, vidro vulcânico e vidros reciclados. O mecanismo de formação do gel expansivo da RAS em um agregado é exemplificado na Figura 1. Em investigações por microscopia eletrônica de varredura (MEV), a RAS é identificada por meio de ocorrência de um gel na borda de agregados e fissuras, como ilustra a Figura 2.

O uso de adições minerais ativas, como metacaulim, cinzas volantes, escória granulada de alto-forno e sílica ativa, em teores a depender do grau de reatividade dos agregados, podem mitigar a RAS. Os mecanismos envolvidos são a redução da quantidade de álcalis disponíveis no concreto devido à redução do teor de cimento Portland na mistura, o que contribui para uma menor concentração de íons Na^+ , K^+ e OH^- na solução de poros. A concentração de íons Na^+ e K^+ na solução de poros é também fortemente diminuída, pois os íons alcalinos são incorporados no C-S-H gerados na reação. Desta forma, o uso de adições é ainda a forma mais efetiva para prevenção da RAS em novas construções.

3. REAÇÃO SULFÁTICA INTERNA (RSI)

O ataque por sulfatos em estruturas de concreto pode acontecer de duas maneiras diferentes: externo, quando a fonte agressiva está no meio em que está inserida a estrutura, como solos e águas agressivas, ingressando por sua rede de poros; ou interno, quando a fonte agressiva faz parte de sua composição.

No caso do ataque interno, conhecido também como reação sulfática interna (RSI), os sulfatos podem ser encontrados nos constituintes do concreto, sendo eles: agregados, cimento, aditivos ou adições, ou na água de amassamento.

**FIGURA 1**

MECANISMO DA RAS NO CONCRETO

FONTE: AUTORES

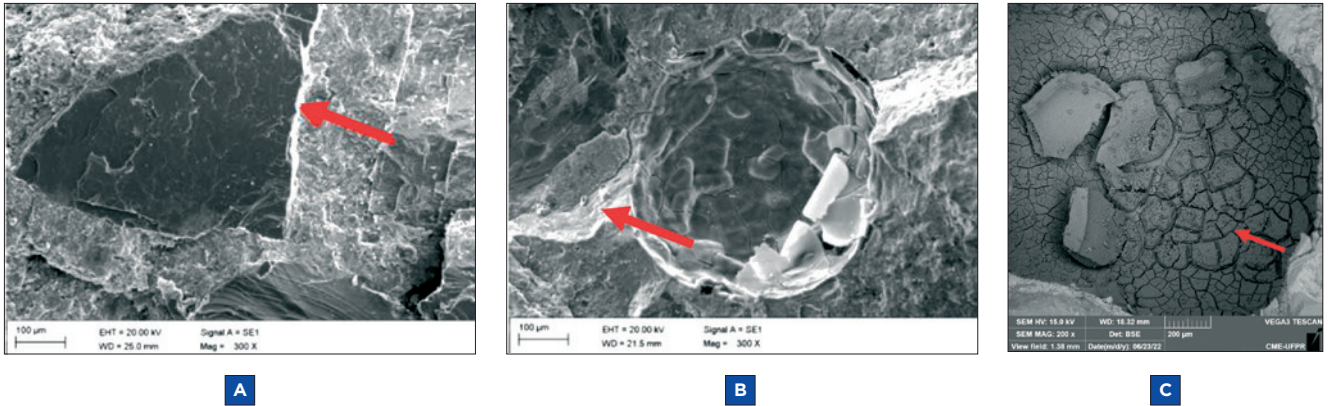


FIGURA 2

ILUSTRAÇÃO DO (A) ATAQUE NA BORDA DO AGREGADO, (B) FISSURAS PREENCHIDAS PELO GEL E (C) DO GEL GRETADO TÍPICO EM CONCRETO COM RAS

FONTE: AUTORES

Quando a fonte de sulfatos for o cimento, um possível mecanismo está relacionado a teores inadequados do regulador de pega (sulfato de cálcio) no processo de produção do cimento, associados a teores incompatíveis de aluminatos cálcicos no clínquer. Em altas temperaturas (acima de 60-65 °C) ou mesmo com temperaturas ordinárias, mas com elevadas umidades, há formação de gipsita e etringita tardia, esta última denominada de DEF, derivada do termo em inglês *Delayed Ettringite Formation*. Assim, a DEF sempre ocorre no

ataque interno (RSI) e outros compostos podem se formar como no caso de agregados, como se detalha a seguir.

Nos casos de ocorrência do mecanismo pela presença de uma fonte de sulfeto nos agregados, foco deste estudo, o ataque é iniciado pela oxidação dos sulfetos, na presença de água e oxigênio. Esse processo libera enxofre e ferro para o meio, produzindo tanto íons sulfatos quanto produtos secundários, oriundos do seu próprio processo de oxidação, como os hidróxidos e óxidos ferrosos, além de sulfatos

de ferro. Alguns desses compostos podem ser expansivos e deletérios. Ainda, durante esse processo de alteração do enxofre, pode ocorrer a sua conversão para ácido sulfúrico, intensificando a deterioração no concreto. A instabilidade dos sulfetos é acelerada pela alcalinidade do meio e valores de pH acima de 10.

Este processo pode ser considerado como um dos mais nocivos ao concreto, uma vez que, nesse tipo de ataque, os produtos gerados reagem com os compostos da pasta cimentícia, provocando



FIGURA 3

ILUSTRAÇÃO DE (A) AGREGADO GRAÚDO CONTENDO INCRUSTAÇÃO DE PIRITA, (B) MINERAL PIRITA, E (C) FORMAÇÃO DE ETRINGITA NO INTERIOR DE PORO DEVIDO AO ATAQUE POR SULFATO

FONTE: AUTORES

consequências físicas, como: variação dimensional, fissuração, deslocamento e desintegração; e químicas, como a redução do pH da matriz. Em virtude da constatação da existência de rochas com a presença de sulfetos em sítios geológicos brasileiros, existe uma motivação para o estudo da contaminação de agregados empregados no país.

Um caso de ocorrência de RSI no Brasil relativa à contaminação de agregados é a Barragem do Rio Descoberto, em Brasília. Anos após a conclusão de sua construção (1974), a barragem começou a apresentar vazamentos no seu paramento de jusante. Após diversas intervenções, a CAESB (Companhia de Saneamento do Distrito Federal) investigou as causas e descobriu que a origem do problema se devia à combinação da ação da água com a piritita (FeS_2) do agregado presente no concreto. Dentre os minerais sulfetados existentes na superfície terrestre, a piritita é o mineral mais comum.

As alterações físicas ocorrem principalmente pela tensão interna causada pela cristalização dos novos produtos, os quais possuem volume superior ao volume do sulfeto mineral que lhes originou. Já, a alteração química

TABELA 2
TESTES PARA DIAGNÓSTICO DA RAS EM CONCRETOS E ARGAMASSAS

Normativa	Ensaio	Condição do ensaio	Amostras	Limite de expansão
NBR 15577-4 (RAS)	Potencial reativo acelerado em argamassa	Solução 1N NaOH a 80 °C por 30 dias	3 barras de argamassa 25 x 25 x 285 mm	< 0,19%
NBR 15577-6 (RAS)	Potencial reativo em concreto (CPT)	1,25% Na_2O_{eq} a 38 °C por 365 dias	3 prismas de concreto 75 x 75 x 285 mm	< 0,04%
NBR 15577-7 (RAS)	Potencial reativo acelerado em concreto	1,25% Na_2O_{eq} a 60 °C por 140 dias	3 prismas de concreto 75 x 75 x 285 mm	< 0,03%

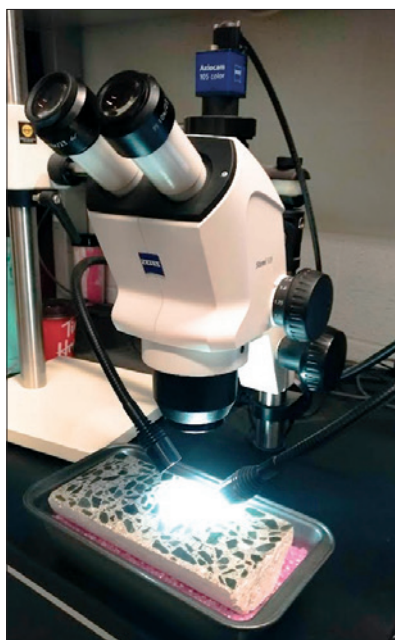
FONTE: AUTORES

é causada, principalmente, pelo consumo da portlandita, disponível na matriz, e pela formação dos subprodutos gerados pelo ataque (OLIVEIRA; CAVALARO; AGUADO, 2014). As Figuras 3A e 3B apresentam agregados com presença de piritita. Já, a Figura 3C apresenta uma imagem de MEV evidenciando o principal produto gerado no ataque, etringita, em uma pasta cimentícia com piritita.

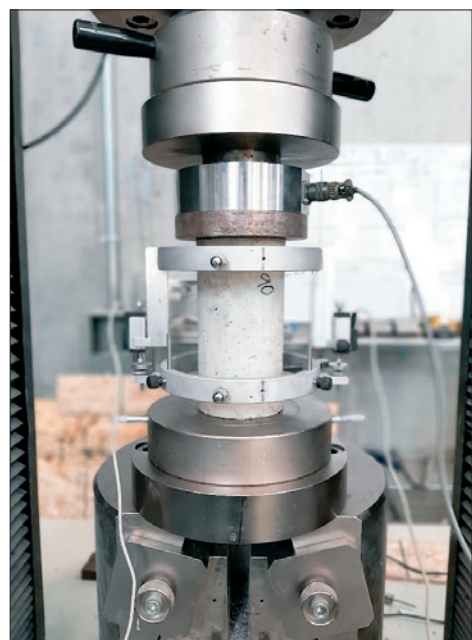
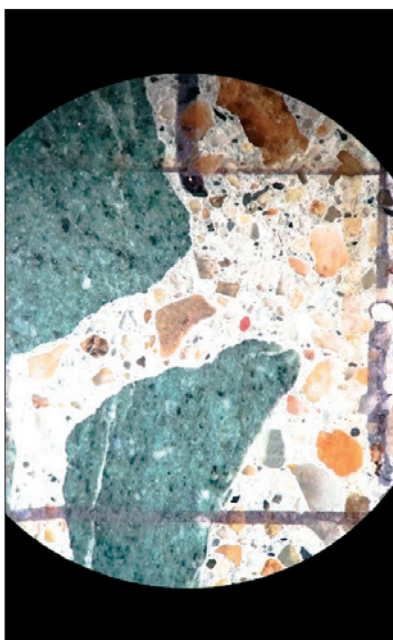
O diagnóstico de uma estrutura com a RSI não é simples, em especial por não

existir um ensaio padronizado que indique a ocorrência. Sinais que podem levar a uma investigação química do concreto e seus constituintes são: quadros de fissuração generalizada, deslocamentos e manchas, normalmente na cor ocre, originados pela oxidação do mineral sulfetado.

Como neste ataque o agente agressor já está interno ao concreto, medidas de proteção externa não são as mais eficazes nesse caso. Assim sendo, as medidas de prevenção devem ser pautadas na



A



B

FIGURA 4

ENSAIOS PARA DIAGNÓSTICO DE REAÇÕES EXPANSIVAS. (A) *DAMAGE RATING INDEX (DRI)* E (B) *STIFFNESS DAMAGE TEST (SDT)*

FONTE: AUTORES

QUADRO 1

CASOS DE OBRAS HIDRÁULICAS QUE SE ENCONTRAM AFETADAS PELA RAA

UHE/ Barragens	UF	Indícios e/ou evidências da RAA	Tipo de agregado
UHE Jurupará	SP	Diagnóstico 1997	Gnaisse; biotita granito
Barragem de Peti	MG	1964	Granito - gnaisse
Barragem Guanhães - UHE Salto Grande	MG	2001	Gnaisse
UHE Jaguará	SP	1996	Quartzito
UHE Apolônio Sales (Moxotó)	AL	Indícios 1980 e diagnóstico 1984	Granito e biotita gnaisse
UHE Paulo Afonso I	BA	1978	Granito, biotita gnaisse e biotita granito
UHE Paulo Afonso II	BA	1978	Granito e anfibólio gnaisse
UHE Paulo Afonso III	BA	1978	Granito e biotita granito
UHE Paulo Afonso IV	BA	1985	Granito, biotita gnaisse, biotita granito, anfibólito e anfibólio biotita gnaisse
UHE Pedra	BA	1980	Granada granulito
UHE Sobradinho	BA	2000	Quartzito
UHE Tapacurá	PE	1990	Granito e gnaisse cataclásados
UHE Piratininga	SP	2002	Gnaisse
Barragem de Pirapora	SP	1998	Granito - gnaisse
Barragem Reguladora Bilings-Pedras	SP	1992	Granito
Barragem Rio das Pedras	SP	1992	Gnaisse - milonito
Usina de Rasgão	SP	Nd	Granito - filito
Usina Elevatória de Pedreira	SP	2000	Gnaisse - milonito
Usina Elevatória de Traição	SP	1994	Milonito
Barragem de Joanes II	BA	1988	Gnaisse, migmatito e granulito
UHE Mascarenhas	ES	Diagnóstico 2003	Nd
UHE Furnas	MG	1976	Quartzito
UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho	SP	1994	Quartzito
UHE Mascarenhas de Moraes	MG	1994	Quartzito
UHE Porto Colômbia	MG	1985	Basalto - seixo de quartzo
UHE Jaguari	SP	Indícios 1985/1990 e diagnóstico 2000	Gnaisse milonitizado
UHE Ilha dos Pombos	RJ	1991	Gnaisse
UHE Santa Branca	SP	1995	Gnaisse
UHE Sá Carvalho	MG	Diagnóstico 1997	Granito
Barragem Atibainha	SP	1992	Biotita gnaisse cataclástico
Barragem Cascata	SP	1992	Granito - gnaisse
Barragem Jaguari	SP	1992	Gnaisse milonitizado
Barragem Paiva Castro	SP	1992	Biotita granito-gnaisse
Barragem Pedro Beitch	SP	1992	Biotita gnaisse
Barragem Ribeirão do Campo	SP	1992	Biotita gnaisse cataclástico

FONTE: ADAPTADO DE HASPARYK (2022)

correta escolha dos constituintes do concreto. Uma vez utilizado material inadequado, a deterioração vai ocorrer e ainda não existe uma solução técnica definida para bloquear a ocorrência do mecanismo de deterioração.

4. NORMALIZAÇÃO NO BRASIL E ENSAIOS PARA DIAGNÓSTICO

No Brasil foram publicadas as normas ABNT NBR 15577:2018, que estabelecem os critérios para avaliação, classificação e mitigação da RAS em novas construções. Ainda que a análise petrográfica seja capaz de quantificar fases minerais cristalinas e amorfas que possam gerar reações expansivas no concreto, técnicas complementares podem ser necessárias, tais como: coloração seletiva de minerais, análise por difração de raios X (DRX), análise termogravimétrica (DTA/DTG), espectroscopia no infravermelho (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise por fluorescência de raios X (FRX), entre outras. Mesmo quando as fases reativas são identificadas pela análise petrográfica, é necessário confirmar a relevância de sua presença no desenvolvimento de reações por meio de testes de expansão em prismas de concreto em função da formação do gel expansivo. Ainda que existam diferentes métodos de avaliação, a ABNT NBR 15577:2018 considera os ensaios acelerados como prévios na tentativa de indicação mais rápida da reação (140 dias a 60 °C), mas não exclui a realização do ensaio em prismas de concreto até a idade de 365 dias. Na Tabela 2 são apresentadas as principais normas utilizadas para a avaliação do potencial reativo de agregados por testes de expansão.

Os limites de expansão apresentados na Tabela 1 para a RAS sofrem pequenas variações dependendo da normativa de cada país. De uma forma geral, os ensaios acelerados em barras de argamassa ainda são foco de discussão entre pesquisadores devido à ocorrência de falsos positivos e negativos nos resultados. Parte das normativas costuma referenciar e adotar valores de outras normas e países para a classificação dos agregados, o que pode não representar a realidade local, e isso ocorre devido à falta de dados históricos sobre obras com a ocorrência da reação expansiva e de campos experimentais.

No caso dos ensaios para RSI, as normas vigentes apenas limitam os valores máximos de concentração de sulfatos no concreto. A ABNT NBR 7211:2022 regulamenta o limite máximo de sulfatos expresso em SO_4^{2-} nos agregados para a produção de concreto em 0,1% em massa. Assim, fica subentendido que os agregados contendo enxofre podem ser utilizados desde que não ultrapassem esse limite. Mesmo quando este limite for excedido, os agregados ainda podem ser usados, desde que o teor total presente no concreto proveniente de todos os seus componentes (água, agregados, cimento, adições e aditivos químicos) não exceda 0,2% de SO_4^{2-} da massa total, ou que fique comprovado a utilização de cimento Portland resistente a sulfatos (verificado pela ABNT NBR 13583:2014).

Diversos ensaios têm sido desenvolvidos com o objetivo de diagnosticar estruturas já afetadas por reações expansivas: como emissão acústica, ultrassom, espectroscopia, indentação, microscopia e testes de expansão residual realizados em testemunhos extraídos de estruturas danificadas. As metodologias costumam se basear no aumento de descontinuidades no interior do concreto, gerado pela expansão e fissuração das amostras que, de forma geral, reduzem a rigidez das peças e dificultam a propagação de ondas no interior dos sólidos. Dentre os métodos mais eficazes no diagnóstico pode-se citar o ensaio DRI ou *Damage Rating Index* (Figura 4A), que classifica diferentes tipos de fissuras em uma seção polida de concreto; e o ensaio SDT ou *Stiffness Damage Test* (Figura 4B), que avalia a perda de rigidez do concreto durante ciclos de carregamentos e avalia parâmetros como área de histerese, deformação plástica e módulo de elasticidade.

5. LACUNAS E ESTUDOS EM CURSO NA ÁREA

Ainda que diversos estudos tenham sido realizados nas últimas décadas, a cinética das reações expansivas ainda não é inteiramente compreendida e muitas são as lacunas que necessitam de investigações mais aprofundadas.

Ainda não existem técnicas confiáveis disponíveis para avaliação da presença de minerais reativos em agregados em um ensaio de curto prazo de forma dissociada do concreto - sem que haja interferências do tipo de cimento usado, sua composi-

ção química, métodos de moldagem, cura e instrumento de medição. Essas características variam em cada laboratório e país, influenciando as leituras realizadas. Apenas recentemente, Hasparyk (2022) compilou os casos de obras hidráulicas no Brasil já diagnosticadas com RAA (Quadro 1).

Além disso, no Brasil quase não se tem mapeamento de obras diagnosticadas com RSI e faltam dados históricos de campos experimentais de ambas as reações deletérias. Dessa forma, faltam dados de desempenho em campo para balizar a construção de novas estruturas, calibrar métodos de ensaios e orientar o uso de materiais considerando o variado clima e agregados brasileiros.

As condições dos ensaios (temperatura e duração) e os limites de expansão estabelecidos para a classificação dos agregados se encontram em constantes discussões. Uma maior preocupação existe com relação ao ataque por sulfatos, que carece de normativas mais aprofundadas para classificação e mitigação da reação. Além disso, dependendo do tipo de sulfato e sua origem, diferentes limites de classificação precisam ser desenvolvidos. A aplicação de modelos de expansão e vida útil é tarefa complexa, pois costumam ser baseados em resultados obtidos em laboratório, em condições ambientais diferentes daquelas em que as barragens se encontram.

É comum a ocorrência de reações deletérias de forma combinada, envolvendo duas ou mais reações como RAS, RSI, DEF (formação de etringita tardia), o que dificulta o diagnóstico e prognóstico dessas estruturas. Assim, técnicas de microscopia, como o DRI, auxiliam na identificação de diferentes reações deletérias, uma vez que é possível verificar o local da reação (pasta ou borda de agregados) e seu avanço no concreto (tipo de produto formado e avanço na amostra). Com a fissuração e formação de produtos dentro dos poros, outros processos deletérios como a

carbonatação e corrosão das armaduras são também acelerados e sofrem influência direta das reações expansivas.

Neste sentido, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas pelo grupo de pesquisa em Patologia e Reabilitação das Construções da Universidade Federal do Paraná, tais como: avaliação de diferentes teores e tipos de sulfatos no grau de expansão; desenvolvimento de sistema de monitoramento para expansão baseados em sensores de fibra ótica; mitigação de reações expansivas em barragens de concreto com resíduos industriais, adições minerais e uso de tratamentos de superfície; desenvolvimento de técnicas de inspeção, diagnóstico e prognóstico para reações expansivas; desenvolvimento de modelos de vida útil para barragens; avaliação de técnicas de reparo e autocicatrização para fissuras; entre outros.

Capraro (2019), por meio de uma simulação numérica em método dos elementos finitos, analisou a movimentação de uma barragem (Figura 5) quando submetida ao desenvolvimento de RSI. Esta modelagem levou em consideração a ocorrência do ataque em uma camada de cerca de 1,5 m de profundidade na face de jusante, pois as reações dependem do acesso de oxigênio nesta região. O modelo demonstrou que a potencial contaminação de 5% de SO_3 nos agregados pode gerar um deslocamento horizontal superior a 60 cm no topo da barragem, no sentido contrário ao deslocamento gerado somente pelas cargas do empuxo hidrostático.

No desenvolvimento de sensores para monitoramento de reações expansivas,

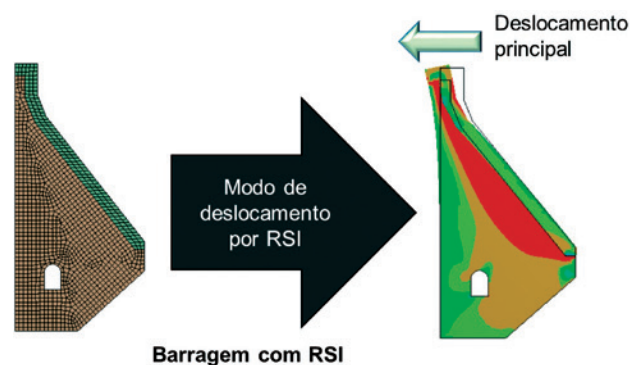
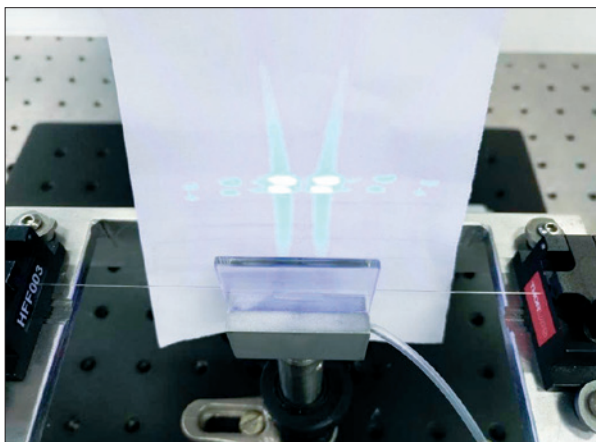


FIGURA 5
MODELO DE MOVIMENTAÇÃO DE BARRAGEM POR DESENVOLVIMENTO DE REAÇÃO SULFÁTICA INTERNA (RSI)

FONTE: CAPRARO (2019)



A



B

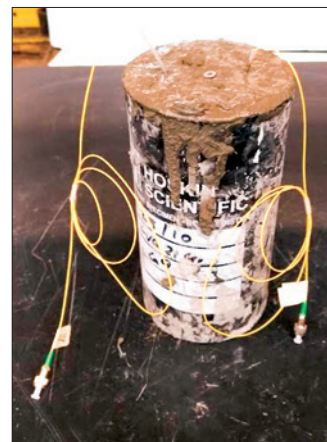


FIGURA 6

(A) PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE SENSORES EM FIBRA ÓTICA E (B) AMOSTRAS COM SENSORES ÓTICOS NA SUPERFÍCIE E NO INTERIOR DO CONCRETO

FONTE: AUTORES

Macioski *et al.* (2020) utilizaram o sinal refletido por uma rede de Bragg inscrita com LASERS no núcleo de fibras óticas (Figura 6) para medir a temperatura, deformação interna e externa de amostras de concreto afetadas por RAS, permitindo verificar que o surgimento de tensões internas dos agregados é elevado (0,11% em 55 dias) e apenas parcialmente transmitido à pasta e ao concreto (amostras sem expansão significativa na mesma idade).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho traz informações sobre dois tipos de reações expansivas que podem ocorrer nas estruturas de barragens de concreto, a reação álcali-silica (RAS) e a reação sulfática interna (RSI). Ambas são reações deletérias em relação às quais apenas tratamentos paliativos podem ser aplicados em obras existentes, ou seja, não

existem métodos efetivos que podem cessar a expansão devido à reação. A melhor solução ainda é avaliar o potencial reativo dos agregados antes da construção.

Apesar do avanço nas pesquisas em relação a cinéticas dessas reações, ainda existem muitas lacunas existentes, materiais a serem entendidos por completo e técnicas promissoras a serem desenvolvidas e aplicadas. Nas normas vigentes no Brasil sobre esses temas, faltam dados de estruturas reais para melhorar sua aplicação, visto a dificuldade de simulação em laboratório da cinética das reações que ocorrem nas barragens.

Esta área temática das reações expansivas é de primordial importância para a área de segurança de barragens de concreto e os autores desenvolvem atualmente projetos neste campo com financiamento da CAPES e da ANA (Agên-

cia Nacional de Águas e Saneamento Básico). Este apoio financeiro é essencial para dar suporte para interações internacionais e implantação dos ensaios específicos para a investigação das reações expansivas no concreto com alto grau de aprofundamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC-UFPR), ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC-UFPR) e ao Laboratório Multiusuário de Fotônica (Multi-Foton) da UTFPR. Os autores também agradecem o suporte fornecido pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e pela ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BATTAGIN, A.; SILVEIRA, A. L.; MUNHOZ, F.; BATTAGIN, I. A evolução da cultura da prevenção da reação álcali-agregado no mercado nacional. *Concreto & Construções*, 39-43. 2016.
- [2] HASPARYK, N. P. Reação Álcali-Agregado no Concreto. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. vol. 2. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2022.
- [3] CAPRARO, A. P. B. Ataque interno de sulfatos: mudanças nas propriedades de compostos cimentícios. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 187 p. 2019.
- [4] MACIOSKI, G.; SANCHEZ, L. F. M.; BAO, X.; MEDEIROS, M. H. F. Monitoring alkali-aggregate reaction (AAR) induced expansion through the use of fiber Bragg grating sensors. 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Lisboa, Portugal. 2020.
- [5] OLIVEIRA, I.; CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A. Evolution of pyrrhotite oxidation in aggregates for concrete. *Materiales de Construcción*, v. 64, 2014.