CBPAT 2020 ANAIS
CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES
DE 15 A 17 DE ABRIL | FORTALEZA - CE
http://dx.doi.org/10.4322/CBPAT.2020.179
ISBN 978-65-86819-05-2

PROTOCOLO DE ATUAÇÃO PARA BARRAGENS DE CONCRETO COM PRESENÇA DE REAÇÃO SULFÁTICA INTERNA

GOBBI, ANDRESSA
Diretora de Planejamento Físico
Universidade Estadual de Ponta Grossa
Paraná; Brasil
andressagobbi@yahoo.com.br

MEDEIROS, MARCELO HENRIQUE FARIAS DE
Professor
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
medeiros.ufpr@gmail.com

CAVALARO, SERGIO HENRIQUE PIALARISSI
Professor
Universidade de Loughborough
Leicestershire; Reino Unido
s.cavalaro@lboro.ac.uk

PIERALISI, RICARDO
Professor
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
ricpieralisi@ufpr.br

RESUMO

As barragens são infraestruturas hidráulicas de grande relevância socioeconômica e fundamental para a produção de energia hidrelétrica, contribuindo além do abastecimento de água, irrigação, controle de enchentes, usos recreativos e outras atividades. Nesse contexto, as inspeções têm importância estratégica na área de segurança e durabilidade de barragens, em conjunto o aumento da vida útil de barragens de concreto traz benefícios ambientais, sociais e econômicos. Uma das principais causas de problemas de durabilidade em barragens de concreto são as reações expansivas que produzem trincas e comprometem o comportamento mecânico do material. Entre os principais fenômenos expansivos estão a reação álcali-agregado (RAA), a reação sulfática interna (RSI) e a reação sulfática externa (RSE). Apesar do crescente número de estudos sobre RSI, a ausência de um diagnóstico preciso das causas dos fenômenos expansivos pode levar a tratamentos / reparos ineficazes, menor segurança para a sociedade e maiores custos de manutenção no futuro. O objetivo deste trabalho é apresentar um protocolo de atuação para barragens de concreto afetadas pela reação sulfática interna devido a agregados contaminados com sulfetos de ferro com base no conhecimento obtido no estudo de barragens reais. Este protocolo é uma ferramenta útil e serve como um guia para a definição da abordagem metodológica para o diagnóstico de barragens de concreto com indicações de expansões de origem interna. A análise crítica dos pontos fortes e fracos da abordagem utilizada serve para consolidar um procedimento de trabalho que pode ser útil para engenheiros e técnicos encarregados dessas estruturas.

Palavras-chave: concreto, reação sulfática interna, barragem.

ABSTRACT

The dams are hydraulic infrastructures of great socioeconomic relevance and fundamental for the production of hydroelectric energy, contributing beyond water supply, irrigation, flood control, recreational uses, and other activities. In this context, inspections are of strategic importance in the area of dam safety and durability, together with the increase in the life of concrete dams brings environmental, social and economic benefits. One of the main causes of durability problems in concrete dams is the expansive reactions that produce cracks and compromise the structural. Among the main expansive phenomena are the alkali aggregate reaction (AAR), the internal sulfate attack (ISA) and the external sulfate attack (ESA). Despite the growing number of studies on ISA, the absence of an accurate diagnosis of the causes of expansive phenomena may lead to ineffective treatments / repairs, lower security for society and higher maintenance costs in the future. The objective of this work is to present an action protocol for concrete dams affected by the internal sulfate attack from the use of aggregates contaminated with iron sulfides based on the knowledge obtained from the study of real dams. The protocol is a useful tool and guideline to the definition of a methodological approach towards the diagnostic of concrete dams presenting indications of expansions of internal origin. Critical analysis of the strengths and weaknesses of the approach used to consolidate a working procedure that may be useful to engineers and technicians in charge of these structures.
Keywords: concrete, internal sulfate attack, dam.

ISBN 978-65-86819-05-2

1. INTRODUÇÃO

As barragens são infraestruturas hidráulicas de grande relevância socioeconômica e fundamentais para a produção de energia hidrelétrica, o abastecimento de água, a irrigação, o controle de enchentes, os usos recreativos e outras atividades. Nesse contexto, as inspeções têm importância estratégica na área de segurança e durabilidade de barragens, propiciando o aumento da vida útil de barragens de concreto e como consequência trazendo benefícios ambientais, sociais e econômicos. Além de preservar os recursos naturais, as despesas com reconstrução ou reparo para manter as condições adequadas de serviço também são reduzidas. A conservação de barragens também é relevante pelo ponto de vista da segurança das populações localizadas a jusante. Considerando que uma eventual falha estrutural pode levar à liberação de um grande volume de água do reservatório, com possíveis implicações catastróficas para essas populações.

Uma das principais causas de problemas de durabilidade em barragens de concreto são as reações expansivas internas que produzem trincas e comprometem o comportamento mecânico do material. O processo químico mais habitual em barragens de concreto é a reação álcali-agregado (RAA), amplamente estudada na bibliografia (DIAMOND, 1975; PAULON, 1981; SAOUMA *et al.*, 2015). Outro tipo de reação expansiva é o ataque sulfático interno (ASI), que implica em diferentes reações químicas e é influenciado pela composição do cimento, natureza dos agregados, aditivos e fatores ambientais (CASANOVA, AGUADO, AGULLÓ, 1997).

O objetivo deste trabalho é apresentar um protocolo de ação para barragens de concreto afetadas pela reação sulfática interna devido a agregados contaminados com sulfetos de ferro com base no conhecimento obtido com o trabalho de barragens reais estudadas por Gomides *et al.* (2005); Campos, Lopez, Aguado (2010); Oliveira (2011); Moura (2012); Oliveira, Cavalaro, Aguado (2013); Oliveira, Cavalaro, Aguado (2014). Este protocolo é uma ferramenta útil que serve como um guia para a definição da abordagem metodológica para o diagnóstico de barragens de concreto com indicações de expansões de origem interna. A análise crítica dos pontos fortes e fracos da abordagem utilizada serviu para consolidar um procedimento de trabalho que pode ser útil para engenheiros e técnicos encarregados dessas estruturas.

A proposta metodológica está baseada no trabalho de Pardo-Bosch (2014) e inclui diferentes estágios considerando as indicações observadas de um possível desenvolvimento de reações expansivas, passando de uma visão mais global para estudos mais específicos, conforme apresentado neste trabalho. Segundo Pardo-Bosch e Aguado (2017), a metodologia de gerenciamento de danos remedia a falta de atenção que o assunto recebeu na literatura da comunidade técnico-científica, focada principalmente em estudos laboratoriais e modelos numéricos.

Primeiramente, são realizados os estudos prévios que orientarão a etapa *in situ* para posteriormente apresentar as ações a serem executadas na visita técnica da pedreira, barragem e seu entorno. A seguir, propõe-se a hipótese de trabalho, para direcionar o programa experimental e os estudos laboratoriais. Com os resultados obtidos nas etapas anteriores, é diagnosticada a origem do problema e verificada a incidência de expansões no comportamento estrutural da barragem. Embora cada um dos estágios e fases não sejam suficientes para determinar os fatores que afetam a barragem, a análise em conjunto permite diagnosticar o problema.

2. METODOLOGIA

A Figura 1 mostra o fluxograma do protocolo de ações proposto com as etapas de trabalho que devem ser realizadas. A detecção do comportamento anômalo da barragem inicia com os estudos preliminares, analisando a documentação histórica e atual da barragem. Essa análise serve de base para a compreensão da situação e embasa a proposta preliminar de uma hipótese. Deve-se notar que, inicialmente, não é apropriado excluir qualquer linha potencial de pesquisa até que os estudos subsequentes demonstrem a origem do problema.

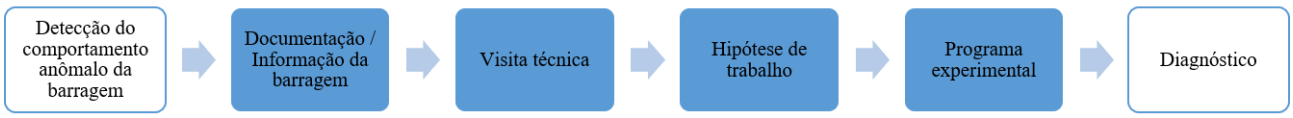

Figura 1: Fluxograma das etapas de trabalho para barragens de concreto com suspeita de RSI

Na sequência, deve ser feita uma visita técnica com base nas informações preliminares fornecidas pelos estudos anteriores da documentação da barragem. Essa investigação no local da estrutura e seu ambiente fornece observações visuais importantes que reforçam ou levam a uma revisão da hipótese do trabalho preliminar.

ISBN 978-65-86819-05-2

Na próxima etapa, a campanha experimental é realizada tanto nos agregados utilizados na construção da barragem, quanto nos testemunhos de concreto extraídos dela. Isso permite identificar a principal origem dos comportamentos anômalos encontrados, bem como possíveis causas secundárias que podem atuar em conjunto.

2.1. Análise de documentação e dados de auscultação

O diagrama da Figura 2 mostra o fluxo de análises da documentação existente e como isso pode afetar na sequência das atividades. As informações sobre os fenômenos observados são compiladas, os registros dos relatórios e os vários documentos que podem conter as fases de construção e exploração. Além disso, devem ser buscadas as informações obtidas em visitas e estudos anteriores, planos descritivos da barragem, dados coletados pelo sistema de auscultação, projetos e descrição de serviços de reparo ou outros trabalhos realizados.

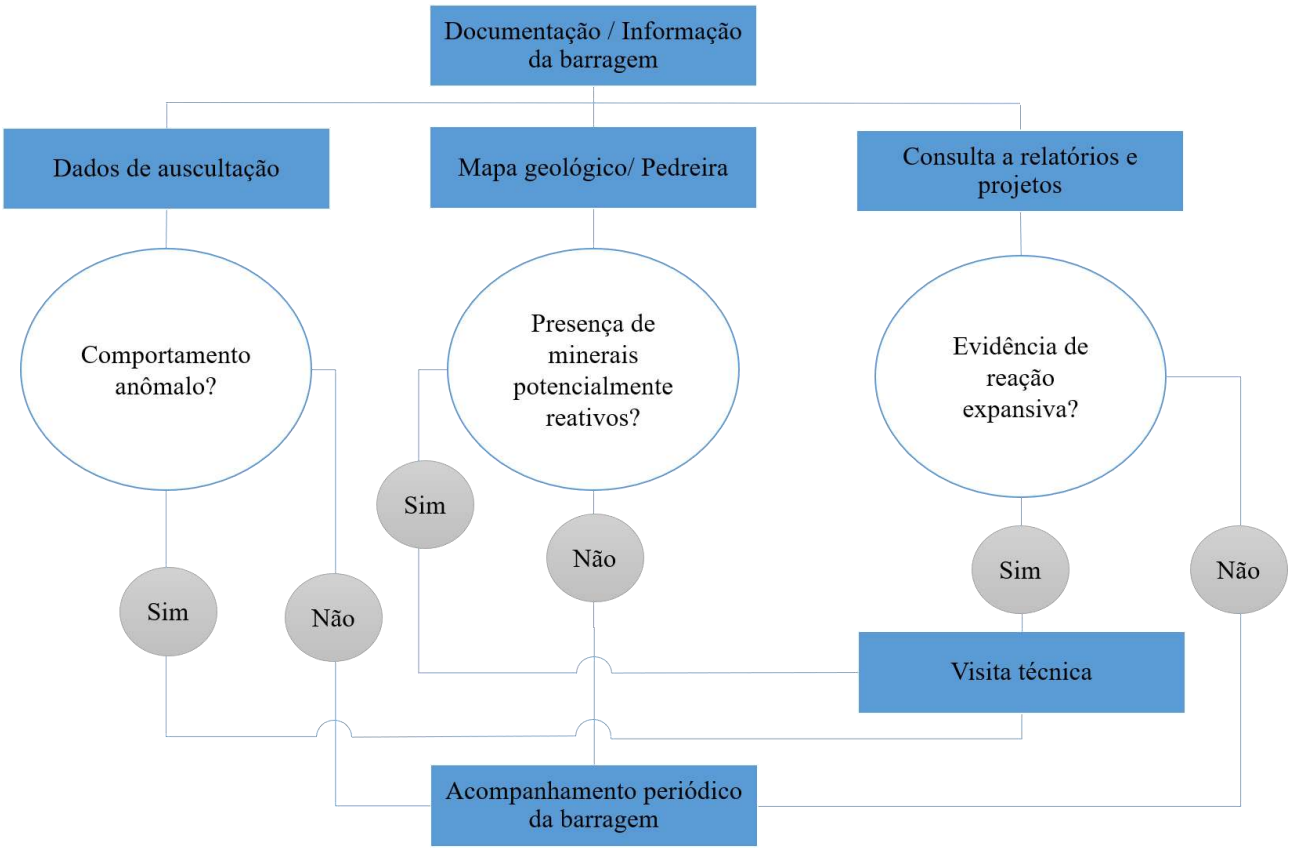

Figura 2: Fluxograma para o estudo da documentação

Inicialmente é realizada a análise dos dados coletados pelo sistema de auscultação instalado na barragem. Estes são comparados com as tendências esquemáticas de movimento indicadas na Figura 3. A direção do deslocamento horizontal (a montante ou a jusante), a relação entre os movimentos verticais e horizontais e suas magnitudes são peças-chave para apoiar a hipótese preliminar.

A Figura 3 mostra as curvas que ilustram a evolução dos deslocamentos horizontais e verticais esperados na crista da barragem após o RSI (Figura 3a e b) e RAA (Figura 3c e d). Esses modelos são baseados nos trabalhos realizados por Campos (2012) em relação a RSI e por Ulm et al. (2000) em relação ao RAA. Deslocamentos horizontais e verticais têm diferentes tendências e cinéticas.

A RSI é geralmente mais rápida que o RAA e depende da presença de oxigênio e água, portanto, a reação está concentrada principalmente na área da parede à jusante e na área não submersa da parede à montante. O oxigênio necessário para a oxidação penetra pelo lado de fora, afetando uma espessura não superior a 2 metros. Isso leva a uma concentração das expansões em uma área reduzida da seção transversal da barragem, levando a movimentos horizontais mais significativos a montante, acompanhados de movimentos verticais ascendentes mais sutis. Por outro lado, o RAA depende

ISBN 978-65-86819-05-2

principalmente da presença de água, ocorrendo geralmente no corpo da barragem. Isso leva a movimentos horizontais sutis, acompanhados por movimentos verticais ascendentes mais significativos.

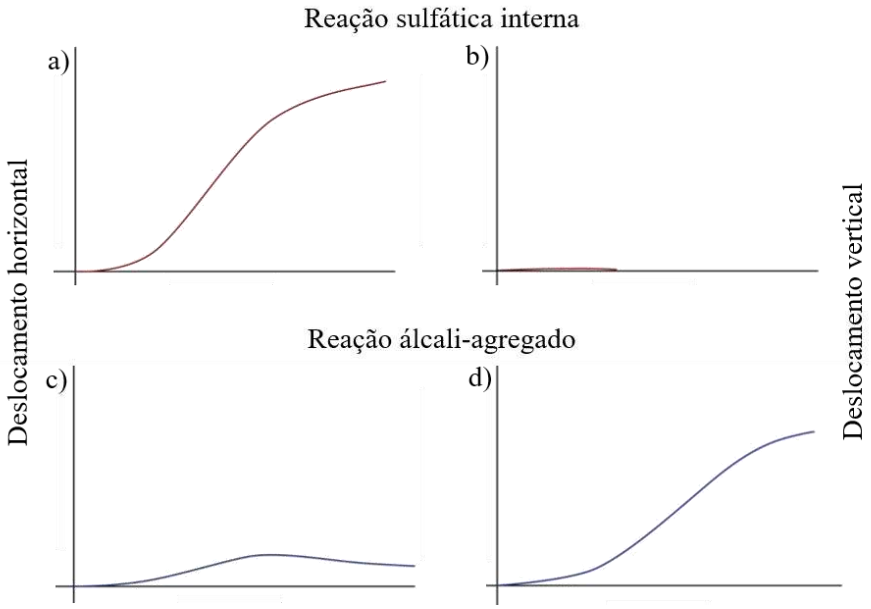

Figura 3: Deslocamentos horizontais e verticais medidos na crista ao longo do tempo devido à ação da RSI (a) e (b), RAA (c) e (d)

Como o uso de agregados provenientes da britagem da rocha próxima à região de construção da barragem é comum, é essencial conhecer sua composição potencial para propor a hipótese e determinar a presença de compostos que podem reagir causando a expansão do concreto. Neste sentido, deve-se consultar mapas geológicos e relatórios específicos com caracterizações da geologia da área ou da pedreira da qual os agregados foram extraídos. Por exemplo, um estudo de mapas geológicos pode permitir identificar que uma barragem está em uma região onde predominam ardósias metamórficas e vários depósitos de sulfeto de ferro. Deve-se considerar que a ausência de uma formação geológica potencialmente prejudicial não é uma condição para descartar a existência de reações expansivas no concreto.

Em seguida, os dados de grande importância são coletados como: data de aparência; aspecto e localização das fissuras; manchas na superfície; infiltrações excessivas; comportamento das juntas: e movimentos não recuperáveis. Eles fornecem informações sobre o comportamento geral da barragem ao longo do tempo e orientam a visita técnica à estrutura, bem como a inspeção das obras próximas e pedreiras.

2.2. Visita técnica

O trabalho de campo possibilita investigar se a estrutura apresenta sinais de desenvolvimento de reações expansivas internas e fundamenta a hipótese da origem do referido comportamento. Toda manifestação patológica encontrada em uma estrutura deve ser estudada em detalhes, identificando seus sintomas mais comuns. Juntamente com as informações visuais, devidamente documentadas com fotografias e anotações detalhadas, devem ser coletadas amostras de material.

Conforme apresentado no fluxograma elaborado para nortear a visita técnica (Figura 4), a análise de documentação e os dados de auscultação, na etapa anterior, fornecem informações para prosseguir com a visita técnica, dividida em três fases: inspeção visual da pedreira (A); da barragem (C); e outras obras na região com o mesmo agregado (J). Na inspeção visual da pedreira (A), a presença de manchas ou produtos na superfície da rocha deve ser observada. Sinais de alteração podem indicar que o agregado contém minerais que, sob certas condições de exposição, reagem com o concreto, desta forma, indica-se a coleta de amostras (B) para a análise de sua composição em laboratório.

Em um segundo momento, a inspeção visual se dá na barragem (C). Esta deve ser realizada tanto no corpo da barragem (D) quanto nos elementos auxiliares (E), sendo necessária a atenção aos sinais de reações expansivas internas mais comumente encontrados. São eles: fissuras; movimentos de blocos e outros elementos; variação na abertura das juntas; interferência de partes móveis do equipamento; bem como, precipitação de produtos de reação.

ISBN 978-65-86819-05-2

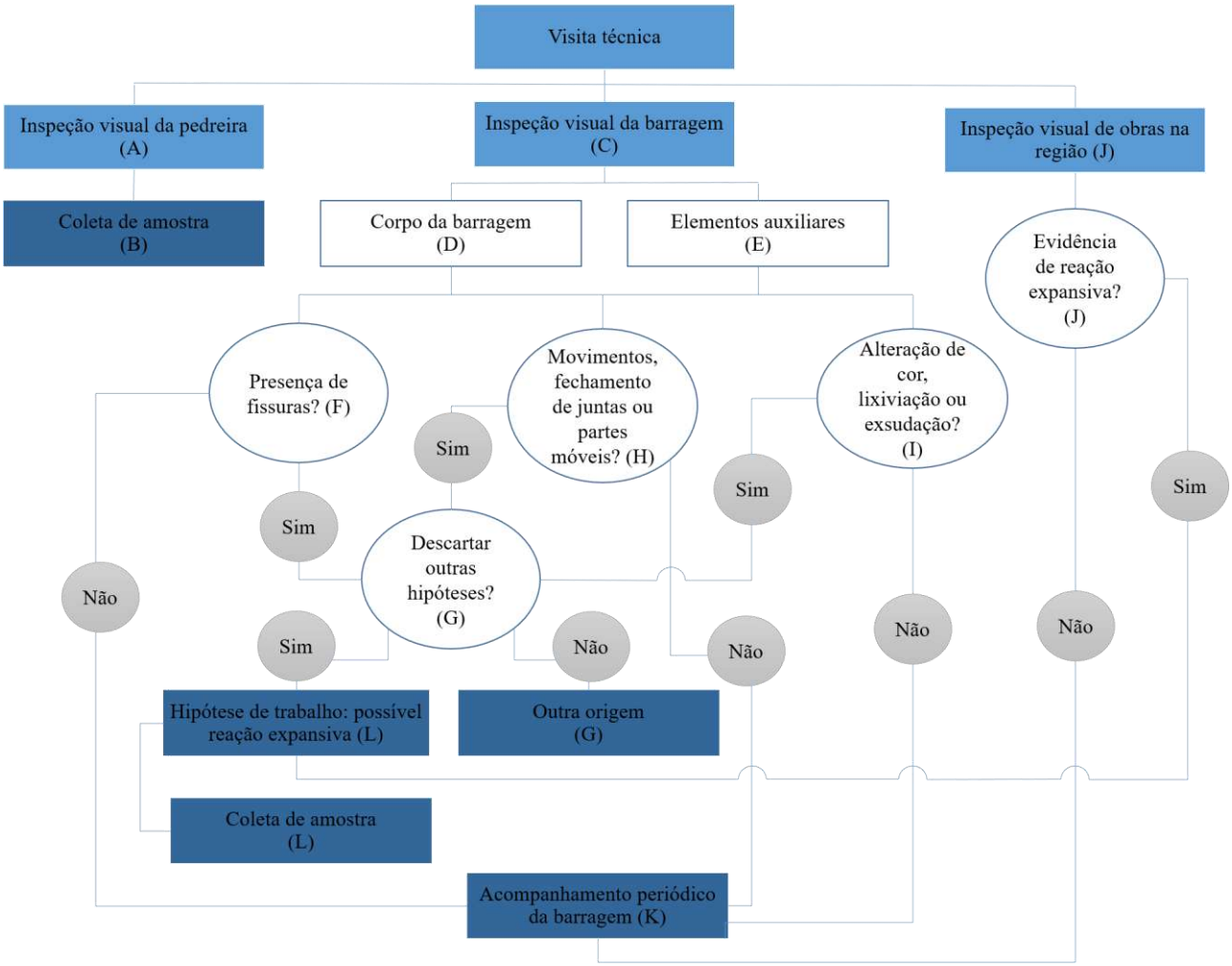

Figura 4: Fluxograma da visita técnica

No caso da presença de fissuras (F) ser identificada, deve-se: documentar a área afetada ; determinar a forma e tamanho das fissuras; se podem causar problemas estruturais; e descartar outras razões para sua origem (G). Fissuras com orientação preferencial e bem acentuadas aparecem em geral nas galerias superiores e paramentos (Figuras 5 e 6) devido ao desenvolvimento de reações expansivas que podem gerar tensões internas. Normalmente, as barragens não possuem restrições verticais, mas sim horizontais devido as ombreiras, próximo das quais as fissuras podem ser geradas como resultado da interação barragem-terreno. A grande superfície de exposição dos elementos auxiliares e seus baixos níveis de confinamento favorecem reações expansivas e facilitam sua apreciação. Assim, na visita técnica deve ser dada atenção especial a esses elementos, geralmente produzidos com o mesmo concreto da barragem (principalmente muretas da crista, dentes dissipadores de energia no pé da barragem, paredes dos vertedouros, construções auxiliares, etc.).

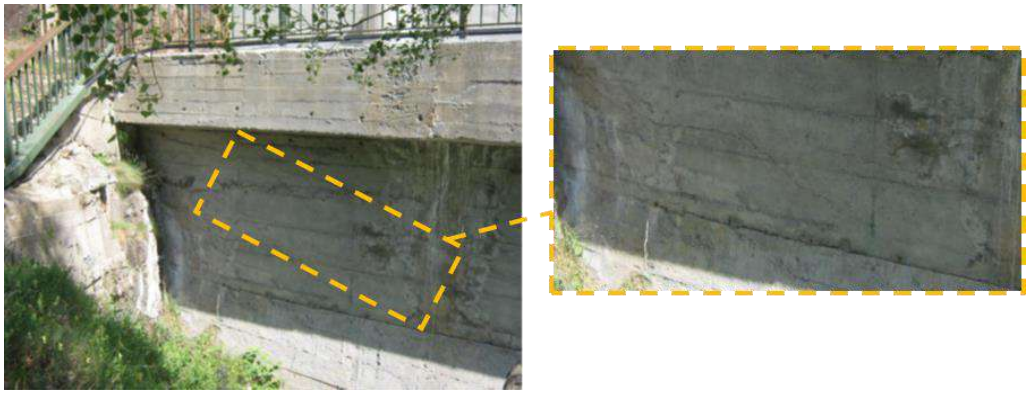

Figura 5: Fissura no paramento de jusante próximo a ombreira direita

ISBN 978-65-86819-05-2

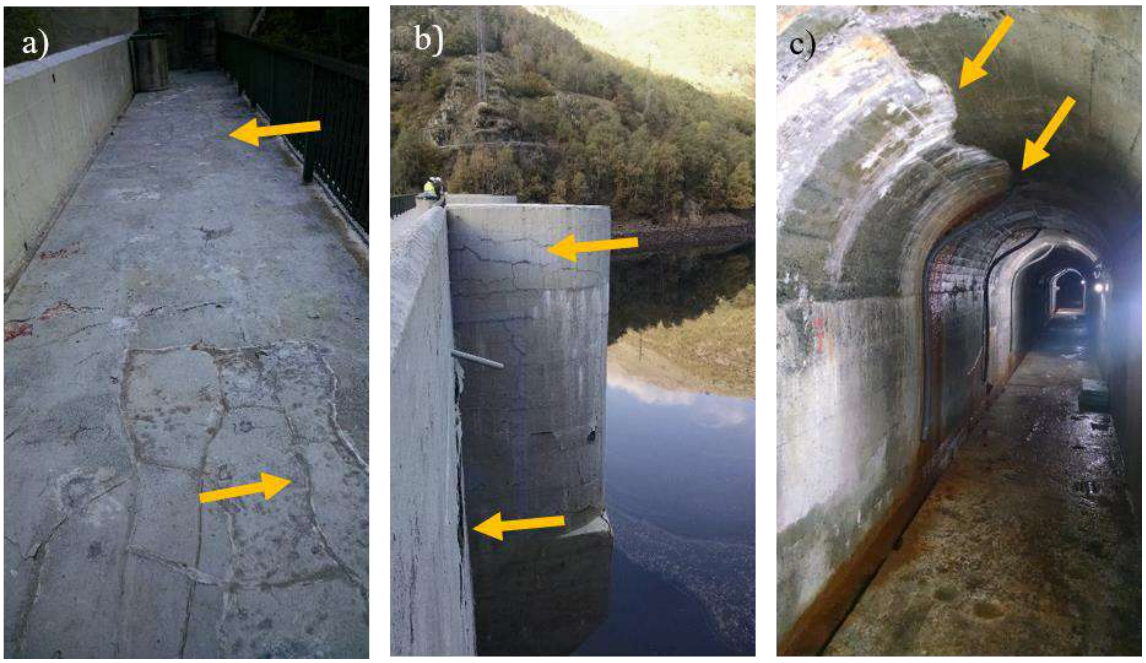

Figura 6: a) Fissuras na passarela, b) Desplacamento de material e fissuras no paramento de jusante e c) Coloração ocre e material branco na galeria

A detecção dos movimentos horizontais e verticais é realizada com mais precisão por meio dos dados do sistema de auscultação. No entanto, em barragens afetadas por problemas de expansão interna, os deslocamentos geralmente podem ser identificados a olho nu, como na Figura 7. A expansão do concreto em elementos com diferentes condições de confinamento ou em blocos com geometria diferente geralmente produzem deslocamentos que podem ocasionar fechamento de juntas ou que danificam partes móveis (H). Esses deslocamentos entre os blocos são gerados para liberar energia e, assim, aliviar as tensões resultantes da expansão.



Figura 7: Evidências de deslocamento entre os blocos: a) Elevação do guarda-corpo, b) Elevação de um dos blocos e c) Deslocamento horizontal entre blocos

Em barragens de plantas retas que apresentam um alto grau de reações expansivas, os deslocamentos podem ter um efeito de arco. Elementos auxiliares, como guarda-corpo ou muretas na crista, podem ajudar na identificação dos movimentos dos blocos (veja o exemplo na Figura 8). As juntas de dilatação permitem variações volumétricas causadas por mudanças climáticas e movimentos relativos entre os blocos. Com o desenvolvimento de reações expansivas, o concreto tem um aumento volumétrico que geralmente leva ao fechamento das juntas. Aumentos volumétricos também podem influenciar certos equipamentos instalados, causando obstrução dos elementos móveis e alterações na geometria da abertura. A

ISBN 978-65-86819-05-2

dificuldade de abrir e fechar as comportas, o aumento da vibração e do ruído nos geradores de energia, além do contato das partes móveis com o concreto próximo são exemplos comuns.



Figura 8: Movimentação horizontal na crista: a) Vista superior da crista e b) Detalhe do guarda-corpo

Em certos casos, é possível observar nos elementos auxiliares e no corpo da barragem a precipitação de produtos de reação acumulados na superfície do concreto (I). Os produtos gerados nas reações internas podem ser depositados nos vazios existentes ou transportados pela água, depositando-se nas fissuras ou manchando a superfície do concreto. Nas barragens afetadas pela RSI é provável que haja manchas marrons devido à oxidação dos sulfetos de ferro presentes no agregado usado na fabricação de concreto, como na Figura 9. Além disso, a água de infiltração coletada pelos drenos na galeria pode ter uma cor marrom escura devido à presença de hidróxido de ferro.

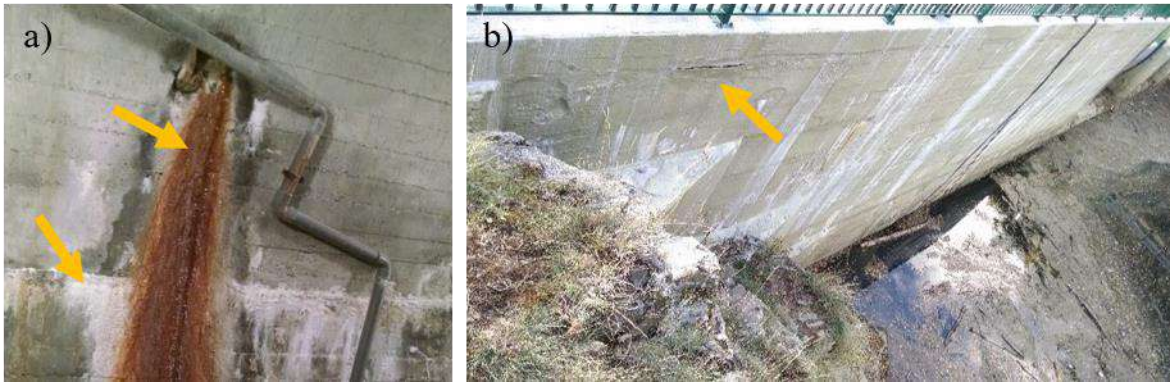

Figura 9: a) Detalhe coloração ocre e material branco na galeria e b) Vista do paramento de montante

As barragens são suscetíveis aos efeitos da deterioração causados por problemas externos e internos, que podem não estar relacionados a reações expansivas (G). As manifestações patológicas encontradas podem estar ligadas a falhas de projeto e construção assim como na manutenção, causando sinais de deterioração na barragem. As fissuras não ocorrem apenas devido a reações expansivas, mas também podem se originar de assentamentos diferenciais da fundação, projeto inadequado, problemas de construção, uso de materiais impróprios, efeitos térmicos e retração. As fissuras também podem responder a uma combinação de causas, dificultando o reconhecimento. Como consequência dos vários fatores, a barragem pode apresentar deslocamentos, movimentação de peças e/ou equipamentos, além de fissuras estruturais. Portanto, durante a inspeção de fissuras é essencial identificar possíveis causas alternativas.

Após a inspeção visual da pedreira e da barragem, recomenda-se observar as obras próximas (J). Em obras ao redor da barragem construídas com os mesmos agregados, os sinais de reações expansivas podem levar menos tempo para se manifestar devido à sua maior área específica de superfície. A falta de sinais de reações expansivas internas em obras próximas não isenta a barragem, pois as obras hidráulicas, em constante contato com a água, podem estar mais predispostas a esse tipo de fenômeno.

ISBN 978-65-86819-05-2

Caso após as inspeções visuais, nenhum sinal de reação expansiva interna seja encontrado deve-se proceder com o monitoramento periódico da barragem (K). Esse controle periódico da barragem é essencial, pois permite uma ação rápida quando são detectados possíveis sinais do desenvolvimento de reações expansivas ou outras manifestações patológicas. Na presença de sinais que embasem a hipótese de trabalho (L) de reação expansiva, deve-se identificar qual fenômeno ocorre.

As reações expansivas mais comuns em barragens de concreto são álcali-agregado e RSI. O estudo dos testemunhos extraídos da barragem permite identificar qual das duas ocorre ou mesmo se ambas estão presentes. Para isso, a campanha de extração com testemunhos deve ser representativa de diferentes partes da barragem (galeria e paramento), fornecendo uma análise confiável do problema apresentado. Extrações de testemunhos devem ser realizadas tanto em áreas saudáveis quanto em áreas com sinais de reação. A metodologia geral para a caracterização dos testemunhos inclui a extração, o transporte, a inspeção visual, a documentação fotográfica e o planejamento dos ensaios.

Durante a visita técnica, são determinadas as áreas mais danificadas pelas reações expansivas e é decidida a quantidade de amostras (testemunhos) a serem extraídas em cada área. As quantidades podem variar, dependendo do nível de precisão do estudo desejado e da facilidade de acesso. Recomenda-se extrair testemunhos da área de paramento e da galeria, pois as condições de contorno favorecem o RAA (principalmente na galeria) ou o RSI (principalmente no paramento). Para definir o diâmetro e o comprimento dos testemunhos, as etapas de construção devem ser revistas para descobrir possíveis conflitos com drenos, fiação de instrumentação ou outras instalações. O próximo estágio é localizar e documentar o processo de extração.

Em seguida, a dimensão é medida e as amostras de cada seção são identificadas com uma nomenclatura única assinalada com marcador permanente. A nomenclatura recomendada é do tipo: T1-1 '. O primeiro termo (T1) refere-se ao número de testemunhos extraídos da barragem, ou seja, testemunho 1. O número seguinte refere-se ao tramo do testemunho extraído, tendo como origem a superfície. O símbolo ' refere-se ao número da seção de peça do respectivo tramo, sempre em ordem crescente e de acordo com a direção da perfuração, sendo ' para a primeira seção, " para a segunda seção e assim por diante. O esquema de nomenclatura proposto para um testemunho é apresentado na Figura 10.

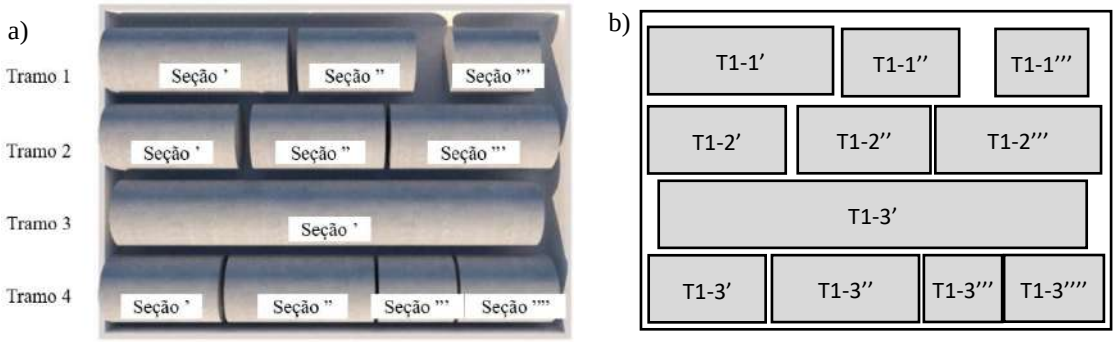

Figura 10: a) Testemunhos extraídos e b) esquema de nomenclatura para um testemunho tipo

Posteriormente é feito um relatório fotográfico geral e um relatório detalhado de cada seção, além da inspeção visual. Deve-se prestar atenção às condições das amostras, umidade e presença de material solto, precipitados, alterações de cor, fissuras na pasta e / ou agregados, tipo e tamanho dos agregados. Após a documentação fotográfica, as amostras são selecionadas para o programa experimental.

2.3. Programa experimental

O programa experimental é definido embasado nas observações realizadas nas etapas anteriores (estudos prévios da documentação, as visitas técnicas da pedreira, barragem e arredores). Nos agregados, principalmente, os minerais presentes e o potencial reativo remanescente devem ser identificados.

No concreto, a formação de produtos expansivos, materiais de oxidação e etringita secundária devem ser avaliados. Considerando que são produtos da reação entre o agregado e a pasta de cimento, considera-se inicialmente realizar a inspeção visual tanto no agregado como no concreto, com especial atenção a interface agregado/pasta e depois os poros e fissuras. A Tabela 1 resume os ensaios propostos e o material em que cada uma das técnicas deve ser aplicada.

ISBN 978-65-86819-05-2

Tabela 1 – Ensaios propostos e material aplicado

Ensaio	Material
Análise petrográfica	Agregado
Ensaio acelerado	Agregado
Fluorescência de raios-X (FRX)	Agregado
Microscopia óptica	Agregado
Difração de raios-X (DRX)	Agregado e concreto
Inspeção visual	Agregado e concreto
Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com EDS	Agregado e concreto
Damage Rating Index (DRI)	Concreto
Ensaio colorométrico	Concreto
Stiffness Damage Test (SDT)	Concreto

2.3.1. Ensaios nos agregados

Nos agregados são identificados os elementos potencialmente reativos que podem causar reações internas com a geração de produtos expansivos. Para a caracterização dos agregados, são realizados os ensaios de análise petrográfica, ensaio acelerado, fluorescência de raios-X, difração de raios-X, microscopia óptica e eletrônica de varredura, conforme descrito a continuação.

A análise petrográfica permite determinar a estrutura e a composição quantitativa dos agregados utilizados na fabricação de concreto, utilizando a UNE-EN 932-3 (correspondente brasileira: ABNT NBR 15577-3:2018). Este teste determina as quantidades de minerais reativos. O método de teste acelerado, proposto por Gobbi (2019), considera a oxidação de agregados contaminados por sulfetos de ferro. O agregado é imerso em peróxido de hidrogênio sem agitação por 6 horas e seco em estufa a 40 °C por 18 horas. Os ciclos são repetidos a cada 24 horas, medindo diariamente o pH da solução e a condutividade elétrica. A determinação do teor de sulfato na solução é estimada pela técnica de cromatografia líquida de alta eficiência em datas específicas. O teste é realizado tanto nos agregados da pedreira quanto nos agregados removidos dos testemunhos da barragem para medir o potencial de reação remanescente.

Também se realiza a caracterização dos óxidos fundamentais presentes por meio da fluorescência de raios-X e as fases cristalinas são identificadas por difração de raios-X. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) com EDS complementa a análise, permitindo identificar as fases presentes, sua morfologia e os elementos químicos. É aconselhável examinar amostras de agregados com fissuras ou alterações de cor.

2.3.2. Ensaios em testemunhos de concreto

Embora o concreto possa ser fabricado em laboratório emulando a composição e os componentes utilizados, a baixa velocidade da cinética das reações é uma desvantagem para a obtenção dos resultados. Portanto, é preferível trabalhar com amostras retiradas da estrutura.

O ensaio colorimétrico ajuda na identificação da área de interesse com suspeita de fenômenos expansivos. É um método qualitativo que revela a presença de elementos relacionados às diferentes reações. O ensaio seguiu a metodologia apresentada por Chinchón-Payá (2013). Para acelerar a identificação, recomenda-se cortar o testemunho longitudinalmente em 2 partes iguais, conforme apresentado na Figura 11.



Figura 11: Esquema de corte para os testemunhos submetidos ao ensaio colorimétrico

A determinação de sulfatos requer a aplicação de duas soluções reativas: uma primeira de nitrato de bário e permanganato de potássio e uma segunda de ácido oxálico. A reação do nitrato de bário com sulfatos na presença de permanganato de potássio resulta na formação de um precipitado rosa. A aplicação subsequente de ácido oxálico remove qualquer resíduo

ISBN 978-65-86819-05-2

de permanganato que não tenha sido retido no precipitado. Assim, áreas com presença de sulfato devem adquirir um tom púrpura.

Para isso, primeiro, uma solução de nitrato de bário e permanganato de potássio na proporção 2:1 deve ser preparada para um teor final de sólidos de 6% (40 g de nitrato de bário, 20 g de permanganato de potássio e 940 g de água destilada). O testemunho é umedecido superficialmente na primeira solução por 3 minutos e, em seguida, a amostra é seca. Na sequência, a amostra é submersa por 3 minutos no ácido oxálico. Finalmente, a superfície da amostra é lavada com água destilada.

A coloração relacionada à reação álcali-agregado revela áreas com alta concentração de potássio e cálcio, encontradas no gel produzido pela reação. Uma solução saturada de cobaltonitrito de sódio (50 $g \cdot L^{-1}$) é preparada na qual a superfície da amostra é imersa por 3 minutos. Em seguida, a superfície do material é lavada com água destilada. A solução de cobaltonitrito de sódio é instável, pois o íon nitrito se decompõe e produz vapores nitrosos. Por esse motivo, o reagente deve ser preparado e utilizado dentro de um período de 3 a 4 dias. O cobaltonitrito de sódio reage com o potássio, resultando em uma coloração amarela. A seguir, é preparada uma solução saturada de Rodamina B (50 $g \cdot L^{-1}$), na qual a superfície da amostra é imersa por 3 minutos. Posteriormente, o material é lavado com água destilada. A solução de rodamina B reage com o cálcio, resultando em uma cor rosa, no entanto, a rodamina não é absorvida no C-S-H, dessa forma não produz falsos positivos (TORRES, 2014).

A distribuição e incidência das áreas coloridas fornece informações relevantes sobre a possível reação. Portanto, a frequência da aparência deve ser avaliada em relação à posição na barragem (paramento ou galeria) e com a profundidade medida a partir da superfície de extração. O estudo das áreas de interesse é complementado por testes adicionais de DRX, FRX e MEV com EDS. A análise por MEV com EDS deve preferencialmente focar nos poros e fissuras presentes no concreto que podem ter deposições de gel e etringita secundária.

Complementar à série de ensaios propostos, podem ser realizados os ensaios *Stiffness Damage Test* – SDT (SANCHEZ et al., 2014 e SANCHEZ et al., 2015a) e o *Damage Rating Index* – DRI (SANCHEZ et al., 2015b). O SDT é um ensaio que pode ser realizado em corpos de prova ou testemunhos e tem caráter não destrutivo. Esse ensaio é baseado em um carregamento cíclico à compressão até um nível máximo de 40 % da resistência à compressão do material, e pode ter seu resultado correlacionado com a deterioração no concreto afetado por mecanismos deletérios (como o RAA).

Por outro lado, o DRI é um ensaio em escala mesoscópica que consiste em analisar a face interna de um testemunho cortado longitudinalmente (de maneira semelhante ao sugerido para o ensaio colorimétrico, apresentado Figura 11). A face interna do testemunho deve ser polida para realizar a contagem das fissuras (separada por sua localização – agregado ou pasta), para posterior cálculo do número DRI. O número DRI deve ser normalizado para uma área de 100 cm^2 (como proposto por SANCHEZ et al., 2015b) para que possa ser obtido o grau de deterioração e, posteriormente, relacionado ao nível de expansão apresentado na amostra.

2.4. Diagnóstico

À medida que o estudo avança, ele deve ser constantemente reavaliado e, se necessário, reformular a hipótese inicial. A análise do conjunto de resultados obtidos deve levar à confirmação da hipótese final, que justifica os sintomas identificados. Após o diagnóstico definitivo, é uma boa prática propor recomendações e medidas para mitigar os efeitos da reação ou reduzir seu alcance. Da mesma forma, o monitoramento periódico da evolução do estado da barragem é recomendado para identificar precocemente possíveis mudanças nas tendências comportamentais.

3. CONCLUSÕES

Através do estudo de barragens reais, foi verificada a importância da análise da documentação da pedreira e dos relatórios e dados da barragem, bem como das visitas técnicas. Essas ferramentas ajudam a entender os comportamentos apresentados e permitem formular uma hipótese de trabalho.

Além disso, é importante analisar os mapas geológicos e relatórios específicos com caracterizações da geologia da região, pois eles fornecem dados sobre a composição potencial do material usado como agregado. Isso é essencial para determinar a presença de compostos que podem reagir causando a expansão do concreto.

ISBN 978-65-86819-05-2

Os testes de laboratório propostos em testemunhos de concreto e nos agregados retirados da pedreira permitem o diagnóstico das principais causas de comportamentos anômalos. Os testes propostos para o agregado são: inspeção visual, análise petrográfica, ensaio acelerado, fluorescência de raios-X, difração de raios-X, microscopia óptica e eletrônica de varredura. Para o concreto, recomenda-se: inspeção visual, difração de raios-X, ensaio colorimétrico, microscopia eletrônica de varredura, stiffeness damage test (SDT) e damage rating index (DRI). Baseado na experiência adquirida com o estudo de reações expansivas internas, recomenda-se a sequência de etapas apresentadas para elaboração de um diagnóstico confiável.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - pela bolsa concedida (processo 205215/2014-9).

REFERÊNCIAS

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN UNE-EN 932-3: **Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 3: Procedimiento y terminología para la descripción petrográfica simplificada**, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-3: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto**. Rio de Janeiro, p. 10. 2018.

CAMPOS, A.; LOPEZ, C.; AGUADO, A**. Análisis meso-mecánico del hormigón bajo la acción de procesos expansivos internos**. XXVII Encuentro del Grupo Español de Fractura/12ª Jornadas de Fractura de SPM. Porto, Portugal, 283-288, 2010.

CASANOVA, I.; AGUADO, A.; AGULLÓ, L. **Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – II. Physico-chemical modeling of sulfate attack**. Cement and Concrete Research, 27, nº. 11, 1627-1632, 1997.

CHINCHÓN-PAYÁ, S. **Áridos reactivos en hormigones de presa. Reacción sulfática con formación de thaumasita**. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. Alicante, España, 2013.

DIAMOND, S. **A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms – 1: alkalis in cements and in concrete pore solutions**. Cement and Concrete Research, 5: 329-345, 1975.

GOBBI, A. **Reacciones expansivas internas: estudio de los áridos y hormigón de presas**. Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha, 2019.

GOMIDES, M. de J.; HASPARYK, N. P.; ANDRADE, M. A. S. de; BITTENCOURT, R. M. **Investigação de agregados contendo sulfetos para utilização em estruturas de concreto**. XXVI Seminário nacional de grandes barragens. Comitê brasileiro de barragens. Goiás, Brasil, 2005.

MOURA, A. C. de. **Análisis numérico de presas de hormigón bajo acciones expansivas**. Barcelona: Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha, 2012.

OLIVEIRA, I. **Reacción sulfática interna en presas de hormigón cinética del comportamiento**. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha, 2011.

OLIVEIRA, I.; CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A. **New unreacted-core model to predict pyrrhotite oxidation in concrete dams**. Journal of Materials in Civil Engineering, 25, Issue 3, 372–381, 2013.

OLIVEIRA, I.; CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A. **Evolution of pyrrhotite oxidation in aggregates for concrete**. Materiales de Construcción, 64, Issue 316, 2014.

PARDO-BOSCH, F. **Gestión integral de obras hidráulicas de hormigón: del diagnóstico a la inversión**. Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha, 2014.

ISBN 978-65-86819-05-2

PARDO-BOSCH, F.; AGUADO, A. **Damage diagnosis in concrete dams with presented expansive damage based on medical propaedeutics**. Journal of performance of constructed facilities, vol. 31, núm. 5, p. 04017048-1-04017048-12, 2017.

PAULON, V. A. **Reação álcali-agregado em concreto**. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1981.

SANCHEZ, L.F.M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J. **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, 2014

SANCHEZ, L.F.M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J. **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, 2015a.

SANCHEZ, L.F.M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; DUCHESNE, J. **Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI)**. Cement and Concrete Research, 67, 74-92, 2015b.

SAOUMA, V.; MARTIN, R. A.; HARIRI-ARDEBILI, M. A.; KATAYAMA, T. **A mathematical model for the kinetics of the alkali-silica chemical reaction**. Cement and Concrete Research, 68: 184-195, 2015.

TORRES, A. V. **Estudio experimental sobre la reacción álcali-sílice en el hormigón producida por áridos de reacción lenta**. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España, 2014.

ULM, F.-J.; COUSSY, O.; KEFEI, L.; LARIVE, C. **Thermo-chemo-mechanics of ASR expansion in concrete structures**. ASCE Journal of Engineering Mechanics, v. 126, n. 3, p. 233-242, 2000.