

ESTUDO NUMÉRICO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL POR ATAQUE INTERNO DE SULFATOS EM UMA ESTRUTURA DE BARRAGEM DE CONCRETO

Capraro, Ana Paula Brandão ¹; Medeiros, Marcelo Henrique Farias ²; Capraro, Diego Felipe Abrahão Capraro ³; Pieralisi, Ricardo ⁴

¹ Doutora, Universidade Federal do Paraná/ana.brandao@ufpr.br

² Doutor, Universidade Federal do Paraná/medeiros.ufpr@gmail.com

³ Mestre, Universidade Federal do Paraná/diegocapraro@ufpr.br

⁴ Doutor, Universidade Federal do Paraná/ricpialisi@ufpr.br

Resumo: Este estudo teve como objetivo avaliar numericamente, com dados de entrada experimentais, o comportamento de concretos contaminados por diferentes teores de sulfato. As recomendações das normas, difundidas internacionalmente, estabelecem um nível máximo de utilização de agregados contaminados, expresso em teor de SO_3 . Entretanto, não há convergência de valores, sendo importante estudar teores máximos que não causem degradação prematura das estruturas. Quatro séries de compostos cimentícios (0,0%, 0,5%, 1,0% e 5,0% de SO_3) foram avaliadas experimentalmente, em um estudo anterior, por meio dos ensaios de resistência axial e variação dimensional. As séries foram submetidas a uma condição ambiental acelerada, ciclo de umedecimento e secagem. Os resultados obtidos nos ensaios de resistência axial e variação dimensional foram aplicados em uma modelagem numérica, utilizando o método dos elementos finitos (MEF), para analisar as tensões geradas em uma estrutura de uma barragem de concreto. Os resultados indicam uma inversão comportamental no sentido de deslocamento entre as séries contaminadas e a série sem contaminação e, ainda, apresentaram um maior deslocamento para a série de maior contaminação (6,85 cm). Por fim, o estudo sugere uma forma de interpretar os dados experimentais, indicando uma forma de avaliar tensões e deformações geradas em estruturas reais.

Palavras-chave: Teores de sulfato, modelagem numérica, tensões, deformações, deslocamentos.

Abstract: This study aimed to numerically evaluate, using experimental input data, the behavior of concrete contaminated with different sulfate contents. Internationally recognized standards recommend a maximum allowable level of contaminated aggregates, expressed in terms of SO_3 content. However, there is no consensus on the acceptable values, making it important to study maximum levels that do not cause premature degradation of structures. Four series of cementitious compounds (0.0%, 0.5%, 1.0%, and 5.0% SO_3) were experimentally evaluated in a previous study through compressive strength and dimensional variation tests. The series were subjected to an accelerated environmental condition involving wetting and drying cycles. The results obtained from the compressive strength and dimensional variation tests were used in a numerical model, employing the finite element method (FEM), to analyze the stresses generated in a concrete dam structure. The results indicate a behavioral inversion in the direction of displacement between the contaminated series and the uncontaminated series, and also showed greater displacement for the series with the highest contamination level (6.85 cm). Finally, the study suggests an approach to interpret experimental data, providing a way to assess the stresses and strains generated in real structures.

Keywords: Sulfate levels, numerical modeling, stress, strains, displacements.

1. Introdução

A reação sulfática interna (RSI) é considerada uma reação prejudicial às estruturas de concreto, principalmente devido à presença de minerais sulfetados — piritita (FeS_2) e pirrotita (Fe_{1-x}S) — nos agregados. As reações envolvidas nesse processo são expansivas, devido à formação de produtos com volumes maiores do que os volumes iniciais dos materiais [1].

O processo deletério envolvendo a oxidação dos minerais sulfetados causa expansão e fissuras nas estruturas de concreto afetadas. Além das alterações externas observadas devido ao ataque, existem variações na microestrutura e, consequentemente, na composição química do material. Segundo Centurione, Kihara e Battagin [2] e Shayan [3], C-S-H e portlandita são possíveis compostos hidratados consumidos durante esse processo.

Existem recomendações normativas que limitam o teor de sulfetos (SO_3) presentes nos agregados utilizados em misturas de concreto. No entanto, não há consenso sobre o limite aceitável de contaminação. O ACI [4] limita o teor a 0,5% de SO_3 em relação à massa total dos agregados. Por outro lado, a norma NF P18-540 [5] limita o teor a 1,0% de SO_3 . Devido aos impactos que diferentes níveis de contaminação podem causar nas estruturas de concreto, este estudo avaliou concretos com quatro teores diferentes de contaminação de SO_3 : 0,0% (referência); 0,5% (limite definido por [4]); 1,0% (limite definido por [5]); e 5,0%.

Um modelo simplificado e direto para prever a evolução da expansão devido ao ataque interno de sulfatos no concreto pode ajudar no diagnóstico e na definição de estratégias de reabilitação para estruturas de concreto [6]. Os estudos disponíveis na literatura correspondem principalmente à modelagem da RAA (reação álcali-agregado), em menor escala ao ataque externo por sulfatos [7, 8], e aqueles relacionados à modelagem da RSI são praticamente inexistentes [9].

Este trabalho buscou avaliar uma metodologia de implementação de resultados experimentais de ensaios de resistência mecânica e variação dimensional em um modelo numérico para simular o comportamento de uma estrutura real.

2. Revisão da Literatura

As consequências causadas pela presença de sulfatos em materiais cimentícios têm sido estudadas nos últimos anos.

Alguns trabalhos apresentam alternativas de ensaios acelerados para observação das consequências do ataque. Um estudo recente propõe a aplicação de um campo elétrico em corpos de prova de concreto e argamassa, contaminados por sulfato, para avaliação da evolução da expansão nos mesmos [10].

Zhao et al. [11] avaliaram a degradação mecânica e microestrutural de concretos contaminados internamente por sulfatos. Segundo os autores, o ataque interno por sulfato reduz a resistência do concreto nas idades iniciais.

Já Lio et al. [12] avaliaram o efeito do ataque físico e químico por sulfato na degradação do desempenho do concreto sob diferentes condições. Os resultados indicaram que o ataque por sulfato afeta a microestrutura do concreto, promovendo o refinamento dos poros.

Song, Chen e Jiang [13] propuseram um modelo de tensões expansivas internas causadas pela presença de sulfatos em idades iniciais. A simulação numérica indicou que a tensão expansiva interna não é determinada apenas pela relação água/cimento do concreto e pela concentração da solução de sulfato, mas também é influenciada pela taxa de relaxamento do concreto.

Oliveira, Cavalaro e Aguado [6] propuseram um modelo para quantificar a cinética do ataque interno por sulfatos em estruturas de concreto. O modelo considera a expansão potencial total do concreto, sendo causada por duas origens distintas: a oxidação dos sulfetos presentes e a formação de etringita. A expansão potencial é transformada em expansão real por meio da multiplicação por um coeficiente de correção, uma vez que nem toda expansão resultará em variação dimensional, devido à existência de poros na matriz. Segundo os autores, o modelo proposto é interessante do ponto de vista da estimativa das expansões que podem ser geradas pelo ataque.

Na mesma linha, Campos, López e Aguado [14] apresentaram um modelo para a difusão das reações do ataque interno por sulfatos. O modelo considera a difusão do processo com base na Lei de Fick, tendo como parâmetros de entrada os dados de quantidade de sulfetos (pirrotita, neste caso), concentração de oxigênio, concentração inicial de Fe^+ , coeficiente de difusão do oxigênio, disponibilidade de água e temperatura ambiente.

Por fim, Campos et al. [9] estudaram o ataque interno por sulfatos e a reação álcali-agregado, por meio de análises numéricas com elementos finitos, utilizando modelos numéricos 2D e 3D. Os resultados das análises indicaram que a RSI se desenvolve em uma área próxima à face de jusante da barragem, sem sinais de expansão no interior da estrutura.

3. Metodologia

3.1 Origem dos dados

O presente estudo utilizou como dados de entrada para alimentação do modelo numérico resultados obtidos em trabalhos anteriores dos autores [15-16].

Como já mencionado anteriormente, os resultados utilizados foram de resistência à compressão de concretos, pela ruptura de corpos de prova cilíndricos de concreto, e de variação dimensional de pastas cimentícias, pela medição de corpos de prova

As condições de contorno da barragem consideradas foram: as restrições de deslocamento nos pontos de contato com o solo, representando as fundações; a ação da gravidade; e a pressão hidrostática na face montante (nível máximo da água considerado um metro abaixo da crista). A subpressão foi desconsiderada na análise, devido à existência de drenagem e consequente redução nas deformações.

Embora as barragens sejam estruturas tridimensionais, geralmente os modelos computacionais empregados, por meio do método dos elementos finitos (MEF), são bidimensionais. Nesse sentido, são válidas as hipóteses de simetria geométrica, conexões, deformações e transferência de calor na direção longitudinal da barragem. Considerando essas hipóteses e o fato de a dimensão longitudinal ser maior que a seção transversal da barragem, utiliza-se a análise em deformação plana, na qual as deformações na direção longitudinal da barragem são consideradas iguais a zero.

A modelagem numérica foi realizada no software ANSYS WORKBENCH 19.0, por meio de uma análise transiente com elementos finitos. De acordo com Campos et al. [9], devido à necessidade de água e oxigênio, o ataque geralmente ocorre na face jusante da barragem. A profundidade do ataque pode variar conforme o caso, entretanto, com base em inspeções realizadas, os autores indicam que é conveniente considerar a ocorrência até 1,5 m de profundidade da jusante para a montante. Nesse sentido, a degradação relacionada à contaminação foi considerada apenas na Região 2, face à jusante da barragem (Figura 1b).

Foi adotado um modelo bidimensional com função de interpolação linear, utilizando elementos planos, quadrados e com quatro nós do tipo CPE4R, resultando no modelo apresentado na Figura 1b. A dimensão padrão dos elementos foi de 40 cm e aplicou-se um refinamento do tipo H, que consiste em uma maior discretização da malha em regiões críticas. A malha final contou com 9.220 nós e 2.897 elementos. A análise transiente foi realizada com etapas de carregamento correspondentes às idades dos ensaios experimentais (28, 84, 168, 360 e 720 dias). O processo de convergência linear adotado foi o método de Newton-Raphson, baseado em uma aproximação sucessiva da solução pelo uso da derivada da função para construir uma reta tangente que se aproxima da raiz.

O módulo de elasticidade foi calculado de forma semelhante ao método utilizado por Santos et al. [20], por meio da Eq. 1 da NBR 6118 [21], aplicável a resistências do concreto entre 20 e 50 MPa:

$$E = \alpha \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

α é o coeficiente de ajuste, igual a 1,2 para agregados basálticos e diabásicos [28], e f_{ck} a resistência axial.

Também foram utilizados como dados de entrada o coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,2, o peso específico do concreto de 2400 kg/m³, o peso específico da água de 1000 kg/m³ e a aceleração da gravidade de 9,81 m/s².

As variações dimensionais foram aplicadas na faixa de 1,5 m a jusante da barragem, por ser a zona onde ocorre o ataque (Figura 1b). As variações, obtidas em percentuais no ensaio experimental de variação dimensional, foram transformadas em variações térmicas, assim como realizado em análises numéricas semelhantes [22-24], para alimentar o modelo. Considerando o exposto na NBR 6118 [21], a expansão linear (ε) é dada pelo coeficiente de dilatação térmica (α) multiplicado pela variação de temperatura (ΔT), conforme a Eq. 2.

$$\varepsilon = \alpha \times \Delta T \quad (2)$$

As variações dimensionais foram sempre obtidas pela diferença entre a idade analisada e o 14º dia. Essa abordagem foi adotada para eliminar o período inicial de retração, causado pelo processo de hidratação do cimento.

A Tabela 1 apresenta os dados de entrada empregados no modelo, sendo: a resistência à compressão axial obtida em estudo anterior [15-16]; o módulo estático estimado pela Eq. 1 e a resistência à compressão axial; e a variação térmica, obtida pela Eq. 2 e a variação dimensional obtida no ensaio experimental [15-16].

Tabela 1: Dados de entrada do modelo.

Séries	Idades	Resistência à compressão axial (MPa)	Módulo Elástico estimado (GPa)	Variação Térmica (°C)
SO ₃ (0,0%)	28	21,06	30,84	-1,89
	84	21,06	30,84	3,71
	168	27,78	35,42	2,77
	360	27,58	35,29	23,27
	720	27,65	35,34	-12,93
SO ₃ (0,5%)	28	21,45	31,12	16,05
	84	21,79	31,37	8,93
	168	27,31	35,12	26,45
	360	26,68	34,71	49,25
	720	26,49	34,59	54,67
SO ₃ (1,0%)	28	20,25	30,24	12,41
	84	20,11	30,13	19,01
	168	30,24	36,95	21,84
	360	28,03	35,58	27,41
	720	25,75	34,1	34,99
SO ₃ (5,0%)	28	19,63	29,78	9,96
	84	16,27	27,1	36,53
	168	19,94	30,01	41,09
	360	20,06	30,1	44,4
	720	18,09	28,58	179,2

3. Resultados

Na Figura 2 observam-se as tensões principais máximas (σ_1) nas barragens avaliadas e na Figura 3 as tensões principais mínimas (σ_2) na idade final estudada (720 dias), na condição ambiental estudada. Os dois cenários são apresentados como forma de representar os estados mais críticos de tensões, máximas e mínimas.

Figura 2: Tensões máximas principais nas séries avaliadas aos 720 dias de idade, em Pa. A – SO_3 (0,0%); B – SO_3 (0,5%); C – SO_3 (1,0%); D – SO_3 (5,0%).

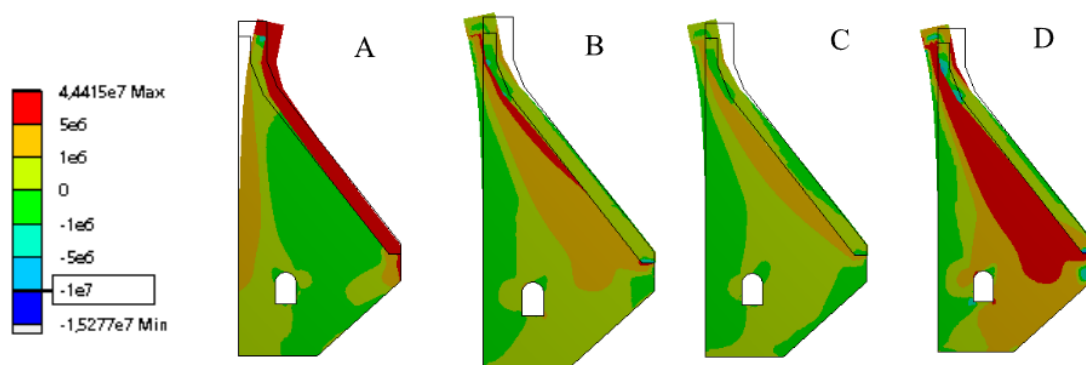
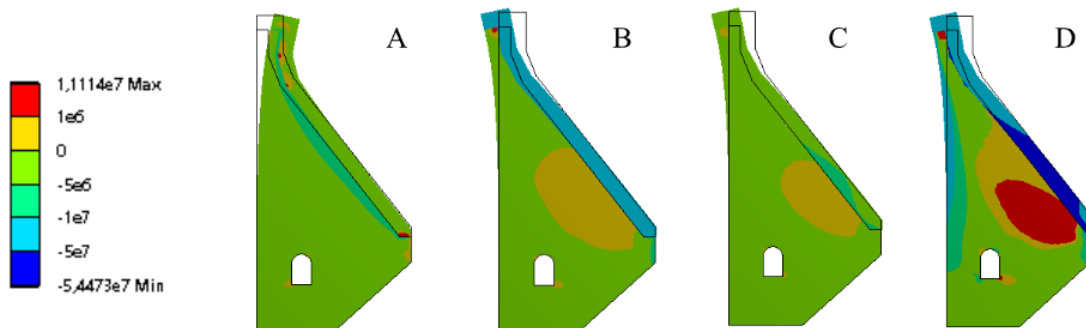


Figura 3: Tensões mínimas principais nas séries avaliadas aos 720 dias de idade, em Pa. A – SO_3 (0,0%); B – SO_3 (0,5%); C – SO_3 (1,0%); D – SO_3 (5,0%).



Para as duas figuras apresentadas, a escala de cores da legenda varia de azul escuro, dos pontos mais comprimidos, para vermelho, que seriam os pontos tracionados. Foi inserido como ponto intermediário da legenda o valor de zero, que diferencia a tração da compressão. Todos os valores apresentados estão em Pascal (Pa).

Nota-se, em todos os casos estudados, que a série referência (SO_3 0,0%) foi a única que possuiu deslocamento para a jusante da barragem, explicado pela retração inicial de secagem sofrida pelo concreto. Nas barragens com os concretos contaminados (0,5%; 1,0% e 5,0% de SO_3), a deformação ocorreu no sentido da montante, uma vez que o esforço aplicado no material foi de expansão. O comportamento das barragens contaminadas foi semelhante ao observado por Campos et al. [9] na barragem real, localizada Pyrenees, com 1,98% de contaminação por SO_3 dos agregados.

Como foi feita a aplicação do esforço de variação dimensional apenas na camada superficial da barragem, a restrição da parte inferior, que não sofre a variação dimensional, fez com que se gerasse o esforço contrário na camada superficial. Isto significa que, nos locais em que foi aplicada a retração (série referência), gerou-se esforços de tração na parte superior e compressão na parte inferior, devido à restrição que impede o encurtamento do concreto. Nos locais em que foi aplicada a expansão (séries contaminadas), gerou-se compressão na camada superficial, e tração na camada inferior.

Observou-se também que a direção em que são geradas as tensões principais é paralela a face jusante da barragem e que, perpendicularmente, são gerados esforços transversais, de natureza oposta, devido ao coeficiente de Poisson.

Pode-se verificar que nas barragens em que foi realizada a aplicação da expansão (séries contaminadas), houve inversão do comportamento natural da barragem, devido a carga de empuxo hidrostático. Os esforços causados pela expansão da RSI alteraram a configuração estrutural da barragem, pois, na face a montante, local em que não é identificada a ocorrência do ataque e que normalmente observam-se esforços de tração, tem-se esforços de compressão.

A Tabela 2 apresenta os deslocamentos máximos encontrados nas modelagens. É possível observar que nos modelos com aplicação de expansão, isto é, nas séries contaminadas, o deslocamento ocorreu a montante, considerado como negativo, o oposto ocorreu com a série referência, e por isso o valor positivo.

Tabela 2: Deslocamentos horizontais máximos observados nas barragens.

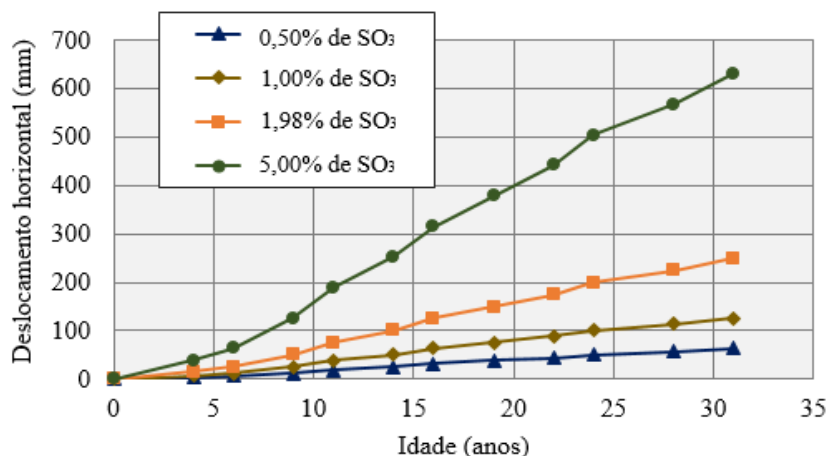
Série estudadas	Deslocamento máximo
SO ₃ (0,0%)	+1,63 cm
SO ₃ (0,5%)	-1,47 cm
SO ₃ (1,0%)	-0,57 cm
SO ₃ (5,0%)	-6,85 cm

Como forma de comparar os resultados obtidos nesse estudo com os resultados apresentados por Campos et al. [9] na barragem real, foi realizada uma análise dos deslocamentos obtidos no estudo.

Assim sendo, foram obtidos os dados da curva de Campos et al. [9], considerando a contaminação citada no trabalho de 1,98% de SO₃. A partir da curva principal (1,98% de SO₃) foram obtidas outras três curvas proporcionais (0,5%; 1,0% e 5,0% de SO₃). As três curvas foram obtidas considerando que a deformação se comporta linearmente em função do teor de contaminação estudado [25].

A Figura 4 apresenta as quatro curvas base adotadas para essa análise (1,98% de SO₃ – curva real de deslocamento horizontal –; 0,5%, 1,0% e 5,0% – curvas proporcionais a curva real, considerando o comportamento linear em função do teor de contaminação).

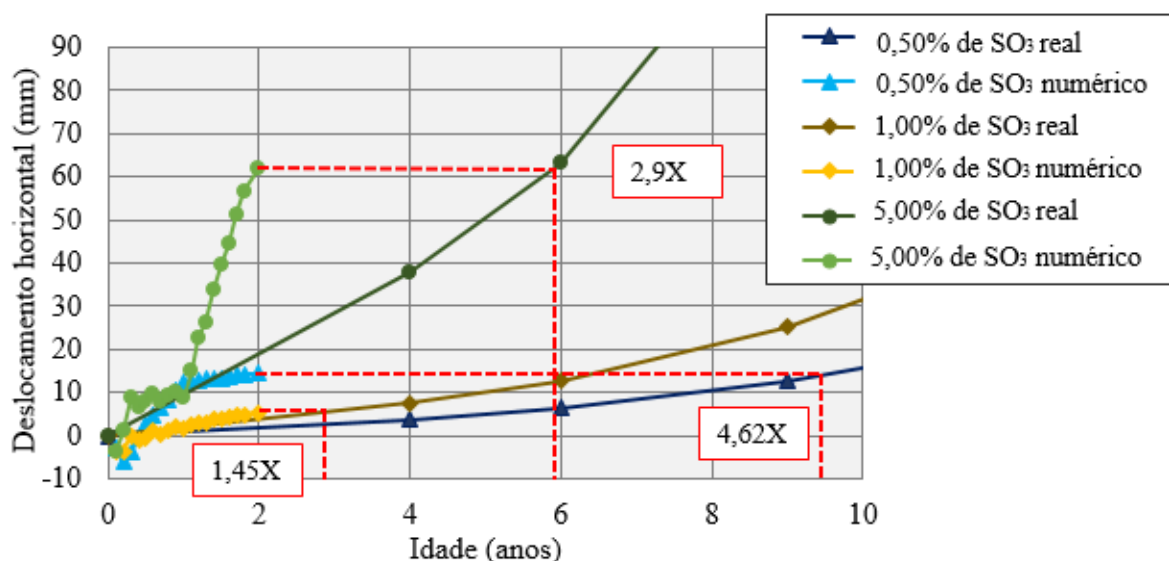
Figura 4: Curvas base de deslocamentos horizontais ao longo do tempo nos níveis de contaminação 0,5%, 1,0%, 1,98% e 5,0% de SO_3 .



As três curvas proporcionais à real foram comparadas às curvas obtidas nos modelos numéricos deste estudo. Contudo, há uma limitação para a análise, uma vez que os deslocamentos horizontais obtidos nesse estudo são consequências das variações dimensionais de pastas, não de concretos, como observado por Campos et al. [9]. Sendo assim, a análise realizada levou em conta que a deformação observada no modelo numérico por si só já estaria sendo majorada, pela diferença mecânica entre os materiais avaliados.

A Figura 5 apresenta as curvas base obtidas a partir da estrutura real e as curvas numéricas obtidas neste estudo.

Figura 5: Análise comparativa dos dados reais de Campos et al. [9] e os dados numéricos obtidos.



O deslocamento observado entre as curvas real e numérico da série de maior contaminação (5,0% de SO_3) indicou que o processo adotado neste estudo acelerou o deslocamento na ordem de 2,9X. A aceleração no processo pode ser explicada pelas variações dimensionais serem obtidas das pastas cimentícias e também pelo método de exposição adotado, ciclo de molhagem e secagem.

Para as séries de menores contaminações (0,5% e 1,0% de SO_3) não se obteve um fator de aceleração proporcional a contaminação empregada, sendo a série com 0,5% de contaminação a responsável pelo maior fator, igual a 4,62X, e a série de 1,0% de contaminação a responsável pelo menor fator, 1,45X.

4. Conclusões

Esse estudo auxiliou no entendimento comportamental de uma estrutura de barragem de concreto, permitindo a aplicação dos dados obtidos experimentalmente. Além disso, os resultados obtidos permitiram inferir que:

- O modelo aplicado mostrou resultados satisfatórios para análise de estruturas reais que sofram deformações devido as reações oriundas do ataque interno de sulfatos;
- Para as séries contaminadas, nas quais foram empregadas as expansões, houve inversão do comportamento estrutural da barragem, uma vez que o deslocamento ocorreu no sentido de montante, comprimindo essa face e gerando esforços de tração consideráveis na região central, logo abaixo da faixa de aplicação da expansão causada pela RSI;
- A série de maior contaminação foi a que apresentou as maiores tensões, sendo elas geradas pelas maiores variações dimensionais aplicadas no modelo;
- A comparação entre os resultados obtidos nessa análise numérica, com os obtidos por Campos et al. [9] em uma estrutura real, indica que a condição de exposição adotada no estudo acelerou o processo de degradação do concreto.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem as agências brasileiras CNPq, Capes e Fundação Araucária pelas bolsas e apoio financeiro, bem como a Universidade Federal do Paraná, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC), ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC), ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) e ao grupo de pesquisa de Patologia e Recuperação das Construções (PRC).

Referências

- [1] Rodrigues, A.; Duchesne, J.; Fournier, B.; Durand, B.; Rivard, P.; Shehata, M. (2012) Mineralogical and chemical assessment of concrete damaged by the oxidation of sulfide-bearing aggregates: importance of thaumasite formation on reaction mechanisms. *Cement and Concrete Research*. Vol. 42, pp. 1336-1347.
- [2] Centurione, S. L.; Kihara, Y.; Battagin, A. F. (2003) Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato. *Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica*. João Pessoa.
- [3] Shayan, S. (1988) Deterioration of concrete surface due the oxidation of pyrite contained in pyritic aggregates. *Cement and Concrete Research*. Vol.18, pp. 723-730.
- [4] American Concrete Institute. ACI 201 (1991) Guide to Durable Concrete. Detroit – USA.
- [5] Association Française De Normalisation. XP P18-540 (1997). Granulats – Définitions, conformité, spécifications. Paris.
- [6] Oliveira, I.; Cavalaro, S. H. P.; Aguado, A. (2013) New kinetic model to quantify the internal sulfate attack in concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol.43, pp. 95-104.
- [7] Shao, W.; Xiao, Q.; Zhang, W.; Shi, D. (2025) Numerical modeling of chloride convection-diffusion-reaction in reinforced concrete under external sulfate attack and drying-wetting cycles. *Construction and Building Materials*. Vol. 472.
- [8] Shan, Z.; Yin, G.; Wen, X.; Miao, L.; Wang, S.; Zuo, X. (2024) Numerical simulation on transport-crystallization-mechanical behavior in concrete structure under external sulfate attack and wetting-drying cycles. *Materials & Design*. Vol. 241.
- [9] Campos, A.; López, C. M.; Blanco, A.; Aguado, A. (2018) Effects of an internal sulfate attack and an alkali-aggregate reaction in a concrete dam. *Construction and Building Materials*. Vol.166. pp. 668-683.
- [10] Nguyen, V.; Leklou, N.; Mounanga, P. (2024) Development of accelerated test methods by electromigration to assess the risk of internal sulfate attack in heat-cured mortar and concrete. *Construction and Building Materials*. Vol.455.
- [11] Zhao, G.; Li, J.; Shi, M.; Fan, H.; Cui, J.; Xie, F. (2020) Degradation mechanisms of cast-in-situ concrete subjected to internal-external combined sulfate attack. *Construction and Building Materials*. Vol. 248.
- [12] Liu, P.; Chen, Y.; Wang, W.; Yu, Z. (2020) Effect of physical and chemical sulfate attack on performance degradation of concrete under different conditions. *Chemical Physics Letters*. Vol. 745.
- [13] Song, H.; Chen, J.; Jiang, J. (2016) An internal expansive stress model of concrete under sulfate attack. *Acta mechanica solida sinica*. Vol.29, pp. 610-619.

- [14] Campos, A.; López, C. M.; Aguado, A. (2016) Diffusion-reaction model for the internal sulfate attack in concrete. *Construction and Building Materials*. Vol.102. pp. 531-540.
- [15] Capraro, A. P. B.; Hoppe Filho, J.; Medeiros, M. H. F. (2021) Influence of internal sulfate attack on cement paste properties: contamination by pyrite. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. ISSN 1983-4195.
- [16] Capraro, A. P. B.; Macioski, G.; Medeiros, M. H. F. (2020) Effect of aggregate contamination with pyrite on reinforcement corrosion in concrete. *Engineering Failure Analysis*. ISSN 1350-6307.
- [17] Gao, J.; Yu, Z.; Song, L.; Wang, T.; Wei, S. (2013) Durability of concrete exposed to sulfate attack under flexural loading and drying-wetting cycles. *Construction and Building Materials*. Vol.39, pp. 33-38.
- [18] Gong, J.; Cao, J.; Wang, Y. (2016) Effects of sulfate attack and dry-wet circulation on creep of fly-ash slag concrete. *Construction and Building Materials*. Vol.125, pp. 12-20.
- [19] Jinag, L.; Niu, D. (2016) Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles. *Construction and Building Materials*. Vol. 117, pp. 88-98.
- [20] Santos, A. C.; Arruda, A M.; Silva, T. J.; Palma Vitor, P. C. (2017) Comparative study between theoretical values and experimental results of concrete elasticity modulus produced with diferente types of corase aggregate. *Ambiente Construido*. Vol.17.
- [21] NBR 6118 (2023) Projetos de estruturas de concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [22] Revilla-Cuesta, V.; Skaf, M.; Chica, J. A.; Fuente-Alonso, J. A.; Ortega-López, V. (2020) Thermal deformability of recycled self-compacting concrete under cyclical temperature variations. *Materials Letters*. Vol. 278.
- [23] Fu, Y. F.; Wong, Y. L.; Tang, C. A.; Poon, C. S. (2020) Thermal induced stress and associated cracking in cement-based composite at elevated temperatures – Part I: Thermal cracking around single inclusion. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 26, pp. 99-111.
- [24] Fu, Y. F.; Wong, Y. L.; Poon, C. S.; Tang, C. A. (2007) Numerical tests of thermal cracking induced by temperature gradient in cement-base composites under thermal loads. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 29, pp. 103-116.
- [25] Campos, A. (2012) *Análisis numérico de presas de hormigón bajo acciones expansivas*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha.