ESTUDO DO PROCESSO DE LIXIVIAÇÃO DURANTE 40 ANOS NO CONCRETO DE ENCHIMENTO DA CASA DE FORÇA DA BARRAGEM PRINCIPAL DE CONCRETO DE ITAIPU

A. C. P DOS SANTOS¹, C. NEUMANN JR^{1,2}, E. F. FARIA²

¹ Universidade Federal da Integração Latino Americana, UNILA. Foz do Iguaçu. Brasil.

² Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, Brasil.

RESUMO

Este estudo tem como objetivo realizar uma análise do processo de lixiviação no concreto de enchimento da casa de força da usina hidrelétrica de Itaipu. Estudos anteriores realizados na década de 1980 estimaram o tempo aproximado de 140 anos para atingir uma perda admissível de 20% de cálcio do concreto e, além disso, indicaram estabilidade da estrutura. Avaliações químicas da água de percolação ao longo de 40 anos são apresentadas. Testemunhos de concreto foram recentemente extraídos para realizar análise de macro e microestrutura, os valores de resistência à compressão obtidos foram bastante superiores aos valores de projeto. Conclui-se que o processo de lixiviação ainda ocorre, em menor velocidade e que não há risco estrutural.

Palavras chave: concreto; lixiviação; durabilidade; segurança estrutural; íons.

ABSTRACT

This study aims to advance researches related to leaching in the concrete backfill (below the foundations) of Itaipu Hydroelectric's powerhouse. Earlier studies carried out in the 1980s estimated an approximate period of 140 years to reach an admissible loss of 20% of the concrete's calcium and, besides this, indicated that there were no risks to the structure's stability. Chemical evaluations of percolation water over 40 years are presented. Concrete samples were recently extracted to perform macro and microstructure analysis, showing increase in strength with higher values than the project. It is concluded that the leaching process still occurs at a lower speed and that there is no structural risk.

Keywords: Leaching in Dams; Structure Aging; Durability of Concrete.

1. INTRODUÇÃO

A lixiviação é a dissolução dos compostos hidratados da pasta de cimento quando em contato com fluxo de água, principalmente águas puras ou ácidas (Taylor, 1990). O concreto é um material poroso reativo, que contém hidratos e água como principais componentes, estando suas fases sólidas em equilíbrio termodinâmico com as soluções químicas dos poros existentes ao seu redor, sendo o cálcio o principal elemento químico da pasta de cimento (Bellégo et al. 2003).

O processo de lixiviação por percolação de água pode causar sérios danos em estruturas de concreto como barragens, tubulações, portos, túneis, e estruturas submersas (Yang et al., 2012, Han et al., 2014, Phung et al., 2016, Tang et al., 2016). Muitos pesquisadores como Bangert et al. (2003), Bellégo et al. (2003), Haga et al. (2005), Forster et al. (2014), Han et al. (2014) and Phung et al. (2016) têm relatado o desempenho de materiais cimentícios frente à lixiviação, mencionando que há um aumento da porosidade da pasta de cimento ao longo do tempo. Em função da microestrutura se modificar, aumenta-se a permeabilidade e diminui-se a densidade da massa (Haga et al. 2005, Yang et al. 2012, Forster et al. 2014, Han et al. 2014, Phung et al. 2016, Tang et al. 2016).

No processo de lixiviação do cálcio, os poros ou a porosidade desempenham um papel muito importante. Primeiramente a dissolução e a difusão dos íons de cálcio acontecem na solução existente no interior dos poros. Posteriormente, a dissolução do cálcio da estrutura gerará novos poros no espaço. Na sequência, este novo aumento da porosidade resultará em maior coeficiente de difusão ou permeabilidade, que mais futuramente acelerará o processo da lixiviação, num efeito progressivo (Yang et al. 2012, Keshu et al. 2015). Exposições à lixiviação por longo prazo podem alterar significativamente o concreto da superfície (Rosengvist et al. 2017), o que acarreta a redução do efeito protetivo do concreto nas barras de aço (Tang et al. 2016), em função da diminuição do pH, induzindo à corrosão das armaduras (Phung et al. 2016).

A presença de lixiviação de cálcio tem sido relatada desde a década de 1920. Apesar disso, há poucos casos em que estruturas de concreto massa foram danificadas por esse processo, uma vez que a taxa de degradação é relativamente lenta (Narakai et al. 2006).

A fim de garantir uma longa vida útil das estruturas hidráulicas, é necessário um melhor entendimento dos efeitos das águas naturais na deterioração do concreto (Phung et al. 2016, Rosengvist et al. 2017). Durante o processo construtivo de Itaipu, no final da década de 1970, foi necessária a substituição de material aluvionar na fundação das unidades centrais da casa de força, na região do leito do Rio Paraná, por um concreto massa de diâmetro máximo de agregado 152mm e resistência característica de projeto de 10 Mpa. Esta camada, chamada de concreto de enchimento, apresentou zonas de alta permeabilidade que poderiam causar subpressões elevadas, lixiviação do concreto, redução da resistência a compressão e do módulo de deformação. Várias medidas foram tomadas a fim de corrigir e prevenir possíveis patologias. Desde então o concreto de enchimento é fruto de monitoramento através de análises químicas da água dos drenos, mas uma vez atestada a estabilidade estrutural os estudos de lixiviação foram descontinuados. O objetivo deste estudo é avançar as pesquisas relacionadas ao processo de lixiviação na camada de enchimento de concreto da usina hidrelétrica de Itaipu.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Dados gerais da usina Hidrelétrica de Itaipu

A usina Hidrelétrica de Itaipu é uma entidade binacional localizada no Rio Paraná, na fronteira entre Brasil e Paraguai (Figura 1), construída no período de 1975 a 1982 por ambos os países.

Figura 1. Vista geral da usina de Itaipu em imagem e planta. (Fonte: Itaipu, 2009)

A barragem possui uma extensão aproximada de 7.700 m e altura máxima de 196 m, sendo composta de cinco tipos de represamentos: a barragem de enrocamento, formada por núcleo em argila compactada, revestida de blocos de rocha oriundas da escavação do canal de desvio; a barragem de terra composta por argila vinda da escavação da fundação da barragem de enrocamento e das proximidades; as barragens de concreto de gravidade aliviada, gravidade maciça e de contrafortes.

2.2 A camada do concreto de enchimento

Para a construção da Casa de Força, foi necessário realizar a escavação do material aluvional do leito do rio entre as elevações 39 e 54m, sendo substituído por concreto de enchimento num volume de 148.565 m³, conforme o plano de escavações mostrado na Figura 2.

Figura 2. Plano de escavação da camada de enchimento (Fonte: acervo de Itaipu).

O concreto foi especificado com resistência à compressão de 10 MPa aos 365 dias, com agregados de até 152 mm de diâmetro, sendo lançado em camadas contínuas de 50 centímetros, por caminhões fora-de-estrada, espalhado com tratores e compactado por baterias de vibradores acoplados em retroescavadeiras. A Figura 3 apresenta uma vista parcial durante fases iniciais da concretagem, onde se destaca a escavação do “dente” de engaste e se observam as formas no limite jusante do concreto de enchimento.

Figura 3. Fase inicial de concretagem (Fonte: acervo de Itaipu)

Na sequência do processo construtivo, foram executados os furos para a cortina de injeção de jusante da Casa de Força, atravessando o concreto de enchimento. Neste processo observaram-se regiões com alta permeabilidade, sendo que cerca de 40% dos casos apresentaram coeficiente de permeabilidade superior a 10^{-3} cm/s.

Com a extração dos testemunhos dos furos, observou-se a existência de trechos com baixíssima permeabilidade intercaladas com trechos mais permeáveis. Para reduzir a permeabilidade desta camada foram executadas duas cortinas de drenagem nas laterais esquerda e direita do concreto de enchimento, capturando as águas de infiltração das ombreiras e conduzindo-as até um túnel de drenagem existente na elevação 20m, impedindo assim que estas águas penetrassem no concreto; também foi executada uma cortina de injeção na galeria de jusante na elevação 60m, ao longo da face de jusante do concreto de enchimento, a fim de se tentar impedir a percolação de água pelo concreto, no sentido jusante-montante. Esta cortina foi composta por três leques de injeção, sendo o central com resina epóxi e os demais com calda de cimento; também foram instalados dois extensômetros no concreto de enchimento para acompanhamento suas deformações.

Após a conclusão da cortina de injeção de jusante, foi observada redução da permeabilidade do concreto, da ordem de 100 vezes (ITAIPU, 1984) com coeficientes de permeabilidade de até 10^{-7} cm/s. Também se constatou tendência de uniformização da permeabilidade do concreto, através dos ensaios de perda d'água.

O monitoramento das infiltrações de água e suas respectivas análises químicas começaram a ser realizadas em agosto de 1982, na fase de enchimento parcial do reservatório, quando as enscadeiras a jusante da obra já haviam sido removidas, e vêm sendo realizadas até a atualidade. Entretanto, seus registros consolidados constam de arquivo digital somente a partir de março de 1987 e janeiro de 1984, respectivamente, inexistindo alguns valores nesse período de mais de três décadas.

3. RESULTADOS PARCIAIS E DISCUSSÕES

3.1 Análise da instrumentação

A análise da instrumentação existente no local é realizada de forma automatizada para o acompanhamento e segurança estrutural. Os extensômetros indicam o comportamento em termos de recalques diferenciais ou outros movimentos que possam comprometer a estrutura.

Observa-se na Figura 4 que os extensômetros apresentam comportamento sazonal, com valores máximos na ordem de 0,3 mm e oscilando atualmente em torno de 0,05 mm no EM-U-021; e tendência de contínuo recalque no EM-U-022, que na atualidade corresponde a valores próximos a 1,4 mm.

É importante comparar estes extensômetros com outros da mesma região, conforme Figura 5, que igualmente mostram pequena tendência de recalque, com valores atualmente na ordem de 6,7 (EM-U-013) a 8,2 mm (EM-U-014) na rocha de fundação, dentro das estimativas de projeto.

3.2 Análises da água dos drenos

Em relação aos ensaios químicos de água de percolação, realizados desde o ano de 1984 até a atualidade, observa-se que ocorre uma redução nos teores carbonato (Figura 6) e um aumento em relação ao bicarbonato (Figura 7), em especial a partir de 2008; e a partir de 1991, a inexistência de hidróxido (Figura 8) e a redução de cálcio (Figura 9), sendo esta última mais notada em relação aos drenos DTJ-U-008 e 012.

Observa-se ainda um pequeno aumento das vazões nos drenos DTJ-U-004 e 008, estando o DTJ-U-012 com vazão praticamente estabilizada, conforme Figura 10.

Não há informações sobre ensaios químicos realizados entre os anos de 1994 e 2003, bem como dados de vazão entre 2003 e 2013.

Figura 6. Teores de carbonato.

Figura 7. Teores de bicarbonato.

Figura 8. Teores de hidróxido.

Figura 9. Teores de cálcio.

Apesar de existirem outros drenos nesta região, estes três são considerados os de maior interesse por corresponderem a cerca de 90% do total de água que por ali infiltra.

3.3 Extração de testemunhos e ensaios preliminares

Em setembro de 2018 foram extraídos testemunhos de concreto, em 10 perfurações de 10cm de diâmetro na região central da camada de enchimento, conforme se mostra na figura 11. As primeiras análises visuais mostraram alguns faveolamentos, como diagnosticados no passado, que poderiam contribuir para infiltrações e levar ao processo de lixiviação, com agregados de grande diâmetro.

Figura 11. Testemunhos extraídos.

Estas amostras foram retificadas ensaiadas à resistência à compressão axial, mostrando resistência, entre 23 e 36 MPa, sendo muito superior às especificações do projeto (10Mpa), não só pela hidratação do cimento a longo prazo, mas também pela hidratação da cinza volante ao longo de 40 anos. Amostras foram destinadas para ensaios de difração de raios X (XRD), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microtomografia computadorizada, a fim de verificar alterações na estrutura, cujos procedimentos ainda estão em andamento no momento.

4. CONCLUSÕES

Avaliações preliminares das análises químicas da água, realizadas desde a década de 1980, indicam que o processo de lixiviação do concreto de enchimento ainda ocorre. No entanto, de acordo com o comportamento da instrumentação, no momento não há movimentos na estrutura que possam estar relacionados à perda de resistência do concreto.

Além disso, testes de compressão recentes mostraram amostras com resistência muito superior à especificada no projeto original, segundo a qual a lixiviação pode ser entendida como uma pequena mudança localizada, sem implicações na segurança da barragem.

Nas etapas subsequentes da presente pesquisa, pretende-se revisar as estimativas anteriores de durabilidade, levando em consideração a maior disponibilidade atual de dados químicos e também a reavaliação dos efeitos a longo prazo da lixiviação.

Embora a situação no terreno revele boas condições de segurança da barragem, serão sempre necessárias investigações adicionais para melhor compreender os processos até agora pouco conhecidos e as mudanças que estes processos podem provocar no envelhecimento de estruturas críticas como o caso de Itaipu Binacional.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Centro de Estudos de Segurança de Barragens de Itaipu pelo apoio e financiamento deste projeto, assim como aos técnicos do laboratório de concreto de Itaipu pelo apoio na extração dos testemunhos e ensaios.

6. REFERENCIAS

- Bangert, F.; Grasberger, S.; Kuhl, D.; Meschke, G. (2003). *Environmentally induced deterioration of concrete: physical motivation and numerical modeling*. Engineering Fracture Mechanics. 70: 891–910.
- Bellégo, C.L.; Pijaudier-Cabot, G.; Gérard, B.; Dubé, J.F.; Molez, L. (2003). *Coupled Mechanical and Chemical Damage in Calcium Leached Cementitious Structures*. Journal of Engineering Mechanics. 129: 333–341.
- Forster, A.M.; Szadurski, E.M.; Banfill, P.F.G. (2014). *Deterioration of natural hydraulic lime mortars, I: Effects of chemically accelerated leaching on physical and mechanical properties of uncarbonated materials*. Construction and Building Materials. 72: 199–207.
- Haga, K.; Sutou, S.; Hironaga, M.; Tanaka, S.; Nagasaki, S. 2005. *Effects of porosity on leaching of Ca from hardened ordinary Portland cement paste*. Cement and Concrete Research. 35: 1764–1775.
- Han, F.; Liu, R.; Yan, P. 2014. *Effect of fresh water leaching on the microstructure of hardened composite binder pastes*. Construction and Building Materials. 68: 630–636.
- Itaipu Binacional (2009). *Itaipu: usina hidrelétrica – projeto: aspectos de engenharia*. Realização da Diretoria Técnica da Itaipu Binacional. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2009. ISBN: 978-85-61885-02-1
- Itaipu Binacional (1984). *Analysis of the backfill concrete on the foundation of the river bed generating units - Technical report*. Internal document nº 4306-50-07028-P. Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu.

- Keshu, W.; Lin, L.; Qiong, X.; Wei, S. (2015). *Spatial Distribution of the Increased Porosity of Cement Paste due to Calcium Leaching*. Journal of Wuhan University of Technology-Mater: 735-744.
- Narakai, K.; Ishida, T.; Maekava, K. (2006). *Modeling of Calcium Leaching from Cement Hydrates Coupled with Micro-Pore Formation*. Journal of Advanced Concret Technology 4: 395-407. Tokio.
- Phung, Q.T.; Maes, N.; Jacques, D.; Perko, J.; Schutter, G.; Ye, G. (2016). *Modelling the evolution of microstructure and transport properties of cement pastes under conditions of accelerated leaching*. Construction and Building Materials, v. 115: 179–192.
- Rosengvist, M.; Bertron, A.; Fridh, K.; Hassanzadeh, M. (2017). *Concrete alteration due to 55 years of exposure to river water: Chemical and mineralogical characterization*. Cement and Concrete Research. 92: 110–120.
- Tang, Y.J.; Zuo, X.B.; He, S.L.; Ayinde, O.; Yin, G.J. (2016). *Influence of slag content and water-binder ratio on leaching behavior of cement pastes*. Construction and Building Materials. 129: 61–69.
- Taylor, H.F.W. Cement Chemistry. London, Academic
- Yang, H.; Jiang, L.; Zhang, Y.; Pu, Q.; Xu, Y. 2012. *Predicting the calcium leaching behavior of cement pastes in aggressive environments*. Construction and Building Materials. 29: 88–96.