

INSPEÇÃO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO: ESTUDO DE CASO DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO ARMADO

Medeiros, Marcelo Henrique Farias¹; Gobbi, Andessa²; Vicenzi, João Henrique³; Araújo, Emanuel Cunha⁴; Cardoso, Julia Caroline⁵; Santos dos Anjos, Juliane Cristine⁶

¹ Doutor, UFPR-PPGEC, medeiros.ufpr@gmail.com

² Doutora, UFPR, andressagobbi@ufpr.br

³ Mestre, UFPR, joaovicenzi@gmail.com

⁴ Mestre, UFPR, emanoelcunhaa@gmail.com

⁵ Engenheira Civil, UFPR, juliaccrds@gmail.com

⁶ Engenheira Civil, UFPR, jucristine123@gmail.com

Resumo: A exposição severa a compostos de enxofre em estruturas de concreto de estações de tratamento de esgoto (ETEs) pode ocasionar danos significativos ao longo do tempo. Este trabalho teve como foco a inspeção de um reator UASB em Curitiba/PR, com o objetivo de diagnosticar a degradação do concreto armado após aproximadamente 23 anos de serviço. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, difração de raios-X (DRX) e medições da profundidade de perda de cobrimento por descamação. Os resultados indicaram redução da resistência mecânica em relação a inspeções anteriores, e os difratogramas revelaram a presença de produtos típicos do ataque por ácido sulfúrico biogênico, como etringita e gipsita, além da completa ausência de portlandita. A taxa de perda por descamação variou entre 0,066 e 0,10 mm/mês, sugerindo que uma possível pintura protetiva pode ter retardado o avanço da deterioração. Concluiu-se que estruturas inseridas em ambientes de elevada agressividade, como as ETEs, devem passar por inspeções periódicas e ser projetadas com critérios rigorosos de durabilidade e proteção, a fim de garantir sua vida útil e desempenho estrutural. Evidencia-se ainda que as normas nacionais vigentes não parecem suficientes para assegurar a durabilidade requerida dessas estruturas.

Palavras-chave: Degradação do concreto, Ataque ácido, Ácido sulfúrico biogênico, UASB, Concreto.

Abstract: Severe exposure to sulfur compounds in concrete structures of wastewater treatment plants (WWTPs) can cause significant damage over time. This study focused on inspecting a UASB reactor in Curitiba/PR, aiming to diagnose the degradation of reinforced concrete after approximately 23 years of service. Compression strength tests, X-ray diffraction (XRD), and measurements of concrete cover loss due to scaling were carried out. The results indicated a reduction in mechanical strength compared to previous inspections, and the diffractograms revealed the presence of typical products of biogenic sulfuric acid attack, such as ettringite and gypsum, along with the complete absence of portlandite. The spalling rate ranged from 0.066 to 0.10 mm/month, suggesting that a possible protective coating may have delayed the progression of deterioration. It is concluded that structures in highly aggressive environments, such as WWTPs, must undergo periodic inspections and be designed with strict durability and protection criteria to ensure their service life and structural performance. National standards do not appear to be sufficient to guarantee the required durability of such structures.

Keywords: Concrete degradation, Acid attack, Biogenic sulfuric acid; UASB, Sewage.

1. Introdução

Este trabalho apresenta os resultados de uma inspeção e diagnóstico realizados em uma estação de tratamento de esgoto (ETE) localizada no município de Curitiba-PR, na região Sul do Brasil. O foco da investigação foi a degradação do concreto armado em um reator UASB, que opera em regime anaeróbio e tem como um de seus subprodutos o ácido sulfúrico, agente altamente agressivo ao concreto.

O estudo foi estruturado em três etapas, conforme indicado na Figura 1: I) Etapa 1 – Inspeção Preliminar: troca de informações com profissionais da Gerência de Pesquisa e Inovação (GPIN), vinculada à Diretoria de Inovações e Novos Negócios da SANEPAR; II) Etapa 2 – Inspeção Detalhada: coleta de amostras, extração de testemunhos de concreto, execução de ensaios em campo e em laboratório; III) Etapa 3 – Análise e Diagnóstico: interpretação dos dados, elaboração do diagnóstico e definição do prognóstico da degradação em andamento no concreto armado.

Figura 1: Fluxograma de etapas do processo de inspeção



O objetivo principal deste trabalho é registrar a experiência de inspeção em uma ETE, contribuindo para a divulgação de informações e para o fomento de discussões sobre o aprimoramento dos processos de inspeção e diagnóstico de estruturas submetidas a condições de exposição extremamente agressivas ao concreto.

2. Programa experimental

Este trabalho envolveu a coleta de amostras, a execução de ensaios de campo e de laboratório, de forma a subsidiar o processo de inspeção e diagnóstico da estrutura analisada. Nos subitens a seguir são descritos os procedimentos e ensaios adotados neste estudo de inspeção, diagnóstico e prognóstico.

A Figura 2 apresenta a vista aérea da estrutura inspecionada com o local de extração de dois testemunhos na laje do reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), bem como os pontos de coleta de amostras para ensaios de DRX e os pontos onde foram executados os ensaios de perda de concreto por descamação em camadas.

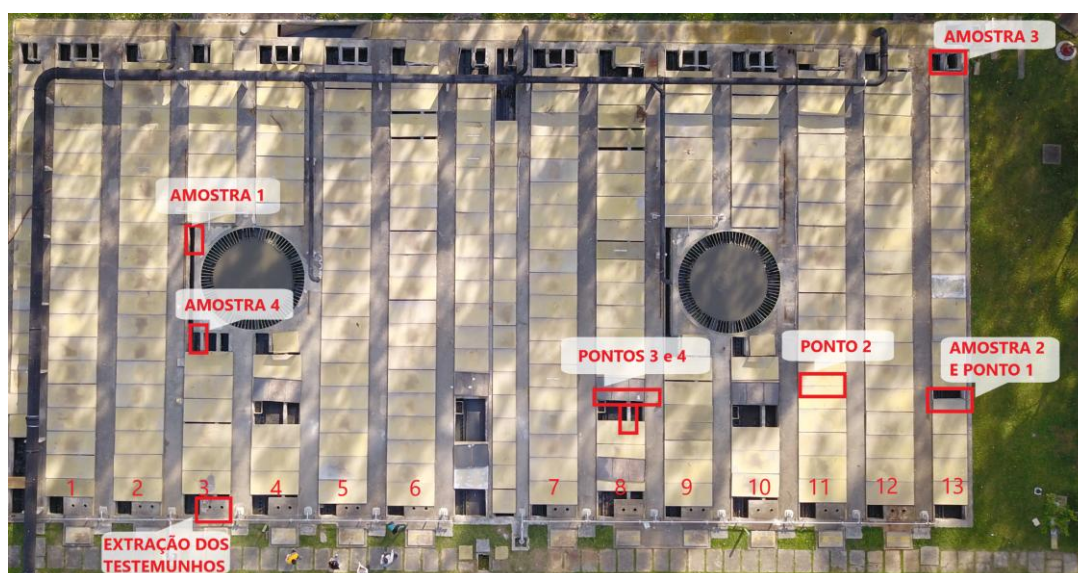
É importante destacar que os testemunhos foram extraídos da mesma região onde, nos últimos 12 anos, já haviam sido realizadas inspeções anteriores, conforme relatado por Hoppe Filho et al. [1] e Godinho e Medeiros [2] nos anos de 2014 e 2021,

respectivamente. Essa estratégia visou garantir uma análise ao longo do tempo das propriedades da estrutura.

No caso das amostras destinadas ao ensaio de DRX, a coleta foi realizada de forma aleatória em pontos onde havia concreto visivelmente deteriorado e com descamação do cobrimento.

Quanto às medições de perda de concreto por descamação, os pontos foram definidos de acordo com as condições de campo. Os critérios adotados foram: I) Acessibilidade para a execução das medições em segurança; II) Presença de peças de concreto com elevado grau de deterioração; e III) Existência de áreas adjacentes não deterioradas, possibilitando o apoio da régua metálica para a medição da profundidade. Devido a essas restrições, as medições foram realizadas em apenas quatro pontos, conforme indicado na Figura 2.

Figura 2: Locais de coleta de amostras e da extração dos testemunhos



2.1 Métodos auxiliares

Alguns procedimentos de apoio foram empregados durante as atividades de campo e laboratório, incluindo a coleta de amostras e a verificação do posicionamento das armaduras.

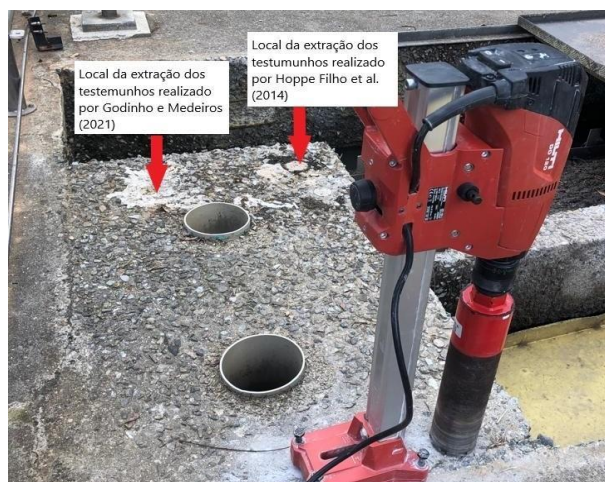
As amostras foram coletadas manualmente a partir do material desagregado das paredes do reator UASB, em uma faixa de 10 a 50 cm acima do nível do efluente. Conforme ilustrado na Figura 3, as amostras foram armazenadas em recipientes identificados.

Figura 3: Coleta de amostras



Outro recurso utilizado foi o detector de armadura Bosch GMS 120, com o objetivo de traçar a posição das armaduras na estrutura para a extração dos testemunhos. A extração dos testemunhos de concreto foi conduzida de acordo com a NBR 7680-1 [3], utilizando-se uma extratora Hilti DD 120 e broca de 75 mm de diâmetro. A Figura 4 indica os pontos de extração de testemunhos em inspeções anteriores (2014 e 2021). Ressalta-se que a laje de concreto armado do reator encontra-se posicionada cerca de 40 cm acima do nível do efluente.

Figura 4: Local das extrações em 2014 e 2021



2.2 Resistência à compressão

Os testemunhos extraídos tinham dimensões iniciais de $\Phi 75 \times 145$ mm. Devido às irregularidades nos topos das amostras, foi necessário retificá-los, resultando em um comprimento final de aproximadamente 115 mm. Os ensaios de compressão foram realizados em prensa da marca FORTEST 200 tf no Laboratório de Materiais e Estruturas (LaME) do Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC) da UFPR. No momento do ensaio, os testemunhos estavam na condição saturada superfície seca (SSS), e a carga foi aplicada a uma taxa de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, em conformidade com a NBR 5739 [4].

Os valores de resistência à compressão foram corrigidos com os fatores previstos na NBR 7681-1 [3], considerando-se os efeitos de esbeltez, broqueamento, direção de extração e umidade do testemunho. A resistência corrigida foi obtida pela Equação 1.

$$f_{ci, \text{ ext}} = [1 + (k_1 + k_2 + k_3 + k_4)] \times f_{ci, \text{ ext, inicial}} \quad (1)$$

Onde: $f_{ci, \text{ ext}}$ = resistência corrigida à compressão (MPa); $f_{ci, \text{ ext, inicial}}$ = resistência obtida no ensaio (MPa); k_1 = coeficiente de correção relativo ao fator de esbeltez (h/d); k_2 = coeficiente de correção para efeito do broqueamento (0,09 para diâmetro de 75 mm); k_3 = coeficiente de correção para direção de extração (considerado 0, pois a extração foi vertical, ou seja, na mesma direção do lançamento do concreto); k_4 = coeficiente de correção para a condição de umidade (considerado 0, os testemunhos foram rompidos na condição SSS).

2.3 Difração de raios X

As amostras para DRX foram coletadas nas paredes laterais do reator UASB, acima do nível do efluente. Para a paralisação das reações de hidratação e degradação, as amostras foram imersas em álcool etílico por 24 h, em seguida secas em estufa a 40 °C por mais 24 h. A argamassa foi separada da brita, moída manualmente e peneirada em malha 325 (abertura de 0,045 mm). As análises foram realizadas em difratômetro PANalytical EMPYREAN, com varredura contínua de 5° a 75° (2 θ), passo de 0,02° e tempo de 1 s. Utilizou-se tubo de ânodo de cobre (40 kV/30 mA) e fenda divergente de 1°. A identificação das fases minerais foi feita por comparação com padrões do *International Center for Diffraction Data* (ICDD), utilizando o software *Crystallographica Search-Match* (Oxford Cryosystems).

2.4 Profundidade de perda por descamação

O ensaio consistiu na medição da profundidade de degradação em quatro vigas do reator UASB. O procedimento utilizou régua metálica para comparação entre áreas deterioradas e não deterioradas, sendo a profundidade medida com paquímetro (Figura 5).

Figura 5: Ensaio de profundidade de perda por descamação

A) Identificação do local para realização do ensaio



B) Medição da profundidade



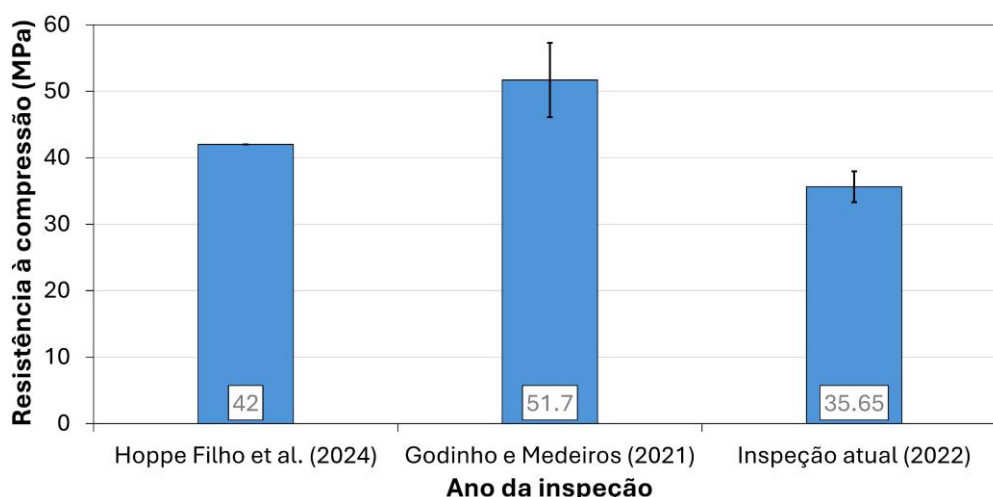
3. Resultados e discussões

3.1 Resistência à compressão

Os ensaios realizados nos dois testemunhos, identificados como CP1 e CP2, resultaram em resistências à compressão de 34 MPa e 37 MPa, respectivamente, considerando cerca de 23 anos de idade da ETE. Segundo Hoppe Filho et al. [1], a resistência de projeto da estrutura era de aproximadamente 22 MPa, e em sua investigação foi observada resistência de 42 MPa. Já no estudo de Godinho e Medeiros [2], foi registrada resistência de 52 MPa, acima da resistência prevista em projeto.

Entretanto, na inspeção atual, os valores ficaram abaixo da resistência mínima de 40 MPa estabelecida pela NBR 6118 [5] para a classe de agressividade IV. Essa redução é atribuída à degradação progressiva do concreto. A Figura 6 apresenta a comparação entre as três campanhas de inspeção.

Figura 6: Comparação de resistência à compressão entre os três momentos



3.2 Difração de raios-X (DRX)

O ensaio de DRX foi realizado em quatro amostras, com varredura entre 5° e 75° (2θ). Na Figura 7, são apresentados os difratogramas das amostras 1 (A), 3 (B) e 4 (C), amostra 2 não apresentou um difratograma que pudesse identificar os picos característicos. É possível observar picos característicos de etringita, gipsita e portlandita.

Na Figura 8, observa-se a faixa entre 8° e 12° (2θ), com identificação de picos de etringita (9,1°) e gipsita (11,6°), compostos formados pelo ataque de ácido sulfúrico biogênico. Esses resultados confirmam a presença de gipsita em todas as amostras, corroborando Hoppe Filho et al. [1], que destacam tais produtos como típicos em processos de degradação induzidos por bactérias oxidantes.

Figura 7: DRX das amostras

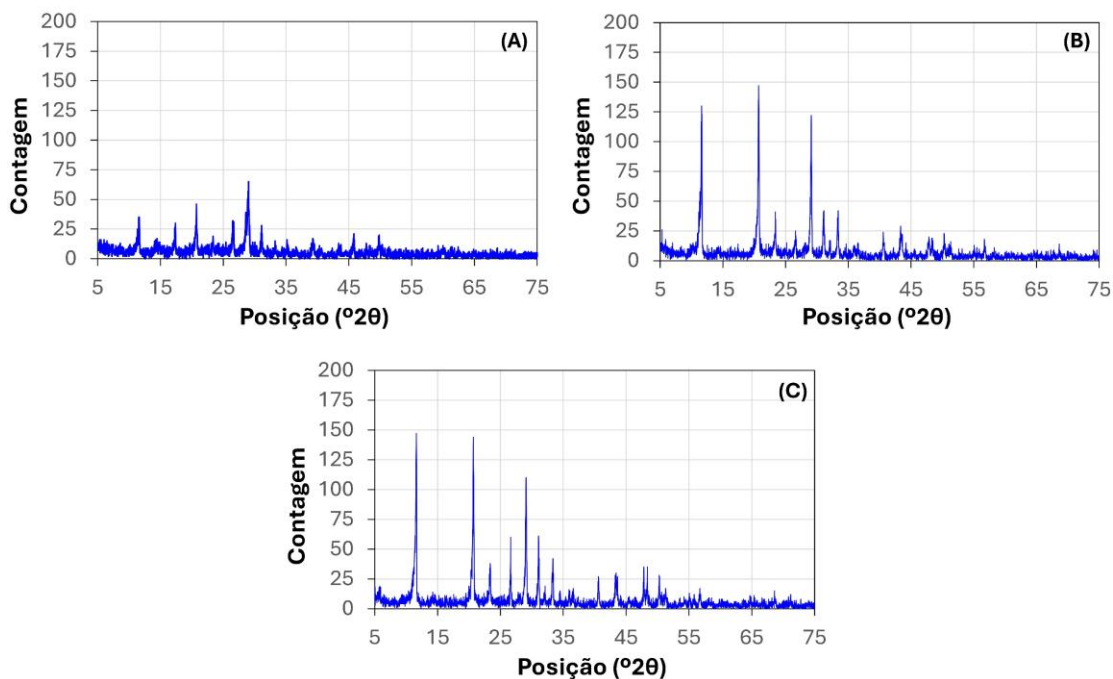
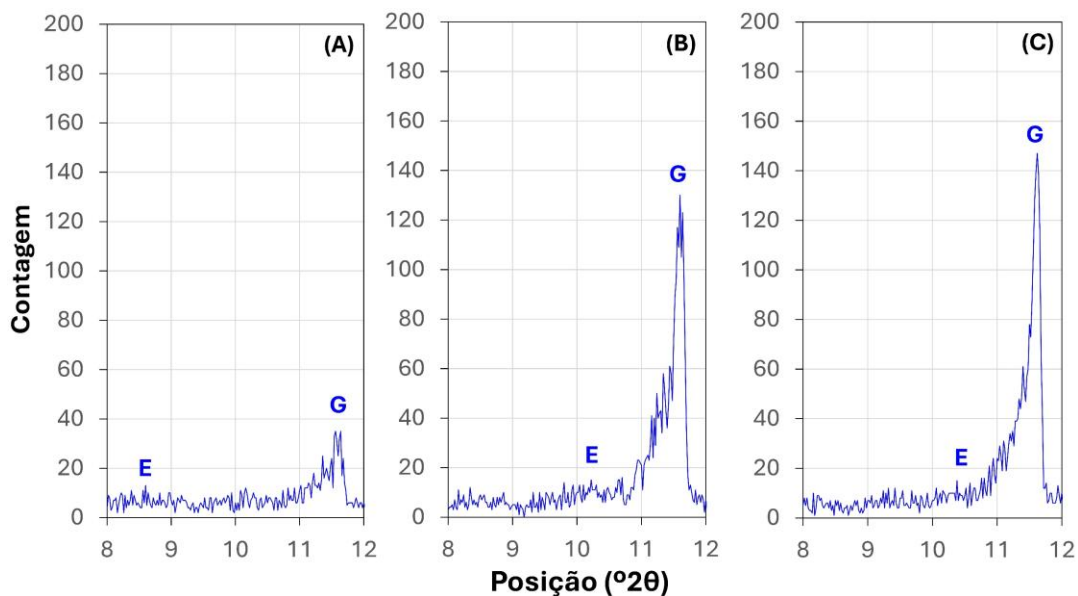
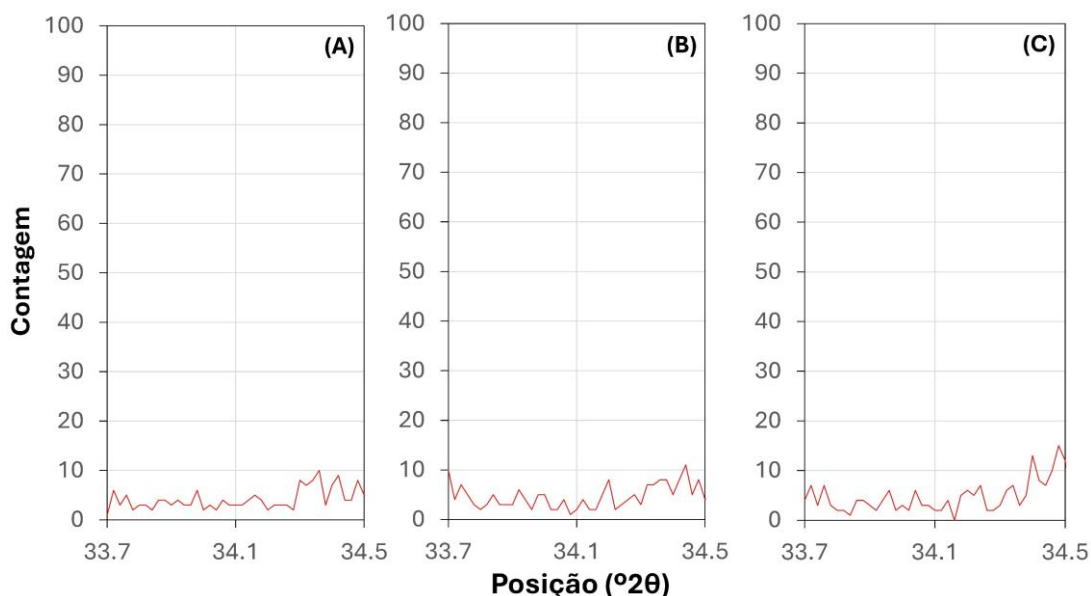


Figura 8: DRX das amostras com destaque para picos de etringita (E) e gipsita (G)



A Figura 9 apresenta o difratograma na região de maior intensidade da portlandita, em 34,1° (2θ). Esse composto é indicativo da reserva alcalina do concreto. No entanto, a ausência de picos de portlandita nas amostras analisadas evidencia que todo o material foi consumido pelo ataque ácido.

Figura 9: DRX das amostras dos reatores UASB, com destaque para o pico da portlandita



3.3 Profundidade de perda por descamação

A medição de perda por descamação foi realizada em quatro pontos do reator. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Profundidade de perda por descamação do concreto

	Profundidade (mm)	Média	Desvio padrão	Velocidade de perda de cobrimento (mm/mês)
Ponto 1	23 29	26,0	4,24	0,093
Ponto 2	23 30	26,5	2,95	0,095
Ponto 3	27 29	28,0	1,41	0,100
Ponto 4	15 22	18,5	4,95	0,066

Fonte: os autores

De acordo com Monteny et al. [6], a velocidade típica de degradação em ambientes biogênicos varia de 0,08 a 0,42 mm/mês. Godinho e Medeiros [7] relataram valores entre 0,10 e 0,55 mm/mês em ETEs. Os pontos 1, 2 e 3 apresentaram valores compatíveis com esses intervalos, variando de 0,093 a 0,10 mm/mês. Apenas o ponto 4 apresentou valor inferior (0,066 mm/mês). Cabe destacar que, no local do ponto 4, foram identificados indícios de uma possível pintura protetiva, o que pode ter retardado a progressão da deterioração e justificado o menor valor registrado.

A Figura 10 mostra a estimativa de tempo de vida útil em função da espessura de cobrimento das armaduras. O cálculo foi realizado considerando a premissa de que o tempo de vida útil é o tempo que a descamação do concreto atinge as armaduras. Considerou-se a velocidade anual média de perda de cobrimento (mm/ano) da ETE e as espessuras de cobrimento de 20 mm, 30 mm e 60 mm. Os resultados mostram que a vida útil para uma estrutura com espessura de cobrimento de 20 mm é de 19 anos, para cobrimento de 30 mm é de 38 anos e para cobrimento de 60 mm é de 56 anos.

4. Considerações finais

A inspeção realizada permite destacar algumas lições relevantes sobre o comportamento do concreto em estações de tratamento de esgoto.

O processo de interação do concreto com o meio, caracterizado pelo ataque do ácido sulfúrico biogênico, mostrou-se extremamente severo.

No que se refere à resistência à compressão, verificou-se que, nos primeiros anos, o concreto apresentou aumento de resistência, possivelmente devido à formação de produtos provenientes do ataque, que tamponaram os poros e conferiram ganho inicial de desempenho mecânico. Entretanto, após longo tempo de exposição, observou-se redução significativa da resistência, situando-se abaixo do valor mínimo prescrito pela NBR 6118.

A técnica de difração de raios-X mostrou-se eficiente para identificar os produtos formados durante o processo de degradação, evidenciando a presença de etringita e gipsita, bem como a completa ausência de portlandita, consumida pelo ataque ácido.

As medições de velocidade de descamação, embora pouco exploradas na literatura, mostraram-se de grande relevância para subsidiar estimativas de vida útil de estruturas. Neste trabalho, a velocidade variou de 0,066 a 0,10 mm/mês. Ressalta-se que os valores relativamente baixos podem estar associados à presença de uma pintura protetiva, que retardou a progressão da deterioração.

De modo geral, os resultados reforçam a elevada agressividade do ambiente de ETES ao concreto, bem como a necessidade de diretrizes normativas específicas para esse tipo de estrutura. Torna-se imprescindível o desenvolvimento de pesquisas que auxiliem na elaboração de critérios de projeto e manutenção capazes de assegurar a durabilidade das estruturas em tais condições. O ensaio consistiu na medição da profundidade.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem às agências brasileiras CNPq, CAPES e Fundação Araucária pelo apoio financeiro e concessão de bolsas, à Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), à Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC), ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LaME) e ao grupo de pesquisa em Patologia e Recuperação das Construções (PRC) pelo suporte técnico e institucional.

Referências

- [1] Hoppe Filho, J.; Rheinheimer, B.; Khoe, S. S.; Artigas, L. V.; Sabbag, A. F.; Medeiros, M. H. F. (2014) Degradação do concreto de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) por ácido sulfúrico biogênico. *Revista ALCONPAT*, 40.
- [2] Godinho, J. P.; Medeiros, M. H. F. (2021) Biogenic sulfur attack in a reinforced concrete sewage treatment plant. Revisited mechanism and rehabilitation proposal. *Engineering Failure Analysis*, 124:105354.
- [3] NBR 7680-1 (2015) Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – Parte 1: Resistência à compressão axial. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [4] NBR 5739 (2018) Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [5] NBR 6118 (2023) Projeto de estruturas de concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [6] Monteny, J.; Vincke, E.; Beeldens, A.; De Belie, N.; Taerwe, L.; Van Gemert, D.; Verstraete, W. (2000) Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research*, 30:4:623-634.
- [7] Godinho, J. P.; Medeiros, M. H. F. (2020) Influência de cristalizantes e cinza volante na durabilidade de concreto exposto ao ataque externo por ácido sulfúrico biogênico em um reator UASB de uma ETE. *Revista DAE*, 70:235:153-166.