



## Avaliação Patológica e Diagnóstico Estrutural de Reservatórios de Concreto Armado: Estudo de Caso no Sul Fluminense

### *Pathological Assessment and Structural Diagnosis of Reinforced Concrete Reservoirs: A Case Study in Southern Fluminense*

**André Landim Fernandes**

0009-0004-9933-6686. Grupo AGP Engenharia do Brasil – Resende - RJ.

**Resumo:** A durabilidade de estruturas de concreto armado inseridas em ambientes industriais agressivos constitui um desafio recorrente da engenharia contemporânea, sobretudo diante do envelhecimento do parque industrial brasileiro. Este estudo apresenta um estudo de caso de avaliação patológica e diagnóstico estrutural de um sistema de reservatórios de água tratada em concreto armado, com capacidade total de 900 m<sup>3</sup>, em operação contínua há aproximadamente 45 anos, localizado na região do Sul Fluminense (RJ). A investigação foi conduzida sob a ótica da Engenharia Diagnóstica, conforme as diretrizes das normas, integrando inspeção visual sistematizada, ensaios não destrutivos (pacometria, potencial de corrosão e resistividade elétrica) e ensaios laboratoriais em testemunhos de concreto (carbonatação, permeabilidade e detecção qualitativa de cloretos). Os resultados indicaram que, embora os mecanismos clássicos de deterioração por carbonatação e penetração de cloretos não sejam governantes nas paredes do reservatório, foram identificadas manifestações patológicas graves em vigas e lajes, incluindo fissuração generalizada, deslocamentos do cobrimento, exposição e ruptura localizada de armaduras, associadas principalmente à umidade permanente, cobrimento insuficiente e ausência de manutenção sistemática. Com base na análise integrada dos ensaios e inspeções, a estrutura foi classificada com nível crítico de desempenho, demandando intervenções corretivas prioritárias. São apresentadas diretrizes técnicas de recuperação estrutural e um plano de manutenção, visando à restauração da segurança, da funcionalidade e à extensão da vida útil remanescente dos reservatórios.

**Palavras-chave:** patologia das construções; concreto armado; carbonatação; corrosão de armaduras; vida útil residual; recuperação estrutural.

**Abstract:** The durability of reinforced concrete structures operating in aggressive industrial environments represents a persistent challenge in contemporary civil engineering, particularly in the context of the aging Brazilian industrial infrastructure. This paper presents a case study on the pathological assessment and structural diagnosis of a reinforced concrete water reservoir system, with a total capacity of 900 m<sup>3</sup>, in continuous operation for approximately 45 years, located in the Sul Fluminense region, Brazil. The investigation was carried out according to Structural Diagnostic Engineering principles, following the guidelines of the standards, combining systematic visual inspection, non-destructive testing (rebar detection, half-cell potential and electrical resistivity), and laboratory tests performed on concrete cores (carbonation depth, permeability and qualitative chloride detection). The results showed that, although carbonation and chloride ingress are not currently the governing deterioration mechanisms in the reservoir walls, severe pathological manifestations were identified in beams and slabs, including generalized cracking, concrete cover delamination,

exposed reinforcement and localized bar rupture. These damages are mainly associated with permanent moisture exposure, insufficient concrete cover and the absence of a systematic maintenance program. Based on the integrated analysis of inspections and test results, the structure was classified as presenting a critical performance condition, requiring prioritized corrective interventions. Technical guidelines for structural rehabilitation and a maintenance plan are proposed, aiming to restore safety, functionality and extend the remaining service life of the reservoir system.

**Keywords:** building pathology; reinforced concrete; carbonation; reinforcement corrosion; residual service life; structural rehabilitation.

## INTRODUÇÃO

“Grande parte da infraestrutura industrial brasileira foi concebida e executada entre as décadas de 1970 e 1980 (...)” (Helene, 1993; Souza e Ripper, 1998), período marcado por normas menos rigorosas no que se refere aos critérios de durabilidade do concreto armado e sua vida útil. Atualmente, essas estruturas atravessam uma fase crítica em relação à sua Vida Útil de Projeto (VUP), apresentando manifestações patológicas progressivas associadas à ausência de programas sistemáticos de manutenção preventiva (Souza; Ripper, 1998).

Na região do Sul Fluminense, importante polo industrial do estado do Rio de Janeiro, esse cenário é agravado por condições ambientais específicas, como elevados índices pluviométricos, alta umidade relativa do ar e exposição contínua a agentes agressivos atmosféricos. Tais fatores contribuem significativamente para a ativação e aceleração dos mecanismos de deterioração do concreto armado.

O objeto deste estudo é um reservatório semienterrado de água tratada, composto por duas câmaras de 450 m<sup>3</sup> cada, totalizando 900 m<sup>3</sup> de capacidade, cuja função é essencial para o processo produtivo de uma unidade fabril local. Após cerca de 45 anos de operação contínua, a estrutura passou a apresentar manifestações patológicas severas, incluindo fissuração generalizada, lixiviação, deslocamento de concreto e exposição de armaduras, levantando preocupações quanto à sua estabilidade global e segurança operacional.

O objetivo deste trabalho é estabelecer, por meio de metodologia científica rigorosa, o nexos causal entre as anomalias observadas e a falha dos mecanismos de proteção do concreto, fornecendo um diagnóstico estrutural preciso e diretrizes técnicas para a recuperação e extensão da vida útil do reservatório.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### Carbonatação do Concreto

“A corrosão das armaduras constitui a principal causa de degradação (...)” (Tuutti, 1982; Helene, 1993), e falha prematura em estruturas de concreto armado.

“Em condições normais, o aço encontra-se protegido por uma camada passivadora (...)” (Helene, 1993; Tuutti, 1982) de óxidos estáveis, mantida pela elevada alcalinidade da matriz cimentícia, com valores de pH tipicamente entre 12,5 e 13,5.

“A carbonatação é um processo físico-químico (...)” (Tuutti, 1982; Silva, 1995), no qual o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente na atmosfera difunde-se pelos poros do concreto e reage com o hidróxido de cálcio [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], formando carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Essa reação reduz o pH da matriz para valores inferiores a 9,0, tornando a camada passivadora instável. Quando a frente de carbonatação atinge a profundidade das armaduras, o aço torna-se suscetível à corrosão na presença simultânea de umidade e oxigênio (Tuutti, 1982).

## Corrosão Eletroquímica e Expansão Volumétrica

Uma vez despassivado, o aço inicia o processo de oxidação, originando produtos de corrosão cujo volume pode ser de 3 a 10 vezes superior ao do metal original. Conforme demonstrado por Helene (1993), essa expansão volumétrica gera tensões internas de tração radial no concreto adjacente. Considerando a baixa resistência à tração do concreto, tais tensões resultam na formação de fissuras longitudinais, que evoluem para o deslocamento do cobrimento (spalling), expondo ainda mais as armaduras ao meio agressivo e acelerando o processo de deterioração.

## METODOLOGIA

A campanha de investigação seguiu as diretrizes da ABNT NBR 16747:2020, sendo classificada como uma inspeção de Nível 3 (Auditoria Técnica), caracterizada pelo emprego de ensaios tecnológicos para fundamentação do diagnóstico.

### Caracterização da Estrutura

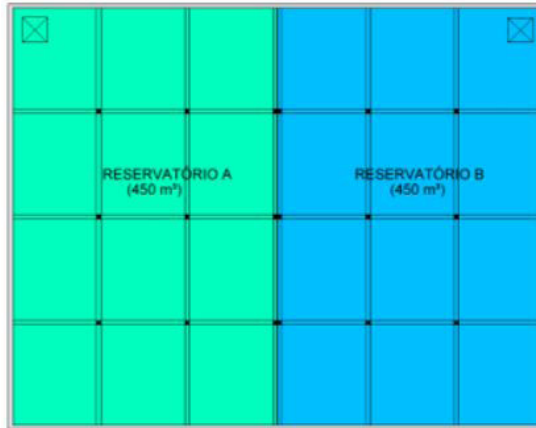
O sistema analisado é composto por dois reservatórios geminados em concreto armado moldado in loco, semienterrado, constituídos por laje de fundo, paredes estruturais e lajes de cobertura.

Durante a etapa de anamnese, foi realizada uma entrevista com os responsáveis pela operação do reservatório, os quais relataram a inexistência de histórico de manutenções preventivas ou corretivas no sistema estrutural. Foram realizados somente serviços de limpeza e vedações pontuais de trincas e vazamentos, com a utilização de injeções de resinas nas paredes laterais da estrutura.

As estruturas inspecionadas possuem aproximadamente 45 anos de uso contínuo. Diante da ausência de manutenção sistemática e da presença de manifestações patológicas visíveis, solicitou-se a realização de uma inspeção técnica com o objetivo de avaliar as condições de estabilidade, segurança e durabilidade dos elementos estruturais.

A planta possui formato retangular e estrutura bipartida por uma parede divisória central, formando dois compartimentos independentes. As paredes, o piso e a laje de cobertura apresentam espessura média de 20 cm. Cada compartimento do reservatório é suportado por 6 pilares de seção 20x20 cm, com 3 vigas longitudinais e duas transversais com seção de 20x60 cm, formando 12 painéis de laje. O pé-direito (altura interna) do reservatório é de 260 cm conforme croqui Figura 01.

**Figura 01 – Croqui do Reservatório.**



**Fonte: Otoni com adaptações, 2025.**

A cobertura é sustentada por vigas e pilares internos, dispostos de forma a distribuir uniformemente as cargas e garantir a estabilidade global. Essa configuração permite a operação alternada dos compartimentos, viabilizando manutenções sem a interrupção total do abastecimento.

A concepção semienterrada proporciona proteção física à água armazenada e inércia térmica, mas requer atenção às pressões externas exercidas pelo empuxo do solo e por eventuais níveis freáticos elevados. O acesso à estrutura é restrito e controlado, com pontos destinados exclusivamente à inspeção e manutenção.

Para embasar tecnicamente a análise, foram conduzidas inspeções visuais detalhadas, complementadas por ensaios tecnológicos in loco, visando à caracterização do estado atual de conservação das estruturas.

## Instrumentação e Ensaios

Foram adotados os seguintes procedimentos de investigação:

- Mapeamento visual e tátil: inspeção sistemática com martelo de inspeção para identificação de sons cavos e mapeamento de fissuras.
- Pacometria: utilização de scanner de parede Bosch GMS 120 para localização das armaduras e determinação não destrutiva da espessura de cobrimento.
- Potencial de corrosão: mapeamento eletroquímico com equipamento

Profometer Corrosion Canin+ (PROCEQ), utilizando eletrodo de referência Cu/CuSO<sub>4</sub>, conforme ASTM C876 (2015).

- Resistividade elétrica: medições realizadas com equipamento RESIPOD (sonda de Wenner de quatro pinos), visando à estimativa da taxa provável de corrosão.
- Ensaios laboratoriais: extração de testemunhos para ensaio de permeabilidade à água sob pressão (NBR 10786) e determinação da profundidade de carbonatação por aspersão de solução de fenolftaleína.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Fissuração e Lixiviação

A inspeção revelou fissuração extensa nas lajes e vigas de cobertura, configurando caminhos preferenciais para a infiltração de água e agentes agressivos. Observou-se intensa lixiviação da matriz cimentícia, evidenciada pela formação de eflorescências e estalactites de carbonato de cálcio, “indicando perda progressiva da reserva alcalina do concreto” (Helene, 1993; Souza; Ripper, 1998), conforme visto nas Figuras 2 e 3.

**Figura 2 - Armaduras exposta e trinca na laje do reservatório A.**



**Fonte: Otoni, 2025.**

**Figura 3 - Fissura ao longo da laje com presença de manchas ferruginosas devido à corrosão das armaduras no B.**



Fonte: Otoni, 2025.

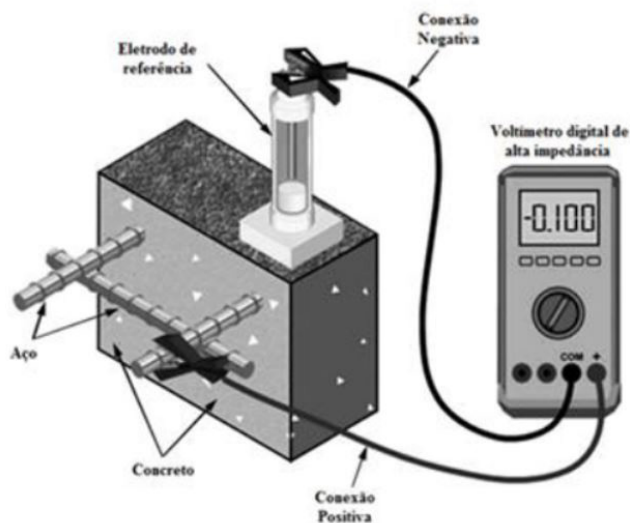
## Potencial de Corrosão das Armaduras

Adicionalmente aos ensaios físico-químicos, foi realizado o ensaio de potencial de corrosão das armaduras, também denominado mapeamento de potencial eletroquímico, em conformidade com a ASTM C 876:2015, com o objetivo de complementar o diagnóstico do estado de corrosão do aço embutido no concreto e permitir a identificação precoce de regiões com maior probabilidade de corrosão ativa.

O ensaio de potencial de corrosão consiste em um método não destrutivo (ou, conforme algumas classificações, semi-destrutivo, quando requer acesso direto à armadura para conexão elétrica) amplamente empregado na avaliação de estruturas de concreto armado. O método possibilita a identificação de áreas com diferentes condições eletroquímicas, associadas à probabilidade de ocorrência de processos corrosivos nas armaduras (ASTM C876, 2015; Helene, 1993).

“O princípio de funcionamento baseia-se na medição do potencial elétrico (...)” (ASTM C876, 2015) espontâneo da armadura em relação a um eletrodo de referência posicionado sobre a superfície do concreto. Os eletrodos de referência mais utilizados são o cobre/sulfato de cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) e o prata/cloreto de prata ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ). As leituras obtidas refletem o estado termodinâmico do aço, permitindo inferir a probabilidade de corrosão ativa conforme esquema Figura 04, conforme critérios estabelecidos pela norma.

Por meio do levantamento sistemático dos potenciais em malha previamente definida, obtém-se um mapa de potencial eletroquímico, no qual regiões com valores mais negativos indicam maior probabilidade de corrosão em andamento. Ressalta-se, entretanto, que os resultados do ensaio devem ser interpretados de forma integrada com outros parâmetros, como resistividade elétrica do concreto, grau de saturação e condições ambientais, especialmente em estruturas permanentemente úmidas ou submersas, nas quais a confiabilidade do método pode ser influenciada.

**Figura 4 - Ilustração do ensaio de potencial de corrosão.**

Fonte: Adaptado de ASTM C 876, 2015.

Os valores obtidos no ensaio são interpretados com base nos critérios da ASTM C 876:2015, conforme mostrado na Tabela 1:

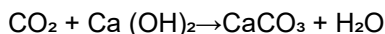
**Tabela 1 – Valores de referência para probabilidade de corrosão das armaduras no ensaio de potencial de corrosão.**

<b>E<sub>corr</sub> (mV, Cu/SO<sub>4</sub>Cu)</b>	<b>Probabilidade de Corrosão</b>
Maior que - 200 mV	<b>Baixa probabilidade</b> de corrosão ativa
Entre - 200 mV e - 350 mV	<b>Indefinido</b> , pode haver ou não corrosão ativa
Menor que - 350 mV	<b>Alta probabilidade</b> de corrosão ativa

Fonte: ASTM C 876, 2015.

## Carbonatação

A carbonatação do concreto é um processo físico-químico resultante da reação do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), presente no ar, com os produtos da hidratação do cimento Portland dissolvidos na fase aquosa dos poros do concreto. Essa reação ocorre predominantemente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), formando carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e água, conforme a Equação 1:



Equação 01

O concreto nas primeiras idades apresenta pH elevado, da ordem de 12,5, em função da presença de hidróxidos alcalinos, especialmente o Ca(OH)<sub>2</sub>, o que garante a formação de uma camada passivadora sobre as armaduras de aço (Silva, 1995). À medida que a carbonatação avança, ocorre o consumo desses hidróxidos, promovendo a redução do pH para valores inferiores a 9,0. Essa redução compromete



a estabilidade da camada passivadora, tornando as armaduras suscetíveis ao início do processo de corrosão.

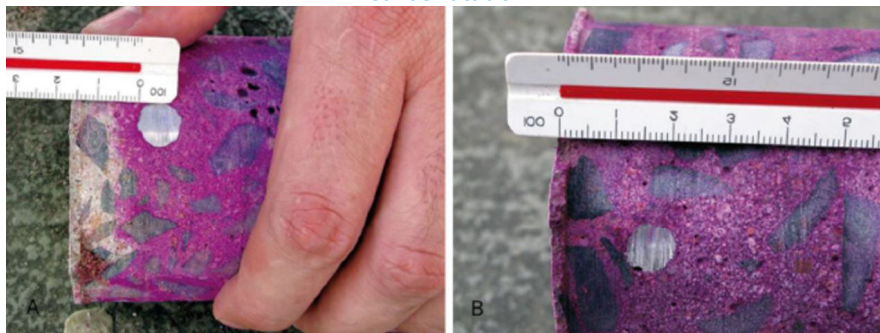
“A identificação da frente de carbonatação não é possível por simples inspeção visual, sendo comumente realizada por meio da aplicação de fenolftaleína ( $C_{20}H_{14}O_4$ ) (...)” (Silva, 1995; Helene, 1993), um indicador colorimétrico sensível ao pH. Em concretos com pH inferior a aproximadamente 8,2 (Silva, 1995), não ocorre alteração de cor, caracterizando material carbonatado. Para valores de pH entre 8,2 e 9,8, observa-se coloração rosada, enquanto pH superiores a 9,8 resultam em coloração vermelho-carmim (Figura 5), indicativa de concreto não carbonatado e com alcalinidade preservada.

No presente estudo, o ensaio de profundidade de carbonatação foi realizado in loco, por meio da aspersão de solução de fenolftaleína sobre superfícies recém-expostas de testemunhos extraídos das paredes dos reservatórios (Figura 6) e em janela realizada em paredes externas (Figura 7). Em todas as amostras analisadas, observou-se coloração vermelho-carmim homogênea, evidenciando que o concreto se mantém alcalino, sem indícios de avanço da frente de carbonatação nas regiões ensaiadas.

Esse comportamento é compatível com as condições ambientais de exposição permanente à água, características do regime operacional dos reservatórios. A saturação contínua dos poros do concreto dificulta a difusão do  $CO_2$  atmosférico, inibindo significativamente o avanço do processo de carbonatação e, conseqüentemente, preservando a passivação das armaduras.

Adicionalmente, durante a abertura de uma janela de inspeção na face externa das paredes, procedeu-se à avaliação da profundidade de carbonatação nessa região. Observou-se um avanço médio da frente carbonatada da ordem de 2,0 mm, em relação a um cobrimento total das armaduras de aproximadamente 10,0 mm. Apesar da presença de carbonatação superficial, o concreto no entorno das armaduras permaneceu alcalino, assegurando a manutenção da camada passivadora e indicando que, até o momento, a carbonatação não constitui o mecanismo predominante de deterioração dessas estruturas.

**Figura 5 - Concreto da camada de cobrimento (A) carbonatado e (B) não carbonatado.**



**Fonte: Bolina, Tutikian e Helene, 2019.**



**Figura 6 - Aplicação de fenolftaleína em corpo de prova extraído da parede do Reservatório.**



Fonte: Otoni, 2025.

**Figura 7 - Aplicação de fenolftaleína diretamente em janela na parede do Reservatório.**



Fonte: Otoni, 2025.

## Penetração de Cloretos

Além da carbonatação, avaliou-se a possível presença e o avanço de íons cloreto no interior do concreto, uma vez que esse agente é reconhecido como um dos principais responsáveis pela corrosão localizada das armaduras, mesmo em ambientes com pH elevado.

Considerando a diversidade de metodologias disponíveis para a determinação do perfil de cloretos em estruturas de concreto, optou-se, neste estudo, por uma avaliação qualitativa baseada no método de aspersão de solução indicadora de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ), em função de sua simplicidade, rapidez e aplicabilidade em campo. A metodologia adotada é análoga à empregada nos ensaios de carbonatação, sendo aplicada sobre superfícies recém-expostas do concreto.

O nitrato de prata reage preferencialmente com cloretos livres presentes no concreto, formando cloreto de prata ( $\text{AgCl}$ ), de coloração esbranquiçada. Dessa forma, o ensaio permite a distinção entre regiões com presença de cloretos livres, caracterizadas pela precipitação clara, e regiões isentas de cloretos, que apresentam coloração mais escura, possibilitando a identificação da profundidade da frente de penetração desse agente agressivo (Medeiros *et al.*, 2017).

Nos ensaios realizados nas estruturas avaliadas, não foram observadas regiões esbranquiçadas após a aplicação da solução de nitrato de prata, tanto nas paredes internas quanto nas superfícies analisadas durante a abertura das janelas de inspeção. Esse resultado indica a ausência de concentrações relevantes de cloretos livres no interior do concreto, afastando, no momento, a possibilidade de corrosão das armaduras induzida por esse mecanismo.

## Ruptura de Armaduras

Nas vigas principais de sustentação da cobertura, constatou-se ruptura total das barras de tração inferior, com perda de seção superior a 90% em decorrência da corrosão. Tal condição caracteriza o atingimento do Estado Limite Último, com perda da capacidade resistente original e redistribuição não prevista de esforços.

## Deslocamento Volumétrico

Nas lajes, verificou-se deslocamento volumétrico generalizado do cobrimento, expondo diretamente a armadura à atmosfera saturada do reservatório. Os valores de potencial de corrosão inferiores a -350 mV confirmaram elevada probabilidade de corrosão ativa, conforme vistos nas fotos das Figuras 08 e 09.

**Figura 8 - Vista do deslocamento volumétrico de concreto no reservatório B.**



Fonte: Otoni, 2025.

**Figura 9 - Vista de armadura rompida devido a deformação e ingresso de agentes agressivos no reservatório B.**



Fonte: Otoni, 2025.

## DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO

As inspeções visuais detalhadas, associadas aos ensaios não destrutivos realizados nas estruturas dos reservatórios, permitiram a identificação de um conjunto relevante de manifestações patológicas, decorrentes da exposição contínua à água, das condições ambientais agressivas e da ausência de manutenção sistemática ao longo de aproximadamente 45 anos de operação.

Entre as anomalias observadas, destacam-se corrosão severa das armaduras, caracterizadas por perda significativa de seção transversal e rompimentos localizados, além da ocorrência de fissuras e trincas distribuídas nas paredes laterais, lajes de cobertura, vigas e demais elementos estruturais. Essas manifestações são indicativas de processos de degradação físico-químicos persistentes, típicos de estruturas submetidas a elevada umidade, ciclos de saturação e secagem e variações térmicas ao longo do tempo.

Os ensaios de profundidade de carbonatação realizados nas paredes dos reservatórios indicaram a manutenção do pH alcalino do concreto em grande parte dos pontos ensaiados, sugerindo, sob o ponto de vista químico, a preservação da camada passivadora das armaduras. Esse comportamento é compatível com estruturas em contato permanente com água, nas quais a difusão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é limitada.

Entretanto, os ensaios de potencial de corrosão apresentaram valores classificados majoritariamente como de alta probabilidade de corrosão ativa, com percentuais superiores a 90% dos pontos avaliados. Tal resultado mostrou-se incongruente com o estado real das armaduras, verificado por meio de inspeções diretas e aberturas pontuais do cobrimento, nas quais não se constatou corrosão generalizada compatível com um estágio avançado de atividade eletroquímica.

“Essa divergência é atribuída principalmente à elevada umidade interna do concreto (...)” (Helene, 1993; Tuutti, 1982), condição intrínseca a reservatórios em operação contínua, que reduz significativamente a resistividade elétrica do material e influencia diretamente as leituras de potencial eletroquímico. Adicionalmente, observa-se que, em determinados trechos, as armaduras aparentam estar em estágio inicial de formação ou recomposição da película passivadora, o que pode induzir leituras conservadoras quando interpretadas isoladamente.

A análise integrada dos resultados evidencia que, embora não tenham sido identificados riscos imediatos de instabilidade estrutural, o conjunto de manifestações patológicas caracteriza um estado de degradação progressiva, com comprometimento da durabilidade, da estanqueidade e da confiabilidade estrutural dos reservatórios.

## CRITICIDADE DOS PROBLEMAS CONSTATADOS

Com o objetivo de hierarquizar as intervenções necessárias, as anomalias identificadas foram avaliadas quanto ao nível de criticidade, considerando seus impactos sobre a segurança estrutural, a funcionalidade dos sistemas construtivos, a operação da unidade industrial e a vida útil da estrutura.

As manifestações associadas à corrosão de armaduras com destacamento do cobrimento e perda de seção, observadas principalmente em vigas e pontos localizados de lajes de ambos os reservatórios, foram classificadas como Prioridade 1, por representarem perda significativa de desempenho estrutural, com potencial comprometimento da segurança e da funcionalidade, além de implicarem aumento expressivo dos custos futuros de manutenção e recuperação.

As trincas em vigas e lajes, bem como as fissuras nas paredes laterais, foram enquadradas como Prioridade 2, por configurarem perda parcial de desempenho real ou potencial, com impacto direto na estanqueidade e na durabilidade, porém sem prejuízo imediato à operação ou à segurança dos usuários.

De forma semelhante, a ausência de impermeabilização na faixa gasosa dos reservatórios foi classificada como Prioridade 2, uma vez que favorece a progressão de mecanismos de degradação associados à condensação, à carbonatação localizada e à corrosão das armaduras, exigindo intervenção corretiva em prazo tecnicamente adequado.

Por fim, as anomalias relacionadas à ausência de regularização e impermeabilização da face superior das lajes, assim como as deficiências nas juntas de dilatação entre os reservatórios, foram classificadas como Prioridade 3, por representarem perdas de desempenho de menor impacto estrutural imediato, passíveis de planejamento e execução programada, sem caráter emergencial.

## VIDA ÚTIL RESIDUAL DA ESTRUTURA

A estimativa de vida útil residual associada ao mecanismo de carbonatação pode ser obtida, de forma simplificada, pela “relação clássica de avanço da frente carbonatada (...)” (Tuutti, 1982), baseada em transporte por difusão no concreto, equação 02:

$$\varepsilon = K \sqrt{t}$$

Equação 02

em que:

$\varepsilon$  = profundidade média de carbonatação (mm);

$K$  = constante de carbonatação (mm/ano<sup>0,5</sup>);

$t$  = tempo (anos).

Nos testemunhos extraídos das paredes internas (face em contato com a água), a aspersão de fenolftaleína indicou ausência de frente de carbonatação detectável, evidenciando que, nessa condição, o concreto se mantém alcalino e a passivação tende a ser preservada. Este resultado é coerente com estruturas em regime de elevada umidade/saturação, nas quais a difusão de CO<sub>2</sub> é significativamente reduzida. Assim, do ponto de vista estrito da carbonatação, a parede interna não apresenta, até o momento, evidência de consumo relevante de alcalinidade.

Entretanto, essa leitura não pode ser confundida com “100% de vida útil residual do sistema estrutural”, pois a vida útil real depende de outros mecanismos (fissuração, permeabilidade localizada, defeitos executivos, cobrimento insuficiente, corrosão por microambientes na faixa gasosa, deslocamentos e exposição de armadura). De fato, em vigas de suporte da laje, foram observadas armaduras expostas e corrosão avançada, caracterizando perda local de proteção (cobrimento) e comprometimento de desempenho, independentemente da carbonatação medida em parede interna.

Para a face externa das paredes, foi identificada profundidade média de carbonatação  $\approx 2,0$  mm. Considerando um cobrimento medido em campo de aproximadamente 16 mm sendo que 10 mm está carbonatado, pode-se estimar pela expressão:

$$K = \frac{\varepsilon}{\sqrt{t}}$$

Como o tempo de exposição informado para a estrutura é da ordem de 45 anos, tem-se:

$$K \approx \frac{10}{\sqrt{45}} \approx 1,49 \text{ mm/ano}^{0,5}$$

A partir desse parâmetro, a estimativa do tempo para a frente de carbonatação atingir o cobrimento de 10 mm (hipótese simplificada e conservadora sob condições constantes) resulta em:

$$t \approx \left( \frac{16}{1,49} \right)^2 \approx 115 \text{ anos}$$

Assim, o tempo residual estimado até a completa despassivação das armaduras por carbonatação, considerando exclusivamente esse mecanismo, é da ordem de:

$$t_{\text{residual}} \approx 115 - 45 \approx 70 \text{ anos}$$

Esse valor não deve ser interpretado como vida útil real do reservatório, mas como um indicador de que, para a face externa avaliada, a carbonatação não é o mecanismo governante no horizonte de serviço, quando comparada às patologias observadas em vigas e lajes (perda de cobrimento, fissuração, deslocamentos e corrosão localizada severa na faixa gasosa).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As inspeções técnicas realizadas nos dois reservatórios permitiram caracterizar o estado atual do concreto e das armaduras, combinando inspeção visual e ensaios diagnósticos. Os ensaios de pacometria viabilizaram a determinação da posição das armaduras e do cobrimento, apoiando com segurança a abertura de janelas de inspeção e a execução dos demais procedimentos investigativos.

A extração de testemunhos possibilitou ensaios laboratoriais de permeabilidade, os quais, embora tenham apresentado resultados globalmente compatíveis com faixas aceitáveis, evidenciaram heterogeneidades e indícios de permeabilidade localizada, aspecto relevante em estruturas sujeitas a umidade permanente e microambientes com transporte iônico facilitado, com reflexos diretos sobre a durabilidade.

Quanto à carbonatação, a fenolftaleína indicou que o concreto permanece alcalino em grande parte das regiões avaliadas, com coloração típica vermelho-carmim. Na face externa, a janela de inspeção evidenciou avanço reduzido ( $\approx 2,0$  mm) frente ao cobrimento medido ( $\approx 10$  mm), sugerindo que a perda de passivação por  $\text{CO}_2$ , nas paredes, ainda não constitui o mecanismo crítico.

A determinação da profundidade de penetração de cloretos por nitrato de prata não indicou presença relevante desse agente no interior do concreto, permitindo inferir que não há evidência de corrosão governada por cloretos nas regiões avaliadas.

Por outro lado, os ensaios de potencial de corrosão (ASTM C 876) indicaram regiões com valores compatíveis com possibilidade elevada de corrosão ativa. Contudo, em reservatórios e estruturas com alto teor de umidade, esse ensaio pode apresentar leituras conservadoras, pois a condição úmida reduz a resistividade



elétrica e pode deslocar os potenciais para faixas que sugerem maior atividade. Essa interpretação foi compatibilizada pelas medições de resistividade elétrica, que apresentaram variações desde faixas associadas a baixa probabilidade de corrosão até condições mais propícias à corrosão, confirmando heterogeneidade do meio poroso e influência do estado de umidade.

A inspeção visual, por sua vez, identificou manifestações patológicas de maior gravidade concentradas em teto, lajes e vigas, incluindo fissuração generalizada, trincas, deslocamentos do cobrimento e exposição de armaduras em múltiplas regiões. Observou-se ainda rompimento localizado de armaduras em vigas, ocorrência crítica por estar diretamente associada à perda de capacidade resistente e comprometimento de segurança.

Assim, a análise integrada indica que, embora os mecanismos clássicos de deterioração por carbonatação e cloretos não estejam em estágio crítico nas paredes, as patologias em vigas e lajes configuram um quadro de deficiência estrutural localizada e progressiva, exigindo reabilitação tecnicamente dirigida.

## RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS

Reservatórios de água tratada devem atender rigorosamente a critérios de estanqueidade, durabilidade e proteção das armaduras contra agentes agressivos, assegurando operação segura e qualidade sanitária. Diante das manifestações patológicas identificadas, recomenda-se a execução de uma intervenção corretiva estruturada, contemplando, no mínimo:

Recuperação do concreto armado com corrosão e deslocamento, com remoção de concreto degradado, limpeza/tratamento das armaduras, passivação e recomposição com argamassas de reparo compatíveis e controle de aderência e retração. Nos trechos com perda relevante de seção, prever recomposição com barras adicionais ancoradas, conforme projeto específico de reparo/reforço (Souza; Ripper, 1998; Helene, 1993).

Reforço estrutural de vigas onde houve evidência de perda de capacidade (incluindo rompimentos localizados), mediante solução dimensionada (ex.: sistemas com compósitos de fibra de carbono, quando tecnicamente aplicável e devidamente verificada a aderência, o estado do substrato e o modo de ruptura).

Tratamento de fissuras em lajes e vigas, priorizando técnicas compatíveis com o objetivo (vedação/monolitismo/estanqueidade). Para fissuras estruturais, a injeção com resina epóxi pode ser adotada quando a finalidade for restabelecer continuidade e reduzir a permeabilidade.

Tratamento de fissuras nas paredes laterais, com técnicas de vedação e estanqueidade (ex.: injeção de resinas de PU em condições adequadas), de forma a interromper caminhos preferenciais de percolação.

Impermeabilização da faixa gasosa (vigas e teto), pois a região acima da lâmina d'água está sujeita a microambiente agressivo por condensação/aerossóis,



favorecendo corrosão localizada. Recomenda-se sistema protetivo compatível com água tratada, com preparação mecânica adequada do substrato (jateamento/lixamento), limpeza, primer e aplicação controlada do revestimento.

Regularização e impermeabilização da face superior das lajes, com correção de caimentos (mínimo técnico compatível com o projeto, usualmente  $\geq 2\%$  quando aplicável), tratamento prévio de fissuras e aplicação de membrana impermeabilizante adequada a tráfego eventual de manutenção. Em sistemas elastoméricos/acrílicos, a incorporação de reforço (tela) na primeira demão melhora resistência ao rasgamento, quando recomendado pelo fabricante e compatível com o sistema.

Vedação das juntas entre estruturas, garantindo estanqueidade sem impedir movimentações relativas. Prever limpeza rigorosa, eventual recomposição de bordas, instalação de fundo de junta para evitar aderência em três faces e aplicação de selante elástico compatível (PU/híbrido/silicone estrutural), com acabamento e cura conforme especificação.

Limpeza/remoção de depósitos e preparo superficial, incluindo hidrojateamento onde indicado, seguido do sistema de proteção superficial previsto, sempre com controle de umidade do substrato e compatibilidade com o revestimento.

## PLANO DE MANUTENÇÃO

Recomenda-se a implementação de um plano de manutenção com rotinas e inspeções periódicas, com foco em estanqueidade, integridade do revestimento protetivo e comportamento estrutural. Uma estrutura mínima, aplicável ao estudo, pode ser descrita assim:

Diariamente: verificação operacional do nível e condições gerais do reservatório (sinais evidentes de vazamentos/instabilidade operacional).

Semanalmente: limpeza operacional conforme protocolo sanitário interno, com registro de anomalias observadas.

Mensalmente: inspeção visual dirigida (faixa gasosa, teto, vigas, encontros parede-laje, juntas), registrando fissuras, eflorescências, manchas de corrosão e pontos de destacamento incipiente.

Semestralmente: checagem de integridade de sistemas associados (bombas, tubulações, pontos de vazamento) e avaliação do comportamento de juntas e selantes.

Anualmente: inspeção técnica formal do sistema de impermeabilização e do revestimento protetivo, com ensaios pontuais quando necessário.

A cada 2–3 anos (ou conforme criticidade): inspeção estrutural especializada, incluindo mapeamento de fissuras, verificação de cobrimento em zonas críticas e reavaliação eletroquímica se houver indícios de progressão.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação técnica realizada nos reservatórios evidenciou manifestações patológicas compatíveis com o envelhecimento e com a ausência de manutenção sistemática ao longo de aproximadamente 45 anos. Embora os ensaios indiquem que carbonatação e cloretos não são, no momento, os mecanismos governantes nas paredes, foram identificadas patologias de maior severidade em lajes e vigas, incluindo deslocamentos, exposição de armaduras e ocorrências localizadas com perda de seção e rompimentos, com impacto direto na confiabilidade estrutural.

Conclui-se que, apesar de não haver evidência de colapso global iminente no instante da inspeção, o quadro observado é compatível com degradação progressiva e demanda intervenção corretiva prioritária, incluindo recuperação do concreto, tratamento e recomposição de armaduras, reforço estrutural onde necessário, impermeabilização/proteção da faixa gasosa e implantação de plano de manutenção com inspeções periódicas. Essas medidas são essenciais para restabelecer desempenho, estanqueidade e segurança, prolongando a vida útil remanescente do sistema de reservatório.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16747: Inspeção predial — Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento**. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10786: Concreto endurecido — Determinação do coeficiente de permeabilidade à água**. Rio de Janeiro.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C876-15: Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1993.
- MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Avaliação da penetração de cloretos em estruturas de concreto armado por método colorimétrico. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 10, n. 4, p. 835–858, 2017.
- OTONI, Sirley. **Laudo De Inspeção Técnica Em Reservatórios**. Relatório Técnico, Pará de Minas 2025.
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

SILVA, P. F. A. **Carbonatação do concreto: influência das condições ambientais e dos materiais constituintes**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.