CAPÍTULO 64 · Parte V · Diagnóstico
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/tre9zw37
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/8p5hz304

INFLUÊNCIA DA FISSURAÇÃO PRECOCE NA VIDA ÚTIL DE UMA PONTE DE ACESSO EM CONCRETO ARMADO EM AMBIENTE MARINHO: ESTUDO DE CASO

Markus Moratti[1]*, Augusto Mamede[2]; Vagner Pontes[3]
*Autor de contato: markus.moratti@transpetro.com.br

[1] Paradas e Pequenas Obras, Petrobras Transporte S.A., Vitória, Brasil
[2] Integridade de Estruturas Civis, Petrobras Transporte S.A., Rio de Janeiro, Brasil
[3] Estudos, Simulações e Pareceres, Petrobras Transporte S.A., Rio de Janeiro, Brasil

RESUMO

A fissuração precoce é uma manifestação patológica recorrente e frequentemente avaliada de forma simplificada quanto ao seu impacto na durabilidade das estruturas de concreto armado. O presente trabalho analisa o quadro fissuratório de uma ponte de acesso a um píer, identificado durante a fabricação das peças, até as condições verificadas após 15 anos de exposição à atmosfera marinha. Foi realizada inspeção visual com mapeamento detalhado, identificando fissuras de até 0,8 mm, complementada por ensaios de medição do cobrimento por detecção eletromagnética, profundidade de carbonatação, penetração de cloretos (avaliação colorimétrica) e de medição do potencial de corrosão. Os resultados demonstram que a abordagem inadequada quanto ao impacto das fissuras na vida útil da instalação levou à interpretação equivocada de sua influência, comprometendo a durabilidade potencial da estrutura.
Palavras-chave: fissuração; durabilidade; concreto armado; ponte

ABSTRACT

Early cracking in reinforced concrete is a recurrent pathological manifestation, often assessed in a simplified manner regarding its impact on durability. The present study analyzes the cracking pattern of an access bridge to a pier, from its identification during the fabrication of the precast elements to the conditions observed after 15 years of exposure to the marine atmosphere. A detailed visual inspection with crack mapping was conducted, identifying crack widths of up to 0.8 mm, complemented by cover depth measurements, carbonation depth assessment, colorimetric testing for chloride penetration, and corrosion potential measurements. The results demonstrate that an inadequate approach to evaluating the impact of cracks on service life led to a misinterpretation of their influence, compromising the structure's potential durability.
Keywords: early-age cracking; durability; reinforced concrete; bridge

1. INTRODUÇÃO

A compreensão moderna do processo corrosivo em estruturas de concreto armado foi sistematizada a partir do modelo conceitual proposto por Tuutti (1982), no qual a vida útil é dividida em duas fases: iniciação e propagação. Nesse modelo, a vida útil está diretamente vinculada ao tempo necessário para que os agentes agressivos atinjam a armadura e desestabilizem a camada passivadora do aço. Consequentemente, qualquer mecanismo capaz de reduzir o período de iniciação resulta na redução da vida útil da estrutura.

Tuutti (1982) ainda afirma que: "Uma fissura no concreto altera radicalmente a permeabilidade do material ao seu redor. Diversas substâncias podem, portanto, penetrar no concreto muito mais rapidamente através das fissuras do que através do sistema de poros do concreto". Dessa forma, embora o concreto íntegro apresente certo grau de resistência à difusão, a existência de fissuras pode reduzir localmente essa capacidade protetiva, antecipando o atingimento do teor crítico de cloretos na interface aço-concreto e, consequentemente, a despassivação das armaduras.

Recentemente, estudos evidenciaram que a presença de fissuras no concreto, mesmo com aberturas reduzidas, pode acelerar significativamente o transporte de cloretos e antecipar a iniciação da corrosão das armaduras. Revisões e modelagens numéricas indicam que fissuras constituem caminhos preferenciais para a penetração de agentes agressivos, reduzindo o período de iniciação da vida útil (POURSAEE; ROSS, 2022; SOUZA; LEONEL, 2025), reforçando a necessidade de avaliação criteriosa de sua ocorrência, origem e tratamento em ambientes marinhos.

Helene (2011) ressalta que a durabilidade deve ser tratada como um requisito explícito de projeto, não sendo mera consequência da resistência mecânica do concreto. A vida útil das estruturas depende da adequada combinação entre a classe de agressividade ambiental, a qualidade do concreto, a espessura de cobrimento e o controle da fissuração. Nesse contexto, destaca-se a relevância da avaliação da fissuração em estruturas expostas a atmosferas marinhas, uma vez que as fissuras desempenham papel determinante ao intensificar os mecanismos de transporte de agentes agressivos, favorecendo o ingresso de cloretos. Conforme discutido por Gjørv (2016), a corrosão das armaduras induzida por cloretos constitui o principal mecanismo de deterioração em estruturas de concreto armado nesses ambientes, superando, em relevância, os processos de degradação da própria matriz cimentícia.

Nesse contexto, este trabalho apresenta o estudo de caso de uma ponte de acesso integrante de um píer, construída em ambiente de elevada agressividade. A estrutura apresentou fissuração nas primeiras idades e, após aproximadamente 15 anos de exposição à atmosfera marinha, evidenciou processo ativo de corrosão das armaduras em diversas vigas longitudinais.

O objetivo deste artigo é verificar, à luz dos conceitos de vida útil propostos por Tuutti (1982) e Helene (2011), se a abordagem inadequada no tratamento das fissuras de retração pode ter contribuído para a redução da vida útil da estrutura. Para tanto, emprega-se uma abordagem qualitativa baseada na análise documental do histórico da obra, no levantamento das manifestações patológicas identificadas em inspeção visual, nos resultados dos ensaios e na confrontação dos dados obtidos com os fundamentos teóricos e experimentais disponíveis na literatura sobre difusão de cloretos em concreto fissurado. Busca-se, assim, contribuir para a discussão técnica sobre a criticidade da fissuração em estruturas expostas a ambientes com elevada concentração de cloretos.

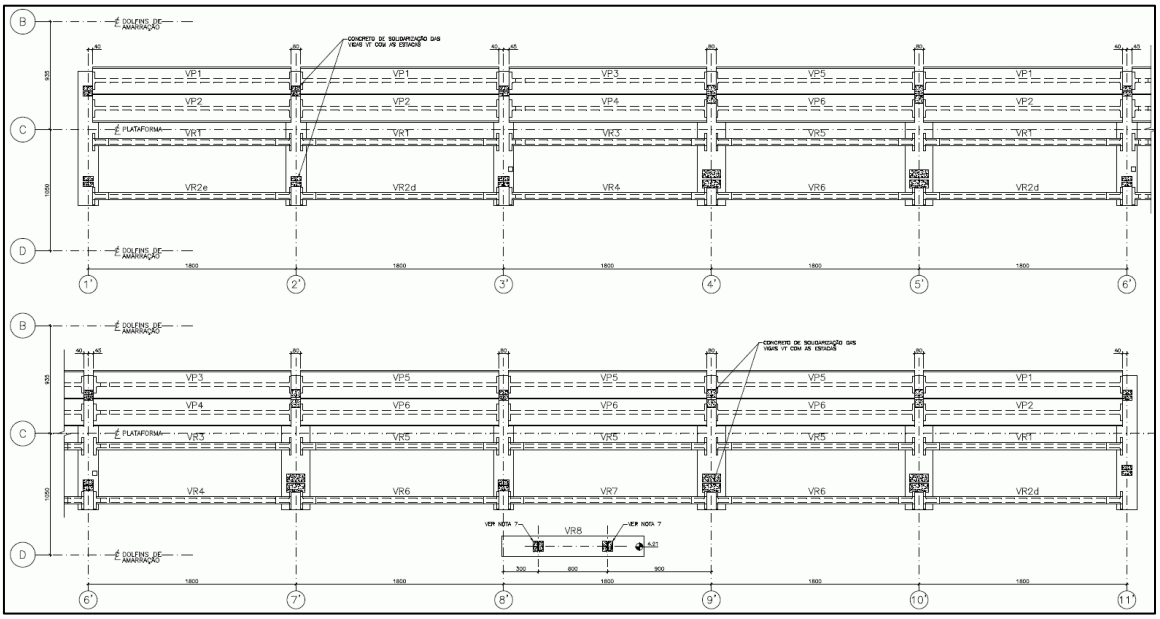
2. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA

A estrutura consiste em um píer, cujas vigas pré-moldadas longitudinais da ponte de acesso e tubovia apresentaram quadro fissuratório nas primeiras idades, durante verificação pós-concretagem. Tais ocorrências foram verificadas e registradas na documentação de qualidade da obra (*databook*), poucos dias após a concretagem, durante a desforma das laterais das vigas.

2.1 Estrutura do píer

A ponte de acesso foi executada entre os anos de 2009 e 2010, sendo composta por 10 vãos de 18 metros, totalizando 180 metros de extensão (Figura 1).

Figura 1 – Ponte de acesso com a disposição das vigas VP e VR em planta

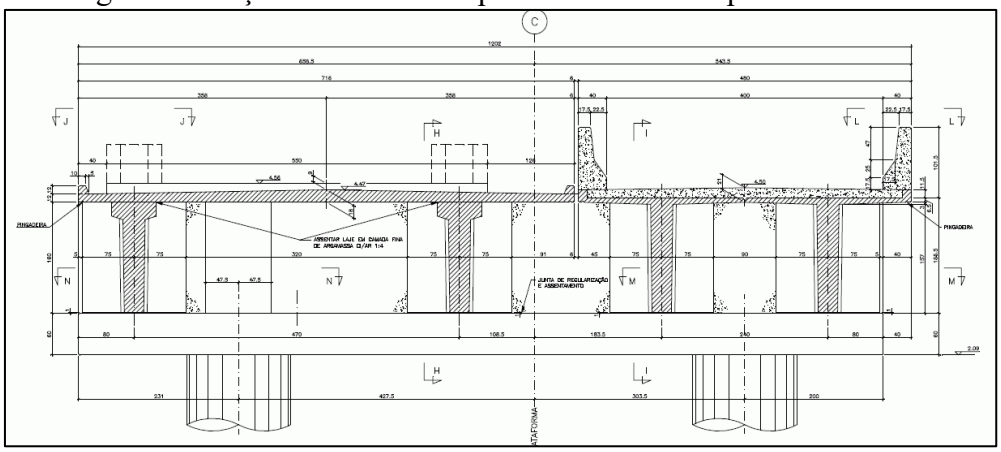


Fonte: os autores

Em cada vão, o sistema estrutural é constituído por duas vigas longitudinais pré-moldadas tipo T (VP) destinadas à ponte de acesso e duas vigas retangulares (VR) associadas à tubovia (Figura 2). As vigas longitudinais têm 17 metros de comprimento e são apoiadas e consolidadas sobre vigas mistas (VT), compostas por trecho pré-moldado complementado por concreto moldado *in loco*, tornando o sistema de vigas hiperestático.

Para o projeto, foi adotada a Classe de Agressividade Ambiental IV – Risco elevado de deterioração da estrutura, conforme a NBR 6118:2007 (ABNT, 2007) vigente no período, correspondente a ambiente marinho com respingos de maré. A Figura 3 ilustra o ambiente de implantação da estrutura.

Figura 2 – Seção transversal da ponte de acesso do píer e tubovia.



Fonte: os autores

Figura 3 – Vista inferior da ponte de acesso e tubovia. Vigas VP (esquerda) e VR (direita)



Fonte: os autores

No que se refere aos materiais, o concreto foi especificado com resistência característica à compressão (f_{ck}) igual a 40 MPa, relação água/aglomerante igual a 0,40, consumo de cimento (CPIII 40 RS) de 414 kg/m³ e adição de sílica ativa correspondente a 8% da massa de cimento.

O concreto executado foi usinado com a verificação da resistência realizada por amostragem total. Foram moldados corpos de prova para ensaios de resistência à compressão nas idades de 24 horas, 48 horas, 3 dias, 7 dias e 28 dias, permitindo o acompanhamento da evolução da resistência desde as primeiras idades. A resistência à compressão média obtida aos 28 dias foi de 65,4 MPa, com desvio padrão de 7,5 MPa, sendo o valor do menor exemplar igual a 53,1 MPa, evidenciando elevado desempenho mecânico do material empregado.

Além disso, todos os elementos estruturais receberam sistema de proteção superficial constituído por fundo epóxi, com espessura de película seca de 100 µm, e acabamento em poliuretano, com espessura de 70 µm. A aplicação foi executada conforme procedimento técnico previamente estabelecido, com controle das condições ambientais, preparação de superfície e medição sistemática de espessura de película seca, sendo os serviços acompanhados e certificados por inspetor de pintura qualificado.

Ressalta-se, contudo, que a vida útil de projeto não está explícita na documentação técnica disponível. A inexistência desse parâmetro formal dificulta a comparação entre desempenho esperado e desempenho observado, especialmente diante da constatação, em inspeções rotineiras do píer, de manifestações patológicas relacionadas à corrosão de armaduras em período inferior a 10 anos de serviço, mesmo em presença de concreto de baixa relação a/c e sistema de proteção superficial. Portanto, no presente artigo a comparação se dará com a vida útil "potencial".

2.2 Histórico das manifestações patológicas

Durante a fabricação dos elementos pré-moldados, realizada no canteiro de obras, foi identificado quadro fissuratório em todas as vigas longitudinais da ponte de acesso, com aberturas variando entre 0,1 e 0,3 mm, logo após a desforma das laterais das vigas. A não conformidade foi identificada como "fissuras de retração restringida" e tratada por procedimento específico de reparo em peças pré-moldadas. Todas as informações relativas ao controle de qualidade, recebimento dos materiais aplicados e registros das não conformidades encontram-se devidamente documentadas no *databook* da obra.

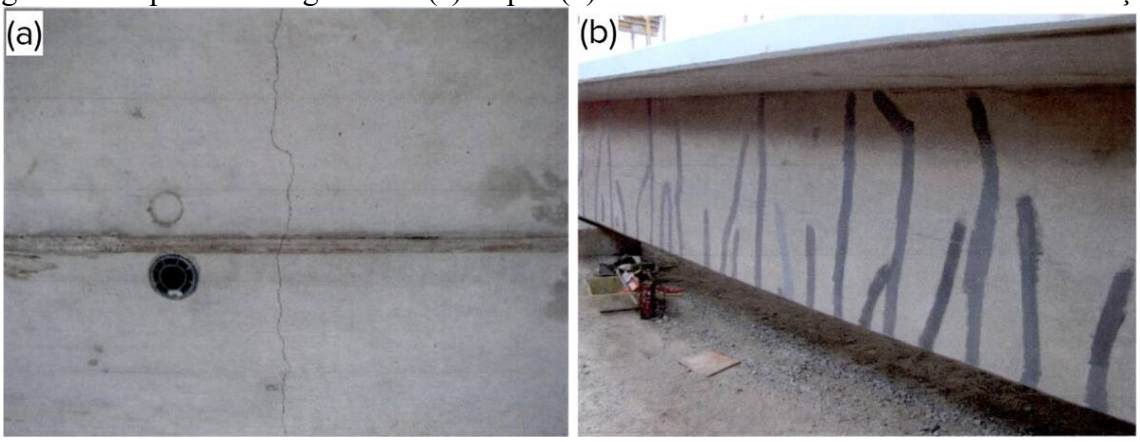
De fato, a geometria das vigas, com extremidades no formato "T" em planta e o próprio sistema de fôrmas, contribuíram para a restrição à retração das primeiras idades. Soma-se a isso o fato de o concreto possuir relação água/cimento de 0,40, condição associada a maior suscetibilidade à retração autógena. A combinação entre retração e a restrição resultou no desenvolvimento de tensões de tração precoces, superiores à resistência do concreto jovem, culminando na formação de fissuras. Agravaram esse quadro as condições de concretagem realizadas a céu aberto, frequentemente nos horários de maior temperatura do dia, aliadas à forte incidência de ventos característica da região costeira e à ausência de barreiras e dispositivos de proteção, resultando em elevadas taxas de evaporação superficial que criaram as condições propícias ao desenvolvimento da retração plástica.

Do ponto de vista estrutural, as vigas foram consolidadas às vigas transversais por meio de engastamento, tornando o sistema hiperestático, que do ponto de vista estrutural reduz os momentos máximos positivos no meio dos vãos; entretanto, tal configuração implicou na imposição de restrições às deformações livres dos elementos, em especial à retração por secagem, uma vez que a consolidação ocorreu ainda durante o período ativo desse fenômeno e, consequentemente, o desenvolvimento de tensões adicionais no concreto jovem, favorecendo a formação de fissuração.

Foram tomadas ações corretivas após a verificação do quadro fissuratório nas primeiras vigas concretadas, como a instalação de isopor entre as formas, permitindo a deformação do sistema, incremento das armaduras de pele e desforma antecipada das laterais para início do processo de cura. Tais ações minimizaram as aberturas e quantidade das fissuras, mas não mitigaram sua ocorrência.

Conforme estabelecido no procedimento de reparo dos pré-moldados da obra em questão, fissuras com abertura inferior a 0,2 mm não demandaram intervenção; fissuras com abertura entre 0,2 mm e 0,5 mm deveriam ser tratadas mediante limpeza da superfície, lixamento em faixa adjacente e selagem com resina epóxi de baixa viscosidade (Figura 4).

Figura 4 – Aspecto das vigas antes (a) e após (b) o tratamento realizado durante a construção



Fonte: os autores

No ano de 2019, menos de 10 anos após o início das operações do píer, durante as inspeções de rotina do píer, foram evidenciados os primeiros sinais de fissuração em decorrência do processo corrosivo das armaduras.

3. METODOLOGIA

A avaliação da ponte de acesso foi conduzida por meio de inspeção visual sistematizada e da realização de ensaios destrutivos e não destrutivos voltados à caracterização do concreto de cobrimento e das armaduras. Os ensaios — incluindo detecção eletromagnética, determinação da profundidade de carbonatação, avaliação da penetração de cloretos e medição de potencial de corrosão — foram executados por amostragem em duas vigas representativas, selecionadas nos vãos mais críticos da estrutura: a viga VP2, localizada no primeiro vão, e a viga VP4, situada no terceiro vão. A escolha desses elementos fundamentou-se na presença de sinais visuais mais pronunciados, maior evidência de processos corrosivos e condições ambientais mais severas, em função da proximidade com a zona de arrebentação (Figura 5). O programa experimental teve por objetivo avaliar o avanço dos agentes agressivos em relação às armaduras, identificar a ocorrência de processos corrosivos ativos e verificar se o ingresso desses agentes ocorreu por difusão através do cobrimento ou se as fissuras previamente estabelecidas atuaram como vias preferenciais, especialmente para os íons cloreto.

Figura 5 – Vista dos dois primeiros vãos da ponte de acesso



Fonte: os autores

3.1 Inspeção visual e mapeamento de fissuras

Foi realizada inspeção visual detalhada em todos os vãos da ponte de acesso, com ênfase nas vigas longitudinais VP e VR. O levantamento contemplou:

- registro fotográfico;
- identificação de danos observáveis;
- mapeamento das fissuras ao longo das faces laterais e inferiores;
- medição de abertura com auxílio de fissurômetro;
- identificação de regiões com desplacamento de concreto e exposição de armaduras.

As fissuras foram classificadas quanto à orientação, continuidade e abertura. Foram registradas aberturas variando de microfissuras até valores máximos da ordem de 0,8 mm. Também foi avaliada a presença de manifestações associadas, como manchas de óxidos, eflorescências e indícios de delaminação.

3.2 Medição do cobrimento e detecção eletromagnética das armaduras

A medição do cobrimento foi determinada por meio de equipamento de detecção eletromagnética, modelo Bosch D-tect 150, permitindo a localização das barras e a medição da espessura de concreto sobre as armaduras. As medições foram realizadas em pontos distribuídos ao longo dos vãos. A localização das armaduras serviu para determinar ainda a malha de pontos para o ensaio de potencial de corrosão.

3.3 Determinação da profundidade de carbonatação

A profundidade de carbonatação foi avaliada mediante aplicação de solução alcoólica de fenolftaleína em superfícies recém-expostas de acordo com a DIN EN 14630 (DIN, 2007).

3.4 Avaliação da penetração de cloretos

A verificação qualitativa da presença de cloretos foi realizada por meio de ensaio colorimétrico, com aplicação de solução de nitrato de prata ($AgNO_3$) em superfícies recém-fraturadas, conforme metodologia consolidada em estudos de estado da arte (REAL et al., 2015). A alteração de coloração permitiu identificar a profundidade aproximada de penetração de íons cloreto.

3.5 Medição do potencial de corrosão

O estado eletroquímico das armaduras foi avaliado por meio de medições de potencial de corrosão conforme ASTM C876 (ASTM, 2015), utilizando eletrodo de referência de Cu-$CuSO_4$. As leituras foram distribuídas ao longo das vigas, com maior densidade de pontos nas regiões que apresentavam maior criticidade, permitindo identificar todas as áreas com processo corrosivo, mesmo que localizadas.

4. RESULTADOS

As condições encontradas durante a inspeção realizada estão apresentadas nas seções 4.1 a 4.5. As principais manifestações patológicas observadas são decorrentes dos fenômenos de retração ocorridos ainda nas primeiras idades dos elementos pré-moldados.

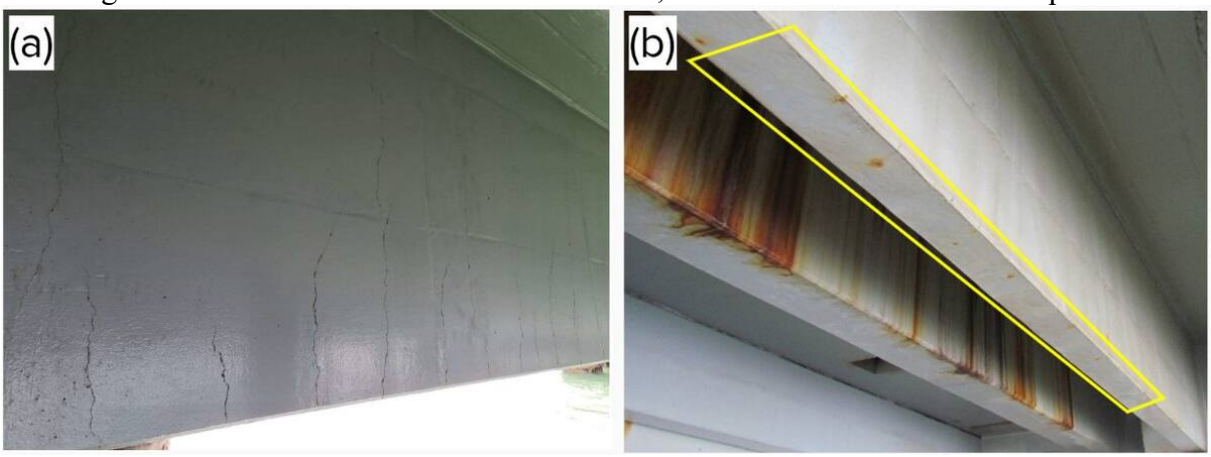
4.1 Inspeção visual e mapeamento das anomalias

A análise das estruturas correspondentes à ponte de acesso e ao tubovia revelou a presença de múltiplas manifestações patológicas, predominantemente associadas à retração e deterioração do concreto induzida por corrosão das armaduras. As anomalias observadas foram categorizadas conforme discriminado nos parágrafos subsequentes.

4.1.1 Fissuração por retração

Foram identificadas fissuras compatíveis com fenômenos de retração em diversos elementos estruturais, notadamente em vigas longitudinais da ponte de acesso (VP) e tubovia (VR). As fissuras apresentaram abertura característica entre 0,05 e 0,8 mm. Em grande parte dos casos, as fissuras não evidenciaram a presença de produtos de corrosão, sugerindo tratar-se de manifestação primária decorrente de fenômenos termo hidráulicos durante as fases iniciais de cura do concreto (retração plástica e/ou autógena) e retração por secagem. Em outros pontos de inspeção, constatou-se a formação de depósitos de óxidos ferrosos nas bordas das fissuras, indicando ingresso dos agentes agressivos, em especial, os íons cloreto, e deflagração de deterioração localizada das barras de aço (Figura 6).

Figura 6– fissuras com abertura inferiores a 0,2 mm observadas na VP1 do quinto vão.



Fonte: os autores

Foi possível observar ainda, fissuras nas regiões reparadas durante a fase de construção, conforme procedimento citado no item 2.2, evidenciando a ineficiência do procedimento de reparo.

4.1.2 Fissuração e desplacamento decorrentes de corrosão de armaduras

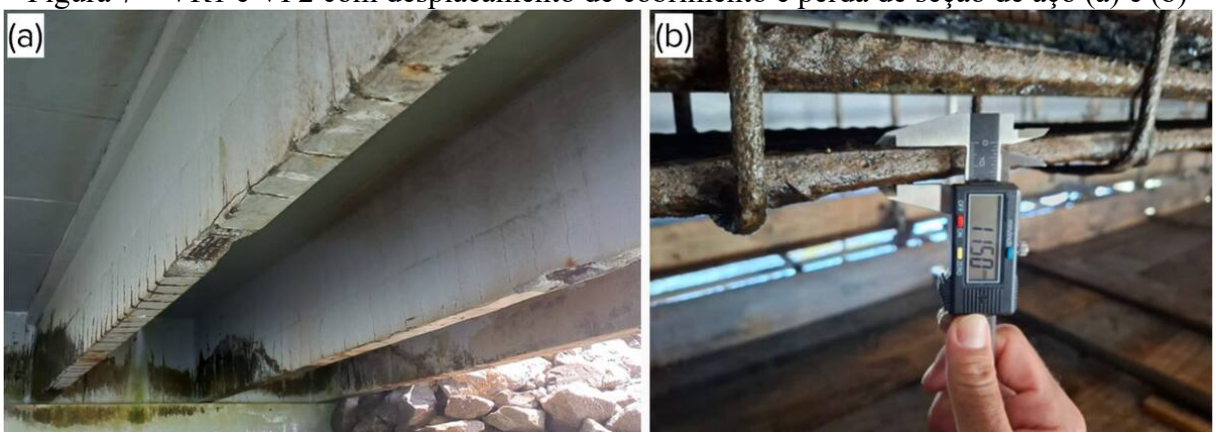
Em diversos elementos estruturais, especialmente na região inferior das vigas, foram identificadas fissuras longitudinais paralelas às armaduras, típicas de expansão por produtos de corrosão.

Tais fissuras são compatíveis com o estado de corrosão ativo, indicando que o processo já ultrapassou a fase de iniciação e encontra-se em fase de propagação

Nas regiões em que o processo corrosivo atingiu estágios mais avançados de desenvolvimento, constatou-se a ocorrência de desplacamento do concreto de cobrimento (Figura 7 a), com exposição

direta das armaduras e perda de seção de quase 50% do diâmetro (a perda de seção foi confirmada durante as obras de recuperação estrutural, conforme Figura 7 b).

Figura 7 – VR1 e VP2 com desplacamento de cobrimento e perda de seção de aço (a) e (b)



Fonte: os autores

4.2 Medição do cobrimento e detecção eletromagnética das armaduras

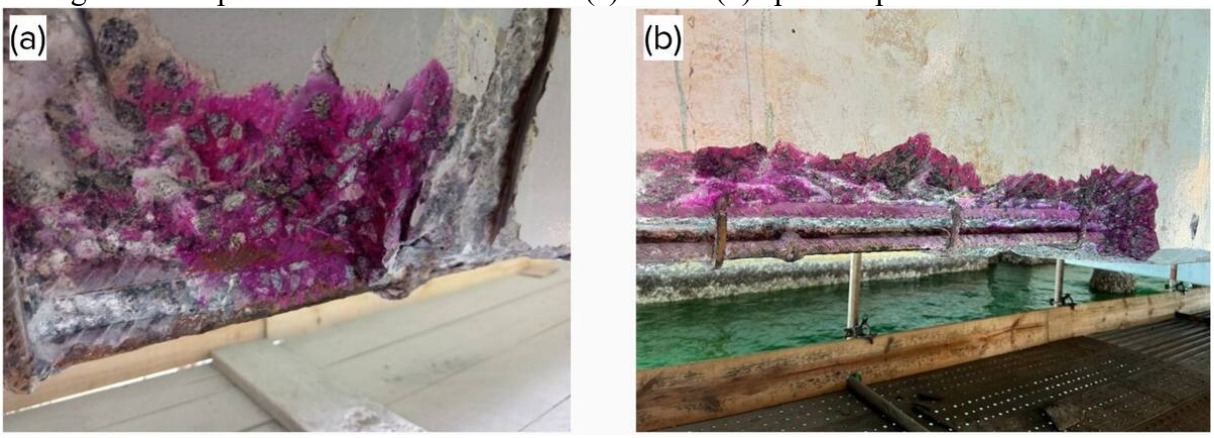
As leituras do cobrimento foram realizadas nas colunas definidas para os ensaios de potencial de corrosão: espaçamento entre 0,60 e 1,05 m. Os resultados obtidos indicaram um cobrimento médio de 4,5 cm, em relação à superfície externa do concreto até a armadura mais próxima.

O cobrimento de projeto previsto para as vigas do píer é de 5,0 cm (cobrimento nominal), já considerando as tolerâncias construtivas. Considerando a tolerância do equipamento de detecção eletromagnética (±5 mm em concreto seco e ±10 mm em concreto úmido, segundo o manual do fabricante), e os resultados das correlações entre as medidas reais de cobrimento e as leituras do aparelho, considera-se que o cobrimento é adequado aos critérios da NBR 6118 (ABNT, 2007) para as condições ambientais onde a estrutura encontra-se inserida.

4.3 Profundidade de carbonatação

Os ensaios de verificação da profundidade de carbonatação indicaram a manutenção da alcalinidade do cobrimento na quase totalidade das seções avaliadas. Observou-se coloração característica púrpura em praticamente toda a espessura do concreto analisado, evidenciando valores de pH compatíveis com a condição passivante das armaduras, conforme ilustrado na Figura 8. Esses resultados confirmam que o processo de carbonatação não se configurou como mecanismo relevante de deterioração para os elementos estruturais analisados.

Figura 8 – Superfície do concreto da VP2 (a) e VP4 (b) após a aspersão de fenolftaleína



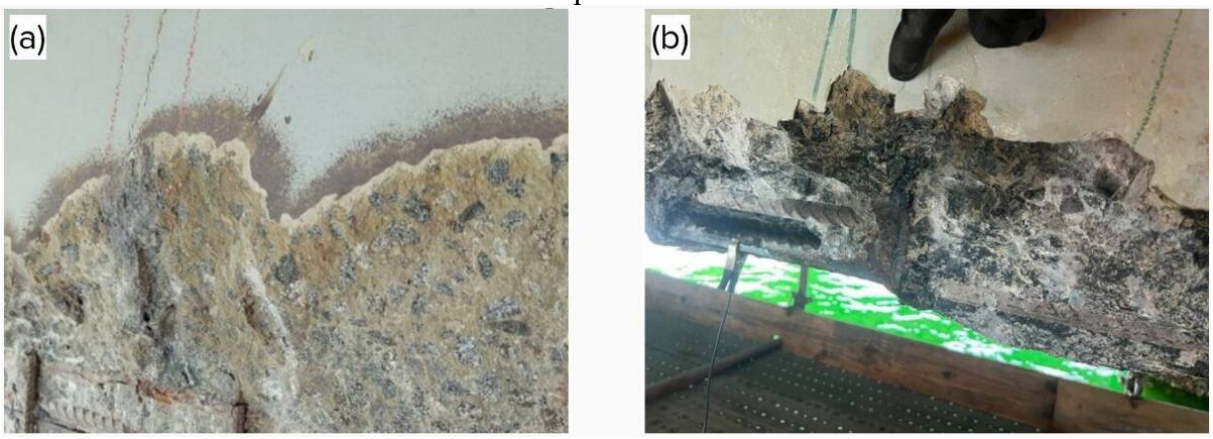
Fonte: os autores

4.4 Penetração de cloretos

Os ensaios evidenciaram predominantemente coloração marrom nas áreas sem contaminação, característica da ausência de cloretos livres reativos. Nas regiões onde ocorre a presença de íons cloreto, a reação química entre o nitrato de prata e o íon cloreto resulta na formação de cloreto de prata (AgCl), identificado visualmente por coloração esbranquiçada.

No caso em análise, as áreas esbranquiçadas apresentaram-se com espessuras contaminadas insignificantes (Figura 9), não atingindo o cobrimento das armaduras, conforme indicado nas figuras apresentadas. Esses resultados corroboram para a conclusão de que o ingresso de cloretos pelo concreto de cobrimento íntegro foi desprezível, apresentando excelente comportamento frente aos agentes agressivos, e reforçando o entendimento de que a deterioração observada está associada a vias preferenciais de transporte, notadamente as fissuras pré-existentes.

Figura 9 – Superfície do concreto da VP2 (a) e VP4 (b) após a aspersão de solução de nitrato de prata



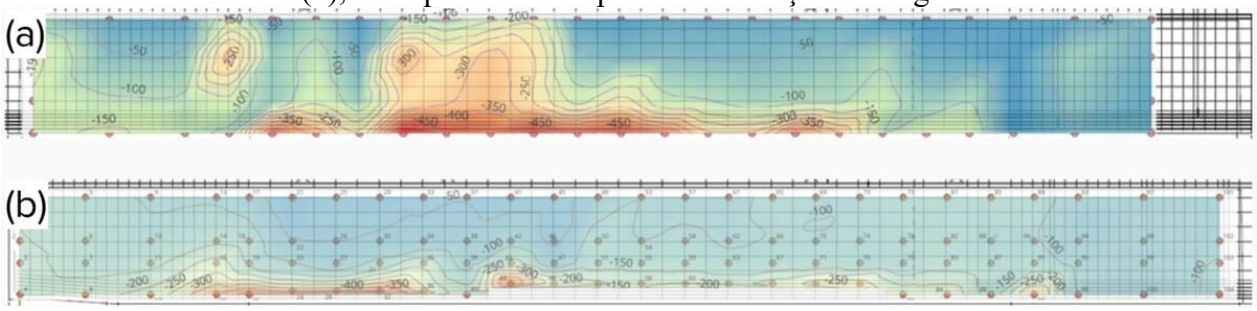
Fonte: os autores

4.5 Potencial de corrosão

As leituras mais eletronegativas concentraram-se nas regiões inferiores das vigas longitudinais, e em alguns pontos, nas regiões superiores das vigas, coincidindo com as fissuras, o que indica maior

atividade eletroquímica nas zonas afetadas por fissuras e ingresso localizado de agentes agressivos. Nas demais regiões, os potenciais permaneceram acima de –200 mV, indicando condição passiva das armaduras, compatível com o bom desempenho observado nos ensaios de penetração de cloretos e de carbonatação. A Figura 10 apresenta o mapa dos contornos equipotenciais

Figura 10 – Contornos de equipotenciais da viga VP2 do primeiro vão (a) e VP4 do terceiro vão (b), sobrepostas com a planta de armação das vigas



Fonte: os autores

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente estudo evidenciou que a durabilidade e o desempenho satisfatório de estruturas de concreto vão além da simples obtenção de resistências mecânicas elevadas ou mesmo a utilização de concretos com baixa permeabilidade intrínseca e ainda, a utilização de revestimentos protetivos. Observou-se que, mesmo em situações nas quais o material apresentou excelente resistência ao ingresso de agentes agressivos quando íntegro, a estrutura como um todo demonstrou desempenho aquém do esperado em termos de vida útil e comportamento em serviço.

As fissuras identificadas constituíram-se como caminhos preferenciais para a penetração de agentes deletérios, assumindo papel predominante em relação às características da matriz cimentícia. Tal constatação reforça a necessidade imperativa de uma abordagem holística no projeto e execução de estruturas de concreto, onde o controle fissuratório deve figurar como elemento central desde as etapas iniciais de concepção. A prevenção e mitigação dessas fissuras precoces, muitas vezes negligenciadas por não comprometerem imediatamente a capacidade resistente da estrutura, revelaram-se essenciais para a preservação da integridade do sistema de proteção do concreto.

Adicionalmente, os resultados demonstraram que aspectos como geometria das peças, dimensionamento adequado de armaduras de controle de fissuração, e especificação de materiais com menor retração devem ser criteriosamente avaliados em conjunto, uma vez que interferem diretamente no padrão de fissuração e, consequentemente, na vulnerabilidade da estrutura aos mecanismos de degradação. Neste sentido, recomenda-se ainda:

- A incorporação de aditivos inibidores ou compensadores de retração e fibras ao concreto, que têm demonstrado eficácia comprovada na redução da fissuração por retração e no controle da propagação e abertura de fissuras, contribuindo significativamente para a integridade estrutural ao longo da vida útil, principalmente em estruturas inseridas em ambientes de alta agressividade, como no caso dos píeres;
- A avaliação do uso de cicatrizantes, que podem contribuir para a selagem de fissuras de pequena abertura e para a redução da permeabilidade superficial;
- Caso as medidas adotadas se revelem ineficazes para impedir o aparecimento das fissuras, recomenda-se que o tratamento corretivo seja conduzido com base em diagnóstico técnico

específico, contemplando a caracterização quanto à natureza (ativa ou passiva), abertura, extensão e condições de exposição ambiental, de modo a assegurar a adequada compatibilidade entre o mecanismo de fissuração e a técnica de intervenção escolhida.

Conclui-se, portanto, que a garantia de durabilidade e desempenho estrutural exige a observância rigorosa dos princípios já consolidados no estudo do comportamento do concreto nas primeiras idades no que diz respeito à prevenção e controle da fissuração, adotando uma visão integrada do comportamento da estrutura ao longo de toda a sua vida útil. Tal abordagem pressupõe a consideração das tensões desenvolvidas nas primeiras horas após a concretagem, dos fenômenos de retração e fissuração iniciais, bem como das condições de exposição e solicitações atuantes em serviço. Somente mediante essa análise abrangente, aliada a controle tecnológico rigoroso e supervisão técnica qualificada, será possível assegurar estruturas efetivamente duráveis e seguras ao longo do tempo.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2007: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2007.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C876/C876M – 15 (Reapproved 2022). Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 14630:2007. Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Test methods — Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method.** Berlin: DIN, 2007.

GJØRV, Odd E. **Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments.** 2. ed. Nova Iorque: CRC *Press*, 2016. 270 p.

HELENE, P. R. L. **Vida útil das estruturas de concreto**. In: ISAIA, G. C. (org.). Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 22.

POURSAEE, A.; ROSS, B. **The role of cracks in chloride-induced corrosion of carbon steel in concrete: review**. Corrosion and Materials Degradation, v. 3, n. 2, p. 258–269, 2022. https://doi.org/10.3390/cmd3020015.

REAL, L. V., OLIVEIRA, D. R. B., SOARES, T., MEDEIROS, M. H. F. **Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte**. Revista Alconpat, 5 (2), 149-159, 2015. https://doi.org/10.21041/ra.v5i2.84

SOUZA, V. B.; LEONEL, E. D. **The influence of cracks on the corrosion initiation time caused by chloride diffusion in concrete structures using the Boundary Element Method**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 18, n. 1, e18108, 2025. https://doi.org/10.1590/S1983-41952025000800008.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. (CBI Research, 4:82).