

AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE DE OAE (OBRA DE ARTE ESPECIAL) EM AMBIENTE MARINHO: ESTUDO DE CASO

EVALUATION OF DURABILITY OF OAE (SPECIAL WORK OF ART) IN MARINE ENVIRONMENT: CASE STUDY

Édison Antônio Nunes Júnior

*Mestrando, Escola de Engenharia –
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)*

Antônio Neves de Carvalho Júnior

Professor Doutor, Escola de Engenharia –UFMG

Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco

Professor Pós-Doutor, Escola de Engenharia - UFMG

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso de uma Obra de Arte Especial (OAE) que inicialmente era uma passarela e liga o continente a uma ilha, construída no final da década de 1980. Em 2003 sofreu intervenção que objetivou o aumento de sua capacidade e a partir de então se tornaria uma ponte para passagem de motos, veículos pequenos ou de passeio. Em 2018 a OAE sofreu nova intervenção de recuperação estrutural nas vigas e tabuleiro. Atualmente faz-se necessária a passagem de veículos de carga o que gera o objetivo deste trabalho que é a verificação da durabilidade de toda a OAE a partir da infraestrutura, mesoestruturas e superestrutura. Para tal foi realizada uma inspeção especial para apresentar e identificar possíveis manifestações patológicas desencadeadas por processos de deterioração de origem física, mecânica, química e biológica do concreto. Foram realizados ensaios destrutivos e não destrutivos correlacionando seus resultados a fim de se obter uma conclusão quanto ao parâmetro estrutural, de durabilidade e funcionalidade da OAE e de sua possibilidade de seu uso como uma ponte com passagem de veículos de carga.

Palavras-chave: Obra de arte especial, manifestações patológicas, ensaios não destrutivos; ensaios destrutivos; durabilidade.

ABSTRACT

This work presents a case study of a Special Work of Art (SWA) that was initially a footbridge and connects the mainland to an island, built in the late 1980s. In 2003, it underwent intervention aimed at increasing its capacity and from then on it would become a bridge for the passage of motorbikes, small or passenger vehicles. In 2018, the SWA underwent a new structural recovery intervention on the beams and deck. Currently, the passage of cargo vehicles is necessary, which generates the objective of this work, which is to verify the durability of the entire SWA from the infrastructure, mesostructures and superstructure. To this end, a special inspection was carried out to present and identify possible pathological manifestations triggered by physical, mechanical,

chemical and biological deterioration processes of the concrete. Destructive and non-destructive tests were carried out correlating their results in order to obtain a conclusion regarding the structural parameter, durability and functionality of the SWA and its possibility of new use for a bridge with the passage of cargo vehicles.

Keywords: Special artwork, pathological manifestations, non-destructive testing; destructive testing; durability.

1. INTRODUÇÃO

Obras de Arte Especiais (OAEs) são estruturas robustas projetadas para transpor obstáculos como avenidas, vales e rios. Essas obras estão sujeitas a várias ações externas, como cargas móveis de veículos, forças do vento, ação das águas de rios e marés, bem como variações de temperatura, retração e fluência do concreto.

Para garantir a segurança dessas estruturas, quando se verificam manifestações patológicas consideráveis ou quando ocorrem colisões sobre a estrutura, é essencial realizar uma inspeção completa dos elementos construtivos, incluindo infraestruturas (blocos e estacas), mesoestruturas (pilares, vigas e aparelhos de apoio) e superestruturas (lajes e vigas longarinas), de acordo com a norma ABNT NBR 9452:2019. Além disso, é necessário verificar o ambiente em que foram construídas e os diferentes níveis de agressividade a que estão expostas, bem como verificar em que níveis estão as manifestações que ocorrem na OAE.

Buscando satisfazer a segurança dos pedestres é necessário que uma passarela, ou seja, uma OAE, atenda aos parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade, conforme a norma ABNT/NBR 9452:2019. Os parâmetros estruturais dizem respeito à estabilidade e capacidade de carga da passarela, enquanto os funcionais estão relacionados à sua adequação geométrica para proporcionar segurança e conforto aos usuários. Já os parâmetros de durabilidade estão associados à vida útil da estrutura e envolvem a realização de ensaios destrutivos e não destrutivos.

O objeto de estudo deste trabalho é uma passarela construída no início da década de 1990 que possuía uma configuração que não permitia trânsito de veículos, e que após uma ampliação lateral no início dos anos 2000, passou sua finalidade para passagem de pedestres, ciclistas, carros de passeio e ambulância conforme imagens da Figura 1.

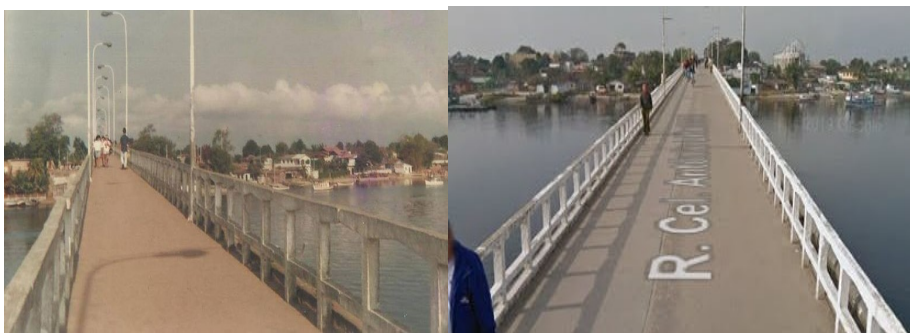


Figura 1– Imagem à esquerda do início da década de 1990 quando era somente passarela e imagem à direita após o acréscimo realizado nos anos 2000

2. Classificação da OAE

De acordo com a norma NBR 9452:2019, uma obra de arte especial abrange estruturas classificadas como ponte, pontilhão, viaduto ou passarela. A passarela é projetada exclusivamente para a travessia de pedestres e ciclistas, enquanto a ponte é destinada a transpor obstáculos, mantendo a continuidade de uma via, geralmente sobre um canal aquífero, como um rio ou mar.

O objeto de estudo desse trabalho foi inicialmente projetado como uma passarela nos anos 80, mas passou por intervenção nos anos 2000, sendo integrado à via para permitir a passagem de veículos de passeio em sua extensão máxima.

A malha rodoviária federal, implantada a partir da década de 1940, inclui diversas obras de concreto armado, que foram dimensionadas conforme os critérios da época. Com o tempo, algumas dessas estruturas foram substituídas, restauradas, reforçadas e alargadas, o que resultou em um perfil heterogêneo de passarelas e pontes de concreto armado.

O Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) em 2004 classifica diferentes tipos de obras de arte especial de acordo com a época de projeto, classe e características. São categorizadas as pontes projetadas até 1950, até 1950-1960, até 1950-1975, até 1950-1985 e as projetadas após 1985. As pontes estudadas após 1985, que são o foco do trabalho, foram construídas conforme as Normas Brasileiras NB-1/1978, NB-2/1987, NB-6/1982 e NBR 7188/1984 e possuem características como uma seção transversal com largura total de 12,8 metros, largura de pista de 12,0 metros, duas barreiras tipo New Jersey de 0,40 metros, cargas móveis de veículos de 45 toneladas força e cargas específicas de multidão. Além disso, utilizam o coeficiente de impacto de 1,4 - 0,007L.

O estudo visou compreender as diretrizes de dimensionamento utilizadas na época da construção da passarela, sugerindo que a norma NBR 7188/1984 foi o parâmetro adotado, devido à sua criação cerca de seis anos antes da concepção da estrutura, com uma carga estimada de 3 KN/m² para passeios de pedestres. A segurança estrutural da passarela será avaliada, classificando os elementos que a compõem de acordo com sua importância:

Elemento principal (P): Pode causar colapso parcial ou total da obra; Elemento secundário (S): Pode resultar em ruptura localizada; Elemento complementar (C): Não causa comprometimento estrutural, apenas funcional na OAE.

A norma NBR 9452/2019 detalha quais elementos se enquadram nas categorias principais, secundárias e complementares, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização dos elementos estruturais segundo a relevância no sistema estrutural

Elemento		Sistema Estrutural				
		Duas Vigas	Grelha	Caixão	Laje	Galeria
Superestrutura	Longarina	P	P	-	-	-
	Transversina	S	S	S	S	S
	Laje	S	S	P	P	P
Mesoestrutura	Travessas	P	P	P	P	-
	Pilares	P	P	P	P	-
	Aparelho de Apoio	P	P	P	P	-
Encontros	Cortina	S	S	S	S	-
	Laje de transição	S	S	S	S	S
	Muros de ala	S	S	S	S	S
Infraestrutura	Blocos	P	P	P	P	P
	Sapatas	P	P	P	P	P
	Estacas, tubulões	P	P	P	P	P
Complementares	Barreira rígida	C	C	C	C	C
	Guarda-corpo	C	C	C	C	C

As Obras de Arte Especiais (OAE) devem ser classificadas de acordo com os parâmetros estruturais, funcionais e de durabilidade, seguindo as Normas Brasileiras aplicáveis em cada caso. Os parâmetros relacionados à segurança estrutural referem-se à estabilidade e capacidade portante da obra, considerando os estados limites último e de utilização, conforme a ABNT NBR 6118:2014. Esses parâmetros são particularmente importantes quando a estrutura apresenta sinais visíveis de anomalias.

Para realizar a classificação, é necessário atribuir notas de 1 a 5, avaliando a gravidade das anomalias encontradas. As situações são classificadas com base nos conceitos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Conceitos e notas para classificação da estrutura.

Excelente	Boa	Regular	Ruim	Crítica
5	4	3	2	1

A norma NBR 9452/2019 indica a classificação da estrutura de acordo com os parâmetros previamente mencionados e as circunstâncias em que cada nota deverá ser concedida. Nos parâmetros estruturais, por exemplo, um aparelho de apoio segundo a norma, terá uma nota de classificação 2 se estiver comprometido gerando vínculos imprevistos com cunhas de ruptura e recalques diferenciais com trincas ou fissuras. Os parâmetros funcionais classificarão com nota 5 uma pista de rolamento com pequenas irregularidades, sem gerar desconforto ao usuário. Já quanto ao parâmetro de durabilidade uma drenagem obtém uma nota de classificação 3 se seus buzinotes estiverem obstruídos.

2.1. Ensaios não destrutivos (END)

Os ensaios não destrutivos (END) são uma estratégia interessante para monitorar estruturas de concreto armado sem causar danos que exijam reparos posteriores. Isso é vantajoso do ponto de vista econômico, evitando a criação de áreas vulneráveis à deterioração e redução da vida útil da estrutura. Os objetivos dos END podem ser estimar a resistência do concreto para análise da capacidade estrutural ou investigar possíveis falhas internas no concreto endurecido.

Os END podem ser classificados em duas categorias: ensaios relacionados às propriedades do concreto, como resistência e durabilidade; e ensaios que visam determinar características das armaduras, áreas mal adensadas, vazios, fissuras e teor de umidade do concreto.

Essa abordagem oferece vantagens significativas, como rapidez de execução, baixo custo, ausência de danos à estrutura, disponibilidade imediata dos resultados e a possibilidade de realizar múltiplos ensaios para uma investigação mais completa. Além disso, os END permitem o monitoramento contínuo da estrutura ao longo do tempo.

2.1.1. Pacometria

A pacometria é um método de ensaio que utiliza o princípio da indução magnética para fornecer informações importantes sobre um elemento estrutural de concreto. Ele é usado para diversas finalidades, como localizar armaduras, determinar o cobrimento do concreto, informar o diâmetro da seção das barras entre outras aplicações. A técnica da pacometria utiliza campos eletromagnéticos para identificar as barras de aço no concreto, utilizando

impulsos eletromagnéticos induzidos por bobinas carregadas com pulsos de corrente. A Figura 3 ilustra esse campo magnético gerado e o próprio equipamento.

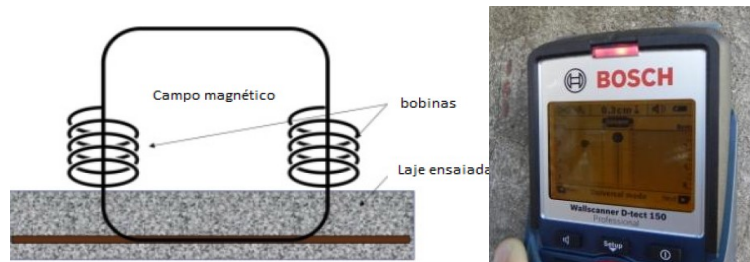


Figura 3 - Funcionamento do Pacômetro através de campo magnético à esquerda; à direita um exemplo de aplicação do ensaio de pacometria

O equipamento é arrastado sobre a estrutura de concreto, e quando a armadura é encontrada, o círculo do visor centraliza-se e uma luz vermelha indica sua localização. O valor estimado do cobrimento aparece no canto inferior do visor, como ainda ilustrado na Figura 3 à direita. O ensaio de pacometria é realizado com facilidade, recomendando-se medidas precisas através da repetição do arrasto em diferentes alturas do elemento em estudo, observando a linearidade da resposta.

2.1.2. Esclerometria

Os métodos não destrutivos de dureza de superfície investigam a resistência do concreto. Nesse ensaio, uma haste de reflexão, conhecido como esclerômetro de Schmidt, é utilizado para medir o índice esclerométrico ou número de rebote que está relacionado às propriedades de resistência do concreto, como compressão e flexão.

O ensaio de esclerometria baseia-se na propagação de ondas de compressão ao impactar a superfície do concreto com o martelo. O número de recuo é correlacionado empiricamente com a resistência à compressão. O ensaio é simples de ser realizado, exigindo menos habilidades mecânicas, e pode ser conduzido em diferentes ângulos. Antes do ensaio, é importante inspecionar visualmente a superfície do concreto para garantir que seja lisa ou tenha poucas rugosidades adequadas para o ensaio. A Figura 4 apresenta um desenho esquemático do esclerômetro de Schmidt.

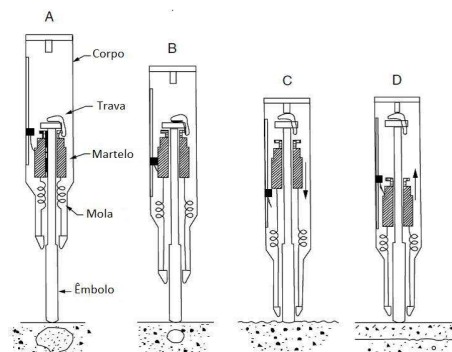


Figura 4 - Esquema do Esclerômetro de Schmidt

Correlações empíricas são fornecidas pelo fabricante do esclerômetro de Schmidt para correlacionar o número de recuo com as propriedades de resistência do concreto. Recomenda-se realizar um procedimento de correlação específico, onde testemunhos de concreto são preparados e testados tanto pelo ensaio de esclerometria quanto pelo ensaio de resistência à compressão. Os resultados são analisados através de um modelo de

regressão simples para obter uma correlação empírica. O ensaio de esclerometria é um método simples, fácil e econômico para estimar as propriedades de resistência do concreto. No entanto, os resultados podem ser afetados por vários fatores, como uniformidade da superfície, propriedades geométricas da seção, idade do concreto, condições de umidade, tipo de agregado graúdo, tipo de cimento e tipo de moldagem. Por essa razão, a NBR 7584 (ABNT, 2012) recomenda que o ensaio de esclerometria seja utilizado como um método adicional ou complementar.

2.1.3. Ultrassonografia

O método do ultrassom envolve a propagação de ondas ultrassônicas em sólidos, medindo o tempo para que essas ondas se propaguem entre um ponto de envio e outro de recebimento. Essa técnica não destrutiva e não invasiva é utilizada para caracterizar a composição, estrutura, propriedades, densidade e geometria de um material, bem como para detectar e descrever falhas e danos em materiais. Os transdutores emissores e receptores são utilizados para enviar e receber as ondas ultrassônicas, permitindo a determinação da velocidade das ondas, o que fornece informações detalhadas sobre o componente sob investigação. A Figura 5 apresenta um exemplo de equipamento utilizado para esse fim.



Figura 5 - Exemplo de equipamento utilizado no ensaio de ultrassom

Este ensaio é normatizado internacionalmente pela ASTM C 597 e no Brasil pela NBR 8802:2019. O ensaio de ultrassom requer preparações básicas, como medição precisa das distâncias entre os transdutores e acoplamento acústico adequado. A presença de armaduras na estrutura afeta as medições. A velocidade de propagação é determinada pela equação $V = L/t$, onde V é a velocidade, L é a distância entre os transdutores e t é o tempo decorrido desde a emissão até a recepção da onda. A qualidade e homogeneidade do concreto podem ser avaliadas a partir da velocidade de propagação para obter resultados confiáveis, o ensaio deve ser realizado em concretos semelhantes. Os resultados do ensaio são avaliados de acordo com os parâmetros da Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação da qualidade do concreto conforme a velocidade do pulso ultrassônico

Qualidade do Concreto	Velocidade de Propagação m/s
Excelente	> 4.500
Bom	3.600 a 4.500
Aceitável	3.000 a 3.600
Má	2.100 a 3.000
Muito má	< 2.100

2.1.4. Resistividade elétrica

O ensaio de resistividade do concreto é importante para avaliar a durabilidade da estrutura, pois concretos com alta resistividade elétrica são menos suscetíveis à corrosão das armaduras. A camada apassivadora do aço é crucial para evitar a corrosão, e uma vez que essa camada é removida, a resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio passam a controlar a taxa de corrosão das armaduras. O ensaio consiste em medir a resistividade do concreto e utilizar esses valores para avaliar o potencial de corrosão. A Figura 6 mostra um exemplo de aplicação do teste utilizando o equipamento RESIPOD.



Figura 6 - Exemplo de estrutura submetida a ensaio para medir a resistividade elétrica

Existem duas formas de determinar a resistividade elétrica do concreto: o método de quatro eletrodos (método de Wenner) e o método dos três eletrodos. O método Wenner é descrito na norma ASTM G57. Para avaliar os resultados do ensaio, é utilizada a Tabela 4, proposta pelo CEB 192, onde resistividades acima de 200 Ohm.m indicam um risco desprezível de corrosão, enquanto abaixo de 50 Ohm.m indicam um risco muito alto de corrosão.

Tabela 4 - Critério para avaliação do resultado do ensaio de resistividade

Resistividade elétrica (Ohm.m)	Risco de corrosão
> 200	desprezível
100 a 200	baixa
50 a 100	alta
< 50	muito alta

2.2. Ensaio destrutivos ou semi-destrutivos

Ensaio destrutivos são conduzidos em amostras extraídas diretamente da obra e causam danos, geralmente pequenos, à estrutura e exigindo reparos posteriores. Esses ensaios complementam as informações obtidas por ensaios não destrutivos, proporcionando resultados quantitativos diretos. Alguns tipos de ensaios destrutivos incluem testes de envelhecimento, análises mineralógicas, medições das propriedades mecânicas e ensaios de absorção de água, entre outros.

2.2.1 Profundidade de carbonatação

A carbonatação é um fenômeno físico-químico que ocorre quando o dióxido de carbono (CO₂) reage com os compostos do cimento, reduzindo a alcalinidade do concreto. Esse processo acontece naturalmente, penetrando pelos poros e avançando progressivamente para o interior da estrutura, reduzindo o pH do concreto. A carbonatação é a principal causa de corrosão da armadura e pode levar à deterioração precoce do concreto. A reação principal que rege este processo é apresentada na Equação 1. Neste processo, o pH do concreto é reduzido de aproximadamente 12,5 para um valor inferior a 9.



A Figura 7 traz uma representação esquemática da penetração do CO₂ por difusão que gera a carbonatação.

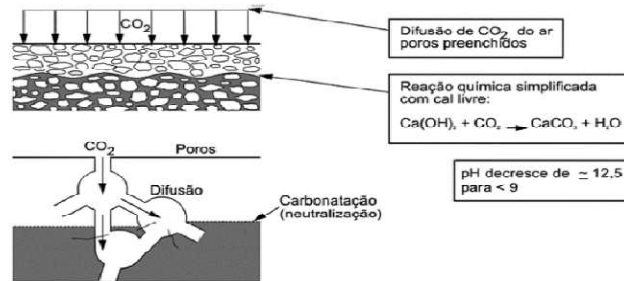


Figura 7 - Representação do processo de carbonatação

A profundidade de carbonatação é medida através de um ensaio que utiliza indicadores químicos, como a fenolftaleína, para observar as cores resultantes na estrutura ensaiada. A coloração púrpura indica um pH maior que 9,5, enquanto a ausência de cor indica um pH menor que 9. Além da fenolftaleína, outros indicadores químicos como timolftaleína, amarela de alizarina R e Naphtolgreen B também podem ser usados no ensaio de carbonatação. Esse ensaio é recomendado pela RILEM CPC 18 (1988) e ajuda a estimar a profundidade de carbonatação do concreto. A Figura 8 mostra um exemplo de realização do ensaio.

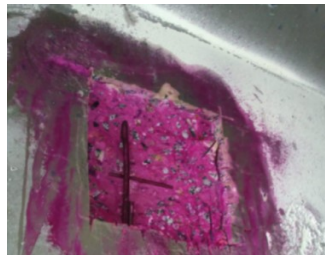


Figura 8- Estrutura submetida a aspersão de fenolftaleína

2.2.2 Potencial de corrosão

O ensaio de potencial de corrosão é um método não destrutivo amplamente utilizado para prever a probabilidade de corrosão das armaduras em concreto armado. Baseia-se na medição da diferença de potencial entre as armaduras e uma meia célula de cobre em uma solução de sulfato de cobre. Essa técnica permite o mapeamento do potencial de corrosão, avaliando a probabilidade de corrosão das armaduras dentro do concreto. A medição é feita com um voltímetro de alta impedância conectado à armadura e ao eletrodo padrão na superfície de concreto externa. A medida da diferença de potencial é feita entre armaduras dentro do concreto e um eletrodo padrão que consiste de uma meia célula, uma vareta de cobre imersa em uma solução saturada de sulfato de cobre Cu/CuSO₄, que mantém constante uma diferença de potencial conhecido. Quando colocado em contato com a superfície de concreto externa da camada de cobertura das armaduras, o eletrodo padrão, é feita a medida de diferença de potencial utilizando-se um voltímetro de alta impedância. A conexão elétrica é obtida através de um cabo elétrico ligado à armadura e ao voltímetro, e a ligação iônica é obtida entre o eletrodo padrão, conectado com a camada de concreto de recobrimento das armaduras, permitindo assim a leitura da diferença de potencial, conforme apresentado na Figura 9.

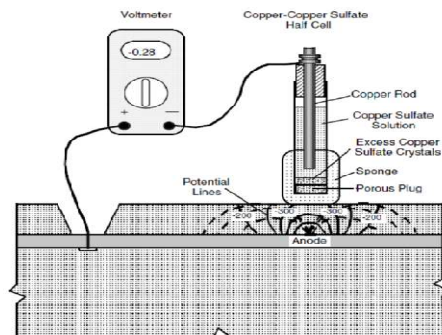


Figura 9 - Esquemático de ligação dos equipamentos do ensaio de potencial de corrosão.

A ASTM C876-91 estabelece parâmetros de probabilidade para avaliar o potencial de corrosão em relação ao eletrodo de sulfato de cobre (CSE), fornecendo diretrizes para determinar a probabilidade de corrosão com base nos valores medidos.

2.2.3 Extração de testemunhos e resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão é uma avaliação importante da capacidade de suporte do concreto sem romper. A resistência é considerada uma propriedade fundamental e amplamente utilizada para o controle de qualidade do concreto. Os ensaios podem ser destrutivos ou não destrutivos, sendo o ensaio de extração de testemunhos o mais confiável e preciso para determinar a resistência real do concreto in situ. No entanto, é necessário converter os resultados de testemunhos extraídos em valores equivalentes a corpos de prova moldados para fins de cálculo estrutural. Vários fatores, como diâmetro do testemunho, qualidade da execução da estrutura e condições de cura, podem influenciar os resultados do ensaio. A norma NBR 7680-1:2015 fornece diretrizes para o ensaio de resistência à compressão de testemunhos, enquanto a ABNT: NBR 5739:2018 aborda as considerações do ensaio de corpos de prova cilíndricos.

2.2.4 Teor de cloretos e sulfatos

Para correlacionar parâmetros é conveniente determinar os cloretos totais, já que parte dos cloretos combinados pode vir a ficar disponível para reações deletérias devido a fenômenos como carbonatação do concreto ou elevação da temperatura, não é escopo deste trabalho a determinação de cloretos totais. Dessa forma, realizou-se a determinação de cloretos livres, pois são os que efetivamente causam corrosão nas armaduras. O procedimento adotado é baseado na norma NBR 14832:2022. A concentração de cloretos é expressa em relação à massa de cimento. O teor crítico aceito na literatura é geralmente de 0,4% em relação à massa de cimento ou 0,05% a 0,1% em relação à massa de concreto.

Outras normas, como a NBR 7211:2022 e a NBR 12655:2022, também apresentam critérios orientativos para a especificação de sulfatos em água de amassamento do concreto e para o concreto exposto a ambientes contendo esse íon. Em ambientes severos, é obrigatória a especificação de cimento resistente a sulfatos. A mesma NBR 12655:2022 também apresenta os limites para sulfatos para concretos expostos a soluções contendo esse íon.

3 A QUESTÃO DA AGRESSIVIDADE DO MEIO AMBIENTE

A norma NBR 6118:2014 classifica a agressividade do meio ambiente em relação às estruturas de concreto, considerando ações físicas e químicas. A proteção dos elementos de concreto armado em projetos estruturais deve levar em conta a classificação ambiental de acordo com as condições de exposição da estrutura. A passarela em questão, que possui concreto armado em toda a sua constituição estrutural, está classificada em uma região de variação de maré. Nessa região, podem ocorrer manifestações patológicas nas estacas devido a diversos fatores, como a ação mecânica de microfissuração; a ação química de cloretos, sulfatos e nitratos; a variação volumétrica devido à temperatura e a formação de colônias de fauna marinhas em locais de recuperação realizados anteriormente e observadas em inspeções aquáticas.

Assim, considerando a passarela ter em sua constituição estrutural o Concreto Armado desde sua infraestrutura até a sua superestrutura, a OAE está habilitada para classificação ambiental conforme NBR 6118:2014 (Tabela 5).

Tabela 5—Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a,b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a,b}	
IV	Muito Forte	Industrial ^{a,c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura)

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estruturas protegidas de chuvas em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Foi observado ao lado da infraestrutura da passarela, a aproximadamente 25 m, a presença de uma elevatória de esgoto conforme as imagens da Figura 10.



Figura 10—A imagem à esquerda demonstra a elevatória de esgoto com a passarela ao fundo e a imagem à direita demonstra uma vista de cima da passarela com a saída de esgoto a aprox. 25 m da infraestrutura

Durante a inspeção, foram coletadas amostras de água escura que sai da manilha, e os resultados do ensaio revelaram altos níveis de cloretos (1.230,0 mg/l) e sulfatos (1.004,0 mg/l), além de alta dureza de cálcio, magnésio e total (5.018,5 mg/l de CaCO₃). De acordo com a Tabela 15 da norma NBR 6118:2014 e considerando a presença da estrutura em área de respingos de maré e a alta agressividade da água da elevatória de esgoto, a Classe de Agressividade em que a estrutura se enquadra é a Nível IV - Muito Forte, com risco elevado de deterioração da estrutura.

4 Metodologia adotada

O estudo de caso investigou fenômenos reais por meio de uma inspeção em uma obra de arte especial (OAE) na região sul do país. A inspeção seguiu procedimentos técnicos específicos para coletar dados e identificar manifestações patológicas no concreto causadas por diversos processos de deterioração. Ensaios destrutivos e não destrutivos foram realizados e seus resultados foram interpretados e correlacionados para compreender o estado da estrutura. Não há normas brasileiras que determinem um quantitativo mínimo de ensaios, assim, optou-se por uma campanha de ensaios para avaliar a estrutura sem causar danos significativos.

4.1 Logística para realização de ensaios

Foi necessário um planejamento que considerasse o movimento das marés para ter acesso aos elementos estruturais e realizar os ensaios. Quando a maré estava alta, os elementos da infraestrutura ficavam submersos, impedindo os ensaios, mas permitindo o acesso aos blocos da mesoestrutura. Para contornar essa situação, foram utilizados dois barcos, um pequeno chamado de "casquinha" para realizar os ensaios nas estacas e outro maior para subir nos blocos. As imagens da Figura 11 mostram a realização dos ensaios no "casquinha" durante as variações de maré.

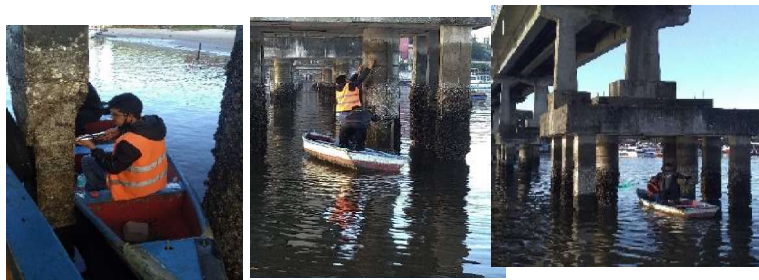


Figura 11 - Ensaios de esclerometria e pacometria em estacas da infraestrutura quando a maré está baixa

Essa variação de maré trouxe alto grau de dificuldade e planejamento arrojado para realização dos ensaios devido aos períodos de subida e descida rápidas sendo necessário em todo o tempo a verificação em um mapa de maré como e quando seriam essas subidas e descidas.

4.2 Nomenclatura

Para realizar os ensaios, foi necessário cadastrar os diversos elementos estruturais, uma vez que não havia acesso ao projeto. Um ponto de referência foi definido para estabelecer a nomenclatura das estruturas. Os elementos foram nomeados de acordo com a sua

localização e características, utilizando letras do alfabeto em sentido horário. Por exemplo, "B1" representa o Bloco 1, "P1" o Pilar 1, e assim por diante. Cada conjunto de elementos possui três blocos: um maior, que é o bloco geral de reforço, um bloco intermediário, original da construção da passarela, e o bloco do pilar. Os pilares da expansão à esquerda foram nomeados como "Px.1". Estacas retangulares são representadas como "ER's", estacas circulares como "EC's" e as sextavadas como "Esex's". A Figura 12 ilustra essa nomenclatura.

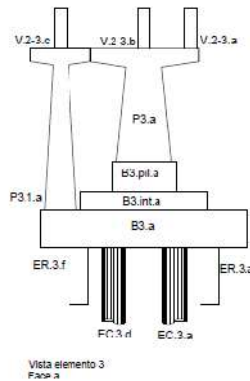


Figura 12 - Croqui de infraestrutura e mesoestruturas do Elemento 3

A Obra de Arte Especial (OAE) é composta por 13 elementos equidistantes, sendo eles: 10 estacas; 1 bloco principal; 1 bloco intermediário; 1 bloco sob o pilar principal; 1 bloco sob o pilar secundário; 1 pilar.

A Figura 13 mostra a planta genérica dos elementos em sua infraestrutura e mesoestrutura, com a nomenclatura que será amplamente utilizada no trabalho.

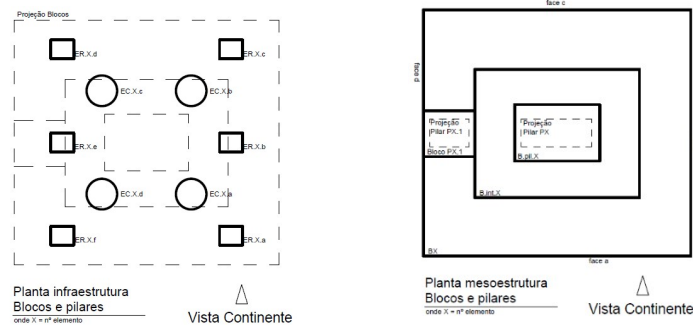


Figura 13 - Croquis de infraestrutura e mesoestrutura do Elemento 3

A disposição dos elementos estruturais da mesoestrutura dos elementos 1, 2, 3 e 13 é significativamente diferente do apresentado acima, mas não é relevante para o objetivo deste trabalho. A superestrutura é composta por 3 vigas longarinas sobre os pilares, além de um tabuleiro de aproximadamente 240m. A Figura 14 mostra a vista frontal (face a) e lateral (face d), com a disposição das vigas longarinas.

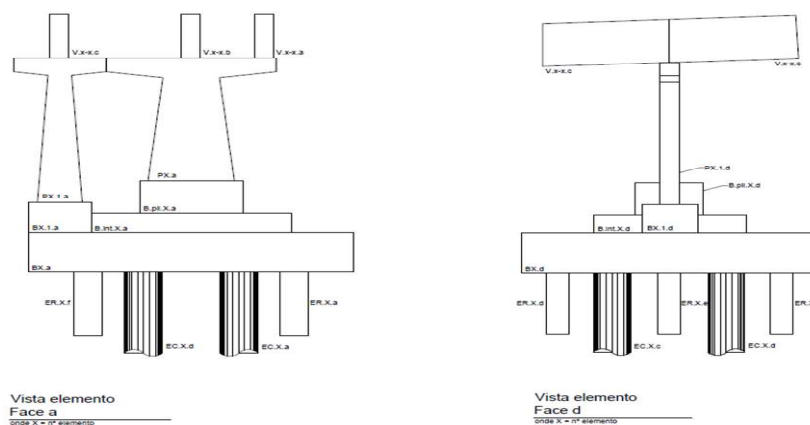


Figura 14- Vistas frontal e lateral dos elementos

Na Figura 15 percebe-se uma visão geral da disposição dos elementos estruturais (pilares) daOAE onde a esquerda encontra-se o continente (elemento 1) e à direita a ilha.

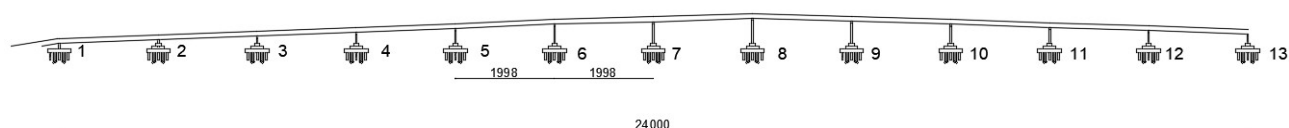


Figura 15 - Disposição geral dos elementos estruturais (pilares)

5 Ensaios

Durante um período de 30 dias, foram realizados ensaios destrutivos e não destrutivos, com suas localizações indicadas em croquis para obter uma interpretação precisa dos resultados. A Tabela 6 resume as quantidades de ensaios executados.

Tabela 6 - Resumo dos ensaios.

ENSAIOS	ESTACAS	BLOCOS	PILARES	VIGAS	TABULEIRO	TOTAL
Pacometria	126	13	26	36	12	213
Esclerometria	05	08	02	-	-	15
Ultrassonografia	-	12	-	-	-	12
Resistividade elétrica	31	18	16	05	05	75
Profundidade de carbonatação	21	35	30	21	16	123
Potencial de corrosão	02	20	21	02	05	50
Resistência a compressão axial	-	13	13	16	14	56
Teor de cloretos e sulfatos	96	40	32	08	-	176

5.1 Pacometria

Os ensaios de pacometria foram conduzidos na passarela para identificar as armaduras e o cobrimento de concreto em todos os elementos estruturais armados e protendidos, incluindo estacas, blocos, pilares, vigas e lajes. Ao todo, foram avaliadas 126 estacas, 13 blocos, 26 pilares, 36 vigas e 12 vãos de lajes. Durante o ensaio, as barras foram marcadas para guiar a execução de outros ensaios que exigiram evitar as armaduras, além de fornecer informações detalhadas dos elementos. Algumas imagens dos resultados da pacometria são mostradas na Figura 16.



Figura 16- Marcação da ferragem do bloco no continente através da pacometria

5.2 Esclerometria

Os ensaios de esclerometria foram executados nos elementos da passarela sendo 5 estacas, 8 blocos e 2 pilares totalizando 15. Desviando das ferragens foi feita então marcação com giz de 16 pontos equidistantes conforme NBR 7584:2012. Na Figura 17 é mostrado ensaio sendo executado em uma das estacas da infraestrutura quando a maré estava baixa.



Figura 17 - Realização de ensaio no “casquinha” em maré baixa

5.3 Ultrassonografia

Foram realizados ensaios de ultrassom nos 13 blocos principais da mesoestrutura da passarela. O ensaio visou identificar possíveis ninhos ou vazios nas peças estruturais. Para a realização do ensaio, foi utilizado gel selante como material acoplante entre o transdutor e a superfície do pilar, seguindo as orientações da NBR 8802:2019. O método de transmissão empregado foi o semi direto, e foram realizadas seis medidas por dupla face de cada bloco conforme figura 18. A execução do ensaio de ultrassom ocorreu antes do ensaio de esclerometria para evitar interferências nos resultados. Vale ressaltar que o trânsito de outras embarcações aumentou a dificuldade da realização dos ensaios, podendo acidentalmente levar o equipamento ao mar.



Figura 18- Realização de ultrassom semidireto em bloco

5.4 Resistividade elétrica

Foram realizados ensaios de resistividade elétrica em cerca de 35% da infraestrutura e mesoestrutura da OAE, totalizando 75 elementos. Para realizar os ensaios nos locais com excesso de cracas, foi necessário remover essas incrustações com uma escova de aço antes de fazer a leitura com o equipamento. A Figuras 19 mostra o processo de realização dos ensaios.



Figura 19- Ensaios de resistividade elétrica nas estruturas da OAE

5.5 Profundidade de carbonatação

Foram realizadas medições da profundidade de carbonatação do concreto em aproximadamente 30% das estacas e no mínimo 50% dos blocos, pilares, vigas e tabuleiro da OAE conforme pode-se observar nas imagens da Figura 20.



Figura 20 - Medição de profundidade de carbonatação

5.6 Potencial de corrosão

Foram feitas medições do potencial de corrosão do concreto em cerca de 30% dos elementos, totalizando 50 elementos. Para realizar o ensaio, foram feitas pequenas intervenções até encontrar as ferragens, como mostrado nas imagens da Figura 21.

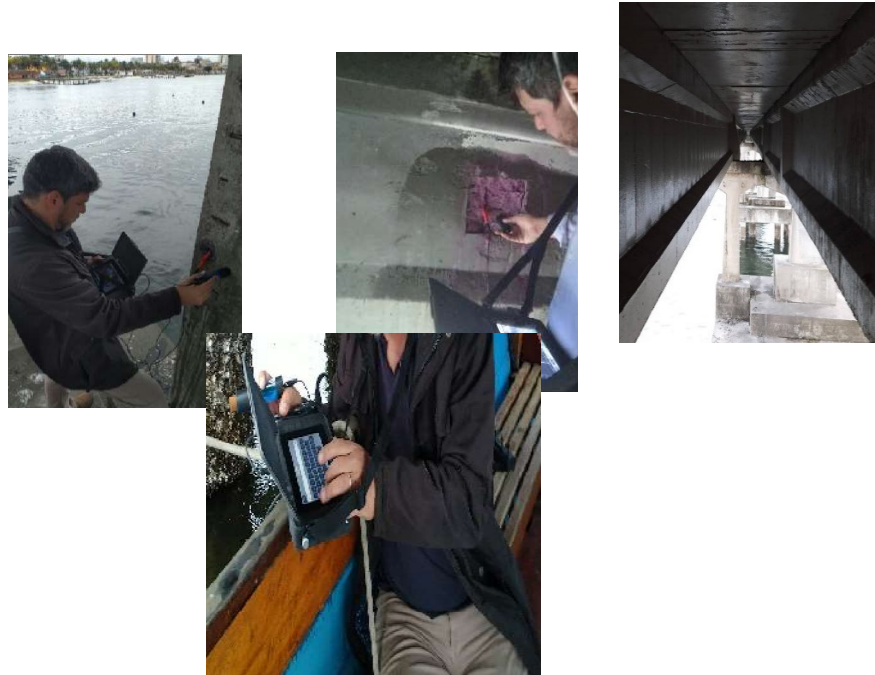


Figura 21 - Leitura de potencial de corrosão em estacas, pilares e vigas

5.7 Extração de corpos de prova e resistência à compressão axial

Foram realizados ensaios de resistência à compressão em 56 elementos estruturais, incluindo blocos, pilares, vigas e tabuleiro. Os testemunhos de concreto foram extraídos, preparados, ensaiados e analisados para obtenção dos resultados. A Figura 22 mostra a extração de um testemunho em um pilar utilizando uma perfuratriz.



Figura 22- Extração de corpo de prova para ensaio

5.8 Teor de cloretos e sulfatos

Foram realizadas análises de teores de cloretos e sulfatos em 44 pontos da OAE. Foram extraídas amostras em diferentes profundidades (de 5 a 20 mm) totalizando 174 amostras de cloretos e 124 de sulfatos. As amostras foram coletadas utilizando uma furadeira e, em seguida, foram analisadas em laboratório. A Figura 23 mostra o processo de extração das amostras.



Figura 23 - Extração de amostras para ensaio

6 Resultados dos ensaios

Conforme citado no item 4.1 Nomenclatura, os ensaios realizados nos conjuntos de elementos estruturais, 1 a 13, foram demonstrados em croqui. A Figura 24 traz os ensaios do conjunto de elementos nº 5 demonstrados em croqui. Apenas algumas variações ocorreram nos outros elementos então tomaremos para esse trabalho os croquis do elemento 5 assim como os resultados da pacometria como referência para os demais elementos. O elemento 5 é constituído por 3 blocos, sendo um principal (B5), um intermediário (B5.int) e um de apoio ao pilar principal (B5.pil), sobre os quais estão um pilar misular apoiado sobre tronco (P5) de onde se apoiam as vigas longarinas V5-6A, V5-6B, além de bloco (B5.1), estrutura de apoio a outro pilar secundário (P5.1), elemento de apoio da viga V5-6C e o tabuleiro T5-6.

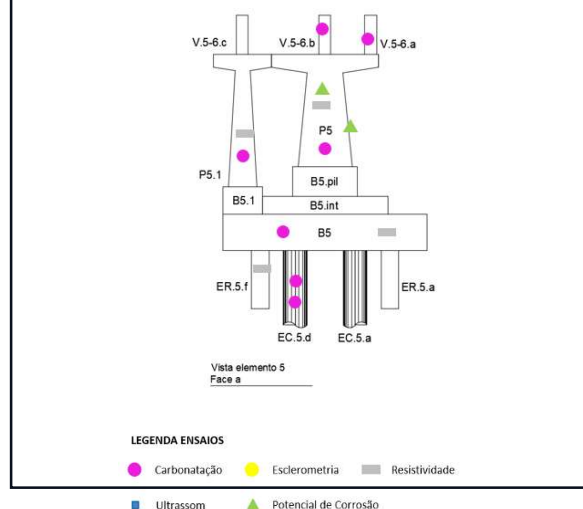


Figura 24 - Croqui dos ensaios vista frontal com legenda dos ensaios realizados

6.1 Pacometria

A técnica da pacometria foi utilizada para fazer leituras nos elementos estruturais, e os resultados foram apresentados em tabela conforme Tabela 7.

Tabela 7–Amostragem dos resultados da pacometria do Elemento 5.

Elemento.(face)	Largura (m)	Altura (m)	Nº Armaduras	Nº Armaduras	Ø horizontal (mm)	Ø vertical
B5.a e B5.c	5,20	0,95	30	6	10	12,5
B5.b e B5.d	4,80	0,95	24	6	10	12,5
B5.int.a e B5.int.c	3,20	0,45	-	3	10	-

B5.int.b e B5.int.d	2,50	0,45	-	3	10	-
B5.pil.a B5.pil.c	1,65	0,75	10	5	8	16
B5.pil.b e B5.pil.d	1,10	0,75	8	5	8	16
B5.1.a e B5.1.c	1,00	0,70	8	5	6,3	12

6.2 Esclerometria

O ensaio de esclerometria é um método não destrutivo que mede a dureza superficial do concreto, permitindo avaliar sua resistência à compressão e homogeneidade. Foram realizados ensaios em blocos, pilares e estacas, com os desvios padrão dos resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da pacometria do Elemento 5.

Elementos	Medições (Índice Esclerométrico)																Média
B1.c	41	47	41	25	40	45	41	37	45	44	50	40	43	41	44	42	41,6
B1.c1	45	45	43	46	45	47	43	42	40	44	45	41	42	38	36	45	42,9
B1.d	45	45	43	46	45	47	43	45	47	43	45	40	44	45	41	42	44,1
B2.a	54	57	47	56	54	51	48	54	43	54	54	54	53	56	54	52	52,6

6.3 Ultrassonografia

O ensaio de ultrassonografia de elementos de concreto armado permite avaliar a qualidade da estrutura em relação a possíveis falhas internas. A Tabela 9 mostra um exemplo de cada tipo de resultado obtido nos ensaios de ultrassonografia, dentre todos os resultados.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de ultrassonografia

Bloco-Face	Leituras semi-diretas (m/s) 6 pontos por faces laterais						Média	Qualidade do Concreto
B1.1 - c/d	4515	4306	4677	4454	2857	4718	4255	Bom
B.2 - a/b	4935	5854	5721	6090	4888	5371	5477	Excelente
B.3 - a/b	2851	2942	3120	3420	3285	3358	3163	Aceitável
B.3 - c/d	3401	2024	2387	1531	2331	2710	2397	Ruim
B.9 - c/d	1757	1949	1577	1789	2415	2481	1995	Muito Ruim

6.4 Resistividade elétrica

O ensaio de resistividade elétrica superficial do concreto armado tem como objetivo monitorar o desenvolvimento da corrosão das armaduras. A Tabela 10 mostra um exemplo de cada tipo de resultado obtido nos ensaios de resistividade elétrica superficial, dentre todos os resultados.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial.

Elementos	Leituras (Kohm.cm)						Média	Risco de Corrosão
1 B1.c	51,3	52,7	50,0	61,3	51,2	53,3	53,3	Baixo
2 B2.a	110,0	124,0	121,0	130,0	121,0	121,0	121,2	Insignificante
6 EC3.d	21,2	20,6	21,5	20,5	20,5	20,9	20,9	Moderado
20 EC4.a	6,1	5,2	6,8	7,0	6,4	6,3	6,3	Alto

6.5 Profundidade de carbonatação

O ensaio de determinação da profundidade de carbonatação permite identificar a localização da frente de carbonatação do concreto armado e, conseqüentemente, a área suscetível à despassivação das armaduras. A Tabela 11 apresenta resultados amostrais obtidos nos ensaios de determinação da profundidade de carbonatação.

Tabela 11 - Resultados de ensaios de profundidade de carbonatação

	Elemento	(mm)
1	B1.c	20
2	V1-2A	25
3	V1-2.B	24
4	T1-2	6
5	B1.c	0

6.6 Potencial de corrosão

O ensaio do potencial de corrosão é uma ferramenta auxiliar no monitoramento da corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado. A Tabela 12 apresenta resultados amostrais obtidos nos ensaios de potencial de corrosão.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de potencial de corrosão.

Elemento	Média	%	Leituras																
1	B1.c	-570,15	95%	-60	-628	-628	-606	-612	-609	-609	-609	-609	-613	-608	-610	-611			
12	B.int.4	-344,29	50%	-367	-356	-383	-388	-395	-402	-352	-343	-302	-281	-320	-320	-342	-323		
				-322	-358	-345	-328	-351	-332	-320									
32	P9.1.c	336,75	5%	318	327	331	335	339	346	306	323	327	336	342	346	349	352	354	357
50	B12.1	-293,21	50%	-275	-275	-284	-264	-263	-253	-269	-374	-243	-246	-265	-257	-277	-284	-364	-357

6.7 Extração e resistência à compressão axial

A Tabela 13 apresenta os resultados amostrais obtidos nos ensaios de resistência à compressão.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

CP	Tipologia	Elemento	(Mpa)
1	Bloco	B1.c	40,5
4	Tabuleiro	T1-2	54,3
10	Tabuleiro	T2-3	90,4
15	Bloco	B4.c	50,7
21	Bloco	Bpil.5	55
28	Viga	V6-7A	55,6

6.8 Teores de cloretos e sulfatos

A Tabela 14 apresenta os resultados amostrais dos ensaios de teores de cloretos, e a Tabela 15 apresenta os resultados amostrais dos teores de sulfatos. As legendas das nomenclaturas utilizadas são explicadas, indicando os elementos estruturais testados,

como blocos, vigas, pilares, estacas retangulares e circulares, além da indicação de regiões de variação de maré.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de teores de cloretos

ID	Limites aceitáveis		Concreto Protendido			<0,30%				
			Concreto Armado			<0,15%				
	Amostra	Prof. (mm)	Peso (g)	Volume de AgNO ₃ consumido			V - B	Cl mg/L	Peso (mg)	% de Cl no concreto
1				2	média					
0	BRANCO	-	-	49,46	49,40	49,43	-	-	-	-
1	B1C	5	0,1280	50,68	50,07	50,38	0,95	0,50	128,0	0,39%
6	V23A	10	0,2548	50,01	50,08	50,05	0,02	0,01	254,8	0,01%
12	P3C	20	0,2687	52,47	52,40	52,44	2,42	1,28	268,7	0,48%

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de teores de sulfatos

ID	Amostra	Prof (mm)	Peso (g)	Volume (mL)	SO ₄ (mg/L)	Peso (mg)	% de SO ₄ no concreto
1	B10 A	5	5,08	100	132,4	5080,0	2,6%
25	V9 10 A	5	4,79	100	183,0	4790,0	3,8%
26	V9 10 A	10	4,90	100	86,8	4900,0	1,8%
44	V12 13	20	4,90	100	41,6	4900	0,8%

7 Conclusão

Com base nos ensaios realizados na estrutura da passarela, conclui-se que a frente de carbonatação dos elementos não é significativa, com profundidade média de 3,5 cm. A resistência à compressão axial dos corpos de prova indicou média geral de 46 MPa, sendo este um valor acima do usualmente utilizado em obras desta natureza. Os ensaios de potencial de corrosão e resistividade elétrica mostraram resultados medianos. A inspeção visual e subaquática revelou elementos deteriorados, como exposição de armaduras corroídas. Com base nos resultados dos ensaios e inspeções, a passarela foi classificada como qualidade aceitável, do ponto de vista de durabilidade e funcionalidade. Todavia, para alteração de uso deverá ser feita avaliação de capacidade portante da estrutura e verificação da segurança estrutural.

8 Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9452:2019**: - Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento — Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR6122/2019**: Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR12655/2015** – Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR16230/2013** – Inspeção de estruturas de concreto – Qualificação e certificação de pessoal;

_____. **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

____ **NBR 6118:2014** - Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASTM **C-876/2015** – Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated reinforcing Steel in Concrete

ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. São Paulo: PINI, 1992.

BASHEER, L.; KROOP, J.; CLELAND, D. J. **Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review**. Construction and Building Materials, 2001.

BERTOLINI L.; ELSENER B.; PEDEFERRI P.; POLDER R.(6), **Corrosion Of Steel In Concrete**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim Wiley. 2004.

CÁNOVAS, M. F., Patologia e terapia do concreto armado, Ed. Pini, São Paulo, 1988.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. São Paulo: PINI, 1997.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

GJØRV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese (Livre docência). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELAL, J.; SOFI, M.; MENDIS, P. **Non-Destructive testing of concrete: A review of methods**. Electronic Journal of Structural Engineering, v. 14(1), p. 97-105, 2015.

MALHOTRA, V. M. **Surface hardness methods**. In MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. Handbook on nondestructive testing of concrete. 2. ed. CRC Press, p. 17-31, 2004.

MEHTA P. K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, Ibracon, 2008.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S. **The ultrasonic pulse velocity method**. In MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. Handbook on nondestructive testing of concrete. 2. ed. CRC Press, p. 189-207, 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888p.