



Análise Técnica e Econômica da Viabilidade de Opções de Reforço Estrutural em Passarelas com Placas de Concreto Armado.

Daniella Pinheiro de Moraes¹, Júlia dos Santos Oliva¹, Nayra Romão da Silva¹, Renan Guimarães Bittencourt¹, Lisiane Pereira Prado¹

¹Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá / UNESP / Engenharia Civil / daniella.morais@unesp.br / julia.oliva@unesp.br / nayra.romao@unesp.br / renan.g.bittencourt@unesp.br / lisiane.prado@unesp.br

Resumo

As estruturas de concreto armado estão sujeitas à deterioração devido às condições de serviço e ao ambiente em que estão inseridas. Essa degradação pode causar danos significativos e comprometer a qualidade e segurança ao longo de sua vida útil, gerando riscos e prejuízos aos usuários. Embora a substituição completa por novas estruturas seja a solução ideal em casos severos, essa alternativa frequentemente é inviável devido ao elevado custo envolvido. Diante dessa limitação, a realização de reparos ou reforços estruturais torna-se uma opção viável. A escolha adequada dos materiais para realizar esses procedimentos é uma das principais dificuldades enfrentadas. Este estudo consistiu na inspeção visual de uma passarela executada com placas de concreto armado localizada na cidade de Guaratinguetá-SP, com o objetivo de identificar manifestações patológicas e propor alternativas de recuperação estrutural para aumentar sua capacidade resistente. Foram sugeridas duas soluções principais: substituição das placas de concreto existentes por novas placas de maior resistência; reforço estrutural com chapas de aço aplicadas na face inferior e uma nova camada de concreto aplicada na face superior. Além disso, foram analisados os custos associados a cada solução proposta. Embora a substituição por novas placas apresente maior viabilidade econômica, sendo 12% mais em conta do que a solução com reforço estrutural com chapas de aço e camada de concreto, ainda assim a solução mais adequada é o reforço das placas existentes. Essa conclusão foi obtida devido às suas vantagens práticas, como a redução do desperdício de materiais, pois as placas de concreto serão aproveitadas e servirão como base para receber o reforço estrutural, além disso, há uma otimização dos recursos estruturais, pois elas não serão descartadas na natureza.

Palavras-chave

Reforço estrutural; Concreto Armado; Manifestações patológicas; Custo

Introdução

A durabilidade das pontes de concreto armado é um tema amplamente discutido no campo da engenharia civil, em virtude da sua importância na garantia da segurança estrutural e eficiência da mobilidade urbana. De acordo com a ABNT NBR 9452:2016 - Inspeção de Pontes, Viadutos e Passarelas de Concreto, a análise de durabilidade de estruturas de concreto armado considera fatores relacionados à exposição a condições ambientais adversas, a qualidade dos materiais utilizados e as características de projeto e execução da obra. Esse controle depende de fatores como a qualidade dos materiais, a exposição ambiental e o regime de manutenção ao longo do tempo (ARAÚJO E OLIVEIRA, 2019).

Consoante com Andrade e Andrade (2018), os principais fatores que afetam a durabilidade das pontes incluem problemas de carbonatação e corrosão das armaduras, especialmente em ambientes agressivos, que podem ser acelerados pela fissuração do concreto. Isso porque, esta permite a infiltração de água e outros agentes agressivos, levando ao comprometimento da integridade estrutural. Além disso, pode haver danos causados por sobrecargas, movimentações da estrutura e variações térmicas.

A análise da durabilidade dessas estruturas é feita com inspeções periódicas, monitoramento e ensaios de profundidade de carbonatação, potencial de corrosão e ensaios de resistência (ALMEIDA *et al.*, 2018). O monitoramento de longo prazo, com sensores e tecnologias não destrutivas, como termografia e ultrassom, também se destaca para detectar as alterações precoces no concreto (SILVA E CUNHA, 2019).

A ABNT NBR 9452: 2016 estabelece parâmetros para a realização dessas atividades e permite a categorização das condições da estrutura, o que facilita a determinação da ação de manutenção. As práticas de manutenção de pontes são divididas em preventivas e corretivas. A manutenção preventiva tem como objetivo prolongar a vida útil da estrutura por meio de intervenções regulares, como a aplicação de agentes de proteção superficial e selagem de fissuras (FERREIRA E PAIVA, 2019). Já a manutenção corretiva é aplicada quando os danos se tornam mais graves e envolvem procedimentos de reparo ou reforço estrutural (CAMPOS E MENDONÇA, 2021).

Quando há danos severos à estrutura, a recuperação desta pode incluir o reforço com fibras de carbono, a aplicação de concreto projetado ou o uso de argamassas de alta resistência. As fibras de carbono, em particular, são amplamente estudadas por ter a eficácia de recuperar a capacidade de carga e prolongar a vida útil das estruturas (FARIA *et al.*, 2020; GUIMARÃES e MELO, 2021).

É importante ressaltar que a literatura destaca a importância de um plano de manutenção contínua e a adoção de materiais mais duráveis e sustentáveis para garantir a longevidade das pontes (FERNANDES *et al.*, 2019). De acordo com as normas e os avanços científicos, é possível desenvolver estratégias para assegurar a durabilidade e segurança das pontes de concreto, o que demonstra a relevância do estudo das pontes de concreto já existentes.

O presente trabalho visa analisar as manifestações patológicas presentes na Ponte José Orestes Rangel Credidio 'Birete', localizada no município de Guaratinguetá-SP, propor soluções técnicas para sua recuperação estrutural, bem como avaliar os custos envolvidos nas intervenções sugeridas.

Materiais e Métodos

A Ponte José Orestes Rangel Credidio 'Birete' é composta por uma via de pavimento flexível e duas passarelas com 46 placas de concreto armado em cada passarela. Foram realizadas vistorias para identificar e fotografar as manifestações patológicas. Na maioria dos casos notou-se que as possíveis causas para as patologias identificadas são as condições ambientais atuantes e a falta de ações preventivas de manutenção. As Figuras 1 e 2 apresentam as manifestações encontradas.

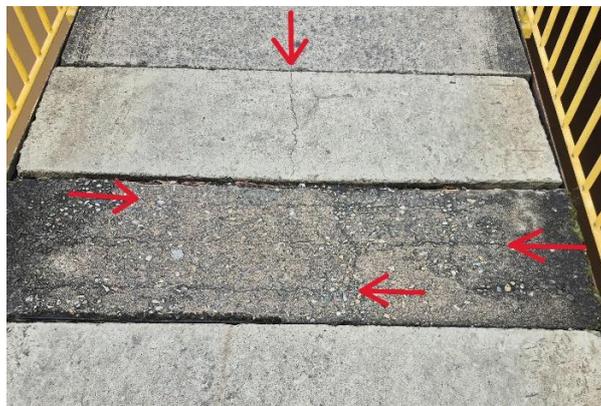


Figura 1 – Placas de concreto fissuradas.

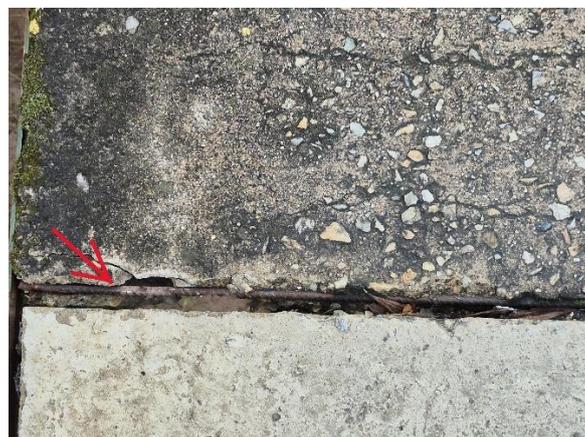


Figura 2 – Placa de concreto segregada com armadura exposta.

Após a análise das pontes, foram propostas duas soluções de recuperação da mesma, conforme apresentado no Fluxograma da Figura 3.

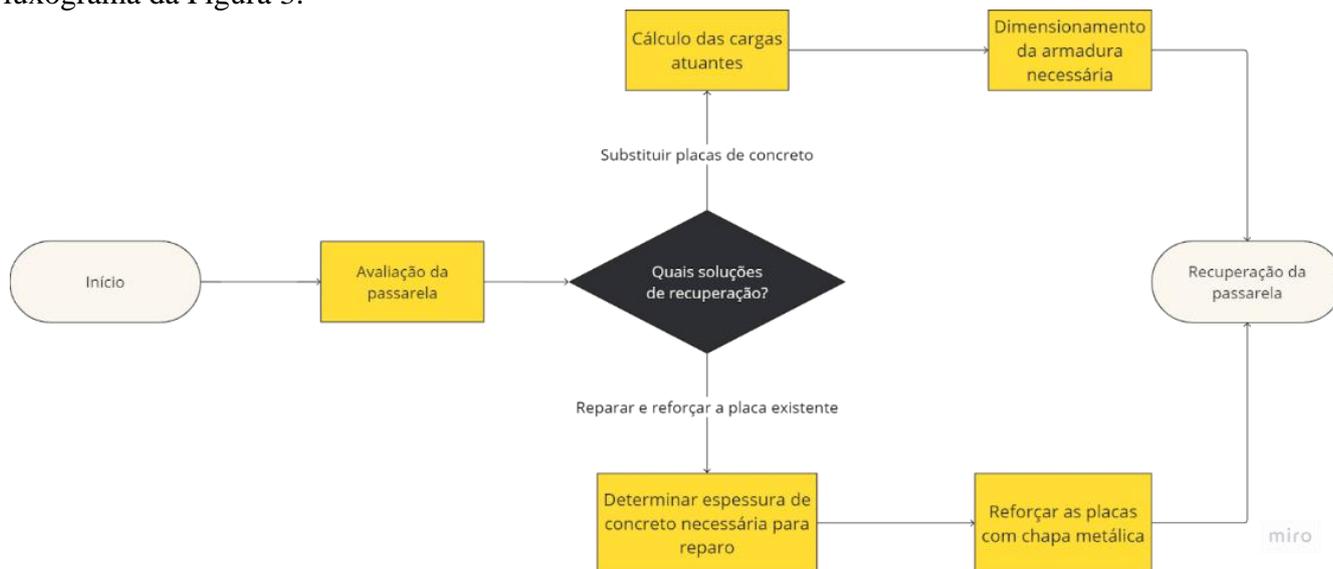


Figura 3 - Fluxograma de recuperação da ponte.

Solução 1: Substituição por novas placas de concreto armado

Cálculo da armadura

Para a proposta de substituição total das placas das duas passarelas analisadas, foi necessário o cálculo das armaduras longitudinais de cada placa, onde foi utilizado o concreto C40 em vista da maior durabilidade da estrutura, pois estas ficam expostas ao sol e à chuva.

A Tabela 1 apresenta as propriedades dos materiais utilizados para o cálculo das novas placas de concreto e a Figura 4 mostra a geometria das placas de concreto usadas no dimensionamento.

Tabela 1 - Propriedades dos materiais.

Área da seção	Resistência característica do concreto (f_{ck})	Resistência ao escoamento do aço (f_{yk})	Peso específico do concreto armado (ρ)
0,025m ²	40 MPa	500 MPa	25 kN/m ³

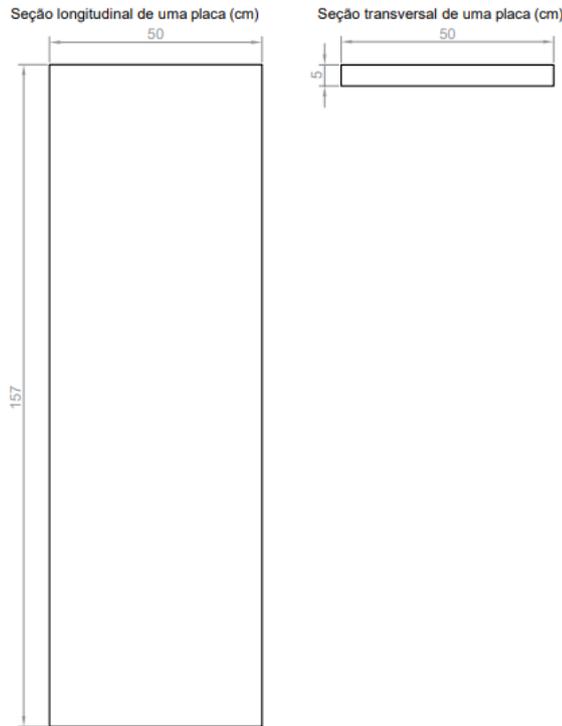


Figura 4 - Seção longitudinal e transversal da placa de concreto armado da passarela.

De acordo com o livro "Cálculo de Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado, Segundo a ABNT NBR 6118:2014", de Roberto Chust Carvalho e Jasson Rodrigues de Figueiredo Filho, o cálculo da armadura passiva longitudinal pode ser realizado utilizando as Fórmulas Adimensionais, para concretos de até 50 MPa (C50) e com seção transversal retangular. Assim, para determinar a quantidade de aço necessária para que uma placa de concreto da passarela resista aos esforços, foram realizados os seguintes cálculos:

1. Cargas Atuantes nas Placas de Concreto, ABNT NBR 6120: 2019

A- Peso próprio (ação permanente): 25,0 kN/m³

B- Escadas e passarelas com acesso público (variável): 3,0 kN/m²

C- Força horizontal de guarda-corpos de zona com fluxo de pessoas e barreiras perpendiculares à esse fluxo (ação permanente): 2,0 kN/m

2. Combinação das Ações Últimas Normais, ABNT NBR 8486: 2003

A equação utilizada para a encontrar o valor da carga atuante na estrutura foi a descrita pela ABNT NBR 8486: 2003 item 5.1.3.1

$$Fd = 1,35 \left[\left(25 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,025m^2 \right) + \left(2 \frac{kN}{m} \right) \right] + 1,5 \left(3 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,5 m \right) \quad (1)$$

$$Fd = 5,09 \frac{kN}{m}$$

3. Momento Atuante

$$Md = \frac{Fd \cdot l^2}{8} = \frac{5,09 \cdot 1,57^2}{8} = 1,57 kNm = 157 kN \cdot cm \quad (2)$$

4. Encontro do Domínio do Estado Limite Último

$$fcd = \frac{40}{1,4} MPa = 28,6 MPa = 2,86 \frac{kN}{cm^2} \quad (3)$$

$$d_{\min} = 2 \sqrt{\frac{Md}{bw \cdot f_{cd}}} = 2 \sqrt{\frac{157}{50 \cdot 2,86}} = 2,0956 = 2,10 \text{ cm} \quad (4)$$

$$KMD = \sqrt{\frac{Md}{bw \cdot d^2 \cdot f_{cd}}} = \sqrt{\frac{157}{50 \cdot 2,10^2 \cdot 2,86}} = 0,2489 = 0,250 \quad (5)$$

Portanto, para $KMD=0,250$, os demais valores foram encontrados, como indicado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores para cálculo da armadura longitudinal de seções retangulares até a classe C50.

KMD	KX	KZ	ϵ_c ‰	ϵ_s ‰	ϵ_{yd} ‰ do CA50
0,250	0,4479	0,8208	3,5	4,3	2,07

Portanto, a placa atingirá o estado limite último no Domínio 3, na qual a ruptura do concreto ocorre de forma simultânea com o escoamento da armadura, portando os dois materiais são aproveitados integralmente atingindo sua capacidade resistente máxima, apresentando uma situação ideal, pois sua ruína se dá com avisos, como grandes deformações.

5. Cálculo da quantidade de aço necessário

$$A_s = \frac{Md}{KZ \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{157}{0,8208 \cdot 2,10 \cdot \frac{50}{1,15}} = 2,095 = 2,10 \text{ cm}^2 \quad (6)$$

6. Quantidade de armaduras longitudinais necessárias em cada placa

Utilizando barras de aço de 8 mm de diâmetro, a quantidade necessária será de 5 barras de diâmetro de 8 mm (5/6 “).

$$Quantidade = \frac{A_s \text{ necessário}}{A_s \text{ de cada barra}} = \frac{2,10}{0,5} = 4,2 = 5 \text{ barras de 8 mm cada} \quad (7)$$

Verificação da Necessidade de Estribos

1. Verificação ao cisalhamento

$$Solicitante \leq Resistente \rightarrow V_{sd} \leq V_{rd} \quad (8)$$

$$F_{d,l} \leq 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot d \cdot bw$$

$$7,99 \text{ kN} \leq 68 \text{ kN}$$

2. Cálculo da armadura transversal

$$V_{sw} = V_{sd} - V_c \rightarrow V_{sw} = V_{sd} - (0,6 \cdot f_{ct} \cdot bw \cdot d) \quad (9)$$

$$V_{sw} = 7,99 - 0,03 = 7,96 \text{ kN}$$

$$s = \frac{2 \cdot A_{sw} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yd}}{V_{sw}} = \frac{2 \cdot 2,10 \cdot 0,9 \cdot 0,05 \cdot 43,48}{7,96} = 1,03 \quad (10)$$

$$Quantidade \text{ de estribos} = \frac{1,57}{1,03} = 1,52 = 2 \text{ estribos} \quad (11)$$

Os dois estribos serão fixados a uma distância de 45 cm de cada extremidade, resultando em um vão central de 67 cm, que está dentro do limite exigido e, portanto, aprovado. A Figura 5 demonstra a disposição das armaduras e estribos nas novas placas de concreto.

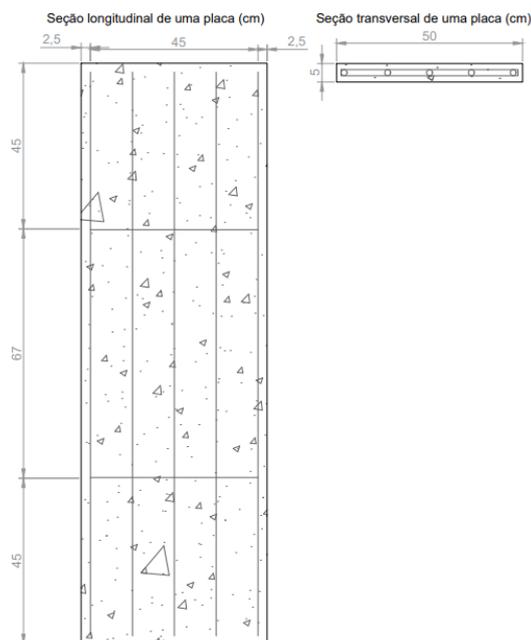


Figura 5 - Seção longitudinal e transversal de uma placa com armaduras da passarela.

Solução 2: Reparo e Reforço da Placa Existente

1. Espessura Mínima para o Reparo

Ao fazer a análise da altura útil existente (d) na placa e a altura necessária encontrada a partir dos cálculos (d_{\min}), foi constatado que será necessário o acréscimo de 2,5 cm de camada de concreto em cada placa da passarela.

$$d = h - 5 = 5 - 5 = 0 \text{ cm} \quad (12)$$

$$d_{\min} = 2 \sqrt{\frac{Md}{bw \cdot fcd}} = 2 \sqrt{\frac{157}{50 \cdot 2,86}} = 2,09 \text{ cm} \quad (13)$$

$$d = 2,09 - 0 = 2,09 = 2,50 \text{ cm} \quad (14)$$

2. Cobrimento Nominal Necessário

Entre os reparos necessários para a recuperação da ponte, é indispensável a reconstituição da espessura da camada de concreto responsável pela proteção da armadura, a qual protege as barras da corrosão.

As condições de cobrimento e seus valores nominais são recomendados pela ABNT NBR 6118: 2023, estando diretamente relacionados ao nível de agressividade do ambiente.

Dessa forma, evidencia-se a necessidade de um cobrimento nominal de 25 mm para as placas de concreto da passarela, o qual se mostra de acordo.

Será aplicada uma camada de concreto com espessura de 2,50 cm na parte superior da estrutura, com comprimento de 1,5m, para que se cumpra com a altura mínima encontrada e faça reparo das fissuras. A cada três placas, será realizada a instalação de uma junta de dilatação com mastique de poliuretano para permitir a movimentação das placas e evitar o surgimento de fissuras na superfície do concreto. Antes da aplicação dessa camada, é necessário realizar a limpeza da superfície existente e aplicar um adesivo estrutural para garantir a adequada adesão do novo concreto.

3. Reforço com Chapas Metálicas

As análises visuais realizadas nas placas indicaram a corrosão das armaduras, resultando em uma redução da capacidade resistente. Assim, para restaurar essa capacidade sem alterar significativamente a geometria das placas, adotou-se como solução de reforço estrutural a adição de chapas metálicas na face inferior, região sujeita aos maiores esforços de flexão.

Para o cálculo da geometria da chapa metálicas necessária para o reforço estrutural foi considerado aço C25 zincado com seção transversal de 0,15 cm x 10 cm ao longo do comprimento da placa de 157 cm, calculados de acordo com as Equações 14 e 15.

As chapas metálicas serão aderidas com resina epoxídica na superfície de concreto e fixadas mecanicamente com chumbadores metálicos (parafusos de ancoragem), visando aumentar a resistência mecânica, a rigidez e garantir o desempenho estrutural adequado frente às solicitações atuantes.

$$A_{sw} = \frac{Md}{d \cdot f_{yk}} = \frac{157}{5 \cdot \frac{25}{1,15}} = 1,44 \text{ cm}^2 \quad (15)$$

$$A_{sw} = b \cdot h \rightarrow 1,44 = b \cdot 0,15 \rightarrow b = 9,6 = 10 \text{ cm} \quad (16)$$

Custo

Para determinar o método de restauração mais viável e eficaz, foi elaborada uma tabela comparativa de custos entre as duas alternativas apresentadas anteriormente: solução 1, ou seja, substituição por novas placas (Tabela 3); solução 2: reparo e reforço da placa existente, com adição da camada de concreto de 3,0 cm e a colagem de placas de aço (Tabela 4). O concreto escolhido para ambas as situações foi o C40.

Tabela 3 - Custo de novas placas para 1 passarela.

MATERIAIS	Traço (kg/m ³)	Traço em massa (kg)	Peso total de compra de cada material (kg)	Valor total dos materiais (R\$)	Valor de cada material para 1 placa (R\$)
Cimento CPV	420,00	16,80	50,00	36,90	12,40
Brita 0	900,00	36,00	900,00	129,90	5,20
Areia média	550,00	22,00	1000,00	88,00	1,94
Areia fina	380,00	15,20	1000,00	88,00	1,34
Água (a/c = 0,36)	151,20	6,05	-	-	
Aditivo (2.4% massa cimento)	10,08	0,40	5,00	200,00	16,13
ARMADURA		Comprimento total usado (m)	Comprimento total de compra (m)	Valor total do material (R\$)	Valor do material para 1 placa (R\$)
Barra de aço 4,2 mm (2 barras de 1,0 m de comprimento)		2,00	12,00	12,79	2,13
Barra de aço de 8mm (5 barras de 1,57 m de comprimento)		7,85	12,00	43,00	28,13
Custo por placa					67,26
Custo total para 46 placas por passarela					3.093,81

Tabela 4 - Custo de recuperação estrutural das placas para 1 passarela.

Materiais	Traço (kg/m³)	Traço em massa (kg)	Peso total de compra de cada material (kg)	Valor total dos materiais (R\$)	Valor de cada material para 1 placa (R\$)
Cimento CPV	420,00	8,24	50,00	36,90	6,08
Brita 0	900,00	17,66	900,00	129,90	2,55
Areia média	550,00	10,79	1000,00	88,00	0,95
Areia fina	380,00	7,46	1000,00	88,00	0,66
Água (a/c = 0,36)	151,20	2,97	-	-	
Aditivo (2.4% massa cimento)	10,08	0,20	5,00	200,00	7,91
Chapa de aço		Área total usado por placa (m²)	Área total da placa comprada (m²)	Valor total do material (R\$)	Valor de cada material para 1 placa (R\$)
Chapa de aço 1,57 x 0,10 x 0,0015 (m)		0,157	1	234,09	36,75
RESINA EPÓXI	Consumo (kg/m³)	Volume total de resina por placa (m³)	Consumo por placa (kg/m³)	Valor total do material (R\$)	
Adesivo de dois componentes à base de resina epóxi, para ligação entre chapas metálicas com concreto endurecido.			0,3768	56,99	21,47
	1,5	0,25	Custo por placa		76,38
Custo total para 46 placas de concreto por passarela					3513,35

Entre as propostas analisadas para a recuperação da passarela, a solução mais viável economicamente é a solução 1: confecção de novas placas, com um custo de R\$ 3.093,81, em comparação aos R\$ 3.513,35 da solução 2, que prevê a recuperação das placas existentes.

No entanto, a solução mais prática de executar seria a recuperação das placas atuais, pois o trabalho seria realizado no próprio local, aproveitando as estruturas já existentes. Isso reduziria a geração de resíduos e eliminaria a necessidade de transportar as placas de concreto, valores estes que não foram computados no custo apresentado na Tabela 3.

Conclusões

A análise da Ponte José Orestes Rangel Credidio "Birete", em Guaratinguetá-SP, revelou manifestações patológicas significativas, incluindo fissuras no concreto e corrosão das armaduras, decorrentes de fatores ambientais e pela ausência de manutenção preventiva. Para sua recuperação, foram propostas duas soluções técnicas: a substituição integral das placas de concreto e o reparo e reforço das placas existentes.

Embora a substituição por novas placas apresente maior viabilidade econômica, sendo 12% mais em conta do que a solução 1, ainda assim a solução mais adequada é o reforço das placas existentes. Essa conclusão foi obtida devido às suas vantagens práticas, como a redução do desperdício de materiais, pois as placas de concreto serão aproveitadas e servirão como base para receber o reforço estrutural, além disso, há uma otimização dos recursos estruturais, pois elas não serão descartadas na natureza.

Referências

ABNT. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023.

- ABNT. NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.
- ABNT. NBR 7480: Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado- Requisitos . Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.
- ABNT. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas- Procedimentos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.
- ABNT. NBR 9452: Inspeção de Pontes, Viadutos e Passarelas de Concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
- ALMEIDA, M. R. S.; BRITO, L. A.; OLIVEIRA, R. S. “Durabilidade de Pontes de Concreto em Ambientes Costeiros”. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 11, n. 6, 2018
- ANDRADE, C.; ANDRADE, J. C. “Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Impactos da Carbonatação e de Cloretos”. Materials and Structures, v. 5, n. 4, 2018.
- ARAÚJO, A. V.; OLIVEIRA, T. P. “Manutenção de Pontes: Estudos de Casos e Aplicações”. Journal of Structural Engineering, v. 45, n. 3, 2019.
- CAMPOS, H. R.; MENDONÇA, R. F. “Reparos Estruturais em Pontes com Danos Extensos”. Engenharia Civil, v. 7, n. 1, 2021.
- CARVALHO, R. C. e FILHO J. R. F. “Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado”, Segundo a NBR:6118/2014, Editora EDUFSCAR, 2014.
- CUSTÓDIO, Vicente; RIPPER, Thomaz. Estruturas de concreto: patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: Editora Pini, 2009.
- FARIA, L. M.; SANTOS, P. F.; MELO, J. R. “Fibras de Carbono como Reforço Estrutural em Pontes”. Construction and Building Materials, v. 20, n. 5, 2020.
- FERREIRA, A. S.; PAIVA, R. O. “Manutenção Preventiva e Corretiva em Estruturas de Concreto”. Boletim Técnico de Engenharia, v. 33, n. 2, 2019.
- GUIMARÃES, S. M.; MELO, V. S. “Eficiência do Reforço com Fibras de Carbono em Estruturas de Concreto”. Journal of Civil Engineering, v. 38, n. 2, 2021.
- SILVA, A. J.; CUNHA, R. S. “Monitoramento de Estruturas de Concreto com Técnicas Não Destrutivas”. Revista Construção Civil, v. 10, n. 2, 2019.