

Estudo de Caso do Reforço das Fundações do Apoios 3 e 4 da Ponte sobre o Rio Taquari, no km 349+500 Pista Norte /BR-386/RS

Nathalia Pizzol de Oliveira

Casagrande Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, npoliveira@cagen.com.br

Marcelo Leite de Melo Filho

UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, marcelomelo@poli.ufrj.br

Kátia Regina Anschau

Motiva, Rio de Janeiro, Brasil, katia.anschau@motiva.com.br

Leonardo Patrício Chaves

Casagrande Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, lpchaves@cagen.com.br

João Luis Alvarenga Casagrande

Casagrande Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, jlcasagrande@cagen.com.br

RESUMO: Em maio de 2024, fortes chuvas elevaram o nível do Rio Taquari, ocasionando patologias significativas nas fundações da ponte localizada no km 349+500 da BR-386/RS (Pista Norte). Inspeções, incluindo ensaios PIT, batimetria multifeixe e inspeção subaquática, revelaram o descalçamento da base de um dos tubulões dos Apoios 3 e 4, antes embutido em rocha. Diante do risco à estabilidade da estrutura, foi proposta uma solução emergencial de reforço, composta por duas estacas escavadas de grande diâmetro adjacentes ao tubulão comprometido, com pinagem em rocha por estacas tipo raiz. A transferência de carga será viabilizada por uma viga protendida com tirantes monobarra atravessando os blocos de fundação. O modelo estrutural da ponte foi desenvolvido no software CSI Bridge, desconsiderando as estacas do tubulão danificado para simular o cenário crítico. A análise permitiu o dimensionamento dos novos elementos estruturais e a definição do embutimento em rocha com base em sondagens. A execução de sondagens rotativa e uma prova de carga complementarão o controle tecnológico. Este trabalho apresenta a solução adotada e os desafios enfrentados no reforço de fundações em obras de infraestrutura rodoviária afetadas por eventos extremos.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço de fundações, Modelagem estrutural, Patologias, Obra de infraestrutura.

ABSTRACT: In May 2024, heavy rainfall caused the Taquari River to reach record levels, resulting in significant damage to the foundations of the bridge located at km 349+500 of the BR-386/RS (Northbound). Inspections, including PIT tests, multibeam bathymetry, and underwater visual assessments, revealed that the base of one of the caissons at Pier 3 and 4 had been exposed, no longer embedded in the riverbed rock. Due to the structural risk, an emergency foundation reinforcement was proposed, consisting of two large-diameter bored piles adjacent to the compromised caisson, socketed into rock using micropiles. Load transfer from the existing structure will be achieved through a post-tensioned transfer beam anchored with monobar tendons. A structural model of the bridge was developed in CSI Bridge software, with the critical scenario simulated by disregarding the damaged caisson's piles. The analysis supported the design of the new structural elements and defined the rock socket length based on site-specific borehole data. A rotary drilling survey and load test were also planned to confirm the predicted stratigraphy and pile performance. This paper presents the adopted solution and the challenges involved in foundation reinforcement for large-scale transportation infrastructure subjected to extreme events.

KEYWORDS: Foundation reinforcement, Structural modeling, Structural damage, Infrastructure project.

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura de transporte, em particular as pontes, desempenha um papel vital na conectividade e no desenvolvimento socioeconômico. No entanto, a crescente frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como chuvas torrenciais e inundações, representam uma ameaça significativa à integridade e funcionalidade dessas estruturas. Tais eventos podem induzir patologias severas, especialmente nas fundações, comprometendo a segurança e a operacionalidade das obras de arte especiais.

Este artigo apresenta um estudo de caso detalhado sobre o reforço das fundações do Apoios 3 e 4 da Ponte sobre o Rio Taquari, localizada no km 349+500 da BR-386/RS (Pista Norte). Em maio de 2024, a região foi acometida por fortes chuvas que elevaram o nível do Rio Taquari a patamares recordes, resultando em danos críticos à infraestrutura da ponte. As inspeções subsequentes, que incluíram ensaios de integridade de estacas (PIT), batimetria multifeixe e inspeção subaquática, revelaram o descalçamento da base de um dos tubulões do Apoio 3, que anteriormente estava embutido em rocha. Este cenário de dano exigiu uma intervenção emergencial para mitigar o risco à estabilidade estrutural.

A solução de reforço adotada consistiu na instalação de duas estacas escavadas de grande diâmetro adjacentes ao tubulão comprometido, com pinagem em rocha por estacas tipo raiz. A transferência de carga da estrutura existente para os novos elementos foi concebida através de uma viga protendida com tirantes monobarra, atravessando os blocos de fundação. A análise estrutural, realizada com o software CSI Bridge, simulou o cenário crítico de desconsideração da contribuição do tubulão danificado, permitindo o dimensionamento preciso dos novos elementos e a definição do embutimento em rocha com base em sondagens geotécnicas.

O presente trabalho visa documentar a metodologia empregada no diagnóstico das patologias, a concepção e o dimensionamento da solução de reforço, bem como os desafios inerentes à execução de intervenções em ambientes fluviais sujeitos a condições extremas. A relevância deste estudo reside na contribuição para o corpo de conhecimento em engenharia geotécnica e estrutural, oferecendo insights práticos sobre a resiliência de infraestruturas de transporte frente aos impactos das mudanças climáticas e a aplicação de técnicas avançadas de reforço e monitoramento estrutural.

2 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA EXISTENTE

A Ponte sobre o Rio Taquari – Pista Norte, localizada no km 349+500 da BR-386/RS, é uma estrutura de ponte em seção celular, caracterizada por sua continuidade e complexidade geométrica. A estrutura existente possui 5 vãos contínuos, cujas extensões variam significativamente entre 42 metros e 80 metros, adaptando-se às condições topográficas e hidráulicas do local.

Originalmente, a ponte apresenta uma largura total constante de 12,8 metros. No entanto, o projeto prevê uma ampliação para 14,4 metros, com a adição de um passeio em estrutura metálica, visando melhorar a segurança e a funcionalidade para pedestres ou ciclistas. O trecho central da ponte é composto por balanços sucessivos, suportados por pilares em lâmina, que se apoiam nas extremidades em trechos isostáticos com apoio tipo Gerber. Nas extremidades da ponte, foram projetados encontros pesados, com 7 metros de comprimento, que servem como transição entre a estrutura da ponte e o aterro de acesso.

As fundações da ponte são diversificadas, refletindo as condições específicas de cada apoio e reaproveitando parte da estrutura existente que havia antes da construção da obra em balanços sucessivos:

- Apoios Extremos (AP1 e AP6): As fundações nesses pontos são constituídas por tubulões, que são elementos de fundação profunda de grande diâmetro, executados por escavação manual ou mecânica;
- Apoio 2: Neste apoio, as fundações são compostas por tubulões que foram reforçados com estacas raiz em seu perímetro. As estacas raiz são elementos de fundação profunda de pequeno diâmetro, executadas por perfuração e injeção de calda de cimento, que aumentam a capacidade de carga e a rigidez do conjunto;
- Apoio 5: Para este apoio, foram executados dois estacões por pilar. Os estacões são elementos de fundação profunda de grande diâmetro, semelhantes aos tubulões, mas com a particularidade de serem pinados em rocha na sua base por estacas raiz. Essa pinagem garante uma ancoragem adicional e maior capacidade de carga;
- Apoios 3 e 4: Nestes apoios, que foram o foco da intervenção de reforço, foram mantidos dois tubulões existentes em cada pilar. Entre esses tubulões, foram executados novos estacões,

revestidos com camisa metálica e também pinados em rocha na sua base por estacas tipo raiz. Sobre essas estacas e tubulões, foram construídos blocos de coroamento e vigas transversais, que conectam os pilares em lâmina, distribuindo as cargas da superestrutura para as fundações.

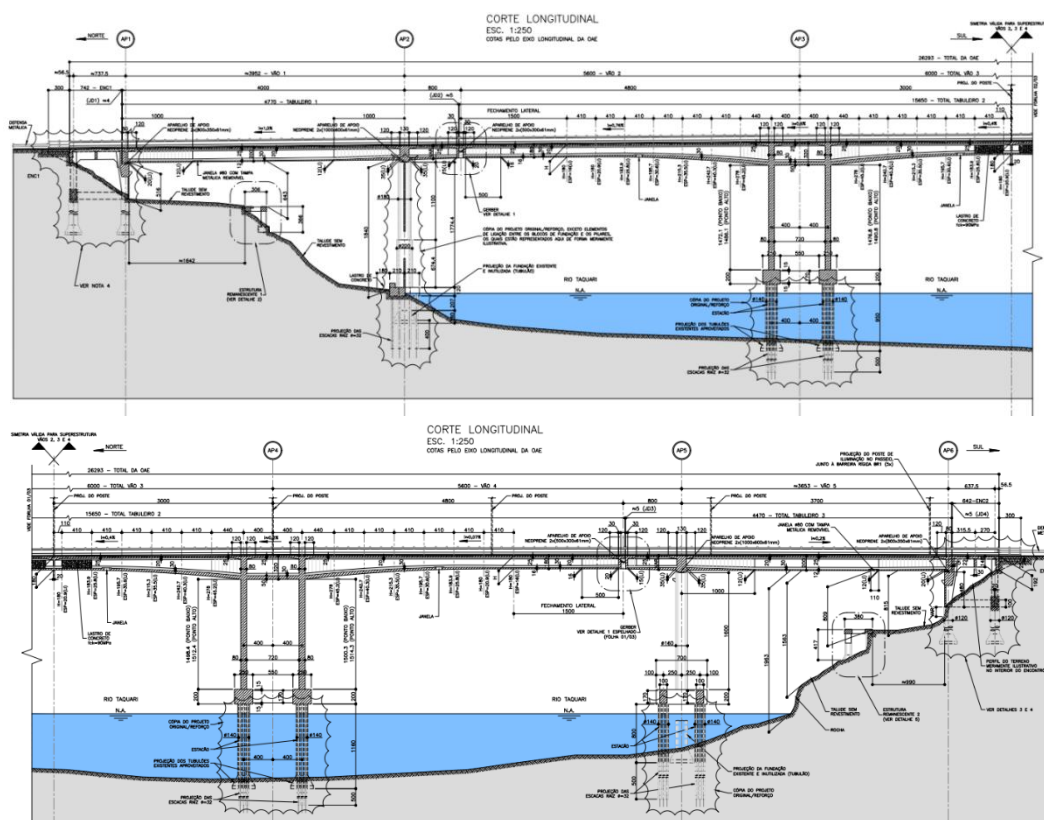


Figura 1. Corte longitudinal ao longo da OAE - Ponte sobre o Rio Taquari – Pista Norte

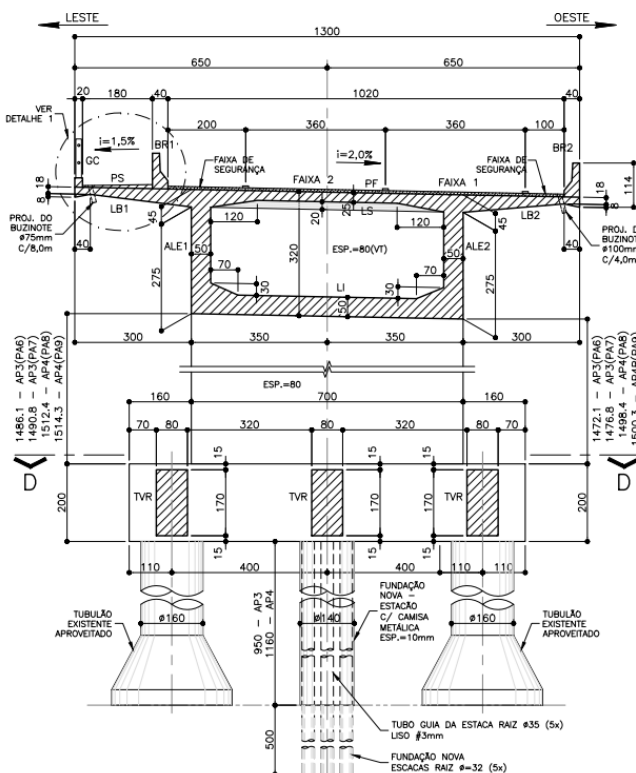


Figura 2. Seção transversal dos apoios AP3 e AP4 - Ponte sobre o Rio Taquari – Pista Norte

3 CONTEXTO E INSPEÇÕES

No mês de abril de 2024, fortes chuvas provocaram uma grande enchente na região sul do Brasil, principalmente na região do Vale do Taquari. Entre os municípios de Estrela e Lajeado, o Rio Taquari transbordou suas margens, alcançando a cota de 33,35m. Nessa ocasião ponte ficou submersa, com lâmina d'água acima de 5m sobre o greide.



Figura 3. Nível normal e nível do rio durante a cheia de 2024

Após a regressão do nível do rio Taquari, a ponte foi submetida a reparos emergenciais, que incluíram a remoção de escombros e a restauração parcial de sua operacionalidade. Contudo, durante essa fase inicial, foram constatados danos permanentes significativos, causados principalmente pelo impacto de uma balsa durante o período de cheia e à ação erosiva de correntes fluviais intensas. Observou-se, de imediato, uma rotação global do tabuleiro, resultando em deslocamentos superiores a 10 cm na margem esquerda, no sentido jusante.

Diante da gravidade dos danos preliminarmente identificados, iniciou-se um programa sistemático de inspeções, abrangendo tanto a superestrutura quanto as fundações da ponte. A metodologia de inspeção seguiu as diretrizes de normas técnicas e boas práticas da engenharia, que preconizam a avaliação visual detalhada e o emprego de tecnologias avançadas para diagnóstico preciso.

Na superestrutura, além da rotação global do tabuleiro, foram verificadas rupturas nas estruturas das passarelas metálicas e a presença de escombros localizados. No entanto, as inspeções não revelaram danos que comprometessem de forma relevante a capacidade portante do tabuleiro principal.

As inspeções das fundações foram possíveis apenas após a redução do nível d'água do rio, revelando rupturas nos tubulões de suporte nos eixos 3 e 4. A confirmação dessas rupturas foi realizada por meio de inspeção subaquática com mergulhadores especializados, um método que permite a avaliação direta e detalhada de elementos submersos. Além disso, após a descida da água além do fundo do bloco de fundação foi possível constatar os elementos rompidos, conforme figura a seguir.



Figura 4. Tubulão estruturalmente rompido

4 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA

A Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas é parte da Bacia do Paraná, caracterizada por uma sequência estratigráfica que inclui o Grupo São Bento (Formações Rosário do Sul e Botucatu) e a Formação Serra Geral. A Formação Serra Geral, composta por basaltos, é a unidade mais expressiva na área de estudo. Sedimentos Quaternários, como aluviões argilosos e siltsos, também são encontrados nos canais fluviais e planícies de inundação.

Foram analisadas três sondagens mistas realizadas nas proximidades da ponte, conforme descrição e imagem apresentada abaixo:

- SM-F-348.00-01 e 02 – Investigações realizadas com o objetivo de definir o substrato da região de um contenção projetada abaixo da ponte;
- SM-OAE-347.00-110 – Investigação realizada para as fundações do viaduto próximo.



Figura 5. Localização de sondagens.

As sondagens indicam um embasamento em rocha basáltica de boa a muito boa qualidade. Contudo, é observada uma heterogeneidade na sondagem SM-OAE-347.00-110, com rocha mais alterada e fraturada.

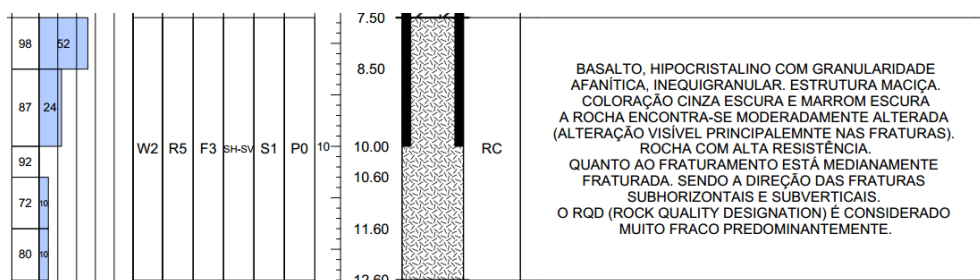


Figura 6. Trecho rotativo da SM-OAE-347.00-110.

5 REFORÇO ESTRUTURAL

5.1 Descrição

A concepção do reforço para as fundações da ponte sobre o Rio Taquari foi diretamente influenciada pela urgência da situação e pelas severas condições impostas pelo evento climático extremo de maio de 2024. A solução adotada representa uma resposta robusta e emergencial.

O reforço das fundações dos apoios AP3 e AP4 foi projetado visando garantir a capacidade de carga necessária e a estabilidade estrutural frente à situação das fundações existentes. Para isso, adotou-se um par estacas escavadas posicionadas adjacentes às estacas com base rompida. A transferência das cargas provenientes da estrutura existente para as novas estacas foi viabilizada por meio da previsão de uma viga de transferência, que atravessa os blocos originais, estabelecendo a solidarização dos elementos. Para assegurar esse comportamento, essa viga foi protendida com a utilização de tirantes monobarra. A figura a seguir ilustra o projeto descrito em planta e seção.

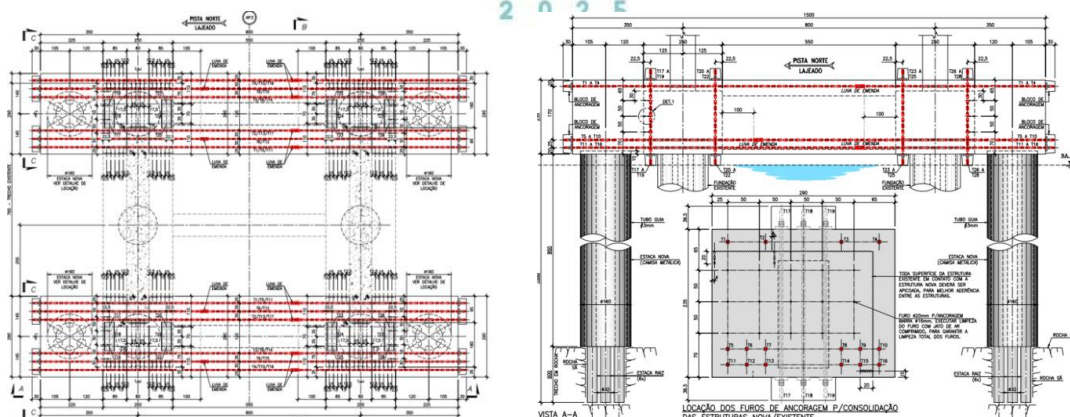


Figura 7. Planta e seção transversal com o reforço.

5.2 Análise estrutural

Para garantir a segurança e a eficácia do reforço, a análise estrutural, realizada com o software de elementos finitos CSI Bridge, partiu do cenário mais crítico possível, visto que durante o desenvolvimento do projeto não havia sido concluído o monitoramento subaquático dos tubulões e a real situação de cada elemento não era conhecida. A metodologia adotada desconsiderou a contribuição estrutural das estacas pertencentes ao tubulão danificado. Essa premissa permitiu simular a condição de máxima vulnerabilidade da ponte, garantindo que a nova solução de reforço fosse dimensionada para suportar integralmente as cargas atuantes, sem depender de elementos comprometidos.

A superestrutura foi modelada com elementos de barra com rigidez as dimensões registradas no cadastro da estrutura, enquanto os blocos de fundação foram representados como elementos de casca, permitindo uma análise detalhada da distribuição de esforços. As conexões entre os elementos e os aparelhos de apoio foram simulados com suas rigidezes específicas, resultando em um modelo tridimensional de fiel as condições de campo que serviu de base para todo o dimensionamento.

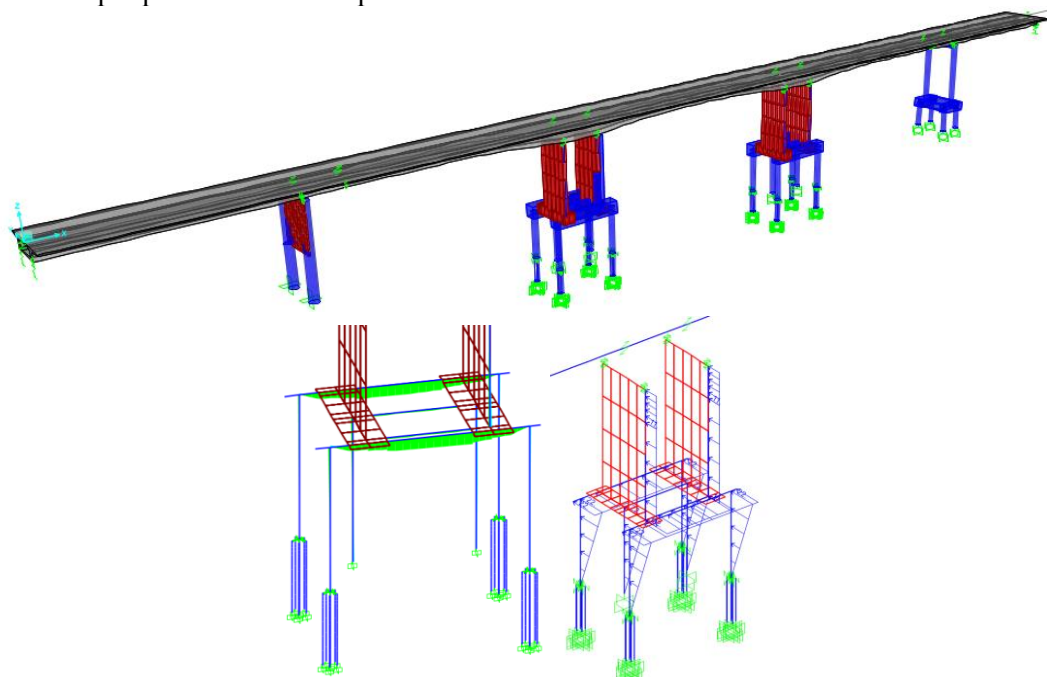


Figura 8. Modelos de cálculo em elementos finitos (CSI Bridge).

O dimensionamento do reforço das fundações da ponte sobre o Rio Taquari considerou um conjunto abrangente de ações e carregamentos, em conformidade com as normas técnicas brasileiras vigentes. A precisão na definição dessas condições é fundamental para garantir a segurança e a durabilidade da estrutura reforçada. As ações, classificadas em permanentes e variáveis, tiveram seus efeitos ponderados por coeficientes específicos para as diferentes combinações de carregamento.

5.3 Estacas Adjacentes e Viga de Transferência

O cerne da solução de reforço reside na execução de um par de estacas escavadas de grande diâmetro (1,60 m) adjacentes aos tubulões existentes que apresentaram ruptura na base. A escolha por estacas escavadas de grande diâmetro justifica-se pela necessidade de mobilizar elevadas capacidades de carga, compatíveis com as solicitações de uma estrutura de ponte, e pela capacidade de atingir camadas de solo ou rocha com características geotécnicas superiores, garantindo a estabilidade da fundação.

Essas estacas foram projetadas para serem cravadas até a rocha sã, ou seja, até uma camada rochosa que apresente resistência e integridade adequadas para suportar as cargas transmitidas. A profundidade de embutimento na rocha é um fator crítico e foi determinada com base em sondagens rotativas prévias e na análise da tensão de adesão entre o concreto da estaca e a rocha. Para otimizar a ancoragem e a capacidade de carga na rocha, foi prevista a pinagem adicional por meio de estacas-raiz. As estacas-raiz, de menor diâmetro, são perfuradas através do fuste da estaca escavada e ancoradas profundamente na rocha, aumentando a resistência ao arrancamento e à compressão, e garantindo uma ligação monolítica com o maciço rochoso.

O dimensionamento geotécnico dessas estacas considerou a variabilidade do maciço rochoso, especialmente em um ambiente fluvial sujeito a processos erosivos. A tensão de adesão foi calculada com base em formulações reconhecidas na literatura técnica (e.g., Poulos e Davis, 1980), ajustadas pela porcentagem de recuperação de testemunhos de sondagem, o que reflete a qualidade da rocha encontrada. A adoção de um fator de segurança de 2 sobre a resistência última da estaca, resultando em uma capacidade de carga admissível de 646,1 tf por conjunto, demonstra a abordagem conservadora e segura do projeto.

Um dos aspectos mais críticos e inovadores do reforço é o sistema de transferência de cargas do pilar existente para as novas estacas. Dada a impossibilidade de simplesmente substituir os tubulões danificados sem comprometer a operação da ponte, foi desenvolvida uma solução que permite a redistribuição dos esforços para as novas fundações. Este sistema é composto por:

- **Viga de Transferência:** Uma viga de concreto armado robusta foi projetada para abraçar o bloco de fundação original do pilar. Esta viga atua como um elemento intermediário, coletando as cargas do pilar existente e as redistribuindo para as novas estacas escavadas. Sua geometria e armadura foram dimensionadas para suportar os elevados esforços de flexão e cisalhamento decorrentes dessa transferência.
- **Tirantes Monobarra Protendidos:** A solidarização entre a viga de transferência (concreto novo) e o bloco de fundação original (concreto existente) é um ponto crucial para a eficácia do reforço. Para isso, serão utilizados tirantes monobarra protendidos que atravessam os blocos de fundação. Antes da aplicação dos tirantes, a superfície de contato entre o concreto novo e o existente será apicoada, garantindo uma rugosidade adequada para a aderência. A protensão dos tirantes gera uma força de compressão transversal na interface, que é essencial para ativar o mecanismo de transferência de cisalhamento por atrito (Shear Friction). Este mecanismo permite que as cargas de cisalhamento sejam transmitidas de forma eficiente entre as duas superfícies de concreto, mesmo com a presença de pequenas discontinuidades. O dimensionamento desses tirantes e da viga de transferência seguiu o modelo de bielas e tirantes, conforme as diretrizes da NBR 9062:2017, que é apropriado para elementos de concreto de grande altura e complexidade geométrica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O caso da ponte sobre o Rio Taquari, no km 349+500 da BR-386/RS, emerge como um estudo de caso emblemático dos desafios contemporâneos enfrentados pela engenharia de infraestrutura diante dos impactos das mudanças climáticas e da crescente frequência de eventos extremos. As fortes chuvas de maio de 2024, que elevaram o nível do rio a patamares recordes, desencadearam patologias severas nas fundações da estrutura e uma rotação global do tabuleiro, comprometendo a segurança e a operacionalidade da ponte.

O diagnóstico preciso dessas patologias foi viabilizado por uma investigação multifacetada e rigorosa. Inspeções subaquáticas com mergulhadores confirmaram as rupturas nos tubulões, enquanto levantamentos cadastrais avançados, como a batimetria multifeixe e o mapeamento de nuvem de pontos com laser scanner,



2025

forneceram uma compreensão detalhada da extensão dos danos e da geometria da estrutura. Complementarmente, um sistema de monitoramento estrutural contínuo, empregando acelerômetros e extensômetros, permitiu avaliar as respostas dinâmicas da ponte e identificar anomalias correlacionadas com as fraturas nas fundações. Ensaios Não Destrutivos (ENDs), como Georadar, Esclerometria e Ultrassom, caracterizaram as propriedades dos materiais e revelaram descontinuidades internas, consolidando o diagnóstico e a urgência da intervenção.

Diante desse cenário crítico, a solução de reforço estrutural foi concebida com base em premissas de segurança e robustez. A metodologia de análise estrutural, que simulou o cenário mais desfavorável ao desconsiderar a contribuição do tubulão danificado, garantiu que o dimensionamento dos novos elementos fosse capaz de suportar integralmente as cargas atuantes. O reforço consistiu na execução de duas estacas escavadas de grande diâmetro, adjacentes ao tubulão comprometido, com pinagem em rocha por estacas tipo raiz, assegurando uma fundação profunda e estável. A transferência de carga do pilar existente para as novas estacas será realizada por uma viga protendida com tirantes monobarra, um sistema que garante a solidarização entre o concreto novo e o existente através da protensão e do mecanismo de cisalhamento por atrito.

O projeto e a execução dessa intervenção não apenas visam a reabilitação imediata da ponte, mas também servem como um valioso aprendizado para a engenharia civil. A integração de análises estruturais avançadas, investigações geotécnicas detalhadas e um plano de controle tecnológico rigoroso – que inclui sondagem rotativa complementar e prova de carga – é fundamental para assegurar a eficácia e a durabilidade de tais reforços. Este trabalho demonstra a capacidade da engenharia de responder a desafios complexos, combinando diagnóstico preciso, soluções inovadoras e um compromisso inabalável com a segurança e a resiliência da infraestrutura rodoviária em um ambiente cada vez mais suscetível a eventos naturais extremos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 6118. *Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 6123. *Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 7187. *Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 7188. *Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 9452. *Inspeção de pontes, viadutos e passarelas — Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 9062. *Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16694. *Projeto de pontes rodoviárias de aço e mistas de aço e concreto*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2023). ASTM D5882: *Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations*.
- Décourt, L. (2008) Provas de carga em estacas podem dizer muito mais do que têm dito. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia - SEFE 6, São Paulo. *Anais... ABMS*. v. 1, p. 221-245.
- Poulos, H. G.; Davis, E. H. (1980) *Pile Foundation Analysis and Design*. New York: John Wiley & Sons.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. (1987) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 685 p.