

Reforço estrutural de ponte em concreto protendido **mediante sistema estaiado externo: estudo de caso em Paraty — RJ**

RAFAEL POSTIGO MAZZALI - ENG. ;

GABRIEL POSTIGO MAZZALI - ENG. — **Postigo Projetos de Engenharia**

CARLA NEVES COSTA - DOUTORA — UNICAMP

RESUMO

A RECUPERAÇÃO DE PONTES EM CONCRETO PROTENDIDO SUBMETIDAS A LONGOS PERÍODOS DE PARALISAÇÃO É PARTICULARMENTE CRÍTICA QUANDO O SISTEMA DE PROTENSÃO PERDE SUA CONFIABILIDADE. ESTE ARTIGO APRESENTA O ESTUDO DE CASO DO REFORÇO DA PONTE DO BOMBEIRO, SOBRE O RIO PEREQUÊ-AÇU, EM PARATY-RJ. AS INSPEÇÕES INDICARAM DETERIORAÇÃO DAS BAINHAS E EXPOSIÇÃO PROLONGADA DAS CORDOALHAS À ATMOSFERA MARINHA, CONDIÇÃO QUE INVIABILIZOU O REAPROVEITAMENTO DA PROTENSÃO ADERENTE ORIGINALMENTE PREVISTA. O PROJETO ADOTOU UM SISTEMA ESTAIADO EXTERNO, COMPOSTO POR QUATRO MASTROS DE CONCRETO ARMADO, TRANSVERSINAS PROTENDIDAS, NOVOS BLOCOS E FUNDAÇÕES PROFUNDAS. AS VERIFICAÇÕES CONSIDERARAM AÇÕES PERMANENTES, TREM-TIPO TB-45 E COMBINAÇÕES DOS ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS E DE SERVIÇO PRESCRITAS PELAS NORMAS BRASILEIRAS. A SOLUÇÃO ESTABELECE UM CAMINHO DE CARGAS INDEPENDENTE DA PROTENSÃO DETERIORADA E PRESERVA A MAIOR PARTE DA ESTRUTURA EXECUTADA. OS RESULTADOS DE PROJETO INDICAM A VIABILIDADE TÉCNICA DA CONCEPÇÃO PARA O CASO ANALISADO; A VALIDAÇÃO DO DESEMPENHO DEPENDE DA CONCLUSÃO DA INTERVENÇÃO, DE PROVAS DE CARGA E DO MONITORAMENTO DAS FORÇAS NOS ESTAIS E DOS DESLOCAMENTOS DO TABULEIRO.

PALAVRAS-CHAVE: REFORÇO ESTRUTURAL, CONCRETO PROTENDIDO, PONTES, SISTEMA ESTAIADO EXTERNO, DURABILIDADE, MONITORAMENTO ESTRUTURAL.

1. INTRODUÇÃO

Pontes de concreto protendido dependem da integridade de cordoalhas, bainhas, injeções e ancoragens para conservar sua

capacidade resistente e seu desempenho em serviço. A exposição de componentes de protensão a cloretos e umidade, somada à ausência de proteção definitiva e de manutenção, pode produzir perdas de seção e de força difíceis de quantificar e comprometer a confiabilidade do sistema. Em obras interrompidas antes da injeção das bainhas, a incerteza abrange trechos não acessíveis à inspeção visual e limita intervenções meramente localizadas.

A protensão externa é uma técnica consolidada para reabilitar membros protendidos deteriorados, pois permite introduzir força adicional com menor interferência na seção existente. Ensaaios e intervenções em pontes reais mostram aumento de capacidade e controle de fissuração, mas também ressaltam a importância do detalhamento das zonas de ancoragem e da validação em campo (KIM et al., 2021; MANISEKAR; SARAVANA KUMAR, 2023). A durabilidade dos tendões externos depende ainda de barreiras anticorrosivas, inspeção e manutenção ao longo da vida útil (FIB, 2005).

Sistemas com mastros e cabos inclinados podem ampliar esse princípio ao instituir um caminho resistente global. Xiang (2020), por exemplo, associou torres implantadas nos encontros e cabos inclinados ao reforço de uma ponte em arco, com concordância entre o modelo espacial e a prova de carga. O caso aqui estudado difere por empregar o sistema estaiado externo como substituto funcional de uma protensão interna não concluída em

uma ponte de concreto, conciliando requisitos estruturais, execução sobre estrutura existente e condicionantes urbanísticas de uma cidade histórica.

A Ponte do Bombeiro, sobre o rio Perequê-Açu, em Paraty-RJ, permaneceu inacabada por vários anos sob a influência da atmosfera costeira. A degradação das bainhas e das cordoalhas impediu assegurar a confiabilidade da protensão originalmente projetada. Como resposta, concebeu-se um conjunto formado por estais externos, quatro mastros de concreto armado, quatro transversinas protendidas e fundações profundas independentes.

O objetivo deste artigo é apresentar o diagnóstico, a concepção e os resultados de dimensionamento desse reforço, explicando o caminho de cargas, os principais parâmetros dos estais e das fundações, os requisitos de durabilidade e os limites de aplicabilidade da solução. Sua contribuição consiste em documentar um uso ainda pouco difundido no país: um sistema estaiado externo destinado a substituir estruturalmente uma protensão aderente perdida, em vez de apenas complementar a capacidade de um tabuleiro em operação. Como a intervenção se encontra em execução, os resultados apresentados são de projeto e não constituem validação experimental do desempenho final.

2. DIAGNÓSTICO ESTRUTURAL

A avaliação foi baseada na documentação disponível, em inspeções visuais e no levantamento das condições dos

elementos executados, em consonância com os princípios de inspeção estabelecidos pela ABNT NBR 9452:2019. Verificaram-se a configuração resistente prevista, a condição aparente dos componentes da protensão e as manifestações patológicas que poderiam comprometer a conclusão da obra. A Figura 1 mostra a superestrutura durante o período de paralisação.

As inspeções realizadas evidenciaram que a ponte permaneceu durante longo período em condição de exposição direta ao ambiente, sem que o processo executivo da protensão fosse concluído. Em consequência, observou-se que diversas cordoalhas permaneceram expostas à ação da atmosfera marinha, sem a proteção definitiva proporcionada pela injeção de nata de cimento nas bainhas e sem o adequado selamento dos dispositivos de ancoragem, conforme demonstrado na Figura 2.

A localização da estrutura em região costeira submetida à influência da maresia contribuiu significativamente para a aceleração dos processos de deterioração. A combinação entre elevada umidade relativa do ar, deposição de cloretos e exposição prolongada dos componentes metálicos



FIGURA 1

VISTA SUPERIOR DA ESTRUTURA INACABADA

FONTE: AUTOR



FIGURA 2

CORDOALHAS EXPOSTAS SEM INJEÇÃO DA BAINHA

FONTE: AUTOR

favoreceu o desenvolvimento de processos corrosivos nas cordoalhas e nos elementos associados ao sistema de protensão.

Além da degradação observada nos componentes metálicos, verificou-se comprometimento das bainhas originalmente previstas para proteção dos cabos. Em diversos trechos foram identificadas condições incompatíveis com os requisitos de durabilidade exigidos para estruturas pretendidas, impossibilitando garantir a integridade futura dos elementos, caso se optasse pela simples continuidade do sistema originalmente projetado.

A análise técnica demonstrou que eventuais intervenções localizadas de recuperação não seriam suficientes para restabelecer níveis adequados de confiabilidade estrutural, uma vez que não seria possível comprovar integralmente as condições das cordoalhas ao longo de todo o seu desenvolvimento nem assegurar a proteção necessária para a vida útil de projeto da estrutura.

Dessa forma, concluiu-se que o reaproveitamento da protensão aderente originalmente concebida não representava uma solução tecnicamente segura ou economicamente justificável. A inviabilidade de utilização do sistema original exigiu o desenvolvimento de uma nova estratégia estrutural capaz de restabelecer a capacidade resistente da ponte por meio da criação de um mecanismo alternativo de transferência de esforços.

No novo esquema resistente, as cordoalhas da protensão original deteriorada

são desconsideradas na capacidade estrutural da ponte. Durante a execução do reforço, os trechos expostos e sem possibilidade de reaproveitamento são destinados à remoção quando tecnicamente acessíveis; eventuais segmentos mantidos na estrutura permanecem sem função resistente e não integram as hipóteses de cálculo do sistema reabilitado.

A partir desse diagnóstico, foram iniciados os estudos de concepção de um sistema de reforço estrutural baseado na utilização de estais externos, permitindo a redistribuição das cargas atuantes na superestrutura e reduzindo a dependência dos elementos de protensão deteriorados.

3.. CONCEPÇÃO DO REFORÇO

A partir do diagnóstico realizado, foram desenvolvidos estudos técnicos com o objetivo de identificar a solução mais adequada para restabelecer a capacidade resistente da estrutura, considerando simultaneamente aspectos de segurança, viabilidade executiva, durabilidade, custo de implantação e preservação da estrutura existente. Os carregamentos, esforços e verificações apresentados neste trabalho foram obtidos a partir da modelagem estrutural desenvolvida para o projeto (POSTIGO PROJETOS DE ENGENHARIA, 2025). A análise foi realizada por meio de modelagem computacional tridimensional, pelo método dos elementos finitos, representando o comportamento global do tabuleiro, transversinas, mastros, estais e

fundações, verificando as combinações de ações nos estados limites adotados.

Inicialmente foram avaliadas alternativas baseadas na demolição integral da ponte e posterior reconstrução, na implementação de sistemas de protensão externa convencional e na adoção de sistemas complementares de reforço estrutural. Embora a reconstrução integral permitisse a execução de uma nova estrutura sem as limitações impostas pela obra existente, essa alternativa apresentava elevado custo, maior prazo de execução e desperdício significativo dos elementos já construídos.

Diante desse cenário, optou-se pela implementação de um sistema estaiado externo capaz de criar um mecanismo resistente para absorção e redistribuição dos esforços atuantes na superestrutura. A solução adotada permitiu preservar a maior parte dos elementos estruturais existentes, minimizando intervenções sobre as longarinas originais e reduzindo significativamente a necessidade de demolições e reconstruções.

O conceito estrutural desenvolvido baseou-se na introdução de mastros em concreto armado implantados junto às extremidades da ponte e conectados ao tabuleiro por meio de estais protendidos. Esses elementos passaram a atuar como componentes principais do novo sistema

resistente, transferindo parcela significativa das cargas verticais da superestrutura para as novas fundações executadas especificamente para essa finalidade. Os elementos adotados e suas características são apresentados na Tabela 1.

O dimensionamento do sistema foi realizado em conformidade com os critérios estabelecidos pelas normas ABNT NBR 6118, ABNT NBR 7187, ABNT NBR 7188 e ABNT NBR 8681, considerando os carregamentos permanentes da estrutura, as ações variáveis decorrentes do tráfego rodoviário e as combinações de estados limites últimos e de serviço. Para a avaliação das cargas móveis foi adotado o trem-tipo TB-45, complementado pelas cargas de multidão previstas para a pista de rolamento e passeios.

Para o dimensionamento dos estais foram consideradas duas regiões de influência distintas do tabuleiro, correspondentes aos trechos próximos aos encontros e à região central da estrutura. As cargas totais e as respectivas reações verticais de projeto por estai são apresentadas na Tabela 02. Considerando a geometria inclinada dos cabos, as reações verticais de 2.348,65 kN e 2.760,75 kN correspondem a forças axiais de projeto de aproximadamente 2.455,96 kN e 2.845,27 kN, para ângulos de 73° e 76°, respectivamente. Os estais principais foram dimensionados com feixes de 37 cordoalhas no Trecho Tipo 1 e 43 cordoalhas no Trecho Tipo 2.

Os resultados sintetizados na Tabela 02 evidenciam a participação do sistema estaiado no equilíbrio global da estrutura e justificam a necessidade de reforço das fundações e dos elementos de transferência de carga, em especial nas regiões de ancoragem e nas novas transversinas protendidas. Cabe destacar que os valores de reação apresentados na Tabela 2 correspondem às componentes verticais das forças atuantes nos estais. Para o dimensionamento das novas fundações, além das cargas correspondentes aos Trechos Tipo 1 e Tipo 2, foram consideradas as ações permanentes associadas ao mastro, ao bloco de fundação e à parcela correspondente da viga de travamento. Dessa forma, a solicitação total considerada para o sistema de fundações não corresponde à simples soma das reações verticais dos estais apresentadas na tabela.

Além dos estais principais, a solução contemplou o reforço localizado das transversinas e a execução de vigas de travamento destinadas a melhorar a distribuição dos esforços entre as longarinas existentes e o novo sistema resistente. A interação entre mastros, estais, transversinas e fundações permitiu a criação de um caminho alternativo para transferência das cargas, reduzindo a dependência estrutural da protensão deteriorada e restabelecendo condições adequadas de segurança e desempenho para a ponte.

Diferentemente das soluções convencionais baseadas exclusivamente em protensão externa, a alternativa adotada promoveu a criação de um novo sistema resistente independente, constituído por mastros, estais, fundações profundas e transversinas protendidas, permitindo não

TABELA 1
PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE REFORÇO ESTRUTURAL

Elemento	Características
Sistema principal de reforço	Estais externos
Tipo de estrutura original	Ponte em concreto protendido
Sistema complementar	Transversinas protendidas
Elementos de apoio	Mastros em concreto armado
Fundação dos mastros	Blocos sobre estacas raiz
Profundidade das estacas	45 metros
Diâmetro das estacas	0,31 metros
Quantidade total de estacas	22 por bloco
Altura do mastro	9,36 metros
Localização	Paraty – RJ

FONTE: MEMORIAL DE CÁLCULO — AUTOR

TABELA 2
RESUMO DOS CARREGAMENTOS CONSIDERADOS NO DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA ESTAIADO

Parâmetro	Características
Área do tabuleiro	780,00 m²
Dimensões do tabuleiro	65,00 m x 12,00 m
Classe de carregamento	TB-45
Carga de multidão na pista	5,0 kN/m²
Carga de multidão nos passeios	3,0 kN/m²
Carga total – Trecho Tipo 1	4.697,30 kN
Reação vertical por estai – Trecho Tipo 1	2.348,65 kN
Carga total – Trecho Tipo 2	5.521,50 kN
Reação vertical por estai – Trecho Tipo 2	2.760,75 kN
Carga total transferida às fundações	12.596,38 kN
Número total de estacas	22 por bloco
Carga média por estaca	572,56 kN
Diâmetro das estacas raiz	0,31 m
Profundidade estimada das estacas	45 m
Altura aproximada dos mastros	9,36 m

FONTE: MEMORIAL DE CÁLCULO — AUTOR

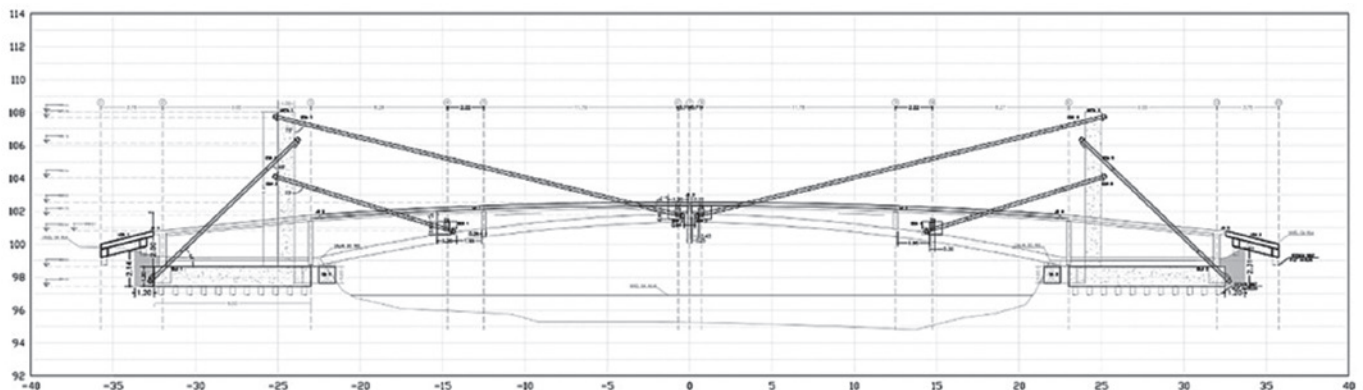


FIGURA 3

CONCEPÇÃO DO REFORÇO COM ESTAIS

FONTE: MEMORIAL DE CÁLCULO — AUTOR

apenas a recuperação estrutural da ponte, mas também a introdução de redundância resistente ao conjunto.

4. IMPLEMENTAÇÃO FUNDAÇÃO E SISTEMA ESTAIADO

A implementação do sistema estaiado externo exigiu o desenvolvimento de uma nova estrutura de apoio capaz de absorver os esforços introduzidos pelos estais e transferi-los de forma segura ao maciço de fundação. Diferentemente da concepção original da ponte, na qual os esforços eram equilibrados predominantemente pela protensão interna das longarinas, a nova solução passou a concentrar cargas significativas nos pontos de ancoragem dos mastros, tornando necessária a execução de fundações complementares específicas para essa finalidade.

Os estudos geotécnicos realizados indicaram a necessidade de fundações profundas para garantir capacidade de carga compatível com as solicitações geradas pelo sistema de reforço. Em função das características do subsolo local e das elevadas cargas envolvidas, foram adotadas estacas raiz com diâmetro nominal de 0,31 metros e profundidade aproximada de 45 m. As investigações geotécnicas indicaram camadas superficiais com baixa capacidade de suporte e elevada deformabilidade, tornando necessária a transferência dos esforços para estratos mais competentes.

Os blocos de fundação foram dimensionados para receber as cargas provenientes dos mastros e dos estais e distribuí-las

adequadamente às estacas. De acordo com os cálculos desenvolvidos para o projeto, a carga total transferida ao sistema de fundações atingiu aproximadamente 12.596,38 kN. O conjunto dos blocos mobiliza 22 estacas raiz por bloco, resultando em carga média de referência da ordem de 572,56 kN por estaca.

Os mastros constituem os principais elementos de sustentação do sistema estaiado e foram dimensionados em concreto armado para resistir às elevadas forças de compressão introduzidas pelos cabos. A geometria adotada resultou em altura aproximada de 9,36 m, definida a partir da configuração estrutural dos estais, das condicionantes urbanísticas do município de Paraty, dos ângulos de inclinação ne-

cessários ao funcionamento do sistema e das restrições geométricas do local de implantação. A Figura 3 apresenta a posição dos novos blocos, estais e mastros.

Na Figura 4 é apresentado o detalhamento dos estais projetados, incluindo sua configuração geométrica, os dispositivos de ancoragem e a interação com os demais elementos do sistema de reforço estrutural. Os estais principais são constituídos por feixes de 37 ou 43 cordoalhas CP-177 de diâmetro nominal 15,7 mm, conforme a região de influência, enquanto os contracabos utilizam conjuntos de 61 cordoalhas para o equilíbrio das componentes horizontais do sistema. Os cabos são alojados em tubos de PEAD de 225 mm nos trechos especificados, com ancoragem fixa junto

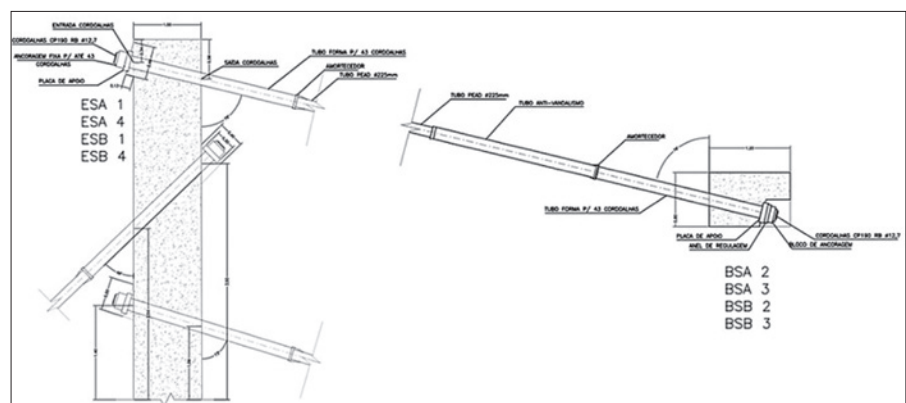


FIGURA 4

DETALHAMENTO DOS ESTAIS

FONTE: MEMORIAL DE CÁLCULO — AUTOR

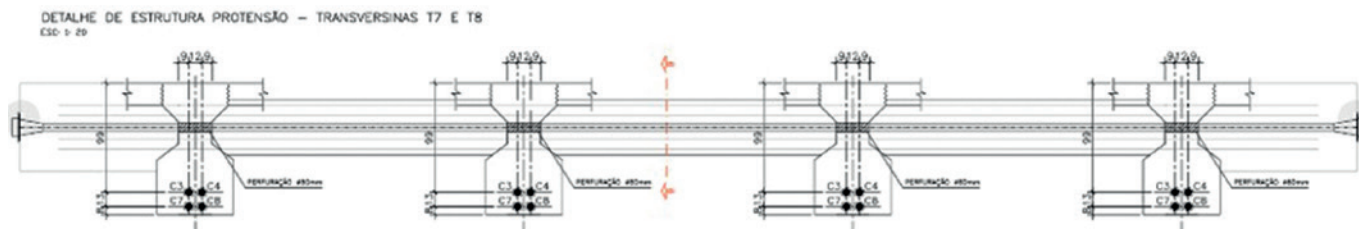


FIGURA 5

NOVA TRANSVERSINA PROTENDIDA

FONTE: MEMORIAL DE CÁLCULO — AUTOR

ao mastro e bloco de ancoragem com placa de apoio e anel de regulagem na extremidade oposta. As forças axiais de projeto dos estais principais são de aproximadamente 2.455,96 kN e 2.845,27 kN para os Trechos Tipo 1 e Tipo 2, respectivamente. A proteção anticorrosiva do novo sistema considera o confinamento das cordoalhas em tubo de PEAD, a proteção das regiões de ancoragem e a necessidade de inspeção e manutenção ao longo da vida útil.

Conforme apresentado na Figura 5, os pontos de ancoragem dos estais foram associados à execução de novas transversinas protendidas, concebidas especificamente para absorver e redistribuir os esforços concentrados introduzidos pelo sistema estaiado. As transversinas passaram a desempenhar papel fundamental na transferência das cargas provenientes dos cabos para as longarinas da ponte, promovendo melhor distribuição dos esforços na superestrutura e reduzindo concentrações localizadas de tensões junto às regiões de ancoragem.

A adoção dessas novas transversinas protendidas constituiu medida complementar indispensável para o adequado funcionamento do sistema de reforço estrutural, garantindo que as forças introduzidas pelos estais fossem transmitidas de forma compatível com a capacidade resistente dos elementos existentes. Dessa forma, o reforço não se limitou à implan-

tação dos mastros e estais, mas envolveu também a adequação da estrutura original para receber os novos caminhos de carga estabelecidos pelo sistema estaiado.

A Figura 6 apresenta de forma esquemática o mecanismo de transferência de cargas desenvolvido para o reforço estrutural da ponte. As cargas atuantes no tabuleiro e longarinas são redistribuídas pelas transversinas protendidas aos pontos de ancoragem dos estais, sendo posteriormente transferidas aos mastros, blocos de fundação e estacas profundas, até sua dissipação nos estratos geotécnicos competentes.

Além da função resistente, a concepção dos mastros buscou compatibilizar desempenho estrutural, viabilidade executiva e integração arquitetônica com o entorno urbano da cidade de Paraty. A combinação entre mastros, estais e fundações profundas permitiu criar um mecanismo de transferência de cargas, capaz de absorver

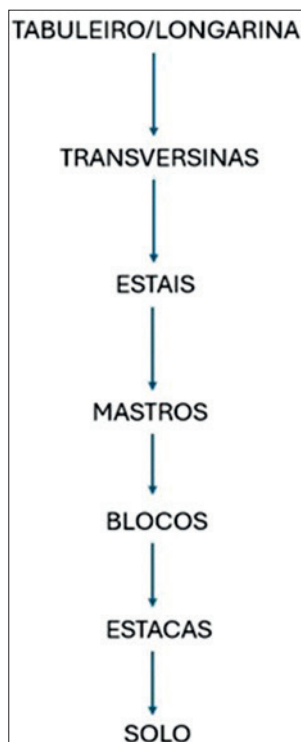


FIGURA 6

DISTRIBUIÇÃO DE CARGA COM NOVO SISTEMA DE REFORÇO ESTAIADO

FONTE: AUTOR

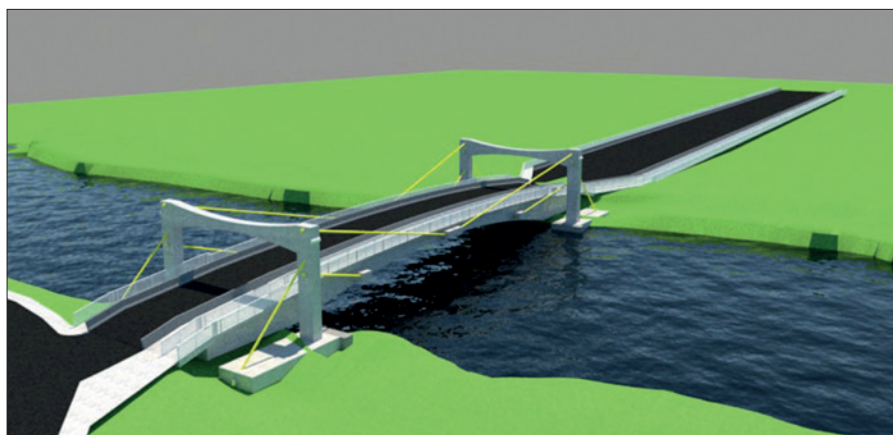


FIGURA 7

CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA DO REFORÇO COM ESTAIS

FONTE: MEMORIAL DE CÁLCULO — AUTOR

os esforços anteriormente atribuídos ao sistema de protensão deteriorado. A concepção final arquitetônica pode ser vista na Figura 7.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A solução estrutural adotada permitiu restabelecer a capacidade resistente da ponte sem a necessidade de substituição integral da superestrutura existente. A implementação do sistema estaiado externo criou um mecanismo de transferência de cargas, reduzindo a dependência estrutural do sistema de protensão originalmente concebido e posteriormente comprometido pela degradação das bainhas e cordoalhas.

Os esforços verticais atuantes sobre o tabuleiro passaram a ser parcialmente absorvidos pelos estais, sendo transferidos aos mastros e posteriormente às novas fundações profundas executadas especificamente para essa finalidade. Essa redistribuição permitiu aliviar as solicitações atuantes nas longarinas existentes e proporcionar um comportamento estrutural compatível com os critérios de segurança estabelecidos pelas normas brasileiras aplicáveis a pontes rodoviárias.

Os resultados de projeto indicam que o sistema é capaz de receber, nas duas regiões de influência analisadas, cargas totais de 4.697,30 kN e 5.521,50 kN, com componentes verticais de reação nos estais de aproximadamente 2.348,65 kN e 2.760,75 kN, respectivamente. Considerando a geometria inclinada dos estais e o conjunto das ações transmitidas pelos mastros e demais elementos do modelo estrutural, o sistema de fundações foi dimensionado para uma solicitação total da ordem de 12.596,38 kN.

Além dos benefícios estruturais, a solução adotada apresentou vantagens construtivas e operacionais. A preservação da maior parte da estrutura existente reduziu a necessidade de demolições e de reconstrução da superestrutura, com potencial de redução de prazo, custos e impactos ambientais em relação à reconstrução integral. Este trabalho, contudo, não apresenta uma análise econômica comparativa quantitativa entre as alternativas.

Outro aspecto relevante refere-se à compatibilização da solução com as condicionantes urbanísticas e paisagísticas

do município de Paraty. A configuração estrutural adotada permitiu integrar os novos elementos de reforço ao ambiente urbano, sem comprometer a leitura arquitetônica da estrutura e sem gerar interferências significativas na paisagem local.

Do ponto de vista técnico, o estudo demonstra que sistemas estaiados externos podem representar alternativa eficiente para reforço estrutural de pontes em concreto protendido quando a recuperação da protensão original não se mostra viável. A metodologia adotada permitiu preservar a estrutura existente, restabelecer condições adequadas de segurança e criar um novo caminho resistente para absorção das cargas atuantes na superestrutura.

A interação entre estais, mastros, transversinas de reforço e fundações profundas permitiu a concepção de um sistema estrutural integrado, capaz de redistribuir os esforços anteriormente concentrados nas longarinas protendidas e proporcionar comportamento global compatível com os critérios normativos de segurança e desempenho adotados no projeto. Em comparação com aplicações de protensão externa descritas por Kim et al. (2021) e Manisekar e Saravana Kumar (2023), nas quais a técnica é empregada para recuperar ou ampliar a capacidade de elementos deteriorados, o caso analisado utiliza os estais como parte de um novo caminho resistente global, associado a mastros e fundações independentes. Essa característica aproxima a solução do princípio de reforço por cabos inclinados discutido por Xiang (2020), embora aplicado aqui a uma ponte de concreto protendido com perda de confiabilidade da protensão aderente original. Estudos recentes reforçam também a importância do acompanhamento das forças em sistemas de protensão externa: Guo et al. (2024) discutem o monitoramento das perdas de protensão em pontes reforçadas, enquanto Tabiatnejad et al. (2024) analisam a detecção de danos em tendões externos. Esses trabalhos evidenciam que a acessibilidade dos cabos favorece a inspeção, mas não elimina a necessidade de controle periódico das forças, das ancoragens e das barreiras anticorrosivas.

Além dos benefícios estruturais, a solução estaiada apresentou vantagens arquitetônicas e urbanísticas relevantes

quando comparada a alternativas convencionais baseadas em protensão externa. Enquanto sistemas tradicionais de protensão externa normalmente exigem a instalação de cabos, desviadores e dispositivos de ancoragem distribuídos ao longo da superestrutura, frequentemente resultando em interferências visuais significativas, a configuração estaiada permitiu uma solução estrutural mais limpa, organizada e integrada ao conjunto da obra.

A presença dos mastros e estais conferiu à ponte uma nova identidade visual, compatível com a importância urbana, turística e paisagística do local de implantação. Essa característica mostrou-se particularmente relevante no contexto do município de Paraty, reconhecido como Patrimônio Mundial pela UNESCO, onde aspectos relacionados à preservação da paisagem e à valorização do espaço urbano constituem condicionantes importantes para o desenvolvimento de obras de infraestrutura.

Sob essa perspectiva, o sistema estaiado passa a desempenhar simultaneamente funções estruturais e arquitetônicas, contribuindo não apenas para a recuperação funcional da estrutura, mas também para sua qualificação estética e integração ao ambiente urbano. Diferentemente de uma solução baseada exclusivamente em protensão externa, cujo resultado visual tende a permanecer oculto ou apresentar elementos acessórios distribuídos ao longo da ponte, o sistema adotado transforma os próprios elementos resistentes em componentes de valorização arquitetônica da obra.

Cabe destacar que, no momento da elaboração deste trabalho, as intervenções de reforço estrutural encontravam-se em fase de execução. Dessa forma, as análises e discussões apresentadas baseiam-se nos resultados obtidos durante o diagnóstico, a modelagem, o dimensionamento e o desenvolvimento do projeto executivo, não constituindo validação experimental do desempenho final. A conclusão das obras permitirá, em etapa futura, a realização de prova de carga e o monitoramento das forças nos estais e dos deslocamentos do tabuleiro, possibilitando confrontar o comportamento medido com as previsões do modelo estrutural.

Do ponto de vista da engenharia estrutural, os resultados de projeto indicam que a utilização de sistemas estaiados externos pode constituir alternativa tecnicamente viável para o reforço de pontes em concreto protendido quando a recuperação da protensão original não se mostra recomendável. A aplicabilidade da solução, entretanto, depende de condicionantes específicas, como disponibilidade geométrica para implantação dos mastros e ancoragens, capacidade de execução de fundações complementares, possibilidade de reforço das regiões de transferência de carga, controle das etapas executivas e manutenção das barreiras de proteção dos estais. Por esse motivo, a concepção não deve ser generalizada sem avaliação estrutural, geotécnica e executiva específica para cada obra.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o estudo de caso do reforço estrutural da Ponte do Bombeiro, localizada no município de Paraty-RJ, cuja concepção original previa a utilização de sistema de protensão aderente, posteriormente comprometido pela degradação das bainhas e pela exposição prolongada das cordoalhas a condições ambientais agressivas. As inspeções realizadas de-

monstraram a inviabilidade técnica de reaproveitamento do sistema originalmente projetado, exigindo o desenvolvimento de uma solução alternativa capaz de restabelecer a segurança e a funcionalidade da estrutura.

A solução adotada baseou-se na implementação de um sistema estaiado externo associado à execução de novas fundações profundas, mastros em concreto armado e transversinas protendidas destinadas à adequada transferência dos esforços introduzidos pelos cabos. A interação entre esses elementos permitiu a criação de um novo mecanismo resistente para redistribuição das cargas atuantes na superestrutura, reduzindo a dependência estrutural da protensão deteriorada e preservando a maior parte dos elementos originalmente executados.

Os resultados obtidos durante as etapas de análise, modelagem e dimensionamento indicam a viabilidade técnica da solução para o caso estudado. A principal contribuição do trabalho consiste em documentar a utilização de um sistema estaiado externo, com mastros, transversinas protendidas e fundações independentes, como substituto funcional de uma protensão aderente cuja confiabilidade foi perdida, distinguindo-se das intervenções em que a proten-

são externa atua apenas como reforço complementar.

Além dos benefícios associados ao desempenho estrutural, a solução desenvolvida apresentou vantagens construtivas, econômicas e arquitetônicas relevantes. A preservação da estrutura existente reduziu a necessidade de intervenções demolitórias e possibilitou o aproveitamento de parcela significativa da obra executada. Adicionalmente, a configuração estaiada conferiu à ponte uma identidade visual compatível com a importância urbana, turística e paisagística do município de Paraty, contribuindo para sua integração ao ambiente local.

Embora as obras de reforço ainda se encontrem em fase de execução, os estudos realizados indicam potencial de aplicação da metodologia em situações semelhantes, desde que sejam verificadas as condicionantes estruturais, geotécnicas, executivas, de durabilidade e de manutenção de cada caso. A validação do desempenho final deverá ser realizada após a conclusão da intervenção, por meio de prova de carga e monitoramento estrutural. Assim, o caso apresentado contribui como referência de projeto e concepção, sem pretender substituir a verificação específica exigida para outras obras de arte especiais. ©

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e protendido - Procedimento. Rio de Janeiro, 2021.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos e passarelas. Rio de Janeiro, 2024.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2019.
- [6] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). Durability of post-tensioning tendons. fib Bulletin 33. Lausanne, 2005.
- [7] GUO, H.; YANG, J.; TANG, R.; YANG, C.; XU, F. Monitoring and analysis of prestress loss in prestressed box girder bridges strengthened with external prestressing. *Sensors*, v. 24, n. 14, art. 4549, 2024. DOI: 10.3390/s24144549.
- [8] KIM, S.-H.; PARK, J.-S.; JUNG, W.-T.; KIM, T.-K.; PARK, H.-B. Experimental Study on Strengthening Effect Analysis of a Deteriorated Bridge Using External Prestressing Method. *Applied Sciences*, v. 11, n. 6, 2478, 2021. DOI: 10.3390/app11062478.
- [9] MANISEKAR, R.; SARAVANA KUMAR, K. Retrofitting of Distressed Post-tensioned Concrete Members by External Post-tensioning. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, v. 104, p. 675-683, 2023. DOI: 10.1007/s40030-023-00737-6.
- [10] TABIATNEJAD, D.; TABIATNEJAD, B.; KHEDMATGOZAR DOLATI, S. S.; MEHRABI, A. Damage detection in external tendons of post-tensioned bridges. *Infrastructures*, v. 9, n. 7, art. 103, 2024. DOI: 10.3390/infrastructures9070103.
- [11] XIANG, Y. Multi-rib Arch Bridge Strengthened by Stayed-Cable and Field Test. In: ARÊDE, A.; COSTA, C. (ed.). ARCH 2019. Structural Integrity, v. 11. Cham: Springer, 2020. p. 814-822. DOI: 10.1007/978-3-030-29227-0_90.
- [12] POSTIGO PROJETOS DE ENGENHARIA. Memorial de cálculo do reforço estrutural da Ponte do Bombeiro. Projeto executivo. São Paulo, 2025. Research, 1998.