



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Avaliação Estrutural da Ponte do Galeão para Trem Tipo Especial – Análise Numérica.

Luiz Octavio de Souza Bueno Oliveira¹, Cristiane Cruxen Daemon d'Oliveira e Bastos², Regina Helena F. de Souza³

¹Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (CGP) e Uerj (FEN/DCCT) / luiz.oliveira@eng.uerj.br

²Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (CGP) e Universidade Santa Úrsula / cristiane.daemon@usu.edu.br

³Universidade do Estado do Rio de Janeiro / Departamento de Estruturas e Fundações / reginahsouza@eng.uerj.br

Resumo

O presente trabalho apresenta a verificação do vão central da Ponte do Galeão para passagem de um veículo especial com 850 kN. A superestrutura da Ponte do Galeão possui 15 vãos isostáticos constituídos por 19 vigas pré-moldadas e protendidas, sendo o maior deles com 43,40 m. A solução estrutural adotou protensão não aderente. Trata-se da primeira utilização de concreto protendido na América Latina. O projeto original considerou um trem-tipo composto por diversos veículos, configurando uma carga distribuída ao longo de uma grande área. Em 2020 foi solicitada à Coordenadoria Geral de Projetos, da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, a avaliação estrutural dessa ponte considerando a passagem de um trem-tipo constituído por blindados com uma carga total (incluindo um semirreboque) de 850 kN, distribuída ao longo de uma área equivalente ao do TB-450. Para fazer essa análise foi desenvolvido um modelo computacional em elementos finitos do maior vão da ponte, no software CSiBridge, produzido pela empresa americana Computers and Structures, mesma desenvolvedora do conhecido SAP2000. Este software permite o emprego de superfícies de influência para determinação dos esforços mais desfavoráveis em cada elemento estrutural modelado, além da consideração da protensão como elemento tipo “tendon”, da não linearidade física do concreto e das perdas de protensão ao longo do tempo.

Nesta avaliação concluiu-se que o software CsiBridge pode ser empregado adequadamente para a análise deste trem-tipo especial, embora a consideração da evolução das propriedades dos materiais com o tempo e a da não linearidade sejam de certa forma complexas e requeiram grande esforço de pós-processamento. A análise dos resultados obtidos revelou que a Ponte do Galeão suporta a passagem do trem-tipo especial, verificando os Estados Limites de Serviço e Último.

Palavras-chave

Ponte; concreto protendido; protensão sem aderência; trem-tipo especial.

1. Introdução

A obra da Ponte do Galeão, inaugurada em 1949, na época recorde mundial de extensão, foi a primeira ponte em concreto protendido feita no Brasil. Foi também a primeira ponte construída nas Américas empregando elementos pré-moldados de concreto protendido. O projeto da superestrutura foi elaborado em 1946 na França, no escritório da STUP (Société Technique Pour l'Utilization de la Précontrainte, dirigido por E. Freyssinet e Y. Guyon). Eugène Freyssinet calculou a ponte considerando protensão completa, isto é, sem tensões de tração na flexão.

A ligação da Ilha do Governador com o Continente foi originariamente projetada em concreto armado, e consistia em dois trechos: Continente-Ilha do Fundão e Ilha do Fundão-Ilha do Governador. Quando se decidiu mudar o projeto da ponte para concreto protendido, a primeira ponte, em viga contínua, já estava com o tabuleiro em execução, e a segunda ponte, com as fundações em tubulões pneumáticos, estava em andamento. Esta é a razão da Ponte do Galeão ter vãos diferentes, que correspondem à modulação da viga contínua de concreto armado do projeto original.

O projeto oficial da concorrência previa um comprimento total de 368,4 m distribuídos em 15 vãos, cujos comprimentos variavam de 19,40 a 43,40 m. A distribuição dos vãos foi criteriosamente estudada de maneira a se otimizar o máximo momento fletor na estrutura. Em fins de 1946 todos os tubulões das fundações já estavam cravados, atingindo a rocha sã, em alguns pontos a 20 m de profundidade. Foi então que a Diretoria da Civilhidro (Cia. Nacional de Construções Civas e Hidráulicas, empresa responsável pela construção da ponte) teve notícia do processo construtivo de Freyssinet, que estava sendo usado na reconstrução de várias pontes destruídas durante a Segunda Guerra Mundial. As excelentes vantagens do processo foram detidamente estudadas, verificando-se que o seu emprego em peças pré-moldadas para obras marítimas conduziria a uma maior durabilidade da construção pela ausência de fissuração (VASCONCELLOS, 1989).

Freyssinet pensou inicialmente em dividir os 370m da ponte em vãos iguais, como convém para uma obra com vigas pré-moldadas de concreto protendido. Porém, com o objetivo de aproveitar as fundações já executadas, a Ponte do Galeão em concreto protendido foi projetada com 10 vãos de 19,40m, 2 vãos de 28,30m, 2 vãos de 37,20m e um vão de 43,40m (VASCONCELLOS, 1989).

A primeira fase da obra, com tabuleiro de 10m de largura, foi inaugurada em janeiro de 1949, e a segunda fase, com mais 10m de largura, perfazendo o total de 20m de largura, foi inaugurada alguns meses depois. A razão para isso foi a possibilidade de utilização imediata da obra com 10m de largura. A Figura 1 ilustra uma foto da construção da Ponte do Galeão.

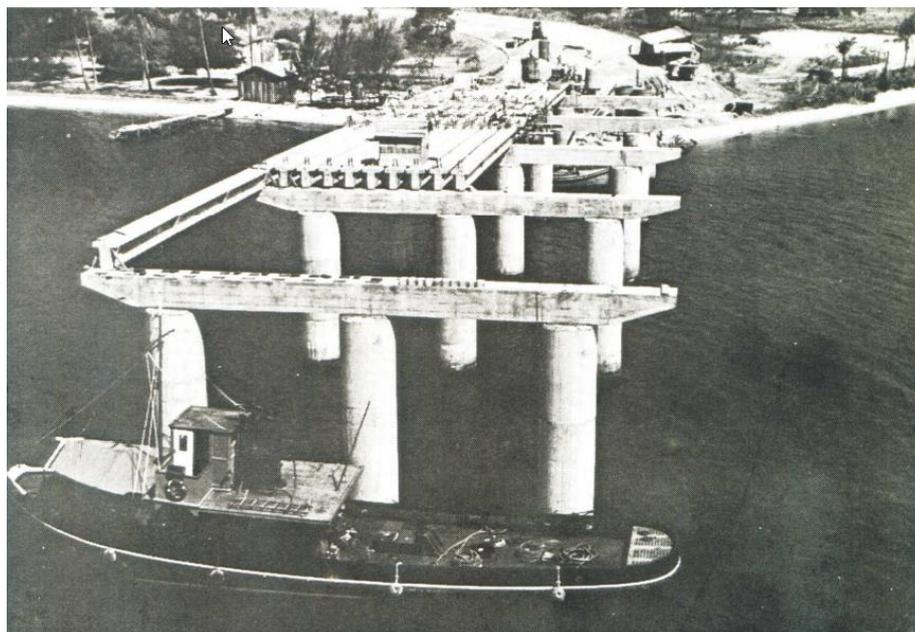


Figura 1 – Foto da Construção da Ponte do Galeão (VASCONCELLOS, 1985).

Após 25 anos de sua existência, os jornais do Rio de Janeiro noticiaram seu perfeito estado de conservação. Em 1982 foi realizado um serviço de recuperação da obra, refazendo as pistas de rolamento e substituindo os 260 m de juntas de dilatação. Em 1983, o "Freyssinet Magazine" publicou uma pequena notícia da obra com o título: "Le Pont du Galion est toujours en bonne santé!" (VASCONCELLOS, 1989). Por volta de 1988 foi feita uma vistoria da obra solicitada pelo DER (RJ). Foi constatado que o concreto das vigas não apresentava carbonatação e fissuras, e as armaduras estavam sem corrosão. O papel de proteção dos cabos desapareceu, mas a pintura betuminosa ainda podia ser notada (MACHADO, 2005). A ponte ainda está em utilização, porém tornou-se insuficiente para a atual demanda de tráfego e necessitou de uma duplicação. A Figura 2 ilustra uma foto da Ponte do Galeão.

Em 2020, foi solicitada à Coordenadoria Geral de Projetos, da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, a avaliação estrutural da Ponte do Galeão considerando a passagem de um trem-tipo constituído por blindados

com uma carga total (incluindo um semirreboque) de 850kN, distribuída ao longo de uma área equivalente ao do TB-450. Esse trabalho apresenta a verificação do vão central da Ponte do Galeão, de 43,40m.

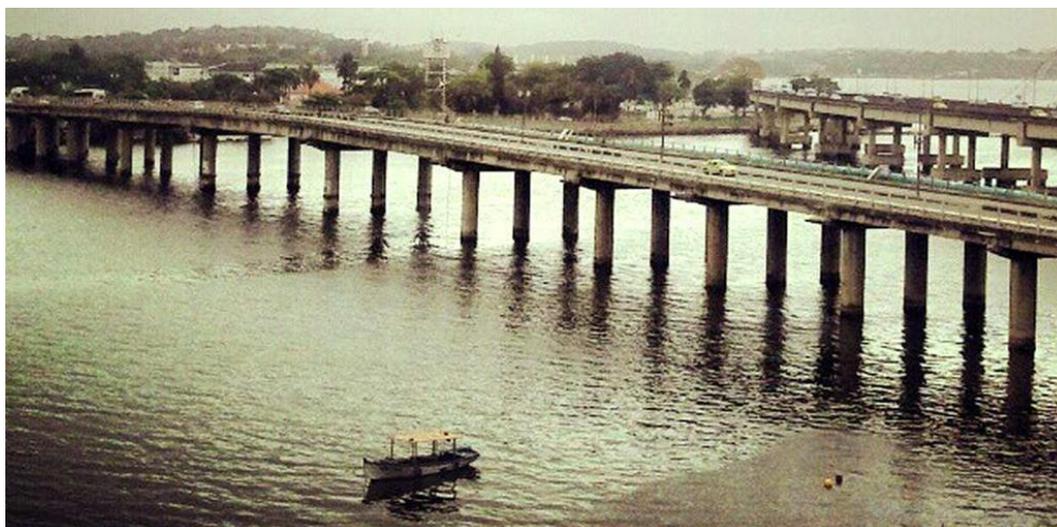


Figura 2 – Foto da Ponte do Galeão (Google Maps, 2011 citado por THOMAZ, S/D).

2. Características da Ponte

A solução adotada foi um tabuleiro de vigas múltiplas pré-moldadas de concreto protendido sem aderência posterior, simplesmente apoiadas, solidarizadas transversalmente por laje e transversinas concretadas “in loco” e protensão transversal. A laje do tabuleiro de 16cm de espessura, é constituída pela mesa superior das 19 vigas principais e pela concretagem “in loco” de segunda fase. Estas longarinas se apoiam em uma viga protendida pré-moldada solidarizada por protensão vertical nos três tubulões de 2m de diâmetro das fundações. As juntas de dilatação foram de chapa e cantoneiras metálicas chumbadas no concreto da laje do tabuleiro (MACHADO, 2005). A figura 3a ilustra a seção transversal da Ponte do Galeão.

A largura do tabuleiro é de 20,60m compreendendo 2 passeios laterais de 2,20m, 2 pistas de rolamento de 7,70m e uma barreira central de 0,80m de largura. Cada vão possui 19 vigas pré-moldadas de concreto protendido, espaçadas 111,1cm entre eixos. As vigas têm seção "I" assimétrico, com 85cm de largura de mesa superior, e largura de 35 a 45cm de mesa inferior. A espessura das almas é de 10cm nos trechos centrais dos vãos, alargando para 35 ou 45cm nas extremidades junto aos apoios. As vigas do vão central de 43,40m têm altura variando de 170cm no apoio, a 190cm no meio do vão. As demais vigas dos outros vãos têm altura constante: 160cm nos vãos de 37,20m; 125cm no vão de 28,30m e 95cm no vão de 19,40 m. A figura 3b ilustra a seção transversal da viga pré-moldada com 170cm de altura.

As vigas se apoiam na mesoestrutura por intermédio aparelhos de apoio metálicos com rótula numa extremidade e pêndulo na outra (apoio simples). Uma vez no lugar, os intervalos entre mesas superiores das vigas pré-moldadas são concretados, bem como os intervalos entre transversinas, tornando-se o conjunto monolítico por meio de uma protensão transversal. A superestrutura foi construída em duas etapas. A primeira, com 10,00m de largura e 10 vigas longitudinais, possibilitando o trânsito de veículos. A segunda, acrescentando 9 vigas longitudinais perfazendo a largura final de 20,60m. O alargamento do tabuleiro foi previsto no projeto por meio do traspasse da protensão transversal, eliminando assim, uma junta longitudinal no tabuleiro. A meso e infraestrutura da ponte é constituída, em cada apoio, por 3 tubulões de 2,00m de diâmetro externo, espaçados de 7,20m entre eixos, ligados no topo por uma verga pré-moldada de concreto protendido, solidarizada aos tubulões por protensão vertical. Os tubulões pneumáticos, como acima referido, foram cravados até atingirem a rocha (o mais profundo atingiu a profundidade de 27m). (BOSCOLI, 1992).

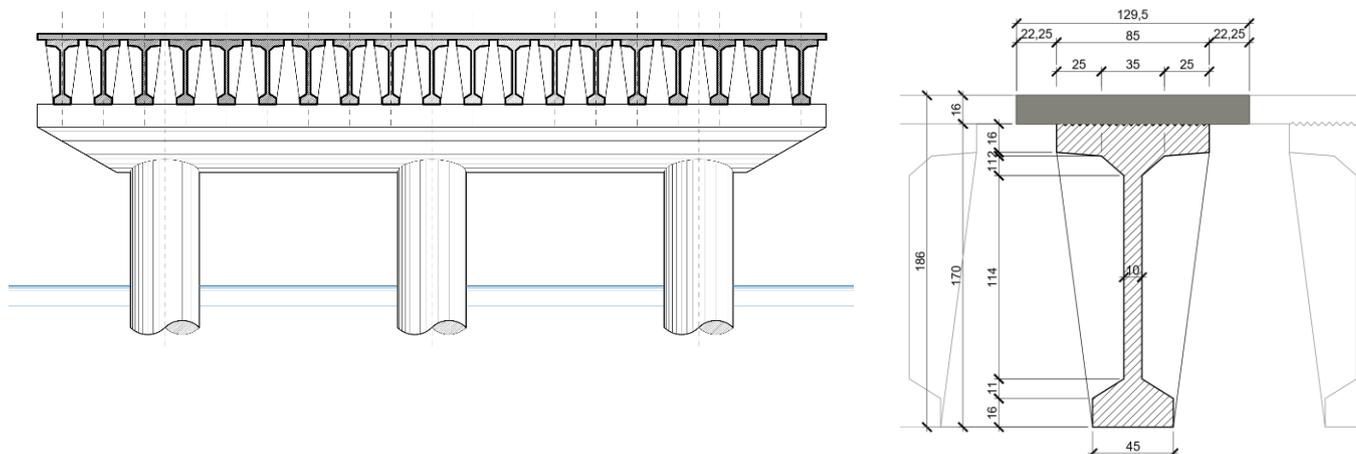


Figura 3 – (a) Seção Transversal da Ponte do Galeão. (b) Seção transversal da viga pré-moldada com 170cm de altura.

A ponte foi executada com cabos constituídos de 12 fios de 5mm de diâmetro ($12 \Phi 5$ mm), paralelos e dispostos em volta de uma mola central de arame recozido. Essa mola garantia a existência de um buraco central que permitisse a injeção de calda de cimento, cuja finalidade era apenas de proteção contra corrosão. Para evitar a entrada de nata do cimento no interior do cabo, durante a concretagem da viga, o que acarretaria a aderência dos fios com o concreto antes da aplicação da protensão, os cabos eram envolvidos em papel kraft e pintados com tinta betuminosa em várias camadas. Essa maneira de realizar a cablagem é proibida pelas normas atuais (VASCONCELLOS, 1989).

A armadura ativa das longarinas é constituída por cabos de $12\Phi 5$ mm, importados, com tensão de escoamento de 1250MPa e com tensão última de 1500MPa, assim distribuída: 20 cabos para os vãos de 43,40m, 17 cabos para os de 37,20m, 12 para os de 28,30m e 8 para os de 19,40m. As transversinas e lajes também são protendidas, a fim de solidarizar a superestrutura, sem haver juntas longitudinais. A protensão transversal da laje é com cabos de $12\Phi 5$ mm espaçados a cada 85cm. Na obra foi utilizado um concreto de resistência equivalente a 30 MPa e as armaduras passivas consideraram o aço CA-24, liso.

O carregamento considerado no dimensionamento considerou a carga móvel determinada de acordo com os preceitos da NB-6:1943, em diversas combinações, envolvendo um caminhão de 90kN, um compressor de 240kN e, adicionalmente, um bonde com 640kN, aplicados em três faixas de tráfego, e dois comboios destes na outra via, aplicados em duas faixas de tráfego, num total de 1250kN. O segundo trem-tipo consistia um comboio de um caminhão e compressor, aplicado em duas faixas de tráfego, mais um bonde aplicado em uma das vias e, na outra, um comboio composto por um bonde, mais um compressor e um caminhão, perfazendo 2030kN (BOSCOLI, 1992).

3. Ensaio da viga da Ponte do Galeão

Em julho de 1949, estando a obra ainda em construção, foi realizada a prova de carga de uma viga de 19,40m de comprimento, cujo concreto tinha 10 meses de idade. A viga pré-moldada com vão teórico de 18,80m, com pós-tensão, foi ensaiada pelo INT, utilizando dois macacos hidráulicos com capacidade de carga de 600kN cada, promovendo um ensaio de flexão de quatro pontos. Foram instalados deflectômetros no meio do vão, extensômetros nas face superior e inferior e inclinômetros, obtendo as leituras de flecha, deformações na face superior e inferior da viga, no meio do vão, e de rotação nos apoios. As fissuras formadas durante o ensaio eram de flexão, não sendo observadas fissuras de cisalhamento. O modo de ruptura se deu por esmagamento do concreto, permanecendo as armaduras intactas (THOMAZ, s/d).

4. Modelagem Numérica

O modelo computacional para estimativa da capacidade resistente teórica da Ponte do Galeão foi elaborado com o software CSiBridge. Este programa, desenvolvido pela empresa Computer & Structures inc, é derivado do programa SAP2000, possuindo a capacidade de analisar cargas móveis através de superfícies de influência, pelo método dos elementos finitos.

A modelagem de uma ponte nesse programa segue um protocolo padrão, cujas etapas são: (1) criar ou modificar um modelo que numericamente represente a geometria da estrutura e as propriedades dos materiais, o(s) carregamento(s) e os parâmetros de análise da estrutura; (2) realizar a análise do modelo criado; e (3) verificar os resultados da análise. O processo é iterativo e pode envolver muitos ciclos das etapas descritas, para melhor ajuste e otimização dos resultados.

Usualmente, fazer a previsão teórica da capacidade portante de estruturas antigas é uma tarefa complicada. Nem sempre os desenhos de projeto originais estão disponíveis, e, portanto, determinar as características geométricas e dos materiais torna-se uma tarefa mais complicada, salvo com a execução de ensaios destrutivos ou não destrutivos. Contudo, pela importância histórica da Ponte do Galeão, há muito material técnico disponível sobre ela, o que foi fundamental para realização de uma análise estrutural representativa.

A execução do processo de modelagem, como é usual no SAP2000 e no CSiBridge, começa pela definição dos materiais a serem utilizados. O concreto foi modelado considerando uma resistência à compressão característica de 30MPa.

Os efeitos devidos à fluência do concreto e às perdas progressivas de protensão devem ser levados em consideração na análise, já que tratam de ocorrências desfavoráveis à estrutura. Por outro lado, o ganho de resistência à compressão do concreto com o tempo é uma ocorrência favorável e, por isso, não foi considerada no modelo. Os efeitos da fluência e da retração neste material foram implementados automaticamente pelo software, de acordo com as recomendações do EN 1992-1-1 de 2004.

As armaduras ativas em cada uma das vigas que forma o tabuleiro foram modeladas como elemento tipo “tendon” no programa. As informações relativas a suas propriedades mecânicas e carga de protensão foram obtidas em BOSCOLI, 1992. A geometria dos cabos e a configuração da seção transversal foi obtida em VASCONCELLOS, 1985.

Através desses desenhos foi possível vetorizar a viga e seus componentes, procedimento necessário para obtenção das coordenadas ao longo dos cabos, a fim de alimentar o modelo numérico. Nesses mesmos trabalhos foram encontrados a tensão de protensão inicial (σ_{p0}), de 1050 MPa, o tipo de cabo, 12Ø5 mm e as características mecânicas do cabo ($f_{ypk} = 1250$ MPa e $f_{upk} = 1500$ MPa).

As dimensões da seção transversal das longarinas podem ser vistas na Figura 3b. Não foram consideradas, a favor da segurança, as mudanças na seção da viga, que, portanto, é modelada ao longo de seu comprimento totalmente como um “I” assimétrico. O aumento de altura na região do vão do pré-moldado, de 1,70 para 1,90 m também não foi considerado.

A possibilidade de modelagem por fase de construção com evolução das propriedades dos materiais que o programa permite é interessante. Assim, inicialmente as longarinas foram modeladas sem a existência da laje e das transversinas e, portanto, sem qualquer colaboração transversal. Numa segunda fase durante a análise, são acrescentados estes elementos ao modelo, com conseqüente mudança de inércia e surgimento de efeito de placa. A protensão das transversinas e das lajes foi realizada na estrutura real com o propósito de criar um elemento transversalmente monolítico, sem juntas longitudinais. Como o efeito do monolitismo já é considerado através do aumento de inércia que ocorre por implementação desses elementos, a protensão transversal não foi considerada no modelo. A Figura 4 ilustra geometria dos cabos na Ponte do Galeão.

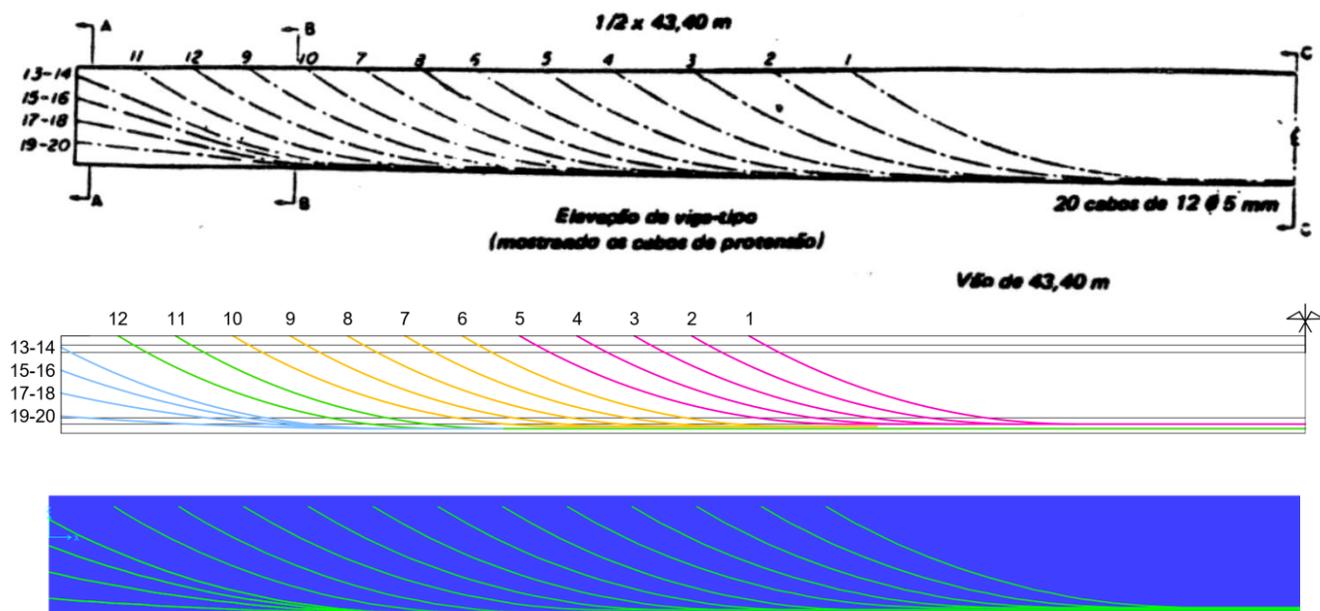


Figura 4 – Geometria dos cabos na Ponte do Galeão (1) Desenho de Vasconcellos,1989 (2) Reconstituição em CAD (3) Modelo numérico.

4.1 Carga Móvel

Conforme mencionado anteriormente, os trens-tipo do projeto original consistiam em comboios com bonde, caminhão e compressor, perfazendo a carga total de até 2030kN. O trem-tipo especial objeto deste estudo é constituído por blindados com uma carga total (incluindo um semirreboque) de 850kN, distribuída ao longo de uma área equivalente ao do TB-450. Deve-se observar que, embora a carga total dos trens-tipo do projeto original seja superior ao do trem-tipo especial em tela, os trens-tipo originais estavam distribuídos em uma grande área do tabuleiro. A maior carga pontual aplicada pelos trens-tipos de projeto refere-se à roda dianteira do compressor, com 100kN.

Não foi possível ter acesso a todas as características do trem-tipo especial constituído por blindados, apenas ao seu peso total característico (incluindo caminhão e carga a ser transportada) de 850kN e suas dimensões em planta, aproximadamente 3 x 6 metros. Esta carga foi modelada como sendo distribuída em quatro pontos, com um total de 212,50kN por ponto.

Em planta, o tabuleiro se mostra composto por 5 faixas, sendo duas para pedestres, com 2,20m, nas extremidades, duas faixas de rolamento, com 7,70m, e um canteiro central de 0,80m, como pode ser visto na Figura 5.

Por se tratar de trem-tipo especial, que difere tanto do trem-tipo considerado no projeto quanto do considerado atualmente pela NBR 7188 (ABNT, 2013), optou-se por considerar que, quando da passagem desse veículo especial, a ponte não seja solicitada por mais nenhum tipo de carga móvel. Além disso, o veículo especial deverá trafegar com uma velocidade baixa, sem acelerar ou frear, medidas necessárias para que os coeficientes de impacto não sejam levados em conta na análise. Dessa forma, definiu-se que o trem-tipo poderá ocupar qualquer posição dentro de uma faixa de tráfego. Embora as longarinas sejam, longitudinalmente, simplesmente apoiadas, a existência de uma consolidação por ocasião da concretagem e protensão das transversinas e laje, forma uma grelha altamente hiperestática, composta por 19 vigas em uma direção e 5 vigas em outra direção. Por isso, a análise da repartição dessas cargas móveis ao longo das longarinas através de métodos tradicionais é morosa, necessitando-se lançar mão de hipóteses simplificadoras. Daí a utilidade da análise numérica considerando superfícies de influência, já que o processo permite conhecer os valores mais desfavoráveis para cada tipo de esforço interno e para cada seção de qualquer elemento que componha o

modelo. A Figura 6 ilustra a superfície de influência para momento fletor positivo na seção central de uma viga de periferia da faixa de tráfego. Por outro lado, avaliar os elementos com maior precisão – desde que o modelo de análise seja confiável e reproduza fielmente as condições reais – permite obter uma maior precisão nos esforços que efetivamente acontecem, ao passo que as hipóteses simplificadoras dos processos tradicionais geralmente conduzem a resultados mais conservadores, a favor da segurança.

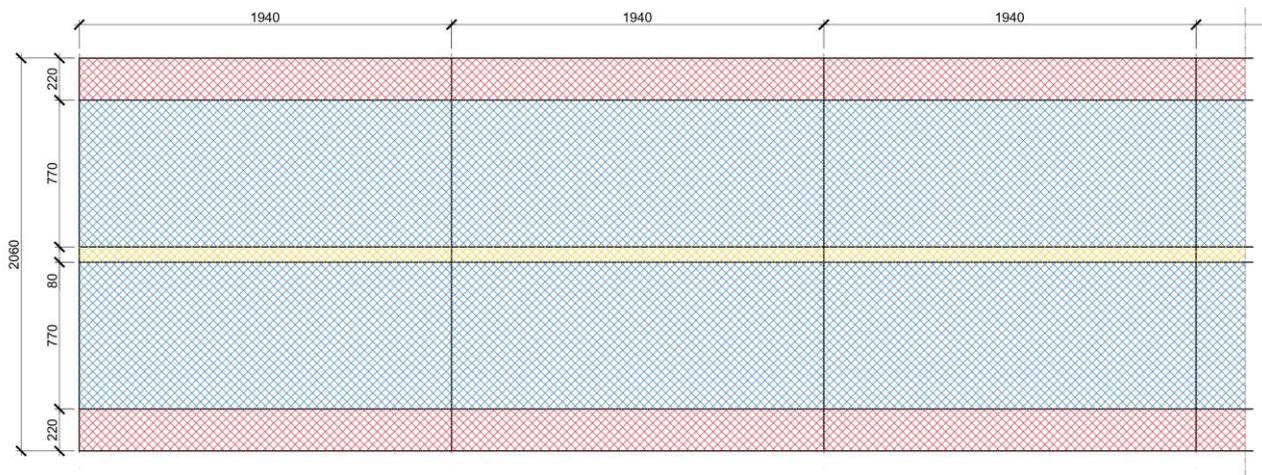


Figura 5 – Distribuição das faixas no tabuleiro.

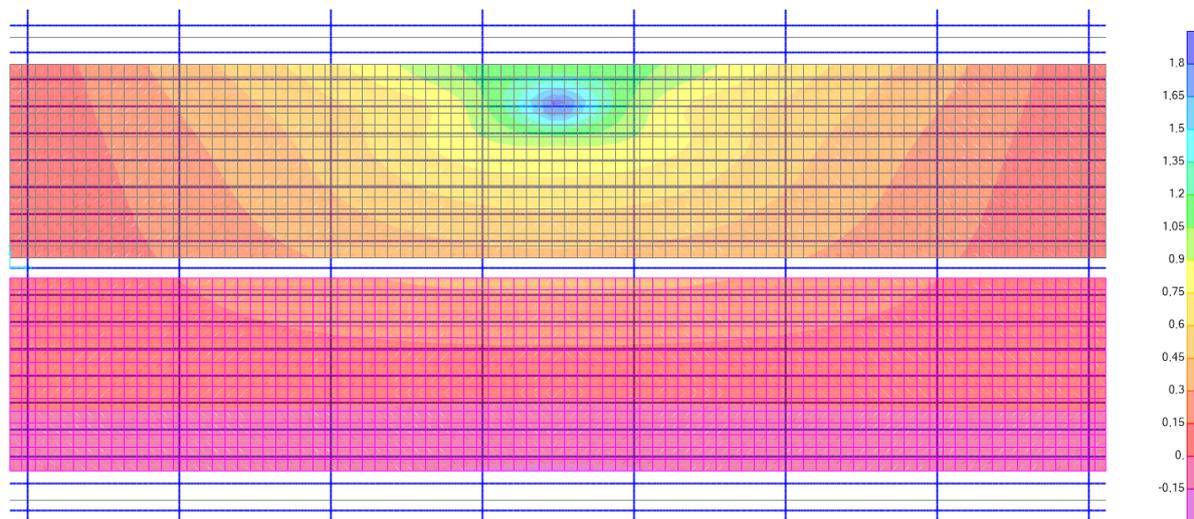


Figura 6 – Superfície de influência para momento fletor positivo na seção central de uma viga de periferia da faixa de tráfego.

4.2 Verificação estrutural – Estado-Limite de Serviço

Para a verificação da estrutura para passagem do veículo especial, os elementos estruturais devem atender aos requisitos mínimos atuais da NBR 6118 (ABNT, 2014), considerando, aí, que os elementos se encontrem com bom estado de conservação.

De acordo com a referida norma, a Ponte do Galeão insere-se na Classe de agressividade ambiental (CAA) IV – muito forte – respingos de maré, em que o risco de deterioração da estrutura é elevado. Para essa classe de agressividade, e tratando-se de pós tração, deve haver protensão limitada (concreto protendido nível 2) e deve ser verificado o atendimento a duas condições simultaneamente:

- a) ELS-F (Estado-limite de serviço de formação de fissuras), para combinações frequentes, e



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

b) ELS-D, ou ELS-DP (estado-limite de descompressão – ou descompressão parcial), para combinações quase permanentes.

As combinações para ELS-F e ELS-D (ou ELS-DP) são formadas de acordo com o estabelecido na NBR 8681 (ABNT, 2004). Para as combinações frequentes, tem-se:

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_1 F_{Q(1,k)} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} F_{Qj,k}$$

E, para as combinações quase permanentes tem-se:

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} F_{Qj,k}$$

A NBR 8681 estabelece os valores de 0,5 e 0,3, respectivamente, para os coeficientes de redução ψ_1 e ψ_2 para pontes rodoviárias.

A tabela 1 apresenta os resultados das tensões obtidas para a carga permanente e protensão, considerando a rigidez, as perdas de protensão e a fluência do concreto, para cada uma das idades da viga. Destaca-se que a laje só passa a colaborar com sua inércia após consolidada.

Tabela 1 – Resultados das tensões para a combinação incluindo carga permanente e protensão

Atividade	Idade (Dias)	Tensões (MPa)		
		Bordo inferior	Bordo superior do Pré-moldado	Bordo superior da laje
Locação das longarinas	8	+14,10	-10,25	-
Aplicação da Protensão	9	-17,73	-1,85	-
Locação das transversinas	46	-13,86	-4,05	-
Locação da laje	76	-8,22	-8,73	-
Passagem do tempo	25.626	-2,30	-4,88	-5,12

Na tabela 2 apresentam-se as tensões obtidas para as combinações que geraram os efeitos mais desfavoráveis na estrutura, para a idade de 70 anos, considerando além da protensão e das cargas permanentes, a aplicação do trem-tipo especial.

Tabela 2 – Resultados das tensões para as combinações incluindo carga permanente, protensão e carga móvel, para a idade de 70 anos

Efeito	Combinação	Tensões (MPa)		
		Bordo inferior	Bordo superior do Pré-moldado	Bordo superior da laje
Maior tração no bordo inferior – Verificação do ELS-F	ELS-F	+1,68	-6,42	-7,19
Maior compressão no bordo superior – Verificação do ELS-F		+1,68	-6,42	-7,19
Maior tração no bordo inferior – Verificação do ELS-D	ELS-DP	+0,09	-5,81	-6,36
Maior compressão no bordo superior – Verificação do ELS-D		+0,09	-5,81	-6,36

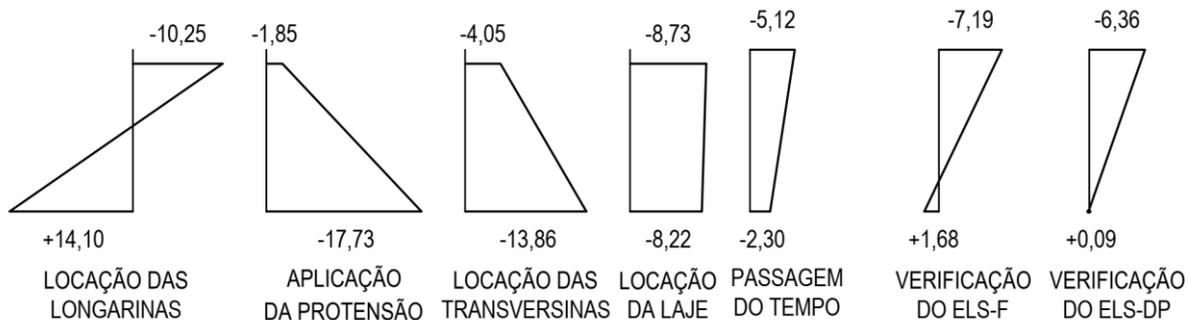


Figura 7 – Tensões normais na seção do meio do vão, ao longo do tempo e na verificação ao ELS-F e ao ELS-DP

A Figura 7 apresenta esquematicamente a evolução das tensões normais na seção transversal mais solicitada, do meio do vão, em função dos estágios de concretagem / carregamento da longarina, além das tensões que solicitam essa seção na verificação do ELS-F e do ELS-D.

Para verificação do ELS-F, a maior tensão de tração deverá ser inferior ao valor da resistência característica à tração na flexão do concreto, $f_{ct,f} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$. Como $1,68\text{MPa} < 2,89\text{MPa}$ este requisito da NBR está verificado.

A verificação do ELS-D se dá quando nenhum ponto da seção está sujeito a tensões de tração, para as combinações quase permanentes. Alternativamente, é possível considerar o ELS-DP, cuja exigência é que a uma distância de 5cm a partir do bordo menos comprimido não haja qualquer tensão de tração. Para as ações consideradas nesta combinação, a essa distância do bordo menos comprimido encontra-se, no pior caso, uma tensão de compressão de $3,03\text{MPa}$, estando, portanto, verificado o ELS-DP.

Os deslocamentos verticais nas vigas foram analisados considerando o ELS-DEF para combinação quase permanente de ações, conforme item 17.3.2.1.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014). Foi encontrado um valor máximo da ordem de 10 cm para a flecha, equivalente a $l/435$, estando verificado, portanto, o atendimento a esse ELS. Destaca-se que esse valor já engloba as deformações diferidas uma vez que o modelo considera a evolução das propriedades dos materiais ao longo do tempo.

4.3 Verificação estrutural – Estado Limite Último

A verificação para o estado limite último não foi realizada no projeto original da Ponte do Galeão. As mesmas hipóteses básicas utilizadas no cálculo são válidas, tanto para o concreto armado quanto para o concreto protendido. Contudo, as peculiaridades inerentes à protensão fazem com que o dimensionamento e verificação ao ELU envolvam cálculos trabalhosos, sendo conveniente utilizar processos iterativos para essa operação.

Uma rotina iterativa criada pelos autores (OLIVEIRA, 2016) foi utilizada nesta verificação ao estado limite último. Esta rotina consiste em calcular, através da geometria da seção, através das propriedades geométricas e mecânica das armaduras ativa e passiva, e, das características do concreto, os esforços resistentes de uma seção protendida. Sua operação é iterativa, e consiste, após determinar a deformação de pré-alongamento da armadura ativa, em arbitrar um valor de profundidade para a linha neutra plástica, e, como consequência, determinar o domínio de deformação no ELU. A seguir, encontram-se os esforços resistentes no concreto e na armadura passiva (caso seja especificada). O esforço resistente teórico de protensão é obtido por equilíbrio de esforços, e, com esse valor, determina-se a deformação de compatibilidade da armadura ativa. Com esta deformação é possível determinar a deformação total na armadura de protensão e, por consequência, a tensão total nesta armadura e, por fim, o esforço de protensão atuante. Caso este esforço seja igual ao esforço teórico de protensão, a solução foi encontrada e, a partir dos esforços resistentes em cada um dos materiais, determina-se o esforço resistente da seção. Caso contrário, uma nova posição da linha neutra é arbitrada e os cálculos são refeitos.

Sabe-se, através da literatura técnica, que foram utilizadas barras lisas (sem nervuras ou entalhes), de aço CA-24, como armadura passiva dos elementos de concreto da Ponte do Galeão, contudo, a informação a respeito do detalhamento é escassa. Por este fato, a colaboração da armadura passiva não foi considerada na verificação ao ELU.

Foram utilizadas na verificação as combinações normais últimas, conforme a NBR 8681 (ABNT, 2004):

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gi,k} + \gamma_q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Qj,k} \right]$$

De acordo com a equação acima, considerando $\gamma_g = 1,35$ (peso próprio de estruturas moldadas no local) e $\gamma_q = 1,50$ (ações variáveis em geral).

$$M_d = 1,35 \cdot 3.529,24 + 1,50 \cdot 1.580,45 = 7.135,15 \text{ kNm}$$

Embora tenha sido utilizada a favor da segurança a combinação normal última de ações, devido à natureza da sobrecarga representada pelo trem-tipo especial, cujos efeitos sobre a Ponte do Galeão são transitórios, poderiam ter sido utilizadas combinações normais especiais, com $\gamma_g = 1,25$ (peso próprio de estruturas moldadas no local) e $\gamma_q = 1,30$.

A Tabela 3 apresenta as informações relativas ao estado-limite último, obtidas com a utilização da rotina descrita e considerando as propriedades geométricas e mecânicas conhecidas do concreto e da armadura de protensão:

Tabela 3 – Propriedades da seção transversal no ELU

X	κ_x	Dom.	Concreto		Armadura ativa				Tensões	R_P	M_{Rd}
			ε_c	R_c	Deformações						
					Pré-along.	Descomp.	Compat.	Total			
(m)	-	-	(‰)	(kN)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(MPa)	(kN)	(kNm)
0,3691	0,209	2	-0,0026	-5515,1	3,6	1,1	10	14,7	1.170,4	+5515,1	8.996,8

Com esta verificação observa-se que o momento resistente de cálculo (M_{Rd}) é 26% superior ao momento solicitante de cálculo (M_d).

5. Considerações finais

A armadura de protensão não aderente, muito utilizada no início das aplicações de concreto protendido, é hoje desaconselhada por todas as normas no caso de pontes, e mesmo proibida em muitas delas, pois a falta de aderência aumenta consideravelmente o risco de fissuração excessiva, diminuindo a segurança à ruptura. A Ponte do Galeão, como muitas outras obras daquele momento, utilizou esse tipo de protensão. Entretanto, as inspeções que foram realizadas na Ponte do Galeão mostraram que, após pelo menos 30 anos de serviço, as estruturas continuavam bem.

Em relação ao trem-tipo especial, o modelo computacional revelou que, verificadas as hipóteses adotadas, especialmente em relação à durabilidade da ponte, os elementos estruturais que a compõem poderão resistir adequadamente às cargas especiais. Esta verificação levou em consideração os Estados Limites de Formação de Fissuras, de Descompressão (ou descompressão parcial) e, finalmente, em relação ao Estado Limite Último.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Finalmente, o estudo mostra o potencial de utilização de softwares como o CsiBridge pois, através da obtenção numérica de superfícies de influência, é possível visualmente e numericamente determinar qual(is) ponto(s) da estrutura, quando solicitados, apresentam os maiores efeitos para um elemento em análise.

Note-se que foram adotadas muitas hipóteses simplificadoras a favor da segurança, tais como a utilização de combinações normais últimas e seus coeficientes, a não existência de armadura passiva e não foi considerado o aumento da altura da seção no meio do vão.

Ainda sobre o modelo, destaca-se a característica de considerar a evolução das propriedades dos materiais ao longo do tempo, retratando de maneira mais fiel as reais condições teóricas desse tipo de obra. Destaca-se também que foi primordial para a realização deste estudo, o conhecimento do projeto original e o contato com os desenhos de projeto pois, com estas informações, o modelo numérico consegue representar de maneira mais fidedigna as condições reais da obra, item crucial para validação de modelo.

Referências

- ABNT, NBR 8681: Ações e Segurança nas Estruturas - Procedimento (Versão Corrigida: 2004). Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- ABNT, ABNT NBR 7188: Carga Móvel Rodoviária e de Pedestres em Pontes, Viadutos, Passarelas e outras Estruturas. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.
- ABNT, ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.
- ACI, ACI 318R-19: Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019.
- BÔSCOLI, G., VASCONCELOS, A.C.: "Ponte do Galeão", Revista Municipal de Engenharia, n.1/4, página 109, Rio de Janeiro, 1992.
- FREYSSINET, E.: Livro : "A revolution in the art of construction" - Eugène Freyssinet – Presses de l'École Nationale de Ponts et Chaussées, 2004.
- MACHADO, C.F.: "Ponte do Galeão – A obra que implantou o concreto protendido no Brasil", Carlos Freire Machado, Artigo CBPE, 2005.
- OLIVEIRA, L.O.S.B.: "Avaliação de cais protendido com pós tração considerando a durabilidade – análise numérica". Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2016.
- THOMAZ, E.C.S., Notas de aula Prof. Eduardo Thomaz -Artigo Instituto Militar de Engenharia,IME, Rio de Janeiro, R.J.
- VASCONCELOS, A.C.: "Alguns Aspectos Curiosos da História do Concreto", Palestra do Prof. Eng. Augusto Carlos de Vasconcelos, apresentada na SBHC. Sociedade Brasileira de História da Ciência - Revista vol. n3, 1989.
- VASCONCELOS, A.C.: Livro "O CONCRETO NO BRASIL " – Vol.1, Augusto Carlos de Vasconcelos, 1985.
- VASCONCELOS, A.C.: Livro "Pontes Brasileiras – Viadutos e Passarelas notáveis", página 307, PINI Editora, 1993.