

Projeto de Reabilitação de Ponte Histórica em Aço no Brasil

Hermes Carvalho¹

Resumo

O processo de reabilitação de obras de arte antigas vem aumentando nos últimos anos. A ponte pênsil Hercílio Luz, construída em 1926, encontra-se interditada desde 1991 devido ao seu elevado grau de corrosão e comprometimento de elementos estruturais. A avaliação da sua integridade estrutural foi realizada e, a partir das conclusões, um projeto completo de reabilitação foi desenvolvido, contemplando a substituição dos elementos metálicos comprometidos e reforços nas fundações existentes, considerando-se uma estrutura auxiliar para a sustentação do vão pênsil durante a recuperação. Para o desenvolvimento dos procedimentos da reabilitação será necessária a realização de um processo de transferência de cargas, uma vez que todo o carregamento do vão central é suportado pelas barras de olhal e deve ser transferido para a estrutura auxiliar. O processo de transferência de cargas é realizado por meio de uma sequência de macaqueamentos sincronizada dos nós inferiores da treliça do vão pênsil, determinada a partir de modelos numéricos tridimensionais, considerando-se as não-linearidades geométricas.

Palavras-chave: Reabilitação de estruturas; pontes metálicas; ponte Pênsil; transferência de cargas; não-linearidades geométricas.

Introdução

O processo de reabilitação de obras de artes antigas vem aumentando nos últimos anos (Costa *et al.*, 2014). Com várias estruturas ultrapassando a vida útil de projeto na Europa e nos Estados Unidos surge uma nova preocupação para os engenheiros da atualida-

de: a necessidade do desenvolvimento de projetos de reabilitação, visando a garantia da integridade estrutural e o respectivo aumento da vida útil (Radomski, 2013). A reabilitação se apresenta com uma alternativa atraente, uma vez que representa entre 10% e 30% do custo total de uma nova obra semelhante, para a maioria dos casos (Shim e Lee, 2015).



Figura 1 – Vão central pênsil da Ponte Hercílio Luz, com 339,5 m de comprimento.

1 Universidade Federal de Minas Gerais / Departamento de Engenharia de Estruturas. E-mail: hermes@dees.ufmg.br.

A ponte pênsil Hercílio Luz teve sua construção iniciada em 14 de novembro de 1922 e foi inaugurada e aberta ao tráfego em 13 de maio de 1926. A ponte tem o comprimento total de 819,5 m, sendo 259 m de viaduto insular, 339,5 m de vão central e 221 m de viaduto continental. Com esse vão central a ponte Hercílio Luz é uma das maiores pontes pênsis, e a última com barras de olhal incorporada à treliça no mundo. A ponte se estende sobre as águas de um dos estreitos do Oceano Atlântico, construída originalmente para sustentar uma estrada, uma ferrovia elétrica e o abastecimento de água para a cidade de Florianópolis. A Figura 1 apresenta uma vista do vão pênsil da Ponte Hercílio Luz.

A estrutura de aço tem o peso aproximado de cinco mil toneladas, sendo os alicerces e pilares responsáveis pelo consumo de 14.250 m³ de concreto. Os pilones metálicos (torres de suporte do vão central) medem 75 m de altura, a partir do nível do mar, e o vão central tem altura de 30 m em relação ao nível da água.

O vão central é constituído por uma treliça cujo perfil tem altura máxima no quarto do vão, onde os momentos fletores são máximos. Na parte central dessa treliça, ou seja, entre $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ do vão, as barras de olhal se incorporam à treliça, desempenhando o papel de corda superior. A corda superior da treliça, fora da parte central, é conectada às barras de olhal por meio de pendurais verticais (Steinman, 1922).

As inspeções visuais e testes não destrutivos realizados na ponte indicaram a necessidade de substituição das barras de olhal, selas, apoios dos pilones, pendurais e vários elementos da treliça. Diante disso foi concebida uma estrutura de sustentação auxiliar sob a treliça do vão central, onde todo o peso próprio da treliça será apoiado nessa estrutura. A transferência de cargas das barras de olhal para a estrutura auxiliar será realizada por meio de uma sequência de macaqueamento sincronizada dos nós inferiores da treliça.

Uma sequência inversa desse macaqueamento deverá ser utilizada para a remontagem da estrutura.

Avaliação da Integridade Estrutural

A primeira interdição da estrutura foi ocasionada pelo rompimento de uma barra de olhal. A partir desse evento avaliações da integridade estrutural da ponte foram intensificadas e, em 1991, ocorreu a interdição completa da ponte.

As últimas inspeções visuais foram realizadas entre os anos de 2009 e 2013. A Figura 2 apresenta fissuras e o estágio avançado de corrosão nas bases dos pilones. A corrosão acentuada do tabuleiro metálico é apresentada na Figura 3.

Devido ao fato do projeto ser muito antigo não havia registros da composição dos aços utilizados na construção. Para a caracterização dos aços presentes na estrutura foram realizados ensaios de dureza nos pilones, barras de olhal, selas e elementos de treliça, conforme a norma ASTM (ASTM E140-05e1, 2005) Figura 4. A partir da caracterização foram determinados os limites de escoamento dos materiais, necessários para as verificações de resistência dos elementos.

Nas inspeções das estruturas de concreto observaram-se sinais de desgaste superficial, sendo detectado que os blocos e os maciços são compostos por concreto ciclópico. Os projetos das fundações elaborados na época da construção indicaram a presença de blocos sobre rocha e dos maciços sobre rocha e estacas de madeira. Devido a dificuldade de acesso não foi possível realizar a verificação do estado de conservação das estacas de madeira, mas avalia-se que, devido a idade desses elementos, a integridade estrutural não pode ser garantida.



Figura 2 – Fissuras e elevado estágio de corrosão das bases dos pilones.



Figura 3 – Elevado estágio de corrosão do tabuleiro metálico.



Figura 4 – Medições de dureza nos principais elementos da estrutura.

Projetos de Reabilitação da Estrutura da Ponte

Diante do elevado estado de corrosão encontrado e de verificações dos níveis de tensões atuantes nos elementos da estrutura (com espessuras reduzidas devidas à corrosão), foi constatada a necessidade da troca dos principais elementos estruturais, tais como: barras de olhal, selas, bases dos pilones, pendurais, tabuleiro e diversos elementos da treliça.

Todas as fundações apresentaram a necessidade de introdução de reforços, devido a incerteza quanto a integridade estrutural. Os blocos e maciços receberão o encamisamento com novos blocos de concreto armado e novas estacas de concreto, para o suporte.

Para a substituição de vários elementos da parte metálica e reforço das fundações deve-se buscar uma condição de alívio das cargas da estrutura, aproximando do estado de sollicitação nula nos elementos. Assim, foi elaborada uma solução contemplando uma estrutu-

ra auxiliar de sustentação, localizada sob o vão central, tornando assim toda a operação de recuperação segura, uma vez que o vão central é completamente suportado pela estrutura auxiliar. Essa estrutura é composta por uma treliça tridimensional com quatro bases, apoiadas sobre fundações mistas independentes, conforme apresentado na Figura 5.

Outra alternativa foi avaliada, baseada na sustentação do vão central por cabos auxiliares posicionados sobre as barras de olhal, procedimento semelhante ao adotado na montagem inicial da estrutura. Entretanto, esse procedimento não reduz as cargas nas fundações dos pilones, exigindo maiores reforços e maiores cargas de macaqueamento para a troca dos aparelhos de apoio. Essa solução também não traz o nível de segurança do procedimento adotado, uma vez que conta com a resistência de elementos comprometidos para a sustentação e estabilização da estrutura, sendo assim descartada.

Transferência de Cargas

Uma vez montada a estrutura inferior auxiliar deve-se realizar a transferência de cargas das barras de olhal para essa estrutura. Tal operação será realizada por macaqueamento sincronizado de 54 pontos da treliça, na direção vertical, impondo deslocamentos em forma de parábola. Toda a operação será monitorada por meio de levantamentos topográficos e dados coletados de sensores posicionados na estrutura (extensômetros, sensores de deslocamento, termômetros, anemômetros, entre outros).

Para a determinação das configurações geométricas necessárias para anular as solicitações nas barras de olhal, foi desenvolvido um modelo em elementos finitos no *software* SAP2000® (2009), incluindo-se os efeitos das não linearidades geométricas nos cálculos, fundamental para a análise de estruturas com grandes gradientes de deslocamento. A avaliação da imposição incremental de deslocamentos na porção inferior da

treliça indica os valores de deslocamentos em cada macaco hidráulico necessários para anular as solicitações em uma dada barra de olhal. A confirmação de hipótese de carga nula em cada elemento será verificada experimentalmente, *in loco*, com a verificação das tensões medidas com sensores de deformação do tipo rosetas.

Basicamente a operação da transferência de carga é composta por duas fases.

– **Fase 1:** macaqueamento dos 54 pontos em forma de parábola, com deslocamentos verticais para cima, visando a configuração geométrica que resulte na condição de carga nula para as barras de olhal externas à treliça. Após a realização da fase 1 as barras de olhais externas podem ser desacopladas da treliça. Mesmo com a estrutura da treliça desacoplada existirá carga normal de tração retida nas barras de olhal internas à treliça, devido a sequência de montagem adotada inicialmente na ponte. A fase 1 considera o deslocamento total vertical para cima igual a 550 mm,

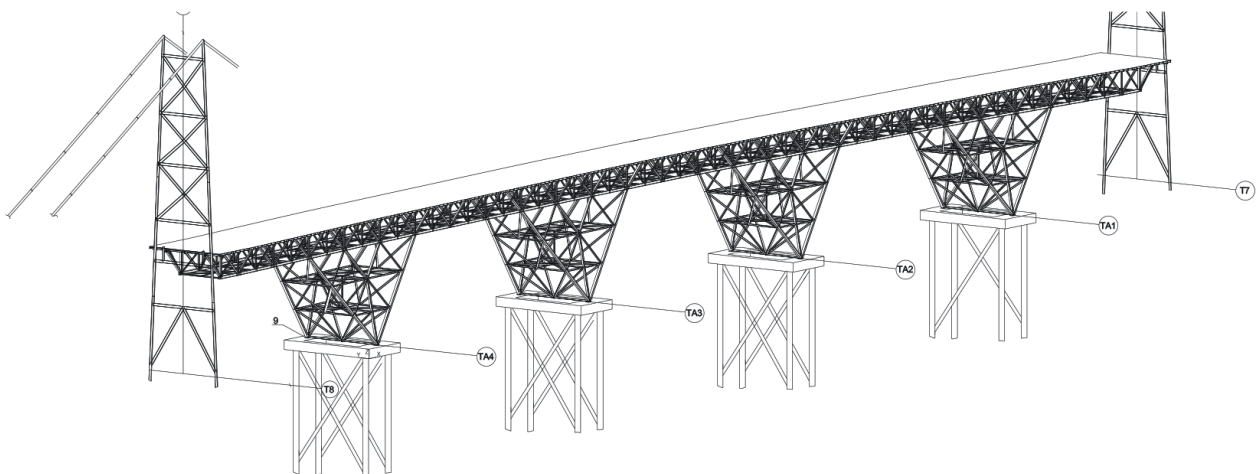


Figura 5 – Estrutura inferior auxiliar de sustentação do vão central.

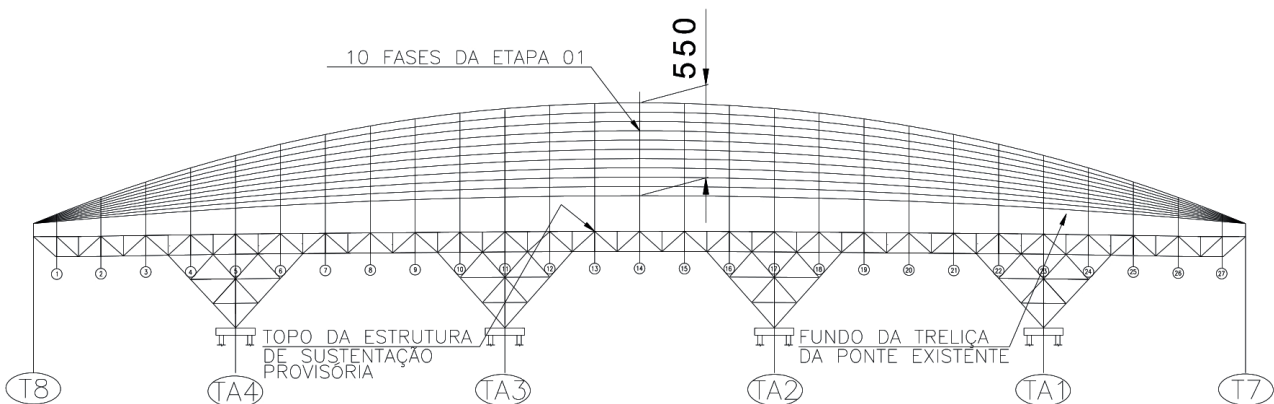


Figura 6 – Etapas da Fase 1 da transferência de cargas.

realizado em 10 etapas, sendo cada uma com deslocamento de 55 mm. A Figura 6 apresenta um esquema das etapas que compõem a Fase 1.

– **Fase 2:** macaqueamento dos 54 pontos em forma de parábola, com deslocamentos verticais para baixo, objetivando a configuração geométrica que introduza cargas de compressão nas cordas superiores da treliça, que sobrepostas às cargas de tração residuais retidas nessas barras, resultarão em carga nula nesses elementos. Os pares das barras de olhal, simétricos, que apresentarem treliça força normal nula ao longo do processo de rebaixamento podem ser retirados.

Para a realização do desacoplamento das barras de olhal da treliça, ao final da Fase 1, é necessário o estaiamento dos pilones de apoio do vão central, para garantir a estabilidade do conjunto.

A partir do desacoplamento total entre as estruturas e abertura das barras de olhal internas à treliça, todas as substituições e reforços podem ser realizados. Após a recuperação dos elementos e reforço das fundações a estrutura deverá ser remontada na sequência inversa à adotada nas operações de desmontagem.

Alterações Implementadas nas Estruturas de Concreto e Fundações

As fundações dos vãos de acesso, originalmente, foram projetadas como blocos de concreto apoiados sobre rocha. Uma vez que não se consegue confirmar a efetividade do apoio desses blocos sobre a rocha,

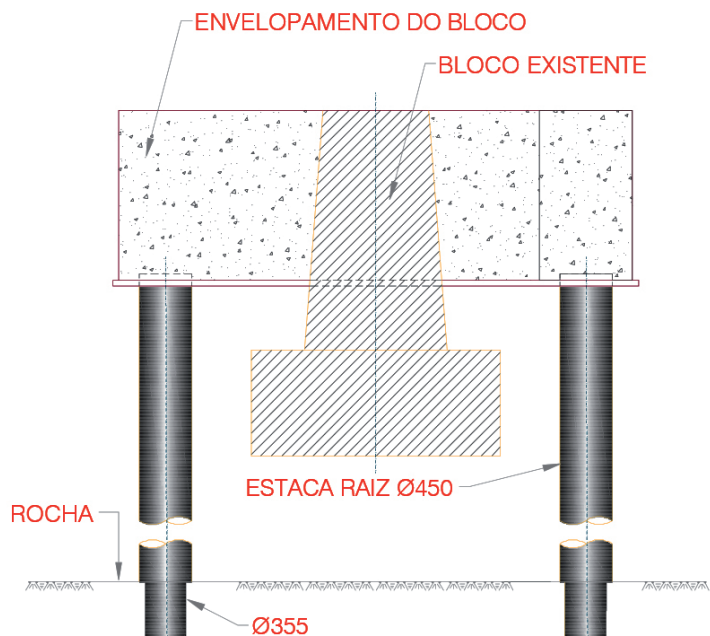
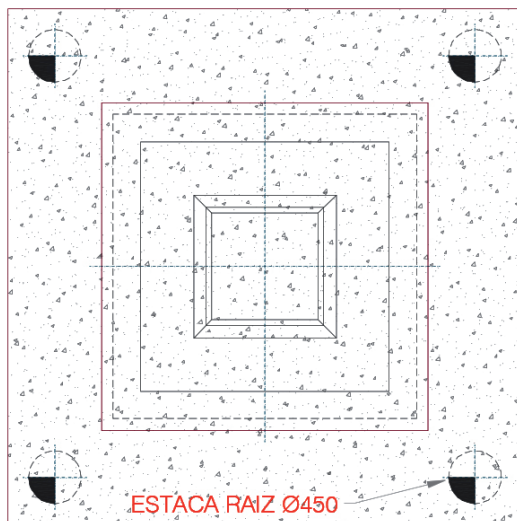


Figura 7 – Reforço típico das bases dos vãos de acesso da Ponte Hercílio Luz.

foram elaborados projetos para reforço dos blocos, contemplando o envelopamento das estruturas existentes por novos blocos, maiores, apoiados sobre estacas de concreto com 450 mm de diâmetro. A Figura 7 apresenta um detalhe do reforço típico adotado nas fundações dos vãos adjacentes.

O mesmo conceito de envelopamento dos blocos, porém, com barras de aço inseridas nos blocos existentes, foi utilizado para o reforço das fundações dos pilones de suporte do vão central. Para a execução da concretagem do reforço desses blocos serão utilizadas enscadeiras pré-fabricadas ao entorno da estrutura existente.

Devido a magnitude das solicitações, o reforço elaborado foi o desenvolvido para os blocos de ancoragem. Também foi utilizado o conceito de envelopamento, sendo o bloco de envelopamento apoiado sobre estacas e microestacas.

Alterações e Verificações dos Elementos que Compõem as Estruturas de Aço

As estruturas de aço que compõem a ponte Hercílio Luz foram as mais afetadas pela ação do tempo. O tabuleiro, inicialmente construído com longarinas metálicas e pranchas de madeira, será substituído por grades metálicas.

Todos os elementos com geometria complexa tiveram sua resistência avaliada com base em modelos de elementos finitos. As peças fundidas tais como o

apoio dos pilones e as selas serão substituídas por peças novas, também fundidas. Na Figura 8 apresentam-se as tensões obtidas na análise do apoio dos pilones.

As barras de olhal serão substituídas por novas barras usinadas, compostas por aço de alta resistência, com limite de escoamento igual a 980 MPa. A geometria das extremidades das barras de olhal foi avaliada e a geometria original foi mantida, conforme apresentado na Figura 9.

As barras de olhais serão substituídas por elementos novos, constituídos por aço de alta resistência,

com limite de escoamento igual a 980 MPa. Algumas modificações na geometria da barra de olhais foram avaliadas, entretanto, a geometria original do furo circular foi mantida. A Figura 13 apresenta a geometria da barra de olhais, com comprimento total de aproximadamente 15000 mm.

Modelos de análise “Global-Local” foram desenvolvidos para o estudo da viga em fadiga das juntas rebitadas (Carvalho *et al.* 2018). Nessa metodologia, as solicitações globais na estrutura são obtidos por meio do modelo completo da ponte, e impostos

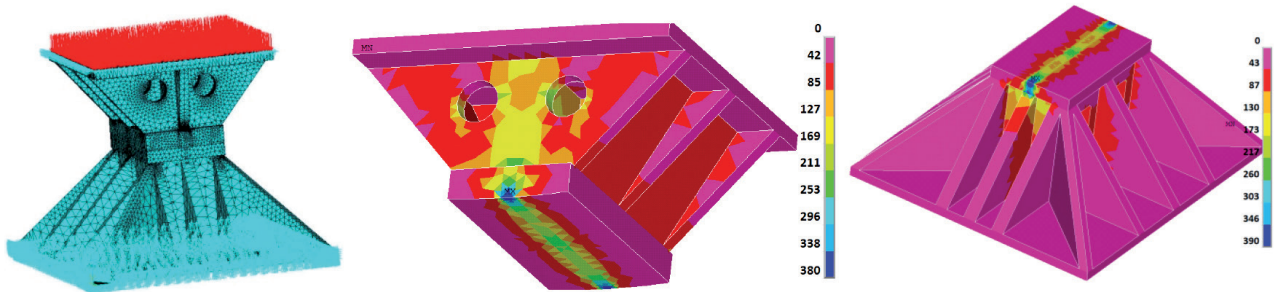


Figura 8 – Modelo e distribuição de tensões de von Mises obtidas para o apoio dos pilones [MPa].

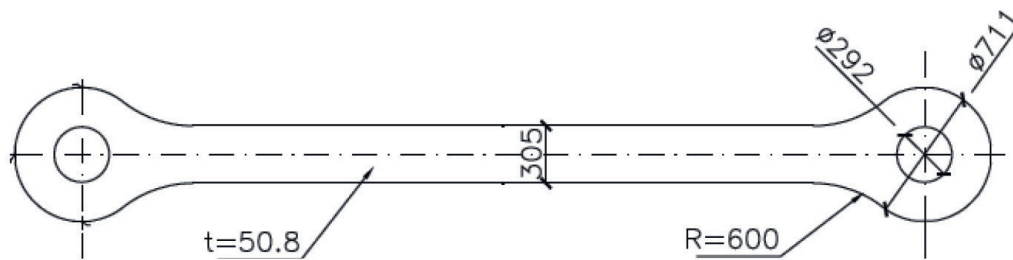


Figura 9 – Geometria adotada para o furo da barra de olhais.

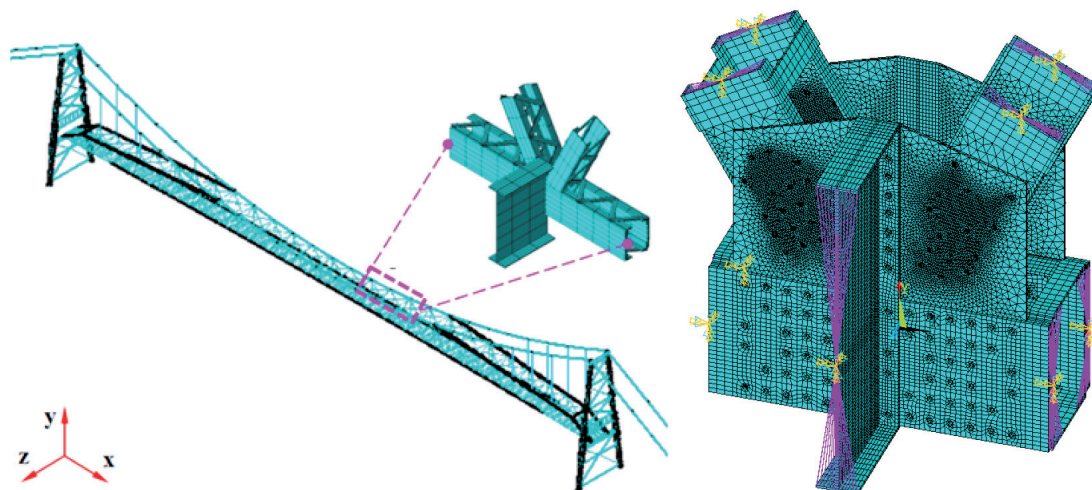


Figura 10 – Modelo “Global-Local” para avaliação da vida em fadiga.

ao modelo local refinado da região objeto de estudo. A vida em fadiga foi avaliada com base na regra do dano acumulado, deformações locais e do número de ciclos, sendo a relação entre a vida em fadiga e as deformações locais obtida com a lei de Basquin e Manson-Coffin. (Carvalho *et al.* 2018). A Figura 10 apresenta o modelo global e um modelo local de um nó da treliça central.

Estágio Atual da Obra

Atualmente (01/02/2018) a montagem da estrutura inferior se encontra concluída. O processo de transferência de carga foi realizado em várias etapas, ao longo do ano de 2017, e também já se encontra concluído. A montagem e substituição de elementos de aço danificados, reabilitação das fundações e transferência de carga reversa serão realizadas durante o ano de 2018.



Figura 11 – (a) Pré-montagem da treliça da estrutura auxiliar no canteiro; (b) transporte das treliças em flutuantes.



Figura 12 – Montagem das torres da estrutura auxiliar.



Figura 13 – Montagem das treliças intermediárias da estrutura auxiliar.



Figura 14 – Fabricação das barras de olhais e selas.



Figura 15 – Calços metálicos, macacos e unidade hidráulica utilizados na transferência de cargas.



Figura 15 – Instalação das ensecadeiras e procedimento de reforço das fundações.

Os principais elementos estruturais necessários para a recuperação estão em processo de fabricação e montagem. As Figuras 11 a 13 apresentam várias etapas do conjunto de estrutura auxiliar e a Figura 14 apresenta as barras de olhais e as selas durante o processo de fabricação. A Figura 15 apresenta os calços metálicos utilizados para escorar a estrutura do vão central, os macacos hidráulicos e uma das unidades hidráulicas utilizadas na transferência de cargas e a Figura 16 apresenta a ensecadeira e reforços das bases dos pilones.

Conclusões

A Ponte Hercílio Luz, devido ao seu estado avançado de corrosão, apresenta a necessidade de reabilitação e recuperação de sua estrutura, para se tornar apta ao funcionamento. Um projeto de recuperação foi elaborado considerando-se uma estrutura auxiliar inferior localizada sob o vão central da ponte. Para que a ponte se apoie sobre a estrutura auxiliar é necessária a transferência de cargas das barras de olhal para essa estrutura, realizada por meio do macaqueamento sincronizado de 54 pontos da treliça do vão principal. Após a operação de transferência de cargas, todas as intervenções da estrutura poderão ser realizadas. Todas as fundações serão reforçadas com o envelopamento dos blocos existentes e apoio sobre novas estacas de concreto. As barras da treliça principal, os vãos de acesso e os elementos que compõem os pilones serão substituídos ou reforçados. Os elementos principais da estrutura como as barras de olhal, selas, bases dos pilones e ancoragens das barras de olhais serão substituídos integralmente. A remontagem da estrutura deverá seguir, em sequência contrária, as etapas utilizadas na transferência de cargas das barras de olhal para a treliça auxiliar.

Agradecimentos

O autor agradece ao DEINFRA-SC e as empresas RMG Engenharia e Teixeira Duarte.

Referências

- ASTM E140-05e1, "Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness". ASTM International, (2005).
- Costa, B. J. A., Figueiras, J. A. "Rehabilitation and condition assessment of a centenary steel truss bridge". *Journal of Constructional Steel Research*, v. 89, p. 185-197, 2014.
- Radomski, W. "Bridge rehabilitation". *Stahlbau*, vol. 72. Issue 7, p. 506-512, 2013.
- SAP 2000, v. 14.1.0. Computers and Structures, Inc, 2009.
- Shim, H. S., Lee, S. H. "Developing a probable cost analysis model for comparing bridge deck rehabilitation methods". *KSCE Journal of Civil Engineering*, p. 1-9, 2015.
- Steinman, D. B. "A practical treatise on suspension bridges", London, John Wiley e Sons, Inc. 1922.
- Liu, Z., Hebdon, M. H., Correia, J. A. F. O., Carvalho, H., Vilela, P. M. L.; Jesus, A. M. P., Calçada, R. A. B. "Fatigue assessment of critical connections in a historic eye-bar suspension bridge". *Journal of performance of constructed facilities*, in press, 2018.
- Liu, Z., Correia, J. A. F. O., Carvalho, H., Raposo, P., Jesus, A. M. P., Calçada, R. A. B., Berto, F. "Global-local fatigue assessment of an ancient riveted metallic bridge based on sub-modelling of the critical detail." *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, p. 1-15, 2018.