

Metodologia de Substituição das Diagonais Tracionadas das Treliças da Ponte Histórica Dom Pedro II em Cachoeira-BA

Alfredo Pinto da Conceição Neto¹, Alberto Belloti Colombo², Rafael Petille Hune³, Túlio Nogueira Bittencourt⁴, William Dener Assis Fonseca⁵

¹ GMEC / PEF / Escola Politécnica da USP / alfredo.pcn@uol.com.br

² GMEC / PEF / Escola Politécnica da USP / abcolombo@gmail.com

³ GMEC / PEF / Escola Politécnica da USP / pet.hune@gmail.com

⁴ GMEC / PEF / Escola Politécnica da USP / tbitten@gmail.com

⁵ VLI Logística / william.fonseca@vli-logistica.com.br

Resumo

A ponte metálica Dom Pedro II, em Cachoeira-BA, foi construída em ferro pudlado e inaugurada em 1885 pelo imperador brasileiro. Patrimônio histórico nacional, é uma ponte rodo-ferroviária caracterizada por quatro vãos isostáticos com treliças laterais em cada vão. Encontra-se sob processo intenso de recuperação e reforço, iniciado no ano de 2017. As atividades desenvolvidas na fase de substituição de todas as diagonais tracionadas das treliças laterais (as quais, originalmente em ferro pudlado, encontravam-se em processo avançado de corrosão), realizadas somente no período noturno (21:00h às 05:00h) com interrupção do tráfego de veículos sobre a ponte, foram delimitadas pelas dificuldades operacionais durante o curto período diário de trabalho. Este trabalho aborda, dos pontos de vista experimental (monitoramento) e da modelagem numérica, discussões sobre qual a metodologia mais apropriada que deveria ser seguida durante a troca dessas diagonais, tendo em vista questões de resistência e segurança estrutural. Diferentes possibilidades são discutidas, levando-se em conta as limitações práticas impostas pela natureza das operações realizadas na obra, durante o período diário de intervenção. Na fase inicial da recuperação estrutural, em um dos vãos da ponte, diagonais antigas em ferro pudlado e novas, em aço, das treliças laterais foram monitoradas com extensômetros elétricos soldados, de maneira sistemática, visando determinar as tensões residuais instaladas nas barras (através do alívio de deformações/tensões) e as redistribuições de deformações / tensões entre as barras do entorno de cada barra substituída. Também, durante o período diurno (05:00h às 21:00h), no qual as passagens de trem e de demais veículos eram permitidas, monitoraram-se as barras instrumentadas durante as passagens de trens cargueiros carregados. Esses estudos (metodologia de substituição) permitiram orientar o trabalho operacional de troca das diagonais tracionadas em todos os quatro vãos isostáticos da obra, minimizando a solicitação estrutural durante as passagens diárias de trens na ponte.

Palavras-chave

pontes metálicas; estruturas; monitoramento; diagonais tracionadas; substituição

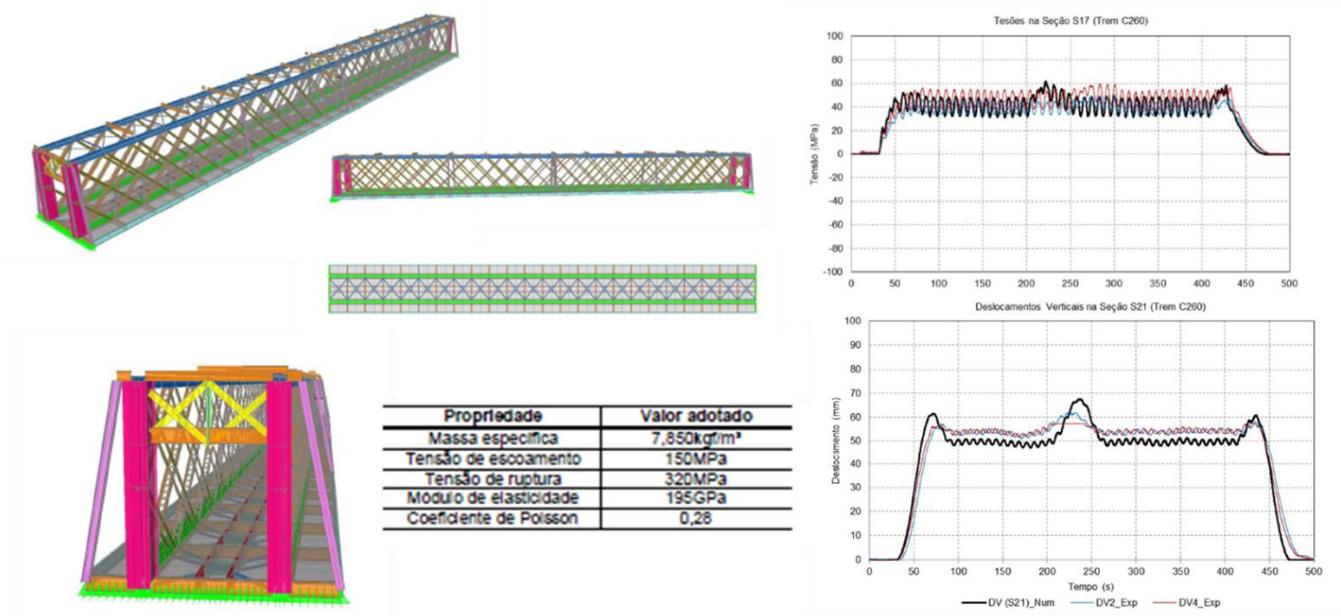
1.Introdução

Uma vista geral da Ponte Dom Pedro II, sobre o Rio Paraguassú, encontra-se na Figura 1, abaixo. No ano de 2012 foi feita uma análise estrutural dessa ponte, a qual envolveu o seu monitoramento durante a passagem de veículos rodoviários e ferroviários. No caso dos veículos ferroviários, além da medição de deformações, deslocamentos e acelerações, mediram-se cargas de roda (e cargas de eixo, por conseguinte), tendo sido realizada, também, a modelagem numérica da estrutura, da qual resultou um modelo numérico calibrado, capaz de ser utilizado para simulações realistas do comportamento estrutural (Figura 2). Na Figura 3 tem-se, para alguns elementos de treliça da estrutura, o panorama das tensões devidas ao peso próprio e das tensões máximas ocorridas durante a passagem de um trem cargueiro carregado (chamado de Trem C260), típico da ferrovia, conforme calculadas para o modelo numérico calibrado.

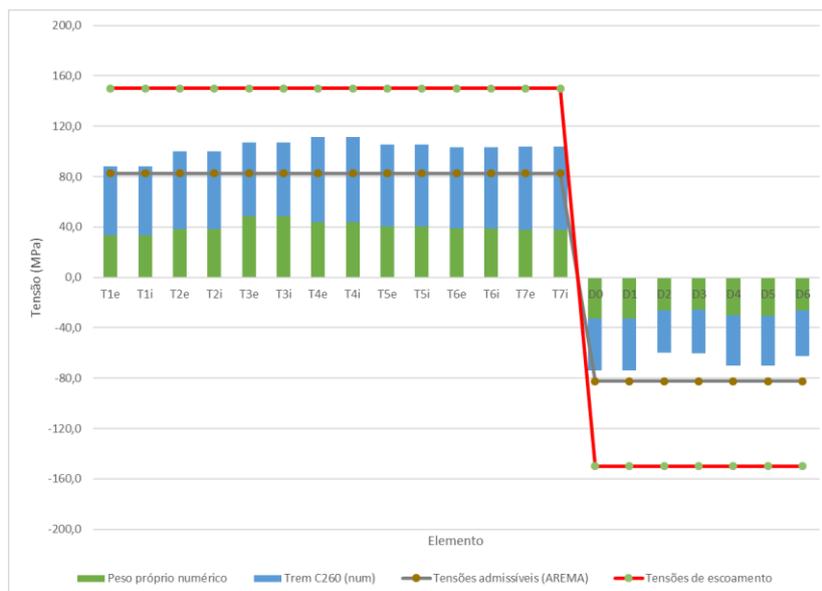


- Extensão: 366m
- Vãos: 4 (isostáticos de 91,60 m)
- Altura: 7,62m
- Largura total: 10,20 m (incluindo suas passarelas para pedestres)
- Material: Ferro Puddledado

**Ponte D. Pedro II sobre o Rio Paraguassú em Cachoeira-BA.
Figura 1**



**Aspectos do “Modelo Numérico Calibrado” para passagem do Trem C260.
Figura 2**



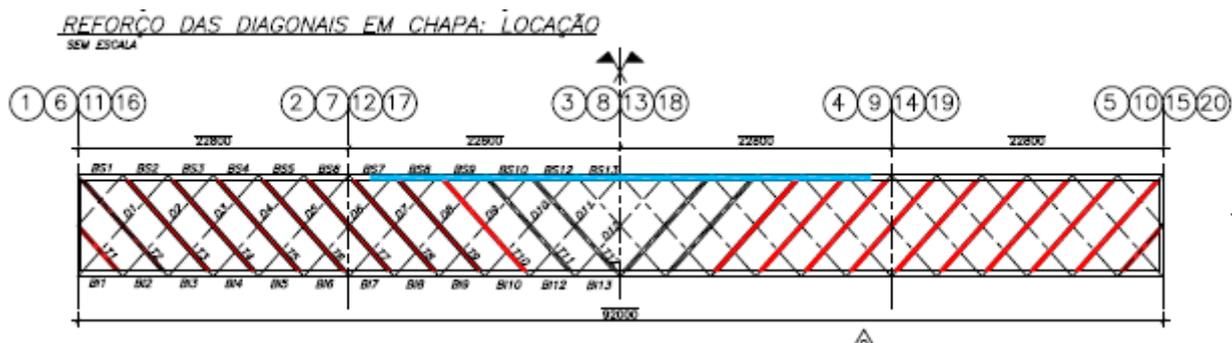
Tensões em algumas diagonais tracionadas e comprimidas devidas ao peso próprio e à passagem do Trem C260. Valores do modelo numérico calibrado, comparados com as tensões admissíveis (AREMA – 82,5 MPa) e de escoamento (150 MPa) para o ferro puddlado.

Figura 3

Em face do estado de corrosão instalado na velha estrutura [2,4] e dos níveis de tensão ocorrentes (medidos no monitoramento e refletidos no modelo numérico calibrado — Figura 3, acima—), os responsáveis pelo gerenciamento da ponte decidiram realizar a troca de todas as diagonais tracionadas das treliças laterais que sustentam a estrutura. Algumas dessas diagonais, em um dos vãos da ponte, as quais foram monitoradas durante as suas operações de troca, conforme descrito a seguir, estão indicadas na Figura 3. Tratam-se das barras T1e a T7i, símbolos tais que: T indica barra de diagonal tracionada, “i” refere-se à face interna da treliça, ao lado da pista, e “e” à face externa, ao lado da passarela lateral. D0 a D6 referem-se às diagonais comprimidas envolvidas no monitoramento. Na Figura 4, a seguir, essas diagonais são indicadas com maior clareza. Este trabalho trata da metodologia adotada para a troca de diagonais, da instrumentação realizada durante as operações de troca e dos resultados encontrados, análise e conclusões.

2. Metodologia de troca das diagonais tracionadas

O número total de barras de diagonais tracionadas em ferro puçludo a serem substituídas nas duas treliças de sustentação da ponte, em seus quatro vãos, era igual a 384. Em face da necessidade de utilização da ponte para o tráfego de veículos em geral, trens e transeuntes no período diurno, ficou acertado com as autoridades que as operações de substituição de diagonais somente poderiam ser realizadas no período noturno, entre as 21:00h e as 05:00h. Durante esse período todo o tráfego de veículos era interrompido, permitindo-se apenas a passagem de transeuntes em uma das passarelas laterais da ponte. Tal quantidade de elementos a substituir, sendo o trabalho permitido somente no horário acordado, mostra que não se tratava de uma operação corriqueira. Assim sendo, a definição da metodologia de abordagem adequada foi questão importante durante as fases de projeto e de realização da intervenção. O método adotado pelo projetista [5] e realizado em campo consta da Figura 4.



Nota: Diagonais T1e, T1i, ..., etc. conforme definido anteriormente; diagonal comprimida, D0, está à esquerda de D1.

SEQUÊNCIA EXECUTIVA:

ANTES DA FABRICAÇÃO E MONTAGEM DAS CHAPAS DE REFORÇO, DEVE-SE FAZER GABARITO DAS PEÇAS (MOLDES) NO LOCAL DE IMPLANTAÇÃO DOS ELEMENTOS. TODAS AS MEDIDAS REAIS E INTERFERÊNCIAS DEVEM SER CADASTRADAS E ANALISADAS DE FORMA LOCALIZADA E PONTUAL.

1 – A SUBSTITUIÇÃO DAS PEÇAS DEVE SER FEITA DO CENTRO PARA AS EXTREMIDADES DA ESTRUTURA CONFORME NUMERAÇÃO INDICATIVA DE SUBSTITUIÇÃO DOS ELEMENTOS. INICIAR PELA FILA "A" A SUBSTITUIÇÃO DA DIAGONAL "EXTERNA" T10, NÚMERO DE ORDEM ①. APÓS O TÉRMINO DA OPERAÇÃO REPETIR O PROCEDIMENTO PARA A DIAGONAL INTERNA T10 DA MESMA FILA "A".

2 – REPETIR O PROCEDIMENTO ACIMA PARA A MESMA DIAGONAL T10, NÚMERO DE ORDEM ② PARA A DIAGONAL EXTERNA DA FILA "B" E POSTERIORMENTE A DIAGONAL INTERNA DA MESMA FILA "B".

3 – FINALIZADA A TROCA DA T10 REPETIR O MESMO PROCEDIMENTO AGORA PARA A DIAGONAL T10 NÚMERO DE ORDEM ③. REPETIR O MESMO PROCEDIMENTO DE SUBSTITUIÇÃO PARA AS FILAS "A" E "B".

4 – FINALIZADA A TROCA DA T10 DEVE-SE INICIAR A TROCA DA DIAGONAL T9 NÚMERO DE ORDEM ④. SUBSTITUIR A DIAGONAL "EXTERNA" DA FILA "A" E DEPOIS REPETIR O MESMO PROCEDIMENTO PARA A DIAGONAL INTERNA DA MESMA FILA "A".

FINALIZADA A FILA "A", REPETIR O PROCEDIMENTO PARA A DIAGONAL T9 DA FILA "B", PRIMEIRO A DIAGONAL "EXTERNA" E DEPOIS A "INTERNA".

5 – FINALIZADA A TROCA DA T9 REPETIR O PROCEDIMENTO PARA A DIAGONAL T9 NÚMERO DE ORDEM ⑤.

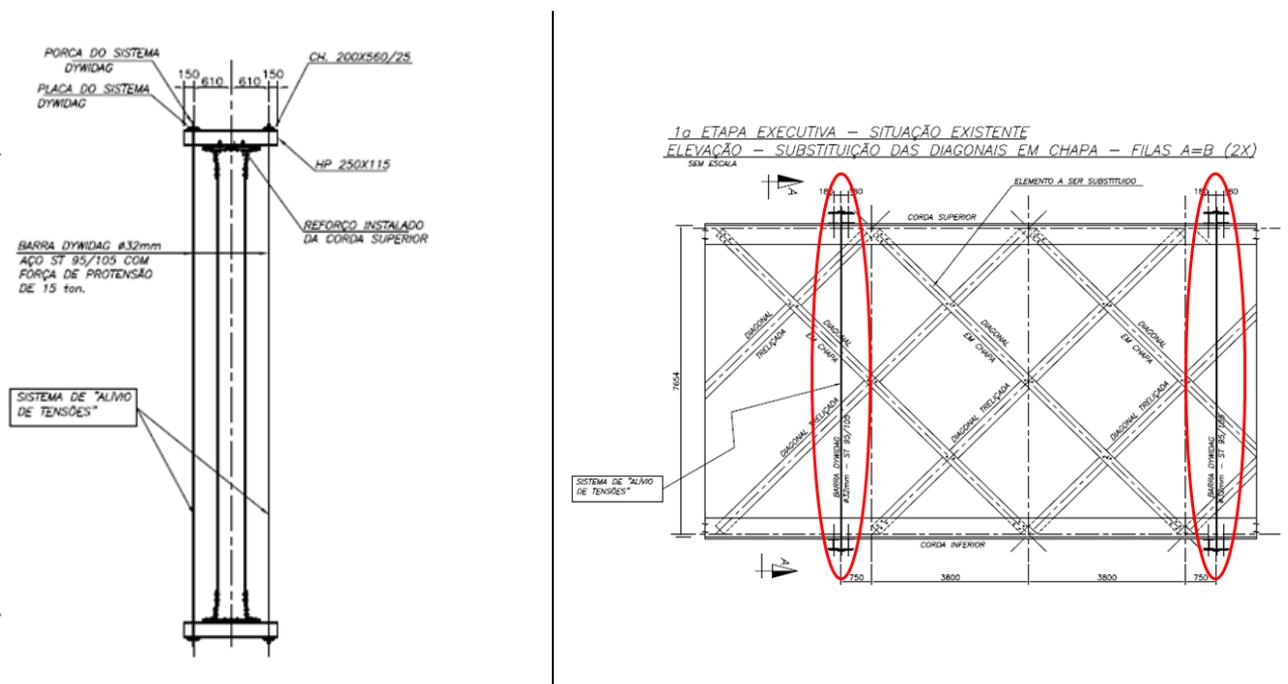
REPETIR O MESMO PROCEDIMENTO PARA A FILA "A" DIAGONAL "EXTERNA" E DEPOIS "INTERNA" E DEPOIS FILA "B", DIAGONAL "EXTERNA" E DEPOIS "INTERNA".

6 – REPETIR O PROCEDIMENTO ACIMA AS DEMAIS POSIÇÕES CONFORME INDICADO.

Metodologia de troca de diagonais prevista no projeto. O método se aplica tanto à treliça da fila A (montante) como à treliça da fila B (jusante), para cada vão da ponte.

Figura 4

Convém comentar, brevemente, que outros métodos podem ser adotados para a troca de diagonais tracionadas de uma ponte. Na Figura 5 são apresentadas duas outras possibilidades, as quais foram discutidas durante a fase do projeto de intervenção e reforço estrutural adotado. Em 5.a tem-se, simbolicamente, o caso da solução convencional que consiste da aplicação de um sistema com barras Dywidag na direção da barra tracionada a ser substituída, ancorado em chapas que se ancoram na estrutura global. Tracionando-se essas barras Dywidag com o uso de atuador hidráulico e célula de carga, impõe-se à (s) barra (s) a trocar o alívio de suas tensões originais de tração (através de compressão superposta) tal que, após o alívio total, realiza-se a troca. O método permite, vantajosamente, o alívio e troca da diagonal tracionada, sem a transferência de esforços para as barras adjacentes e, além disso, o conhecimento dos valores dos esforços de tração presentes na barra tracionada, antes da sua troca (determinação da parcela do peso próprio da estrutura que estava sendo absorvido pela barra que foi trocada). O esforço anterior de tração na diagonal antiga é transferido, com a mesma intensidade inicial, para a nova barra instalada. A segunda possibilidade é aplicar esforços com dois sistemas análogos ao do caso da Figura 5.a em duas seções da treliça (Figura 5.b) até aliviar as tensões ocorrentes no elemento a ser substituído, controlando o alívio de tensões de tração através do uso de células de carga e extensômetros elétricos. Note-se que, neste caso, durante a operação de troca, as barras circunvizinhas (diagonais tracionadas e comprimidas) são significativamente solicitadas. Após realizada a troca, procede-se de maneira inversa, aliviando-se as tensões nas barras Dywidag auxiliares e medindo-se o alívio de deformações com extensômetros elétricos instalados nas novas barras. Neste segundo caso, também é possível obter informação sobre a parcela do peso próprio que estava sendo absorvida pela diagonal que foi trocada.



a) Alívio de tensões em uma barra tracionada.

b) Alívio de tensões em diagonal tracionada: previsão inicial do projeto.

Trocas de diagonais: procedimentos possíveis para alívio de tensões em barras tracionadas.

Figura 5

Ambos os sistemas acima apresentados foram discutidos ao longo do planejamento dos trabalhos. No entanto, considerados não só os aspectos estruturais mas também os de natureza operacional e logística envolvidos (notando que os trabalhos só foram permitidos no período noturno, conforme descrito), a decisão tomada foi pelo método de troca da Figura 4. Note-se que há muitas possibilidades diferentes que podem ser adotadas para a realização das trocas de diagonais. Algumas dessas possibilidades, associadas ao método adotado, são discutidas a seguir, com o auxílio de resultados experimentais advindos do monitoramento estrutural com extensômetros elétricos que foi realizado durante os trabalhos em campo. No escopo do trabalho realizado, discutem-se questões relacionadas com a segurança estrutural, tendo em vista ressaltar aspectos de otimização metodológica nos procedimentos adotados.

3. Instrumentação e cálculo de tensões e forças normais nas barras durante trocas de diagonais tracionadas

Utilizando extensômetros elétricos soldados (“spot welding”), barras antigas lisas e duplas de diagonais tracionadas que foram substituídas (ferro pudlado), barras novas de diagonais tracionadas (Aço A572-50) e barras treliçadas de diagonais comprimidas (ferro pudlado) foram instrumentadas, sequencialmente (Figuras 4 e 6), visando determinar as deformações associadas ao processo de trocas, seguindo a metodologia descrita na Figura 4. Utilizaram-se extensômetros elétricos da marca Vishay e sistemas de aquisição de sinais desse mesmo fabricante, sendo que todo o conjunto foi calibrado previamente [3]. A partir das deformações medidas, tomando em consideração as áreas das seções transversais dos elementos antigos e dos elementos novos e as propriedades dos materiais associados, tensões e forças normais nas barras foram calculadas. Foram considerados tensões e esforços atuantes (remanescentes, antes do alívio de tensões nas barras diagonais retiradas, e decorrentes da redistribuição de esforços nos diferentes elementos das vizinhanças desses elementos que foram retirados). No monitoramento foram consideradas as presenças dos equipamentos utilizados sobre a ponte durante as trocas, tendo-se descontado todos os seus efeitos adicionais que interferiram nas aquisições de dados. Em cada noite de trabalho foram trocadas apenas duas chapas lisas de diagonal, visto que não era possível realizar trocas adicionais em face do número de horas de trabalho disponível, em cada dia, durante o período de interdição da ponte. A título de informação complementar, aproximadamente 192 noites de trabalho foram necessárias para a troca de todas as chapas das diagonais tracionadas da ponte. Esse relevante trabalho encontra-se, atualmente, concluído.

Após a troca de todas as diagonais tracionadas que foram instrumentadas, portanto, quando todas as novas barras em aço substitutas já estavam instaladas, foram monitoradas as passagens de dois trens de carga carregados sobre a Ponte Dom Pedro II. Esses resultados não estão apresentados neste trabalho. No entanto, os resultados do modelo numérico calibrado, consistentes, permitiram mostrar os efeitos desse tipo de carregamento na estrutura com relação à metodologia de troca de diagonais adotada e uma simulação dos mesmos é apresentada no item a seguir.



Propriedades dos materiais:

•Ferro Pudlado:

$E = 195 \text{ GPa}$

Tensão de ruptura a tração: 320 MPa

Tensão de escoamento: 150 MPa

Tensão admissível: 55% da tensão de escoamento = 82,5 MPa (AREMA) [1]

Coefficiente de Poisson = 0,28

•Aço A572-50 – chapas novas que substituíram as diagonais tracionadas do Tramo 4:

$E = 210 \text{ GPa}$

Tensão de ruptura a tração: 450 MPa

Tensão de escoamento: 345 MPa

Tensão admissível AREMA [1]: 55% da tensão de escoamento = 189,75 MPa

Coefficiente de Poisson = 0,28

Instrumentação das barras das diagonais tracionadas (barras lisas duplas em cada diagonal) e comprimidas (barras treliçadas) com extensômetros elétricos soldados, ligados em ponte completa. Barras lisas externas ao lado da passarela (T1e a T7e), barras lisas internas (T1i a T7i) e diagonais treliçadas (D0 a D6).

Figura 6

4. Apresentação e análise dos resultados

Os resultados encontrados estão apresentados através de tabela e de gráficos, nos quais são mostrados os efeitos estruturais da metodologia de substituição de diagonais tracionadas que foi adotada no projeto de conservação e reforço (item 4.1). No item 4.3 é mostrado, a título de exemplo, com base nos esforços medidos durante o monitoramento, qual teria sido o efeito de uma possível alteração relevante do plano de trabalho previsto. Os gráficos apresentados correspondem a situações referidas à realidade experimental e permitem concluir sobre a eficiência do trabalho realizado na obra.

4.1 Distribuição de esforços nas barras quando da troca de barras tracionadas

De acordo com o método de substituição de diagonais previsto em projeto e realizado na obra, imediatamente após a troca de cada diagonal tracionada em ferro puclado, a barra de aço A572-50 que a substituiu fica com carga axial nula. O esforço axial, anteriormente suportado pela barra que foi substituída, se distribui em diferentes parcelas pelas barras do entorno, isto é, pelos montantes superior e inferior e pelas diferentes diagonais em barras lisas e treliçadas das vizinhanças. A força axial que estava sendo suportada pela barra substituída, assim como as forças axiais redistribuídas nas barras vizinhas, todas foram calculadas a partir das deformações medidas através do sistema de instrumentação instalado. Um exemplo ilustrativo, com os valores residuais medidos imediatamente após as trocas das barras T2e e T2i, encontra-se na tabela da Figura 7, abaixo. Nessa mesma figura também se encontram os valores das forças de alívio medidas em todas as diagonais trocadas durante o período de instrumentação e medições em campo. Essas forças correspondem aos esforços normais que as barras trocadas, em ferro puclado, estavam suportando no momento da troca (correspondem à parcela do peso próprio da estrutura suportada pelas barras no instante imediatamente anterior ao início de cada troca). Evidentemente, os valores desses esforços são dependentes da sequência de trabalho adotada durante as operações de troca. Durante o período de instrumentação e monitoramento em campo (aproximadamente 30 dias), os resultados apresentados neste item refletem todos os aspectos relativos às operações realizadas em campo pela empreiteira. A sequência de trocas durante o período de medições, em ordem cronológica, também está informada na Figura 7. Nota-se que a magnitude dos esforços transferidos para as barras do entorno é relevante. Observa-se, também, como variavam as magnitudes dos esforços que atuavam nas barras de ferro puclado antes da troca (parcelas do peso próprio), dependentes do método de troca das diagonais tracionadas.

a)

Barras	Esforços (kN) após troca	
	T2e	T2i
T1e	76,8	37,1
T1i	66,2	41,9
T2e	0,0	105,5
T2i	147,2	0,0
T3e	41,7	29,8
T3i	42,7	26,0
T4e	12,6	9,6
T4i	13,6	7,7
T5e	2,7	1,8
T5i	0,0	-1,8
T6e	-20,8	-10,7
T6i	-18,6	-11,1
T7e	-1,5	0,7
T7i	-3,0	0,7
D0	-39,3	-8,3
D1	-10,7	-15,4
D2	-27,4	-14,2
D3	55,6	27,6
D4	-16,4	-8,1

b)

Barras (ferro puclado)	Esforços imediatamente anteriores à troca (kN)
T2e	349,5
T2i	261,7
T3e	43,7
T3i	58,5
T4e	288,3
T4i	226,8
T5e	157,8
T5i	204,2
T6e	202,9

D5	-14,5	72,0
D6	0,0	-0,7

Nota:

Sequência das trocas (ordem cronológica): T6e, T5i, T5e, T4i, T4e, T3i, T3e, T2e, T2i.

Esforços nas barras: valores residuais /exemplo (a) e valores após alívio de tensões nas barras trocadas (b).

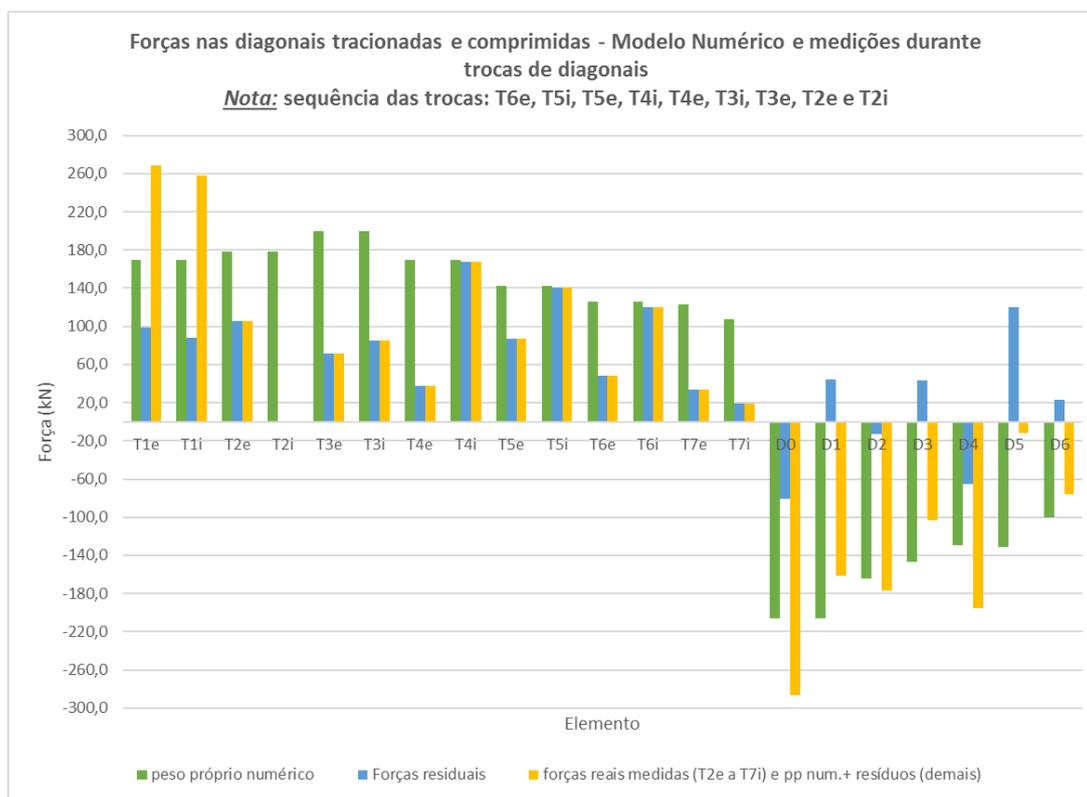
Figura 7

4.2 Distribuição global dos esforços residuais após as trocas sucessivas de barras tracionadas

Na Figura 8, a seguir, é mostrado o panorama global da distribuição dos esforços (efeito do peso próprio da estrutura) nas barras instrumentadas após a troca de todas as barras indicadas, sequencialmente, no respectivo gráfico. Mostram-se:

- Na cor amarela os esforços reais finais decorrentes das trocas das barras tracionadas T6e a T2i (última barra trocada na sequência). Observe-se que, ao final, imediatamente após a substituição da barra T2i, última que foi trocada, o esforço absorvido por essa barra, coerentemente, é nulo. Os esforços na cor verde correspondem aos valores calculados, para o efeito do peso próprio, através do modelo numérico calibrado. As forças nessas barras são significativamente inferiores às do peso próprio numérico, exceto para as barras T4i, T5i e T6i, para as quais os valores medidos e calculados numericamente são muito próximos. Note-se, ainda, que os valores residuais medidos em todas as barras (cor azul) são os mesmos medidos para as barras T6e a T2i;
- Na cor azul, para as barras tracionadas T1e e T1i e para as barras comprimidas D0 a D6, os esforços apresentados no gráfico correspondem ao total das tensões residuais acumuladas até imediatamente após a troca da barra diagonal T2i. Por questões relacionadas com o cronograma da obra, não se monitorou a resposta estrutural até que as barras T1e e T1i fossem trocadas. No entanto, pode-se fazer uma simulação sobre o possível resultado final, admitindo-se que às forças suportadas por essas barras, antes do início do processo de trocas sucessivas fossem iguais àquelas calculadas pelo modelo numérico. Assim sendo, somando-se os valores obtidos no modelo numérico aos valores residuais acumulados desde o início das trocas monitoradas, têm-se os valores em amarelo do gráfico para essas barras. Esses valores são significativamente superiores (valores absolutos) aos valores calculados através do modelo numérico;
- De maneira análoga ao apresentado no item **b** para acima, para as barras T1e e T1i, procedeu-se da mesma forma para estimar os valores dos esforços nas barras comprimidas D0 a D6 (cor amarela no gráfico). Note-se, primeiro, que alguns valores residuais nessas barras de diagonal treliçada (D1, D3 e D5, na cor azul do gráfico) são de esforços positivos, tração, mostrando que durante o processo de trocas de diagonais tracionadas algumas diagonais comprimidas são submetidas a esforços residuais de tração! O resultado final, somando-se aos esforços residuais os esforços do modelo numérico mostra que a magnitude dos esforços residuais adicionais tende a se somar algebricamente aos do modelo numérico de maneira que os esforços finais, em alguns casos (D0, D2, D4) superem os esforços de compressão previstos numericamente e que, particularmente no caso da diagonal treliçada D5, apesar do acúmulo dos esforços residuais de tração ao longo do processo, essa diagonal ainda permaneça comprimida.

Resumidamente, a análise realizada a partir dos dados experimentais obtidos durante o período de monitoramento estrutural mostrou, de maneira quantitativa e com clareza, a tendência da redistribuição dos esforços decorrentes do método de troca adotado para a substituição de todas as barras de diagonais tracionadas da Ponte D. Pedro II. Valores medidos das deformações permitiram determinar corretamente os esforços residuais em todas as barras envolvidas e os novos esforços, após as trocas, nas barras tracionadas substituídas. Os esforços resultantes finais determinados mostram o tipo de cenário resultante, indicando perfeitamente qual foi a tendência da configuração do novo estado de equilíbrio estrutural na situação após a troca de diagonais tracionadas.



Forças nas diagonais tracionadas e comprimidas: residuais (após troca), modelo numérico calibrado e estimativa com soma dos valores residuais aos do peso próprio para as diagonais tracionadas ainda não trocadas e para as diagonais comprimidas (treliçadas).

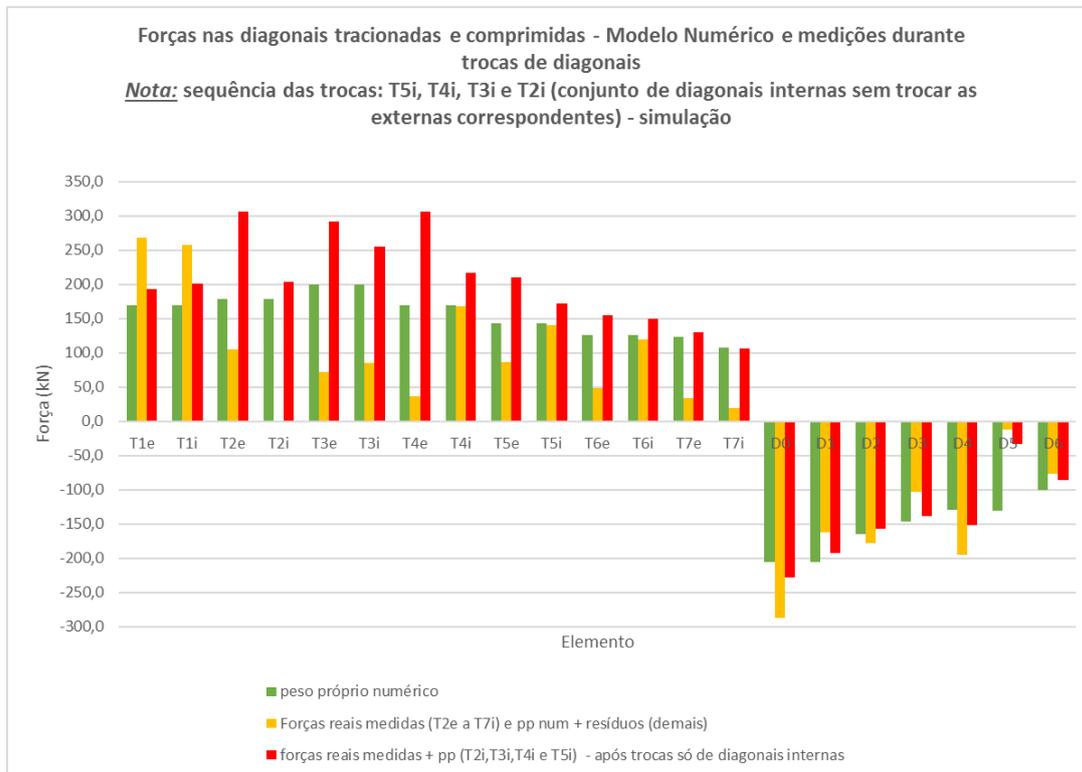
Figura 8

4.3 Estudo de caso: troca consecutiva de barras de diagonais tracionadas do lado interno sem trocar simultaneamente as barras contíguas do lado externo

Simula-se, a seguir, utilizando os dados obtidos experimentalmente, qual seria a resposta da estrutura caso um conjunto de barras tracionadas do lado interno de uma das treliças laterais fosse trocado, de maneira consecutiva, sem realizar, a cada barra interna trocada, a troca da sua barra externa associada. Não se trata do método proposto pelo projetista. No entanto, corresponde a uma situação que na prática pode ser induzida no trabalho em obra considerando, por exemplo, que durante um período dos trabalhos somente se tenha acesso possível às barras do lado interno da treliça. Os resultados dessa simulação estão mostrados nas Figuras 9 e 10, sendo que na Figura 9 são apresentados resultados em termos de esforços normais e na Figura 10 em termos de tensões normais nas barras. Nesta última figura, a título de verificação, insere-se na simulação a influência da passagem do trem C260, cujos resultados foram obtidos através do modelo numérico calibrado. Em campo, de fato, foram realizadas medições para dois trens da via carregados, após a troca de todas as diagonais consideradas neste trabalho. Os resultados experimentais, neste caso, acompanharam os resultados obtidos no modelo numérico. Nesta simulação, as barras consideradas nas trocas realizadas (T5i, T4i, T3i e T2i, nesta ordem, conforme informado nas figuras citadas) corresponderiam a uma situação em que todas as barras instrumentadas ainda não tivessem sido trocadas.

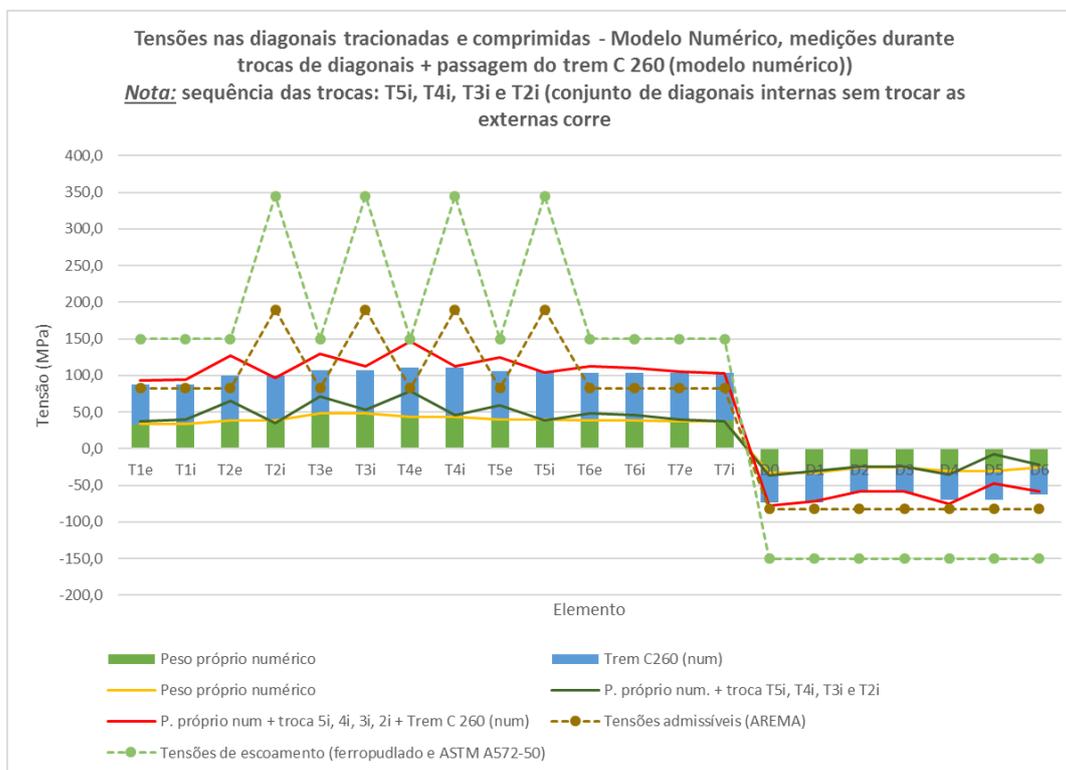
Na Figura 9 tem-se, como referências, os efeitos do peso próprio (cor verde) no modelo numérico e os efeitos finais com resíduos (mesmo gráfico e cor da Figura 8, após todas as trocas). Os valores resultantes da simulação, na cor vermelha, mostram que os esforços normais de tração, principalmente nas barras externas contíguas (T5e, T4e, T3e e T2e), ainda não trocadas (em ferro puulado) são exageradamente maiores que os esforços do modelo numérico calibrado ou do que os esforços efetivamente medidos, seguindo o método proposto em projeto. Na Figura 10, em termos de tensões, nota-se que tal cenário pode conduzir a estados de tensão bem acima dos admissíveis para as barras antigas em ferro puulado, podendo-se ter caso de escoamento de uma ou mais barras, conjuntamente, com as passagens de trens cargueiros sobre a ponte em dias subsequentes aos das datas das trocas, pois durante os períodos diurnos a ponte ficaria aberta ao tráfego, conforme previsto no programa de trabalho para a obra. A situação simulada caracteriza-se como indesejável, pois remete a questões de estado limite último da estrutura. A situação ideal é a de trocas sucessivas numa

mesma noite, das barras externa e interna de uma mesma diagonal, seguindo o previsto pelo projetista. Assim sendo, um trem poderia circular livremente durante o dia seguinte a cada par de trocas sem sobrecarregar a estrutura da maneira descrita nesta simulação. Uma vez que tenha sido realizada a troca de uma barra de aço de diagonal tracionada em ferro pudlado, a nova barra substituta em aço ASTM A572-50 apresenta índice de segurança estrutural muito superior ao da barra antiga (Figura 10).



Forças nas diagonais tracionadas e comprimidas decorrentes da troca consecutiva de diagonais tracionadas do lado interno de uma treliça.

Figura 9



Tensões totais nas diagonais tracionadas e comprimidas decorrentes das trocas consecutivas de diagonais tracionadas internas de uma treliça: simulação do efeito da passagem de trem C260 (modelo numérico calibrado).

Figura 10

5. Conclusões

- a) A substituição de todas as barras de diagonais tracionadas de uma velha ponte treliçada com trabalhos realizados apenas no período noturno e sem interrupção do tráfego de veículos, incluindo passagens de trens cargueiros carregados, mostrou-se como sendo composta de um conjunto de atividades relativamente complexa e demorada, porém realizável segundo a metodologia proposta. O método de troca de diagonais tracionadas em ferro pudlado por barras de aço ASTM A572-50 pode ser considerado como uma solução aceitável, desde que sejam seguidos os pressupostos estabelecidos no projeto estrutural da intervenção. O trabalho experimental mostrou, em detalhes, a maneira de distribuição dos esforços e tensões nas barras circunvizinhas de cada barra trocada ao longo dos trabalhos em campo.
- b) A solução apresentada para a obra foi discutida em comparação com outras soluções possíveis, tendo-se mostrado, a partir de resultados experimentais, que uma possível troca de um conjunto de barras de diagonais consecutivas do lado interno (lado do piso de rolamento) com troca posterior das barras contíguas às substituídas, do lado externo (lado da passarela de pedestres), pode conduzir ao escoamento progressivo das barras em ferro pudlado, antigas, quando das passagens de trens durante o período diurno nos dias subsequentes a essas trocas. Tal cenário evoca discussões sobre estado limite último estrutural.
- c) Há indicações de que solução análoga à apresentada para outras pontes em treliça, similares à estudada, pode mostrar-se viável, porém, dada a complexidade das interações com redistribuição de tensões e forças normais nas barras da estrutura, ocorrentes de maneira generalizada ao longo do vão, precisam ser cuidadosamente estudadas durante a fase de projeto da intervenção.
- d) Sabe-se que, até o momento, todas as barras tracionadas das treliças dos quatro vãos da Ponte D. Pedro II já foram substituídas, tal que, essa significativa parte do trabalho de reabilitação da ponte pode ser considerada como bem sucedida! Atualmente, a ponte continua sendo monitorada através de um sistema de monitoramento contínuo de longa duração que foi instalado, estando-se acompanhando o comportamento da estrutura ao longo da realização de outros trabalhos de campo da obra de recuperação e reforço da Ponte D. Pedro II.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem às equipes de engenharia da VLI Logística, concessionária da ferrovia, e da FDTE (Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Engenharia / USP / Poli); também são gratos a todos os que colaboraram, em campo, para que este trabalho pudesse ser realizado.

7. Referências

- [1] AREMA. (2008): Arema Bridge inspection Handbook. Lanham, American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association, 2008.
- [2] Radomski, W.: Bridge Rehabilitation, Imperial College Press, 2002.
- [3] Kirkup, L.; Frenkel, R. B.: An Introduction to Uncertainty in Measurement, Cambridge Press, 2006.
- [4] Ripper, Thomaz & outros: Reabilitação e reforço estrutural do tabuleiro da Ponte Metálica de Praia do Ribatejo sobre o Rio Tejo, Lisboa – Portugal / informações de Relatório Técnico, 2010.
- [5] Ponte D. Pedro II Cachoeira-BA: informações do projeto estrutural de reabilitação, Paula Machado Engenharia de Projetos, 2016