

AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DE PONTES METÁLICAS DA FERROVIA TURÍSTICA ENTRE AS CIDADES DE MARIANA E OURO PRETO/MG¹

Manoel Gonçalves Cardoso²
Ernani Carlos de Araújo³
Luiz Cláudio Cândido⁴

Resumo

Este trabalho analisou alguns fenômenos patológicos que ocorrem em pontes metálicas da ferrovia turística entre as cidades de Ouro Preto e Mariana/MG. Foram avaliadas a capacidade de carregamento de uma estrutura, denominada "Ponte da Barra", e a influência da corrosão em duas pontes. Para obtenção de dados das pontes foi realizada inspeção visual com registro fotográfico. Também foi realizada a modelagem numérica através de elementos finitos (elemento de barra com seis graus de liberdade por nó), visando analisar o comportamento estrutural da ponte antes e após reforço estrutural. Desta maneira possibilitou-se a avaliação da estabilidade da mesma, e também a avaliação da eficiência do reforço estrutural proposto. A análise numérica foi viabilizada através de parâmetros levantados *in loco*, como geometria, propriedades mecânicas e fatores patológicos. Concluiu-se que: o sistema de arco rígido utilizado para reforço estrutural agravou sistematicamente a estabilidade global da ponte, introduzindo acréscimo de carga aos elementos estruturais mais críticos.

Palavras-chave: Pontes metálicas ferroviárias; Inspeção; Corrosão; Simulação.

THE PHENOMENON OF THE CORROSION IN METALLIC BRIDGES BY TOURISTIC RAILROAD BETWEEN THE CITIES OURO PRETO AND MARIANA

Abstract

This work sought to diagnose and propose solutions for the pathological phenomena occurring on the bridge called "Ponte da Barra" (a metallic bridge that was restored and reinforced for use by the Tourist-Culture Railroad between Ouro Preto and Mariana/MG). To obtain the bridge profile, a visual inspection and photographic registers were performed to evaluate existing pathologies. Numerical modeling was also performed, using finite elements (bar elements with six degrees leeway per nodule), aiming to analyze the bridge's structural behavior before and after reinforcement. This permitted evaluation of the bridge's stability as well as the efficiency of the structural reinforcement proposed. The numerical analysis proved feasible when parameters measured *in situ*, such as geometry, mechanical properties and pathological factors were implemented. The conclusion reached was that the rigid-arch system used for structural reinforcement systematically diminished the overall stability of the bridge, introducing a load increase on the most critical structural elements.

Key words: Metallic bridges; Inspection; Corrosion; Simulation.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Eng^o Civil; M.C.; manodemolay@yahoo.com.br

³ Eng^o Civil; M.C.; D.C; Prof. Associado II – Escola de Minas/UFOP; ecar_em@yahoo.com.br

⁴ Eng^o Metal.; M.C.; D.C; Membro da ABM; Prof. Associado II; Grupo de Estudos sobre Fratura de Materiais; Dep. Eng. Metalúrgica e de Materiais – Escola de Minas/UFOP; candido@em.ufop.br

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que problemas patológicos em estruturas metálicas, particularmente, pontes ferroviárias são muito poucos analisados. Estes fenômenos, tais como: corrosão, trincas por fadiga, afrouxamento de ligações e deformações e/ou deslocamentos excessivos de elementos estruturais são os principais fatores responsáveis por intervenções e interdição parcial ou total de uma ponte. A literatura nacional aborda poucos casos de estudos como o proposto. O objetivo deste trabalho é contribuir, para o desenvolvimento da área de “Patologia das Estruturas”, muito difundida para o concreto armado, porém, ainda pouco estudada para as estruturas metálicas.^(1,2)

As metodologias de inspeção, avaliação e restauração, empregada nas pontes estudadas, particularmente a “Ponte da Barra”, em Ouro Preto/MG, contribuirão para o desenvolvimento de novas estratégias a serem utilizadas para outras pontes do mesmo gênero.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A “Ponte da Barra” localizada sobre o Córrego do Funil e distante 1,17 km da Estação Ferroviária de Ouro Preto/MG, é uma ponte ferroviária metálica, em treliça, com ligações rebitadas e pilares em alvenaria de pedra. Ela foi inaugurada em 1914 e tem uma extensão de 21,00 metros. É constituída de elementos compostos, formados pela associação de chapas e cantoneiras. A distância entre banzos é de 2,00 metros e entre montantes de 1,75 metros.

As características mecânicas e a composição química do aço utilizado na construção da ponte foram obtidas através de ensaios e análises laboratoriais em amostras retiradas da própria ponte. Em virtude da natureza destrutiva dos ensaios realizados, as amostras foram coletadas apenas em elementos estruturais substituídos por apresentarem problemas estruturais. A Figura 1 ilustra, através de *hachuras*, o posicionamento dos elementos utilizados para confecção de amostras para ensaios. A Tabela 1 apresenta a composição química do aço utilizado no montante (Figura 1).

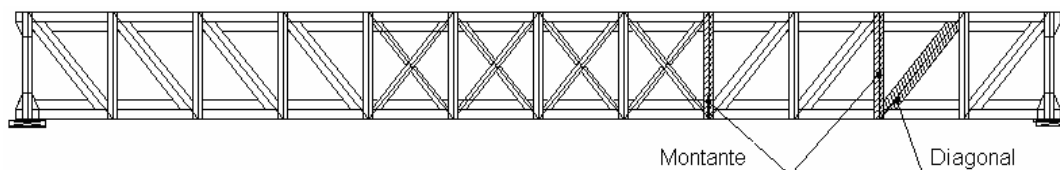


Figura 1 – Posição dos elementos estruturais danificados

Tabela 1 – Composição química do aço analisado (% peso).

C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Cu	Al	Fe
0,007	0,561	0,087	0,756	0,120	0,015	0,052	0,010	0,010	98,340

As análises metalográficas foram feitas em três amostras retiradas de elementos da ponte. A Figura 2(a,b,c) mostra, respectivamente, as fotomicrografias das amostras: 1 retirada do montante, amostra 2 retirada da cantoneira de apoio da passarela e amostra 3 retirada do rebite.

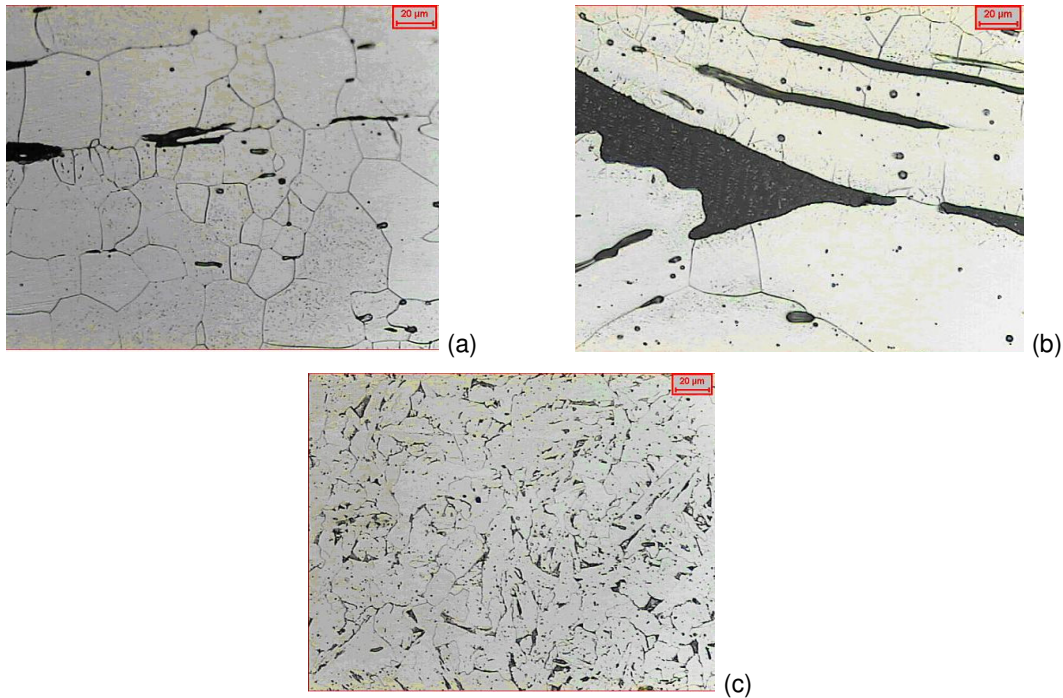


Figura 2 – Fotomicrografias de amostras da “Ponte da Barra”; (a) 1 - montante; (b) 2 – cantoneira de apoio da passarela; (c) 3 – rebite; Nital 2%; 500X.

O aço utilizado na ponte apresenta uma microestrutura praticamente só de ferrita, como era de esperar, devido ao baixo teor em carbono contido neste material. Nota-se na microestrutura do aço da amostra 1, grãos ferríticos de tamanhos variados e inclusões alinhadas, caracterizando o fibramento mecânico. A análise da amostra 2, referente à cantoneira de sustentação da passarela, apresenta uma microestrutura ferrítica, semelhante à da amostra 1; no entanto, neste caso, os grãos de ferrita são maiores. Destacam-se as inclusões e até mesmo escória no material. Isso caracteriza o “Ferro Pudlado” (obtido por redução direta em forjas; daí a grande contaminação do mesmo). O material do rebite, normalmente, em função do grau de deformação e da temperatura que é submetido durante o processo de montagem, pode ter uma microestrutura com incidência de textura cristalográfica. Observa-se que a microestrutura é constituída basicamente de ferrita, o que indica que este aço também é de baixo carbono.

O ensaio de tração foi realizado em amostras do montante (amostra 1) e da cantoneira de sustentação da passarela (amostra 2). Os resultados do ensaio de tração são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Ensaio de tração do aço analisado.

CP	$\epsilon(\%)$	σ_{ys} (MPa)	σ_u (MPa)
1	30	273	374
2	30	265	364
3	32	278	368
4	24	314	432
5	16	314	413
6	19	317	411

σ_{ys} – limite de escoamento; σ_u – limite de resistência

Para cada amostra foram confeccionados três corpos-de-prova (CPs), sendo os três primeiros, retirados da amostra 1, e os demais retirados da amostra 2, totalizando 6 CPs. A amostra 1 apresentou limite de escoamento $\sigma_{ys} = 272$ MPa e limite de resistência $\sigma_u = 370$ MPa; já a amostra 2 apresentou $\sigma_{ys} = 315$ MPa e $\sigma_u = 419$ MPa.

A amostra 3, referente ao rebite, teve o limite de resistência determinado de forma indireta, através do ensaio de dureza. Este procedimento foi adotado em virtude das dimensões reduzidas do rebite. Foram realizadas 25 medidas empregando-se a dureza Vickers, com média de 171 Vickers HV30. Para este valor de dureza, obteve-se para o rebite limite de resistência $\sigma_u \cong 575$ MPa.

A inspeção cadastral (levantamento de dados) foi o primeiro passo no processo de restauração da ponte, onde foram coletadas informações referentes à localização da ponte, sistema estrutural, data de construção, tipo de tráfego, características geométricas, etc. Esta fase também foi acompanhada de inspeção visual, e registro fotográfico contemplando vista lateral, superior, inferior e detalhes.

Em se tratando de pontes antigas, a inspeção cadastral, foi a primeira inspeção, após muitos anos de construção. Neste caso em virtude dos problemas patológicos, o cadastro foi realizado simultaneamente à inspeção rotineira que determinou o estado de conservação da ponte.

Para a modelagem por elementos finitos foi utilizado o *software* “Metálicas 3D” para análise numérica, utilizando elementos finitos (elemento de barra com seis graus de liberdade por nó). O modelo estrutural utilizou as características geométricas da estrutura real, e o *software* foi configurado com as propriedades mecânicas do aço utilizado em 1914 (módulo de elasticidade $E = 205$ GPa; coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$; coeficiente de dilatação térmica $\alpha = 11 \times 10^{-6}$ m/m°C; peso específico $\rho = 78,5$ kN/m³; limite de escoamento $\sigma_{ys} = 272$ MPa e limite de resistência $\sigma_u = 370$ MPa. As ligações foram consideradas rígidas entre banzos e bi-rotuladas nas diagonais e nos montantes. Conforme observado na Figura 3, a seção transversal da ponte é assimétrica, sendo portanto necessária uma análise numérica tri-dimensional.

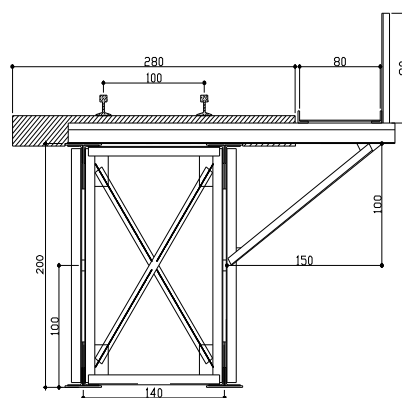


Figura 3 – Representação esquemática da seção transversal típica da ponte.

Foram considerados nos cálculos dois tipos de carregamento:

- COMB 1 - Ponte descarregada, antes da passagem da composição férrea, onde todo o carregamento atuante é referente ao peso próprio da estrutura (PP) aplicado uniformemente distribuído no eixo local do elemento estrutural, além da carga de vento referente à ponte descarregada (V_1);

- COMB 2 - Ponte carregada, com atuação do peso próprio da estrutura (PP) mais a sobrecarga devido às passarelas (S_p); sobrecarga devido aos trilhos e dormentes (S_t); ação do vento (V_2); carga móvel - trem-tipo (TB 240); impacto lateral (F_h) ou força centrífuga (F_c) a que for maior; impacto vertical (φ) e força longitudinal (F_l).

Foram escolhidos estes dois tipos de carregamentos, para determinar a amplitude de tensão atuante em cada elemento estrutural, sendo calculada pela diferença entre a tensão máxima e a tensão mínima provocada pelo carregamento cíclico.

O trem-tipo, TB 240 é utilizado na verificação de estabilidade e projeto de reforço de obras existentes. A designação dos trens-tipo é feita pela carga dos eixos mais pesados da locomotiva. A ação do trem-tipo foi majorada pelo impacto vertical ($\varphi=1,37$), determinado de acordo com a Norma NBR 7187.⁽³⁾

$$\varphi = 0,1\%(1600 - 60\sqrt{l + 2.25l}) \geq 1,2 \quad (1)$$

Onde:

l = vão em metros

A Norma NBR 7187,⁽³⁾ diz que não existe um procedimento específico para a consideração da ação do vento; no entanto, este trabalho adotou as recomendações da antiga Norma NB-2 (1961), onde a ação de vento é considerada uniformemente distribuída, horizontalmente e normal ao eixo da ponte, sendo $1,5\text{kN/m}^2$ para a ponte descarregada e $1,0\text{kN/m}^2$ para a ponte carregada. Também foi empregada uma força centrífuga ($F_c = 8\%$ do trem-tipo majorado pelo impacto vertical), aplicada horizontalmente e normal ao eixo da ponte, 1,6 m acima dos trilhos, e força longitudinal ($F_l = 300\text{kN}$) aplicada normal ao trilho.

A equipe de restauração da ponte optou por um reforço externo, acoplando à estrutura já existente um arco longitudinal com elevada rigidez, com a finalidade de diminuir os deslocamentos no centro da ponte, e por conseqüência diminuir as solicitações nos antigos elementos estruturais (Figura 4).

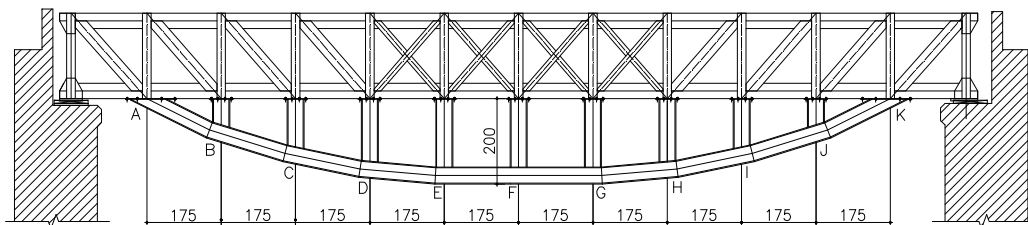


Figura 4 – Ilustração do arco utilizado para reforçar a “Ponte da Barra”.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fenômeno de corrosão foi o fator patológico mais freqüente na ponte, segundo a avaliação por inspeção, porém em virtude da composição química do aço, e da natureza branda da atmosfera local, este fator causou poucos danos à estrutura, com baixa redução de seção transversal dos elementos estruturais. Destaca-se a corrosão localizada, particularmente, em frestas em algumas partes das pontes. A Figura 5 (a-f) apresenta a “Ponte da Estação de Ouro Preto”, em que é possível notar a degradação, e os efeitos do meio (solo, vegetação, particulados e umidade) diretamente nas cabeceiras da ponte. A Figura 5(c-f) destaca o contato direto da ferrugem no solo e o produto de corrosão gerado numa região de frestas

na estrutura. E ainda, na “Ponte da Barra”, Figura 6(a-d), pôde-se notar a flambagem de alguns montantes e o rompimento de uma das diagonais, causando sérios danos à estrutura.



Figura 5 – Fotografias da “Ponte da Estação de Ouro Preto” destacando-se regiões do efeito do meio na corrosão da estrutura metálica; vistas: frontal (a) e lateral(b); sistema de apoio das cabeceiras (c) e (d); corrosão uniforme e por fresta: aparelho de apoio (e); detalhe de ligação do encontro (f).

Foram feitas análises, por difração de raios X, dos produtos de corrosão. Analisaram-se duas amostras, uma retirada em pontos aleatórios da superfície corroída da ponte e outra retirada do *fuste* de um rebite. Por se tratar de uma análise não destrutiva, foi possível coletar amostras de produtos de corrosão em elementos estruturais que não foram substituídos na ponte. Observou-se, predominantemente, presença de goetita e lepidocrocita (hidróxidos de ferro).

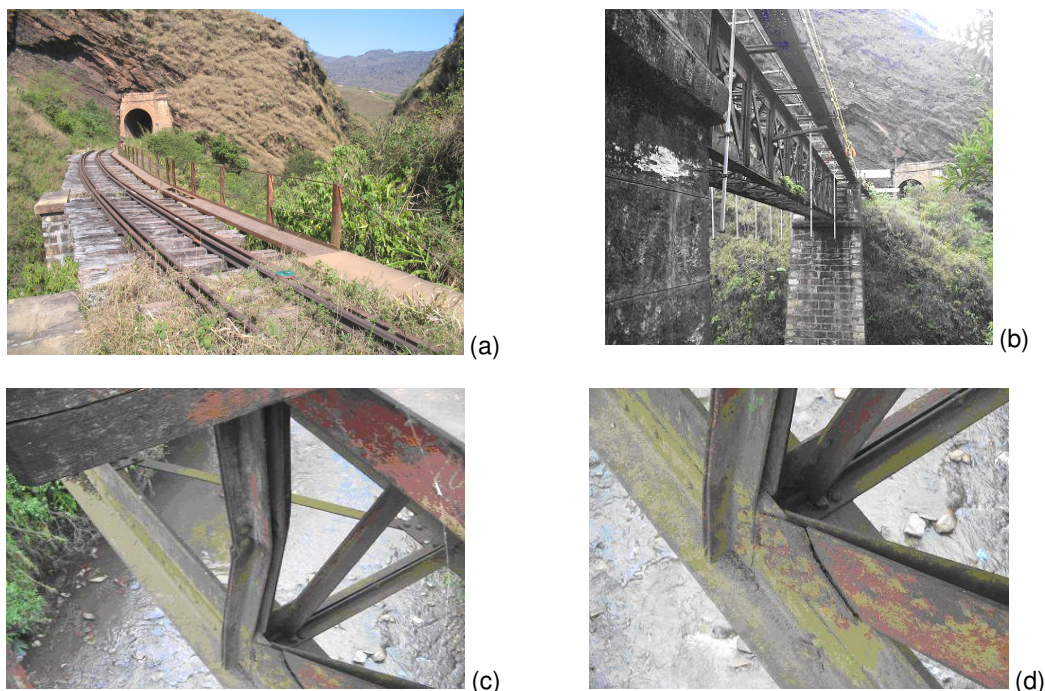


Figura 6 – “Ponte da Barra” antes da restauração; (a) vista frontal superior, com detalhe da ponte em curva, que dá acesso ao primeiro túnel da ferrovia; (b) vista lateral, onde podem ser observados os pilares em alvenaria de pedra; (c) tensão montante com flambagem global; (d) diagonal tracionada rompida – efeitos da corrosão.

A análise numérica identificou os montantes e as diagonais próximas aos apoios, como sendo os elementos estruturais mais críticos. Mesmo após o reforço estrutural, o montante sobre o apoio, e a primeira diagonal tracionada, continuou em estado crítico, além de terem um acréscimo nas solicitações. Para facilitar o entendimento do comportamento após o reforço, são apresentadas nas Tabelas 3-6 as solicitações atuantes no montante sobre o apoio, localizado fora do raio de ação do reforço, e do trecho central do montante inferior da “Ponte da Barra” dentro deste raio de ação.

Tabela 3 – Solicitações extremas atuantes no montante sobre o apoio (antes do reforço) – “Ponte da Barra”.


	Solicitações extremas P/ Barra Mc-1 (4 L 80x80x9,7)					
	N(kN)	Vy(kN)	Vz(kN)	Tx(kN.m)	My(kN.m)	Mz(kN.m)
COMB - 1	-56.260	-1,426	-0,401	-	0,379 -0,39	1.439
COMB - 2	-1026,470	24,873 -22,187	-8,903	±0,004	7,327 -15,330	±25,136
variação	970,210	47,060	8,502	0,008	22,657	50,270

Tabela 4 – Solicitações extremas atuantes no montante sobre o apoio (após o reforço) – “Ponte da Barra”.


	Solicitações extremas P/ Barra Mc-1 (4 L 80x80x9,7)					
	N(kN)	Vy(kN)	Vz(kN)	Tx(kN.m)	My(kN.m)	Mz(kN.m)
COMB - 1	-122,423	-2,506	0,231	-0,001	±0,230	±2,665
COMB - 2	-1130,461	±22,953	1,540	0,006 -0,005	1,701 -1,379	23,413 -22,494
variação	1008,038	45,906	1,309	0,007	3,080	45,907

Tabela 5 – Solicitações extremas atuantes no trecho central do banzo inferior (antes do reforço) – “Ponte da Barra”.



	Solicitações extremas P/ Barra Bi-6 (T 367x132,23)					
	N(kN)	Vy(kN)	Vz(kN)	Tx(kN.m)	My(kN.m)	Mz(kN.m)
COMB - 1	115,942	-0,096	1,468 -0,798	-0,001	1,867	-0,416
COMB - 2	2352,882	2,208 -2,318	7,596 -9,525	0,112	48,488	2,474 -1,389
variação	2239,940	4,526	17,121	0,113	46,621	1,085

Tabela 6 – Solicitações extremas atuantes no trecho central do banzo inferior (após o reforço).

	Solicitações extremas P/ Barra Bi-6 (T 367x132,23)					
	N(kN)	Vy(kN)	Vz(kN)	Tx(kN.m)	My(kN.m)	Mz(kN.m)
COMB - 1	35,181	-0,025	3,343	0,003	-1,387	-0,450
COMB - 2	-116,092	0,207	25,533 -4,626	-0,020	29,703 -12,997	±0,179
variação	80,9110	0,232	30,159	0,023	42,700	0,629

Observa-se acentuada diminuição da força normal, para o banzo inferior, enquanto para o montante houve um acréscimo de 10% da mesma. É mais fácil compreender o efeito quando os dados são apresentados em um mesmo gráfico as solicitações máximas de força normal, atuantes devido ao trem-tipo deslocando-se sobre a ponte Figuras 7 e 8.

De maneira geral, os elementos estruturais dentro do raio de ação do reforço estrutural tiveram um sensível decréscimo nos níveis de solicitações. Em algumas situações houve até mesmo inversão de solicitações. Este é o caso do banzo inferior (Figura 8). Para os elementos estruturais fora do raio de ação do arco, era de se esperar que se reforçassem estes elementos, em virtude do acréscimo de solicitações observadas. Esta situação agrava ainda mais a estabilidade global da ponte, uma vez que para solicitações menores a estrutura apresentou problemas de estabilidade.

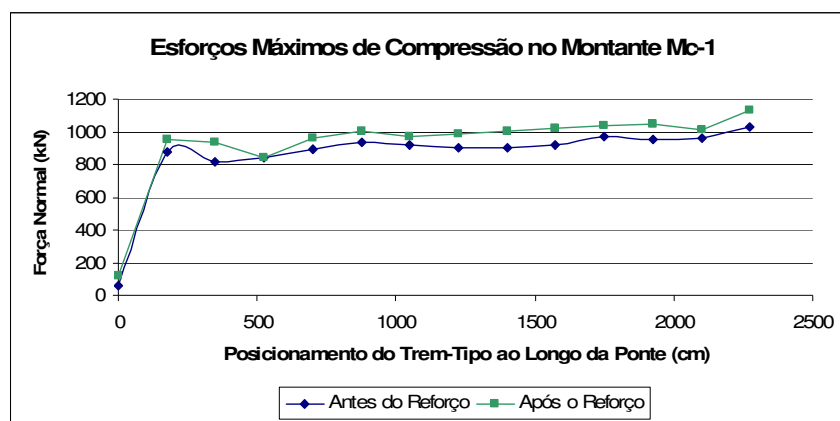


Figura 7 – Comparação entre os esforços máximos de compressão para o montante sobre o apoio, para os casos antes e após o reforço estrutural, em função do carregamento móvel ; “Ponte da Barra”.

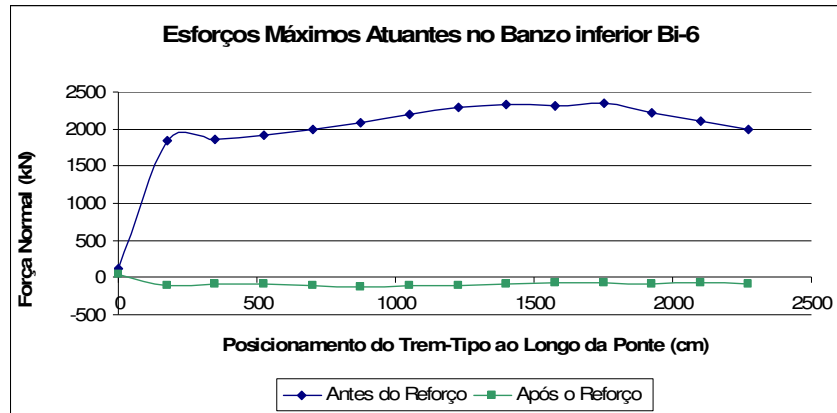


Figura 8 – Comparação entre os esforços máximos atuantes no banzo inferior, para os casos antes e após o reforço estrutural, em função do carregamento móvel; “Ponte da Barra”.

4 CONCLUSÕES

- ◆ O material empregado na “Ponte da Barra” foi caracterizado com sendo do tipo “ferro pudlado”, com microestrutura ferrítica e inclusões.
- ◆ Além da corrosão uniforme nas pontes analisadas, observou-se maior degradação em regiões de frestas.
- ◆ As cabeceiras das pontes estão mais sujeitas à corrosão em decorrência do sistema de apoio das estruturas metálicas diretamente no solo.
- ◆ Quanto à resistência mecânica do aço foram obtidos valores próximos aos encontrados para o aço ASTM A-36.
- ◆ Os fatores patológicos detectados são graves e constitui risco à segurança; principalmente os problemas relacionados à estabilidade, como a flambagem de montantes e rompimento de diagonais.
- ◆ Para melhorar a resistência global da “Ponte da Barra”, o reforço estrutural tornou-se falho, principalmente por introduzir acréscimo de solicitações nos elementos mais críticos. O reforço somente atenderia ao propósito pela qual foi projetado, se este abrangesse todo o comprimento da ponte, ou se aumentasse a resistência dos elementos fora do raio de ação do reforço em arco rígido.
- ◆ O *software* utilizado possibilitou a modelagem da estrutura de forma simples e eficiente. Os resultados obtidos indicaram elevada amplitude de solicitações. Este fato indica o fenômeno de fadiga como sendo o estado limite de resistência prioritário nas análises numéricas e experimentais.

REFERÊNCIAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido: NBR 7187. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 75p.
- 2 _____. Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre: NBR 7188. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 4p.
- 3 _____. Carga móvel para projeto estrutural de obras ferroviárias: NBR 7189. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 2p.
- 4 _____. Vistorias de Pontes e Viadutos de Concreto: NBR 9452. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 13p.

- 5 BRINCK, F. M. Efeito da corrosão na integridade estrutural da ponte metálica Marechal Hermes. Ouro Preto: Construções Metálicas, DECIV/UFOP, 2004. 177p. (Dissertação de Mestrado).
- 6 CARDOSO, M.G. Avaliação da integridade estrutural de pontes metálicas da ferrovia turística entre Ouro Preto e Mariana (MG) por meio de modelagem numérica e técnicas laboratoriais. Ouro Preto: Construções Metálicas, DECIV/UFOP, 2007. 195p. (Dissertação de Mestrado).