

Avaliação da integridade estrutural da Ponte Marechal Hermes - rio São Francisco/MG

Fabiana Malta Brinck

Eng. Civil, Mestranda, DECV/UFOP. E-mail: fmbrinck@terra.com.br

Luiz Cláudio Cândido

Eng. Met., D.Sc., Professor do DEMET-Escola de Minas/UFOP. E-mail: candido@em.ufop.br

Francisco de Assis das Neves

D.Sc., Professor do DECV-Escola de Minas/UFOP. E-mail: fassis@em.ufop.br

Resumo

Sabe-se que a degradação que ocorre em estruturas de pontes metálicas é um problema mundial. Isto ocorre por diversas razões, como envelhecimento da ponte, aumento da carga de tráfego, ataque ambiental e, algumas vezes, devido a projetos, detalhamento e construção da estrutura inadequados. Para resolver esses problemas, procedimentos diferentes de inspeção de pontes têm sido aplicados em diferentes países. No Brasil, no entanto, parece não haver preocupação em preservar a integridade das estruturas, não sendo comum a realização de inspeções e/ou manutenções, o que pode afetar a segurança estrutural, levando à necessidade de reparos mais severos e mais caros. Esse trabalho procurou diagnosticar e propor soluções visando à minimização da corrosão desenvolvida na Ponte Marechal Hermes (rio São Francisco). Para isso, foram feitas visitas *in locu* e, através de inspeção visual, filmagem e registros fotográficos, coletaram-se os dados necessários para análises. Também foram coletadas amostras e, então, realizadas caracterizações química, mecânica e metalográfica do aço empregado na ponte. Fez-se modelagem através de elementos finitos, visando a analisar o comportamento estrutural da ponte com e sem danos por corrosão, o que possibilitou a verificação dos elementos estruturais mais solicitados e a influência da corrosão nessas regiões. Foram realizados ensaios com névoa salina em diferentes sistemas de pintura, visando a identificar o melhor procedimento de revestimento para proteção da ponte. Verificou-se que o emprego do sistema de pintura constituído de etil silicato de zinco, com primer epóxi-amida, rico em zinco e esmalte poliuretano alifático, foi o que apresentou melhor desempenho.

Palavras-chave: pontes metálicas, corrosão, tintas.

Abstract

It's known that the degradation, which occurs in steel bridge structures, is a worldwide problem. This happens for several reasons such as the bridge's advanced age, the increase of the traffic weight, environmental attacks and, sometimes, because of designs, inadequate detailment and construction of structures. In order to solve these problems, different procedures in inspection of bridges have been used in different countries. In Brazil, however, it seems there is not any concern about keeping the integrity of the structures, not being commonly used proper procedures such as inspections and maintenance of the structures that can affect its safety, causing the need of more severe and expensive repairs. This research intends to make a diagnosis and propose solutions, which aim for the least occurrence of the corrosion developed by Marechal Hermes Bridge (São Francisco River). Therefore visits were made in locus, in which visual inspection, screen and photo registers, the information necessary for the analysis, were collected. Some samples were also collected and then, chemical, mechanical and metalographic characterizations were made on the steel used on the bridge, besides the analysis of the corrosion. The numerical modeling was made by using the finite element method, which aimed to analyze the structural behavior of the bridge with or without damages made by corrosion in these areas. There were made tests with salt spray in different systems of painting which aims to identify the best procedure of covering in order to protect the bridge. It was verified that the use of etil silicate of zinc, with primer epoxy-amide, rich in zinc and aliphatic varnish polyurethane was the one which presented the best performance.

Keywords: steel bridges, corrosion, paint.

1. Introdução

Sabe-se que os materiais metálicos são os mais susceptíveis à corrosão [Gentil, 2003]. Sendo a corrosão um processo absolutamente espontâneo, que transforma os materiais metálicos, de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam, a degradação de pontes metálicas pode ser considerada um problema mundial.

A Ponte Marechal Hermes (PMH), situada sobre o rio São Francisco, entre as cidades de Pirapora e Buritizeiro/MG, encontra-se num estado avançado de degradação, devido à corrosão, o que leva à necessidade de um trabalho de recuperação.

Para minimizar esse tipo de problema, há a necessidade de procedimentos de inspeção que permitam avaliar a condição da estrutura da ponte [Woodward et alii, 2001]. Além disso, é importante que se avalie a capacidade de carga da ponte, já que, à medida que as pontes envelhecem, a deterioração causada pelo tráfego intenso e um meio ambiente agressivo tornam-se crescentemente significantes, resultando numa alta frequência de reparos e em uma redução na sua capacidade de carga. A ocorrência e a extensão dos danos encontrados em inspeções sucessivas são usadas para determinar a deterioração estimada de componentes estruturais. Por sua vez, essa análise serve como critério para tomada de decisão, no que se refere a medidas de manutenção e reabilitação.

Nesse trabalho, são apresentados alguns resultados dos estudos feitos sobre a PMH. Foram feitas inspeções, análises do material da ponte, avaliação da capacidade de carga da estrutura e danificada, além da avaliação de sistemas de pintura para proteção da ponte contra o fenômeno de corrosão.

2. Materiais

Foi feita uma investigação constituída de informações obtidas com pessoas da região e inspeção visual. Toma-

ram-se notas e o processo corrosivo instaurado na PMH, foi registrado através de fotos e filmagens. Fez-se um levantamento da geometria de cada perfil que compõe a PMH com suas respectivas dimensões, além da retirada de material da ponte para análise. Nessas amostras foram feitas análises química e metalográfica, além da avaliação mecânica do material. A amostra 1 (AISI 1005) apresenta uma microestrutura constituída praticamente de ferrita, por se tratar de um aço com baixíssimo teor de carbono; Já a amostra 2 (AISI 1123), por apresentar maior teor de carbono, apresenta uma microestrutura com a fase ferrita e o constituinte perlita.

Para a análise química foram utilizadas duas amostras. A Tabela 1 apresenta a composição química das amostras analisadas.

O ensaio metalográfico foi feito nas duas amostras retiradas de elementos da ponte. As Figuras 1 e 2 mostram as fotomicrografias das amostras 1 e 2, respectivamente. Nota-se na amostra 1 (AISI 1005) que a microestrutura é constituída praticamente de ferrita, por se tratar de um aço com baixíssimo teor de carbono; portanto, com características mecânicas

de alta plasticidade. Já a amostra 2 (AISI 1123), por apresentar maior teor de carbono, apresenta uma microestrutura com a fase ferrita e o constituinte perlita (lamelas alternadas de ferrita e cementita).

O ensaio de tração foi realizado a partir da amostra 1. Os resultados do ensaio de tração encontram-se apresentados na Tabela 2.

A partir da amostra 1, foram confeccionados 4 corpos-de-prova (CPs) para o ensaio de tração, que apresentaram limite de escoamento $f_y \cong 271$ MPa e limite de resistência à tração $f_u \cong 574$ MPa.

Através da inspeção visual foi possível identificar as seções transversais das barras que compõem PMH. A inspeção visual também possibilitou o levantamento dos locais com maiores problemas de corrosão [Cândido, 2002; Pannoni, 2004]. A Figura 3 (a-b) apresenta, principalmente, o tipo de corrosão generalizada (uniforme) na PMH, no entanto pode haver também, corrosão localizada. Essas regiões, geralmente, encontram-se nas partes superiores das estruturas, particularmente, onde praticamente não são estabelecidas frestas com acúmulo de eletrólito entres as mesmas.

Tabela 1 - Composição química das amostras (%peso).

Elementos	C	Mn	P	S	Ni	Cr	Si
Amostra 1	0,034	0,346	0,049	0,023	0,047	0,016	---
Amostra 2	0,238	1,200	0,012	0,012	0,008	0,012	0,019

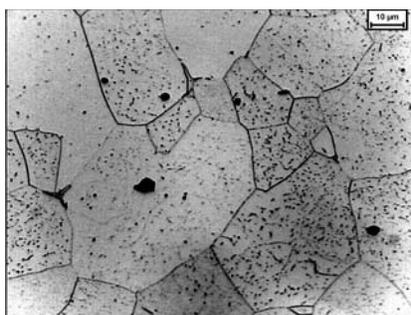


Figura 1 - Fotomicrografia de aço do tipo AISI 1005; amostra 1; ataque com Nital 2%; aumento de 1000X.



Figura 2 - Fotomicrografia de aço do tipo AISI 1123; amostra 2; ataque com Nital 2%; aumento de 500X; ferrita (claro) e perlita (escuro).

3. Métodos

3.1 Descrição da Ponte

A Ponte Marechal Hermes (PMH) é uma ponte ferroviária metálica, em treliça, com ligações rebitadas e apoiando-se em pilares de pedra. Ela foi inaugurada em 1922 e tem uma extensão de 694 metros. A Figura 4 apresenta uma visão em perspectiva da PMH.

Atualmente a ponte não se encontra em operação com o fim para o qual foi projetada. As passarelas servem para tráfego de pedestres, motos e veículos de tração animal e foram colocadas tábuas ao lado dos trilhos, se apoiando sobre os dormentes, para o tráfego de automóveis em baixa velocidade, pela estrutura principal da ponte.

A estrutura, na realidade, é um conjunto de pontes em treliça tipo Pratt. Também é importante notar que, praticamente, todas as barras da estrutura da PMH são em perfis compostos [Neves, 2001].

A seção longitudinal da ponte é composta por 14 sistemas desse tipo, sendo 4 vãos de acesso, dois de cada lado, com 37,1m cada (Ponte 1) e 10 vãos centrais de 51,10m cada (Ponte 2), somando um total de, aproximadamente, 660m de estrutura metálica. A Figura 5 mostra a seção longitudinal total da PMH com seus 14 sistemas estruturais em treliça.

A ponte está assentada em 13 pilares construídos em pedra. A transmissão das cargas das treliças principais para os pilares é realizada através de aparelhos de apoio metálicos, fixos e móveis, localizados nas extremidades das treliças [Neves, 2001].

Tabela 2 - Resultados do ensaio de tração da amostra 1.

CP	Fu (kN)	Fy (kN)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	%A	% δ
1	30,45	15,10	613,91	304,38	50,30	22,35
2	34,35	16,48	574,13	275,45	62,19	35,00
3	33,55	12,85	556,27	213,06	60,21	35,00
4	31,35	16,57	550,00	290,70	57,89	35,00

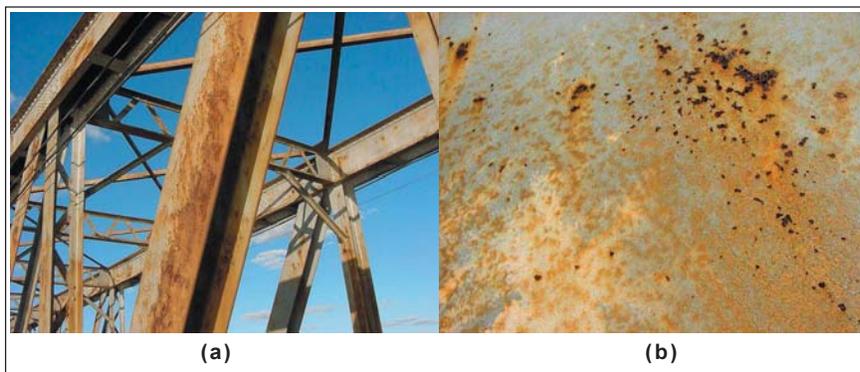


Figura 3 - Corrosão generalizada nas estruturas metálicas da ponte – regiões superiores.



Figura 4 - Visão em perspectiva da Ponte Marechal Hermes.

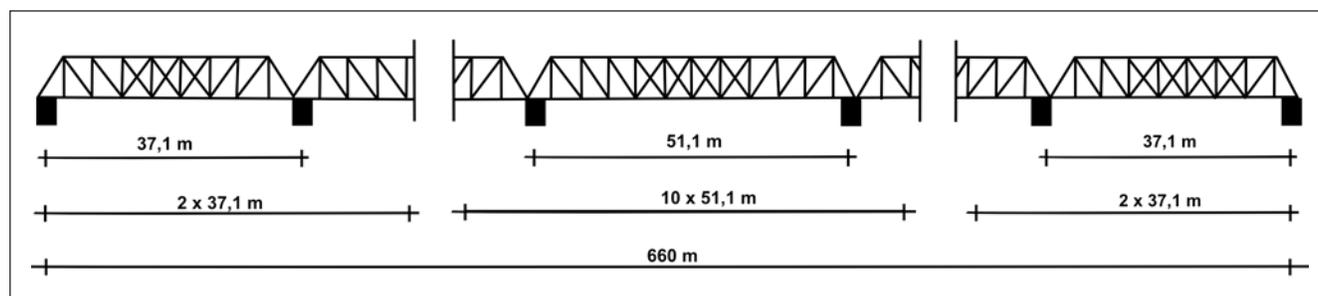


Figura 5 - Representação esquemática da seção longitudinal da Ponte Marechal Hermes: 4 vãos de acesso (2 de cada lado) e 10 vãos centrais.

3.2 Modelagem em elementos finitos

Para a modelagem da PMH em elementos finitos, através do programa SAP2000, consideraram-se aço estrutural ASTM – A36 ($f_y = 250$ MPa; $f_u = 400$ MPa) e módulo de elasticidade $E = 20.000$ kN/cm².

Foram feitas modelagens de duas pontes [Brinck, 2004]. A primeira (Ponte 1), representando os 4 vãos de acesso à PMH (duas de cada lado), com 37,10 m de comprimento, e a segunda (Ponte 2), representando os 10 vãos centrais da ponte com 51,10 m de comprimento. Para isso, foram observadas todas as características de ambas as pontes, como, por exemplo, os perfis de cada uma com suas respectivas dimensões. Como os perfis das barras são, em sua maioria, perfis compostos, foi necessário que se definissem esses perfis como perfis genéricos. Além disso, foi criada uma nomenclatura para os perfis, independente da que é utilizada usualmente.

Os três tipos de modelagens empregadas para a ponte são descritas a seguir: i) modelo de pórtico espacial - modelagem tridimensional com elementos de pórtico espacial; ii) modelo de treliça espacial - modelo tridimensional, onde as treliças principais foram rotuladas apenas em seu plano e as barras que compõem a seção transversal da ponte continuaram tendo um comportamento de pórtico; portanto foram usados elementos de pórtico com nó rígido e de pórtico com extremidades rotuladas; iii) modelo de treliça plana - os elementos pertencentes aos banzos superior e inferior foram discretizados com elementos de pórtico plano com nó rígido, enquanto os elementos pertencentes às diagonais foram rotulados nas extremidades.

No caso da treliça plana, por existir apenas um plano, que é o de uma das treliças principais, as cargas foram relocaladas de forma que os carregamentos, que antes eram aplicados nas longarinas, passaram a ser aplicados no banzo inferior da treliça e os carregamentos, que

eram perpendiculares ao plano da treliça, como vento, foram eliminados. Essas cargas foram calculadas, considerando-se apenas metade de todo o carregamento de cada uma das pontes. A Figura 6 mostra uma das modelagens utilizada.

3.3 Carregamentos

As cargas utilizadas para avaliação foram [Guerra, 1994]: peso próprio da estrutura; sobrecarga devido às passarelas; sobrecarga devido aos trilhos e dormentes; vento, segundo a norma ABNT NBR 6123/1988; carga móvel - trem-tipo (TB 240 e TB 170), segundo a norma ABNT NBR 7189/1982, e impacto lateral.

Foram feitas quatro combinações de carregamento; duas considerando a ponte carregada e duas considerando a ponte descarregada. O coeficiente de impacto vertical foi inserido nessa fase. As combinações feitas foram:

- COMB 1 = PP + SC + IL + V1 + Move 1; sem considerar os coeficientes de majoração das ações.
- COMB 2 = PP + SC + V2; sem considerar os coeficientes de majoração das ações.
- COMB 3 = PP + SC + IL + V1 + Move 1; considerando os coeficientes de majoração das ações dados pela norma.

- COMB 4 = PP + SC + V2; considerando os coeficientes de majoração das ações dados pela norma.

Sendo: PP = Peso próprio; SC = Sobrecarga devido às passarelas; IL = Impacto lateral; V1 = Vento na ponte carregada; V2 = Vento na ponte descarregada; Move 1 = Carga móvel.

É importante citar que o peso próprio da estrutura foi calculado de forma automática pelo SAP2000. A sobrecarga devido às passarelas foi calculada a partir de uma modelagem também feita no SAP2000. A sobrecarga devido aos trilhos e dormente foi calculada e, posteriormente, colocada sobre as longarinas das Pontes 1 e 2. O valor desse carregamento foi de 2,89 kN/m, por longarina, nas duas pontes.

O Vento foi calculado segundo a norma ABNT NBR 6123/88, considerando a ponte carregada e descarregada, e aplicado nos banzos superior e inferior da treliça principal das Pontes 1 e 2.

A Figura 7 mostra o carregamento devido ao vento que foi aplicado em uma das pontes, considerando a ponte carregada.

Como carga móvel, foi utilizado, segundo a norma ABNT NBR 7189/1982, o trem-tipo TB 240 (adotado na verificação de estabilidade e projeto de reforço de obras existentes). A Figura 8 ilustra o trem-tipo utilizado como carga móvel nas Pontes 1 e 2.

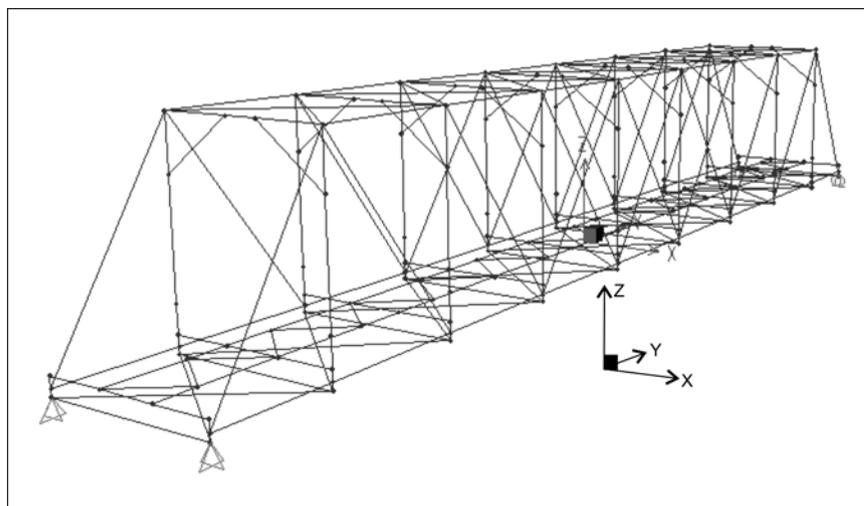


Figura 6 - Modelagem da Ponte 1 como pórtico espacial.

Para a entrada de dados referentes à carga móvel no modelo, foi necessário que se definissem uma faixa de tráfego, o veículo e a classe do veículo. O cálculo dos esforços devido à carga móvel foi obtido por envoltórias, cuja posição do trem-tipo foi determinada de forma automática pelo programa SAP2000.

Tendo essa etapa concluída, foi possível verificar a capacidade de carga da ponte e identificar as barras mais solicitadas da estrutura. Essa identificação foi feita, selecionando-se as barras mais tracionadas, mais comprimidas ou solicitadas com os maiores momentos fletores, e verificando-se, através de dimensionamento, se todas atendiam aos critérios especificados pela norma. O dimensionamento foi feito de acordo com a norma atual, usando o Método dos Estados-Limites. Os esforços devidos à flexão encontrados nas barras foram transformados em esforços axiais correspondentes e, então, somados aos esforços axiais já existentes. Para isso, calculou-se um coeficiente K, em cm, chamado fator de flexão do perfil, pelo qual se dividiu o momento fletor M, em kNm [Carnasciali, 1976], ou seja,

$$P = \frac{M}{K}$$

onde K é o momento resistente W dividido pela área A da seção transversal do perfil. Os perfis foram, então, dimensionados apenas para tração ou compressão.

O método escolhido para a introdução de danos na estrutura foi o de diminuição de 5% da seção transversal, em alguns pontos de algumas barras, baseado na perda de material resultante do processo corrosivo. A análise dos resultados foi feita, comparando-se as solicitações encontradas, nessas barras e nos elementos mais solicitados da estrutura, com as que haviam sido encontradas no modelo são.

3.4 Ensaios de laboratório: sistema de pintura

Para a avaliação das tintas [Nunes e Lobo, 1998] utilizaram-se chapas de aço carbono. Optou-se por ensaiar dois sis-

temas epóxi puro e um sistema silicato de zinco, com o uso de um acabamento de poliuretano. Para que fosse possível observar melhor o comportamento de cada tinta, os sistemas de pintura foram divididos em subsistemas, como pode ser visto na Tabela 3.

Foram utilizados 8 CPs para o ensaio de aderência e 120 para o ensaio de resistência à névoa salina. A limpeza dos CPs se deu por meio de jateamento abrasivo nos padrões Sa2 ½ e Sa3, obedecendo às recomendações do fabricante das tintas.

A pintura dos CPs foi feita com pistola convencional (a ar comprimido), de acordo com as recomendações do fabricante, observando-se a proporção de mistura, a forma de preparo da mistura, a diluição, a forma de aplicação, o tempo de secagem e o tempo para repintura.

Para os ensaios de aderência, os CPs foram preparados, pintados e envelhecidos (tempo necessário para a cura da tinta). Em seguida, foram feitos cortes em grade na pintura e

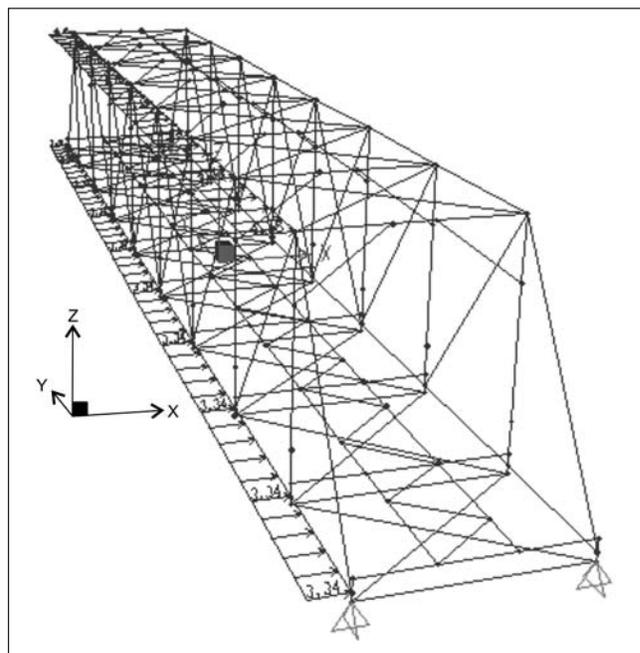


Figura 7 - Vento na Ponte 1, carregada.

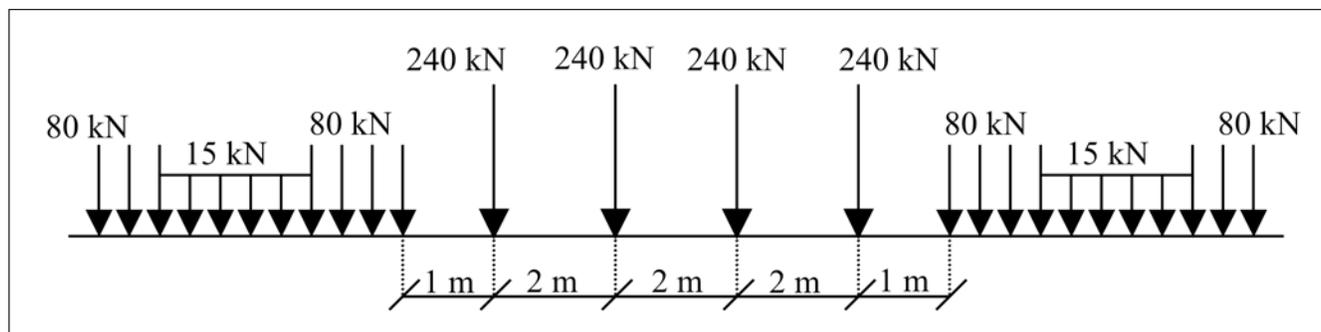


Figura 8 - Carga móvel utilizada na modelagem; trem-tipo TB 240.

uma fita adesiva foi aplicada sobre a área cortada e, após sua retirada, observou-se a aderência da tinta comparando-se a área ensaiada à tabela de avaliação contida na norma.

Para o ensaio de Resistência à Névoa Salina, foram feitos cortes horizontais na parte inferior de uma das faces dos CPs e estes foram distribuídos aleatoriamente em bandejas. As bandejas foram, então, colocadas na câmara de névoa salina com inclinação de 30°, temperatura de 35°C ($\pm 2^\circ\text{C}$), e submetidas à névoa de solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl) a 5% (em peso). Foram feitas retiradas de 1 a 5 semanas, sendo a bandeja 1 com 1 semana, a bandeja 2 com 2 semanas e, assim, sucessivamente. Após cada retirada, os CPs foram, imediatamente, enxaguados sob água limpa corrente e secos superficialmente com ar comprimido. Foram, então, realizadas técnicas para determinação do grau de migração subcutânea (MS), grau de empolamento (G_{Emp}) e grau de enferrujamento (G_{Enf}).

4. Resultados

Todos os esforços máximos obtidos através das modelagens ocorreram para a combinação de carregamento COMB3 composta pelas seguintes cargas: peso próprio (estrutura + trilhos e dormentes), sobrecarga (passarelas), impacto lateral, vento na ponte carregada e carga móvel; considerando os coeficientes de majoração das ações dados pela norma. Como era de se esperar, a Ponte 2 apresentou o mesmo comportamento da Ponte 1. Foi realizada, também, uma verificação da capacidade de carga dos perfis, comparando-se a maior solicitação (onde essa solicitação se refere àquela obtida entre as três modelagens adotadas) atuante num perfil com o seu limite de resistência, para cada peça estrutural. A título de ilustração, é apresentada, na Figura 9, entre os vários gráficos gerados, uma comparação entre esses valores. Os valores mostrados em cinza se referem aos esforços máximos atuantes e em preto, à capacidade máxima de resistência da peça.

Tabela 3 - Sistemas e subsistemas de pintura empregados.

Sistema de pintura	Subsistema de pintura	Tintas
1	A	Pr
	B	Pr + Me
	C	Pr + Me + Po
2	D	Me
	E	Me + Po
3	F	Es
	G	Es + Pr
	H	Es + Pr + Po

Sendo:

Pr - *Primer* epóxi-amida rico em zinco.

Me - *Mastic* epóxi-amida econômico.

Es - Etil-silicato de zinco.

Po - Esmalte poliuretano alifático.

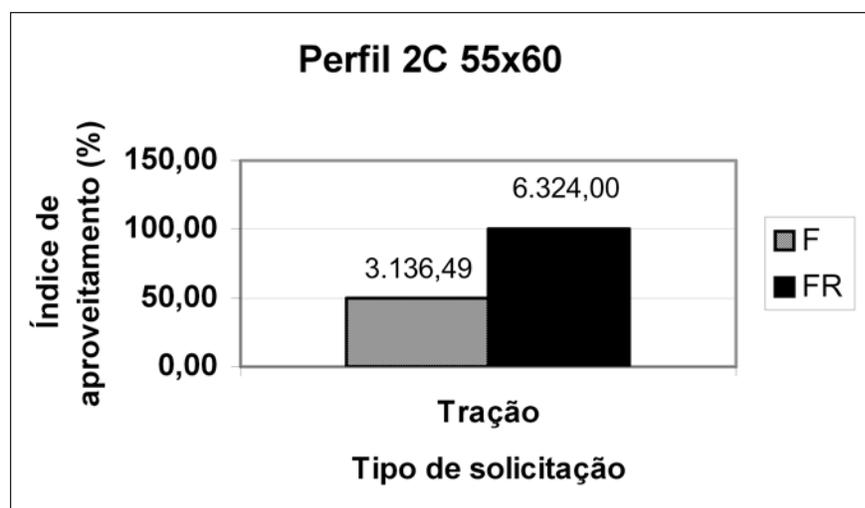


Figura 9 - Comparação entre a maior solicitação no perfil 2C 55x60 (banzo inferior da treliça principal, da Ponte 1) e sua resistência.

Na Tabela 4, são apresentados os valores médios dos esforços para a treliça principal (compressão e tração), para cada sistema componente, de acordo com o tipo de modelo utilizado. Os resultados do ensaio de aderência são apresentados na Tabela 5.

A Tabela 6 apresenta os resultados encontrados nos ensaios de resistência à névoa salina. Os resultados desses ensaios são expressos através de: migração subcutânea (MS), grau de empolamento (G_{emp}) e grau de enferrujamento (G_{enf}).

5. Discussão

Através da inspeção visual, foi possível observar que, apesar de alguns elementos terem as seções transversais com mesma geometria, suas dimensões são diferentes. Também foi possível perceber que os pontos de corrosão parecem se repetir nos vários vãos da PMH. Em sua parte aérea, a PMH apresenta apenas uma corrosão superficial. Já nas regiões inferiores, onde há acúmulo de eletrólitos, nota-se um grau de degradação muito maior, podendo-se encontrar, inclusive, algumas peças secundárias rompidas.

Observando-se a Tabela 4, podemos perceber que a distribuição de esforços, nas treliças principais, quanto aos seus valores máximos, para os três tipos de modelos usados, ocorre para os mesmos elementos e apresenta a mesma grandeza, portanto o efeito da tridimensionalidade parece não ser tão importante. Como era de se esperar, as treliças principais se apresentam suportando os maiores esforços.

A Figura 9 mostra que há uma reserva de resistência considerável nos perfis. Vale lembrar que a verificação foi feita considerando somente os esforços axiais através do método dos estados-limites, segundo a norma brasileira. Quando a peça era submetida a momentos fletores, esses esforços eram transformados em esforços axiais equivalentes. Quando verificadas automaticamente pelo programa SAP2000, segundo a norma americana AISC-ASD89, percebe-se que a Ponte 2 (maior vão) se apresenta com um maior número de barras que não atendem às especificações. Nessa verificação, entretanto, é levada em conta a flexão oblíqua composta.

Quanto ao dano inserido no modelo, utilizando-se a norma AISC-ASD89, ele teve pouca influência na distribuição dos esforços pela estrutura. O dano inserido não foi suficiente para que se possa tirar qualquer conclusão, daí a necessidade de novas análises.

Em relação ao grau de aderência (Tabela 5), os três sistemas (amostras C,

Tabela 4 - Valores médios para os esforços obtidos para cada sistema componente da Ponte 1, de acordo com o tipo de modelo.

Sistemas Componentes		Pórtico Espacial	Treliça Espacial	Treliça Plana
Treliça Principal	Banzo Superior/inferior	310 tf	319 tf	315 tf
	Diagonais	200 tf	200 tf	198 tf
	Montantes	90 tf	99 tf	77 tf
Longarinas e Transversinas		41 tf		-----
Contraventamento Inferior		18 tf		-----
Contraventamento Superior		16 tf		-----

Tabela 5 - Resultados do ensaio de aderência.

RESULTADOS OBTIDOS			
Amostra	Revestimento Material	Espessura (Micrômetros)	Avaliação de pinturas (GA)
A	Pr	113	Gr 0A
B	Pr + Me	306,02	Entre Gr 2A e Gr 3A
C	Pr + Me + Po	327,9	Gr 2A
D	Me	174,05	Gr 2A
E	Me + Po	285,45	Entre Gr 2A e Gr 3A
F	Es	143,05	Entre Gr 1A e Gr 2A
G	Es + Pr	339,45	Gr 1A
H	Es + Pr + Po	> 500	Entre Gr 2A e Gr 3A

E e H) apresentaram comportamento similar e, apesar da aplicação do *primer* (amostra A) apresentar melhor desempenho, é importante lembrar que existem outros fatores que determinam a qualidade de um sistema de pintura.

Também é possível observar, nas Tabelas 5 e 6, que a espessura da película de tinta seca ficou acima do que é recomendado pelo fabricante, o que pode

ter ocorrido devido à má aplicação das tintas, seja por falta de uma mão-de-obra especializada ou pela presença de algum defeito no equipamento utilizado. Isso parece não afetar os resultados de ensaios feitos em laboratório, no entanto é de grande importância que, na prática, essa espessura seja rigorosamente exigida, para que não hajam gastos excessivos de tinta, onerando, assim, a proteção da estrutura.

Tabela 6 - Ensaio de Resistência à Névoa Salina.

Resultados Obtidos			Duração do ensaio: até 5 semanas								
Amostra	Revestimento		Semanas de ensaio					Avaliação de pinturas			
	Material	Espessura (µm)	1	2	3	4	5	G _{Emp}	G _{Enf}	MS (mm)	
D ₁	Me	174,05	x					d ₂ /t ₂	F ₀	29,86	
D ₂	Me	174,05		x				d ₃ /t ₄	F ₀	36,88	
D ₃	Me	174,05			x			d ₃ /t ₃	F ₀	35,04	
D ₄	Me	174,05				x		d ₃ /t ₅	F ₀	27,63	
D ₅	Me	174,05					x	d ₄ /t ₄	F ₀	25,79	
H ₁	Es + Pr + Po	> 500	x					d ₀ /t ₀	F ₀	0	
H ₂	Es + Pr + Po	> 500		x				d ₀ /t ₀	< F ₁	0	
H ₃	Es + Pr + Po	> 500			x			d ₀ /t ₀	F ₀	0	
H ₄	Es + Pr + Po	> 500				x		d ₃ /t ₂	F ₀	0	
H ₅	Es + Pr + Po	> 500					x	d ₀ /t ₀	F ₀	0	

Na Tabela 6, estão apresentados apenas os piores e melhores resultados obtidos nos ensaios de resistência à névoa salina. A partir desses resultados, foi possível observar que todos os sistemas apresentaram $G_{Enf} = F_0$, ou seja, não apresentaram pontos de corrosão sobre a tinta. Apenas o sistema 3 (amostra H) apresentou $G_{Emp} = d_0/t_0$, o que significa que este não apresentou bolhas. Em relação à migração subcutânea, o sistema 2 (amostra D) apresentou-se com pior desempenho.

Um aspecto muito importante no desempenho de tintas é o preparo adequado de superfície. Além disso, deve-se observar o grau de umidade relativa do ambiente e a variação na composição das tintas em termos de porcentagens sólidos/volume, que, geralmente, estão disponíveis em tintas comerciais.

6. Conclusões

Com base nos resultados apresentados e discutidos, pode-se enunciar as seguintes conclusões:

- A distribuição de esforços nas treliças principais e nos outros elementos, quanto aos seus valores máximos, ocorre praticamente, para os mesmos elementos nos três modelos adotados ou seja, o efeito da tridimensionalidade para a distribuição de esforços não é importante.
- Os perfis apresentaram boa reserva de resistência, quando verificados somente para esforços axiais, usando a norma brasileira. No entanto, quando verificados através da utilização do programa SAP2000, de acordo com a norma americana AISC-ASD89, o mesmo não ocorreu. Nessa verificação, entretanto, é levada em conta a flexão oblíqua composta.
- O dano introduzido no modelo, visando a avaliar a corrosão (redução de 5% da seção transversal), teve pouca influência na distribuição de esforços pela estrutura.
- Verificou-se que a Ponte Marechal Hermes encontra-se em elevado estado de degradação por corrosão, principalmente, em regiões onde ocorrem acúmulo de eletrólito.

- Os locais com presença de frestas têm desenvolvido intenso ataque corrosivo. Nessas regiões, desenvolvem-se produtos de corrosão, que atuam como concentradores de tensão, provocando deformação e até ruptura de algumas peças que compõem os elementos estruturais.
- É necessário um preparo de superfície adequado, com especial atenção para as frestas e ligações e, posteriormente, aplicar o revestimento através de pintura.
- A partir de ensaios de névoa salina, verificou-se que o sistema de pintura de melhor desempenho foi com aplicação de etil silicato de zinco com primer epóxi-amida rico em zinco e esmalte poliuretano alifático.
- Diante dos dados obtidos e da espontaneidade do fenômeno de corrosão, é necessário que se faça manutenção periódica na Ponte Marechal Hermes.

7. Referências Bibliográficas

- 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).
- CÂNDIDO, L. C. *Patologia - Notas de aula do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFOP*, Ouro Preto: 2002. 108p.
- CARNASCIALI, C. C. *Estruturas metálicas na prática*. São Paulo: 1976. 174p.
- GENTIL, V. *Corrosão*. Rio de Janeiro: 2003. 341p.
- GUERRA, E. O. *Curso de pontes metálicas - notas de aula do Instituto Politécnico da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais*. Belo Horizonte: 1994. 84p.
- NEVES, F. A. *Avaliação preliminar da ponte ferroviária metálica sobre o rio São Francisco*. Ouro Preto: 2001. 57p.
- NUNES, L. P., LOBO, A. C. O. *Pintura industrial na proteção anticorrosiva*. Rio de Janeiro: 1998. p. 1-33.
- PANNONI, F. D. *Coletânea do uso do aço 2 - Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio*. 2. ed. Açominas, 2004. v. 2. p. 13-66.
- WOODWARD, R. J. et alii. *Final Report - Contract n° RO - 97 - SC.2220*, BRIME, 2001. p. 29-100.

Artigo recebido em 09/01/2005 e aprovado em 21/11/2005.