

IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES

VI CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE

PORTO ALEGRE - RS - BRASIL
21 A 24 DE OUTUBRO DE 1997

ANAIS VOLUME 2

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Civil
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º. Andar
90035-190 - Porto Alegre - RS - Brasil
Fones: +55 (51) 316-3333 / 316-3538
Fax: +55 (51) 316-3999
E-mail: conpat97@vortex.ufrgs.br





IV CONGRESSO IBEROAMERICANO
DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES

VI CONGRESSO DE
CONTROLE DE QUALIDADE

21 A 24 DE OUTUBRO DE 1997 - PORTO ALEGRE, RS, BRASIL

LEME / CPGEC - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL PARA REFORÇO DE VIGAS REBITADAS DE PONTES - USO DE CABOS EXTERNOS

Roberto Martins Gonçalves 555 355

Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas,
Escola de Engenharia de São Carlos, USP (E-mail goncalve@sc.usp.br)

Toshiaki Takeya 192 788

Professor Assistente, Departamento de Engenharia de Estruturas,
Escola de Engenharia de São Carlos, USP

Luiz Fernando L. Ribeiro

Professor Assistente, Departamento de Engenharia Civil,
Universidade Federal de Ouro Preto

RESUMO

Este trabalho discute os principais aspectos do reforço de vigas de aço rebetadas utilizando cabos como metodologia de reforço, destinados a aumentar a capacidade resistente ao momento fletor e força cortante.

Apresentam-se os resultados experimentais obtidos no ensaio de quatro modelos de vigas rebetadas com 4.040mm de vão, 380mm de altura e rebites com diâmetro nominal de 12,5mm (viga rebetada sem reforço, viga com reforço de mesa por adição de chapas, reforço com cabo reto e reforço com cabo poligonal).

1. INTRODUÇÃO

A utilização de rebites como meio de ligação ocorreu até fins da década de 50 e a sua eficiência pode ser avaliada pelas obras construídas com este elemento, tais como: ponte Golden Gate, ponte Ercílio Luz, Empire State Building entre tantas outras.

No Brasil as pontes ferroviárias, em sua grande maioria, foram executadas utilizando rebites na composição de chapas e perfis, bem como nas ligações. Estas pontes são anteriores a década de 50 e continuam sendo utilizadas, sendo que muitas destas são centenárias.

O transporte rodoviário e ferroviário passou por profundas modificações nas últimas décadas e hoje as cargas por eixo nos veículos e nos vagões ferroviários aumentou significativamente, consequentemente aumentando as solicitações nas pontes existentes.

A simples substituição de pontes antigas, algumas centenárias, envolve custos elevados o que justifica, na maioria dos casos, o reforço e a recuperação das pontes existentes.

SYSNO 952524
PROD 003337

ACERVO EESC

A necessidade de reforçar uma ponte tem várias causas e entre estas pode-se citar: aumento do trem tipo, alteração no gabarito vertical ou horizontal, deterioração, fadiga de elementos, etc.

A complexidade e variedade da tipologia estrutural exige uma análise detalhada de cada caso. Cada reforço ou recuperação de uma ponte tem suas particularidades que vão desde o tipo de ponte, localização e idade.

As possíveis soluções técnicas sobre a melhor solução para reforço de uma ponte exige estudos que englobem a segurança estrutural, viabilidade econômica, tempo de interrupção da via e a análise custo-benefício com todas as opções sendo analisadas, incluindo a sua substituição. Entre as passíveis de serem utilizadas para aumentar a capacidade resistente de uma ponte ou recuperá-la estão: recuperação e reforço de elementos isolados, redução da carga permanente, transformação de vigas isoladas em vigas mistas, aumento da rigidez transversal, adição ou substituição de elementos, reforço ou alteração de ligações, alteração do esquema estático, superposição de nova estrutura portante e a utilização de cabos protendidos.

A utilização de cabos protendidos vem sendo utilizado com êxito desde a década de 40 e como ilustração cita-se uma ponte de 45,3m de vão, fabricada em 1876, sobre o Rio Wye Monmouth (Inglaterra) e que foi recuperada em 1957; ou a ponte rodoviária em seção caixão, montada em 1971 sobre o Rio Clyde (Escócia) e que foi reforçada em 1976. No Brasil tem-se os exemplos das pontes ferroviárias na Serra da Graciosa (Curitiba-Paranaguá), onde várias foram reforçadas através da utilização de vigas armadas.

Este trabalho apresenta os resultados experimentais obtidos no ensaio de quatro modelos de vigas rebitadas com 4.040mm de vão; 380mm de altura; utilizando rebites de diâmetro nominal de 12,5mm, compreendendo uma viga sem reforço, uma viga reforçada por adição de chapas nas mesas, um reforço constituído de dois cabos protendidos retos e um reforço constituído de um cabo poligonal(viga armada).

2. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Os modelos foram projetados procurando adequar as diferentes variáveis como altura da viga, espessura das chapas de mesa e alma, afastamento entre rebites, às recomendações de projeto de pontes.

Utilizaram-se aços ASTM-A36 nas chapas e perfis que compuseram as mesas, alma e cantoneira de ligação, aço SAE-1008 para os rebites e tirantes em aço SAE-1040.

As seções transversais, em número de duas, apresentam as seguintes características:

- alma com altura 350mm e espessura da chapa de 4,8mm;
- cantoneiras de composição 44x44x4,8;
- mesas com largura de 125mm e espessura 4,8mm, as chapas de reforço das mesas na Viga 2 e 4 tem largura de 125mm e espessura de 4,8mm.

Várias seções foram instrumentadas utilizando "strain gages" uniaxiais para as mesas e tirantes e rosetas para a alma, salientando que a instrumentação de elementos rebitados constituiu um dos objetos deste estudo, tendo em vista a necessidade de se verificar os resultados obtidos em função das possíveis alterações das deformações provenientes da presença de rebites dispostos de maneira uniforme e constante nas mesas e nas cantoneiras de composição.

As figuras 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 ilustram a geometria e a instrumentação utilizada nas vigas ensaiadas, ressaltando-se que a Viga 1, sem reforço transversal foi utilizada como referência para comparações com as demais vigas reforçadas.

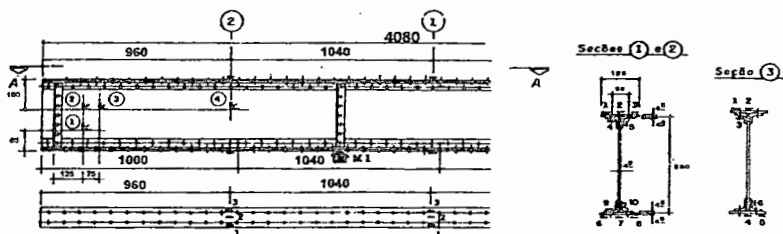


Figura 2.1 - Viga 1: mesas com uma única chapa sem reforço ($I=9.720 \text{ cm}^4$)

A Viga 2 foi reforçada através da adição de chapas nas mesas com um comprimento de 2640 mm e com o espaçamento entre os rebites (12,5mm de diâmetro) de 80mm.

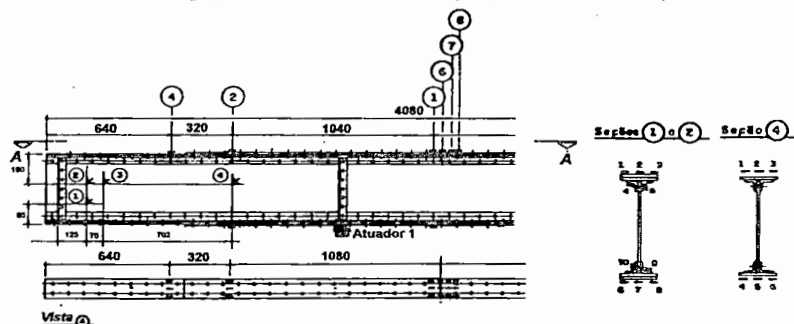


Figura 2.2 - Viga 2: mesas com uma chapa de reforço ($I=13.600 \text{ cm}^4$)

A Viga 3, sem reforço de mesas, foi reforçada através da adição de dois tirantes retos (diâmetro de 16mm) afastado das mesas 65mm e vinculados a estas através de consoles de aço parafusados. O comprimento do tirante foi de 2810mm, portanto parcialmente disposto na viga cujo comprimento é de 4.040mm.

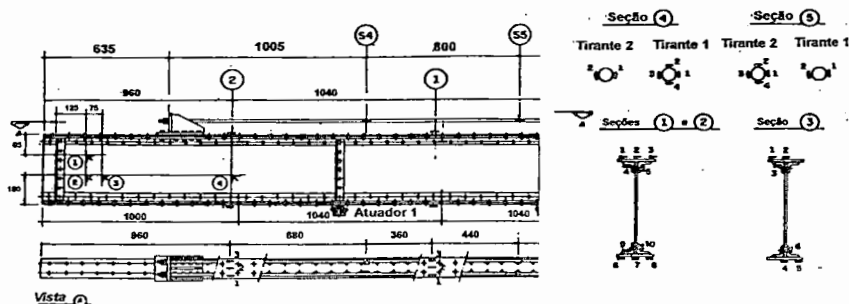


Figura 2.3 - Viga 3: mesas com uma única chapa com tirantes retos ($I=9.720 \text{ cm}^4$)

A Viga 4, com reforço de mesas, foi transformada em uma viga armada através da adição de dois tirantes em forma poligonal (diâmetro de 20mm) afastados das mesas 410mm pela presença de um montante (perfil I 75x8,48) e vinculados às mesas através de consoles de aço parafusados. Na região central desta viga utilizaram-se várias seções instrumentadas com

extensômetros elétricos de resistência para avaliar as deformações onde há a presença de rebites e nas seções próximas para avaliar a influência destes nas medidas de deformações efetuadas.

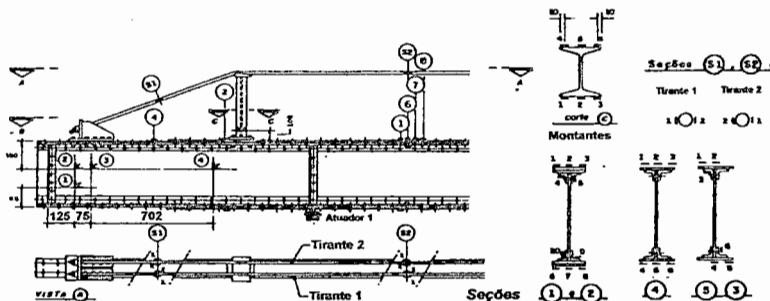


Figura 2.4 - Viga 4: mesas com duas chapas com tirantes do tipo viga armada ($I = 13.600 \text{ cm}^4$)

As forças externas foram aplicadas através de dois atuadores hidráulicos com capacidade de 200kN e acoplados a células de carga, o posicionamento e disposição dos modelos estão apresentados na Figura 2.5.

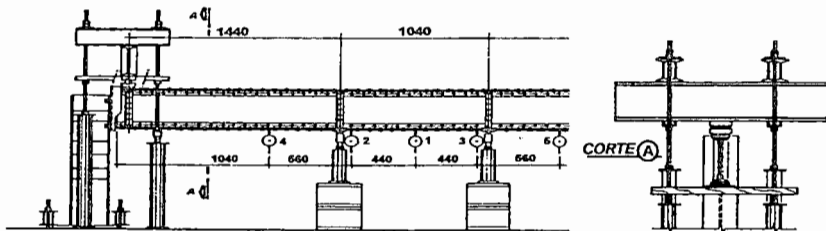


Figura 2.5 - Esquema do pórtico de reação para a realização dos ensaios

Foram aplicadas forças externas estáticas, em etapas sucessivas após o escorvamento da viga e da estrutura de reação, sendo que estes carregamentos se restringiram ao comportamento elástico da viga. Este procedimento é condizente com as condições de utilização de uma ponte onde as limitações impostas pelo dimensionamento à fadiga conduzem a este regime de comportamento elástico.

Os modelos foram carregados em etapas de 10 kN, sendo três as etapas de escorvamento, e em cada etapa foram realizadas as leituras de deformações dos extensômetros elétricos de resistência e dos relógios comparadores.

3. ANÁLISE TEÓRICA E ANÁLISE DAS TENSÕES EM VIGAS REFORÇADAS POR CABOS PROTENDIDOS

A análise de reforços em pontes existentes tem particularidades que não se limitam a obtenção do "melhor" tipo de reforço do ponto de vista estrutural mas também a uma análise global que envolve desde a localização da ponte, condições de acesso para a execução dos reforços, idade da ponte, tempo disponível de interrupção do tráfego, condições dos elementos que a compõem quanto a corrosão e fadiga e principalmente as condições dos carregamentos que originam a necessidade de reforços.

Neste trabalho a análise teórica para as vigas 1,2 e 4 foi realizada através do método dos elementos finitos, no regime elástico linear, pois trata-se das condições normais de utilização das pontes.

Para a viga 3, apresentam-se deduções desenvolvidas também no regime elástico, que possibilitam realizar as principais verificações (baseadas na AASTHO e AREA), bem como definir os parâmetros necessários quanto a dimensão dos tirantes (comprimento e seção transversal) e seu posicionamento (excentricidades) e a protensão.

A figura 3.1 ilustra as características da viga com cabo reto protendido, a Figura 3.2 ilustra os carregamentos a serem considerados.

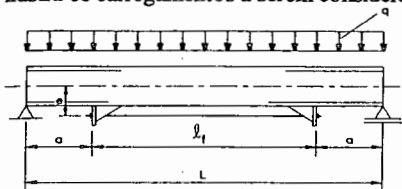


Figura 3.1 - Características da viga e dimensões gerais

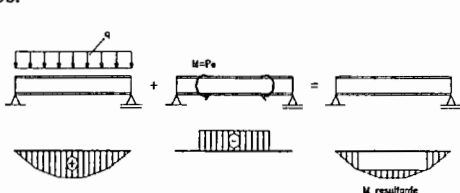


Figura 3.2 - Carregamentos e diagrama de momentos fletores

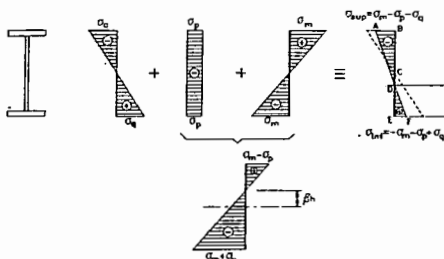


Figura 3.3-Tensões normais devido à carga distribuída equivalente e a força de protensão

A Figura 3.3 ilustra as condições gerais a serem analisadas, onde $\sigma_q = \frac{M}{W}$

(tensão devida a carga q), $\sigma_p = \frac{PM}{A_g}$ (tensão

normal devida a protensão) e $\sigma_m = \frac{eP}{W}$ (tensão devida ao momento introduzido pela protensão), sendo α o coeficiente da posição final da linha neutra e β o coeficiente da posição da linha neutra para a protensão.

A análise da Figura 3.3 permite obter as expressões :

$$\sigma_{sup} = 2\sigma_p + \sigma_{inf} \quad (1)$$

e

$$\sigma_{inf} = \sigma_q (1 - 2\alpha) \quad (2)$$

sendo que esta última expressão permite avaliar a posição da linha neutra, ou seja:

- a) mesa inferior tracionada: $0 < \alpha < 0,5 \Rightarrow 0 < \sigma_{inf} < \sigma_q$
- b) tensão nula na mesa inferior: $\alpha = 0,5 \Rightarrow \sigma_{inf} = \sigma_q$
- c) compressão na mesa inferior: $\alpha > 0,5 \Rightarrow \sigma_{inf} > \sigma_q$
- d) posição limite da linha neutra: $\sigma_{inf} = -f_y \Rightarrow \alpha = 0,5(1 + \frac{f_y}{\sigma_q}) \quad (3)$

A análise das expressões anteriores permite concluir que o parâmetro α define o tipo de comportamento desejado, inversão ou não das tensões na mesa inferior da viga a reforçar. O comprimento do tirante é definido, em primeira aproximação, em função da solicitação na

seção de ancoragem, bem como na carga equivalente uniformemente distribuída que incorpora as ações permanentes e acidentais.

O equacionamento baseado na figura 3.1, admitindo tensão máxima devido a carga q como a tensão de plastificação permite obter a posição dos consolos expressa por:

$$x_1 = 0,5\ell \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{f_y}{\sigma_q} - 2\alpha} \right) \quad (4)$$

Fixado o comprimento do tirante e a "taxa de trabalho" $\left(\frac{\sigma_q}{f_y}\right)$, é possível determinar a força de protensão no tirante:

$$F_{\text{prot.}} = 2\alpha\sigma_q A_g \left(\frac{W}{A_g e + W} \right) \quad (5)$$

Com estes parâmetros é possível estimar e avaliar corretamente a geometria que melhor se adapte à viga a ser reforçada, bem como estimar a força de protensão.

4. ANÁLISE RESULTADOS

Os resultados obtidos para os deslocamentos para as quatro vigas são coerentes e alguns comentários podem ser realizados:

- o comportamento dos deslocamentos da Viga 1 são muito próximos aos obtidos teoricamente (vide Gráfico 4.1) até a força aplicada de 80 kN, onde ocorre o início da perda de estabilidade lateral que justifica o aumento de deslocamento superiores aos obtidos teoricamente. Salienta-se que a força crítica teórica obtida para esta viga foi de 87 kN;
- os resultados de deslocamentos experimentais para a Viga 2 indicam um comportamento linear e próximo aos obtidos teoricamente (vide Gráfico 4.1). Não ocorreu perda de estabilidade ou deslocamentos das chapas de mesas em relação aos rebites;
- os resultados para os deslocamentos da Viga 3 (vide Gráfico 4.2) são os obtidos após a aplicação da protensão (50 kN de tração nos tirantes), o comportamento linear é evidente e o modelo de cálculo considerado reproduz os resultados obtidos teoricamente. Na última etapa de carregamento iniciou o processo de plastificação das porcas que conectavam os tirantes, justificando o aumento maior dos deslocamentos experimentais;
- os resultados dos deslocamentos experimentais obtidos para a Viga 4 (vide Gráfico 4.2) indicam um comportamento claramente bilinear e superior aos obtidos teoricamente, este fato explica-se pelas "folgas existentes no contato tirante/ montante de apoio (tirante contínuo conformado a quente na região da curvatura) e a alteração do segundo trecho linear é justificado pela plastificação das porcas e das arruela de contato, causando assim um aumento dos deslocamentos.

As tensões médias nas mesas das Vigas 1, 2 e 3, apresentadas nos Gráficos 4.3 e 4.4, foram obtidas a partir das medidas de deformações multiplicadas pelo módulo de elasticidade, tendo em vista o comportamento elástico linear.

Os resultados obtidos são próximos dos obtidos teoricamente e reproduzem o comportamento linear também observado nos deslocamentos.

Os resultados obtidos experimentalmente para os tirantes da Viga 3 são inferiores aos obtidos teoricamente e este fato é justificado pela sistemática adotada pelo cálculo teórico que é conservador.

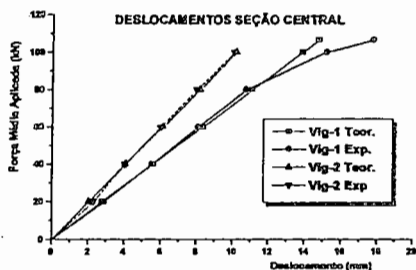


Gráfico 4.1- Deslocamentos Vigas 1 e 2

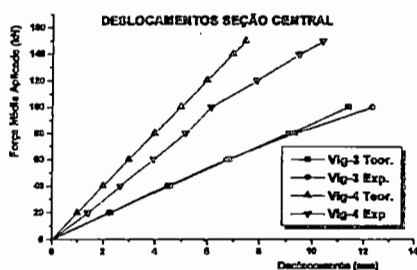


Gráfico 4.2- Deslocamentos Vigas 3 e 4

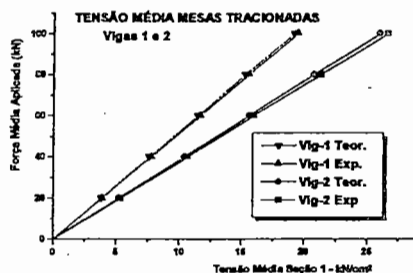


Gráfico 4.2- Tensão Médias Vigas 1 e 2



Gráfico 4.3- Tensões Médias Viga 3

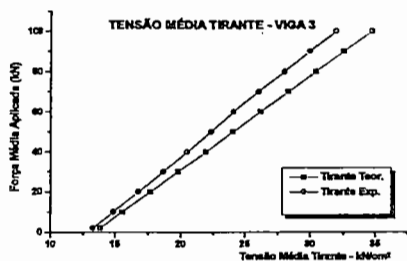


Gráfico 4.5 - Tensões médias tirantes Viga 3

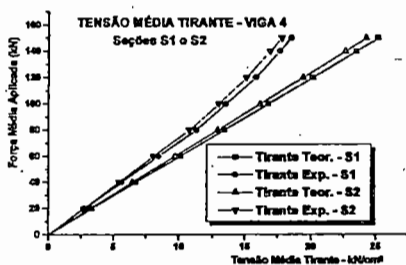


Gráfico 4.6 - Tensões médias tirantes Viga 4



Gráfico 4.7 - Tensões médias mesas Viga 4

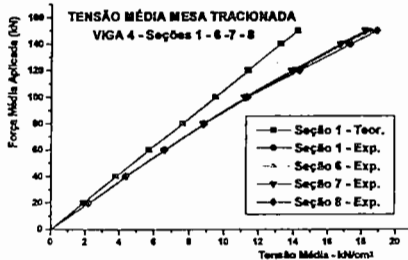


Gráfico 4.8 - Tensões em várias seções mesas

As tensões médias observadas na Viga 4 indicam uma correlação com os resultados teóricos não tão boa quanto aos demais modelos. Nos tirantes o efeito das folgas existentes é claro, salientando também que o modelo teórico foi calculado admitindo uma excentricidade

igual a altura do consolo mais a meia altura da viga. Para as mesas é nítida a influência do efeito dos tirantes, os resultados são superiores aos calculados na mesa tracionada.

A análise dos resultados do Gráfico 4.8 indicam pequena variação nas tensões nas várias seções próximas ao meio do vão, na mesa tracionada, variação da ordem de 2%, indicando que a presença dos rebites não alterou as deformações. Salienta-se que estes resultados são específicos para as condições destes modelos onde não existiu o deslizamento dos rebites.

5. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos pode-se apresentar as seguintes conclusões:

- a) o comportamento força aplicada - deslocamento ou tensão foi linear em todos os modelos, a exceção da Viga 4;
- b) os reforços propostos são eficientes (redução de deslocamentos da ordem de 23% entre Viga 1 e Viga 3 e de 51 % entre Viga 2 e Viga 4)
- c) baseado nos resultados dos deslocamentos, observa-se que os valores teóricos calculados com a inércia líquida se aproximam mais dos resultados experimentais;
- d) os resultados obtidos para as tensões médias são condizentes com os obtidos teoricamente e a utilização de cabos como reforço aumenta a capacidade resistente destas vigas;
- e) a análise linear para estes reforços é a recomendada, principalmente devido as limitações de tensões máximas impostas pelas normas em função da fadiga;
- f) a utilização de cabos como reforço ou meio de recuperação de pontes existentes é eficaz, permite a sua execução com pequenas interferências com os demais elementos, possibilitando uma menor interrupção no tráfego.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da FAPESP Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

REFERÊNCIAS

- AASHTO. *Standard specifications for highway bridges: with 1977-1981 interim specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *Load and resistance factor design specification for structural steel buildings*. Chicago, AISC, 1986. 219p.
- AMERICAN RAILWAY ENGINEERING ASSOCIATION. Steel structures: chapter 15. In: _____. *Manual for railway engineering*. Washington, AREA, 1990.
- AYYUB, B.M.; IBRAHIM, A.; SCHELLING, D. Posttensioned trusses: analysis and design. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, v.116, n.6, p.1491-1506, June, 1990.
- BELENYA, E. *Prestressed load-bearing metal structures*. Translated from the russian by I.V. Savin. Moscow, Mir Publ., 1977. 463p.
- GONÇALVES, R.M. *Alguns aspectos relativos à inspeção e recuperação de pontes de aço: ênfase em pontes ferroviárias*. São Carlos, 1992. 309p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.