

# Análise da distribuição do carregamento transversal móvel em pontes mistas aço-concreto

Zacarias Martin Chamberlain Pravia

Laboratório de Ensaios em Sistemas Estruturais - LESE  
Faculdade de Engenharia e Arquitetura  
Universidade de Passo Fundo, RS, CEP 99001-970, Brasil  
Tel.: 54 3316 8204/54 3316 8219  
e-mail: zacarias@upf.br

## Sumário

O presente trabalho apresenta os resultados de um estudo numérico - computacional para determinação da distribuição de carregamento transversais em pontes mistas aço concreto, usando as seguintes metodologias: coeficiente de distribuição de carregamento transversal previsto pela AASHTO e o trem tipo definido pela NBR 7188/1982, linhas de influência e Método dos Elementos Finitos. O estudo se fundamenta na análise numérica, via elementos finitos, de pontes vigas mistas, considerando a interação de todos os elementos que compõem a estrutura. Pontes de vários vãos (16, 20, 24 e 26 metros) foram estudados e seus resultados comparados aos obtidos por metodologias simplificadas. Os resultados mostram que o uso de linhas de influência para a distribuição de carregamento transversal sobre as vigas é inseguro, já para o uso do coeficiente de distribuição de carregamento preconizado pela AASHTO, os resultados são menores que os obtidos pelo Método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos nos casos avaliados no presente estudo validam o uso do Método dos Elementos Finitos para o projeto de pontes mistas.

**Palavras-chave:** *pontes mistas de estruturas metálicas, distribuição de carregamento transversal.*

## VEHICLE TRANSVERSE LOAD DISTRIBUTION IN STEEL CONCRETE COMPOSITE BRIDGES

### Summary

The present work presents the results of a numeric study for determination of the transverse load distribution in steel concrete composite bridges, using the following methodologies: coefficient of distribution of transverse load by AASHTO and the train defined type by NBR 7188/1982, influence lines and Method of the Finite Elements. Bridges of several lengths (16, 20, 24 and 26 meters) were studied and their results compared to the obtained by simplified methodologies. The results show that the use of influence lines for the distribution of transverse load on the beams is insecure, already for the use of the coefficient of load distribution recommended by AASHTO, the results are smaller than obtained by the method of the finite elements. The present study, also, validate the use of the Method of the Finite Elements for the project of steel concrete composite bridges.

**Keywords:** *steel concrete composite bridges, transverse load distribution.*

## INTRODUÇÃO

O comportamento estático ou dinâmico de pontes é uma tarefa complexa segundo SILVA<sup>1</sup>, no presente estudo baseia-se na análise numérica, via elementos finitos, de pontes com vigamentos em estrutura metálica e tabuleiro de concreto armado, denominados com pontes de vigas mistas, levando em consideração os elementos que compõem a estrutura na transferência dos esforços até os apoios. Trabalho nesse mesmo sentido foi realizado por Willians e Hoit<sup>2</sup> usando redes neurais para obter as máximas solicitações para o projeto de pontes.

O comportamento estrutural dos tabuleiros mistos foi abordado do ponto de vista tridimensional, sendo com isto modelados e analisados alguns tabuleiros mediante o uso do Método dos Elementos Finitos, através do programa computacional ANSYS<sup>3</sup>. Os modelos aqui analisados seguem as recomendações do Manual Brasileiro de Estruturas Metálicas - Volume de Pontes<sup>4</sup>.

Outro aspecto estudado foi a influência que a posição da carga móvel na seção transversal exerce na distribuição de cargas nas vigas, sendo para isto considerado um comportamento elástico-linear.

## METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho se constitui a partir da revisão da literatura, onde foram definidos os tipos de pontes em viga mista padrão a serem analisados, estas com diferentes seções transversais e comprimentos. Com os exemplos definidos, os mesmos foram modelados e analisados tridimensionalmente com o Método dos Elementos Finitos através do programa computacional ANSYS<sup>3</sup>. Após executadas as análises pelo Método dos Elementos Finitos foi realizada uma análise manual de um tabuleiro de uma ponte em viga mista através do método simplificado proposto pela norma americana AASHTO<sup>5</sup>, com esses resultados foi possível verificar e comparar os resultados com metodologias simplificadas e análise mais numéricas mais elaboradas.

### Definição das características dos tabuleiros mistos

Para a definição dos modelos e das características dos tabuleiros mistos foram utilizadas as recomendações expostas no Manual Brasileiro de Estruturas Metálicas (Volume de Pontes (SIDERBRÁS))<sup>4</sup>, onde as diversas pontes possuem as seguintes características:

Um sistema estrutural para o tabuleiro de grelha mista (aço e concreto) biapoiada, com vãos de 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24 e 26 m, sendo que esses vãos são constituídos de diferentes tipos de vigas de aço, espessuras de lajes, sistemas de contraventamentos verticais e horizontais e distância entre os conectores;

As pontes possuem pista de rolamento com 9,0 m e guarda laterais de 0,40 m, chegando a um total de 9,80 m;

A grelha metálica é constituída por vigas I unidas por transversinas intermediárias treliçadas e de apoio em alma cheia;

A união entre as vigas metálicas e o concreto é garantida por conectores de cisalhamento do tipo pino de cabeça (stud) ou barra com alça;

As vigas externas e internas das pontes consideradas apresentam perfis com dimensões idênticas, contrariando o caso geral onde as vigas externas são mais reforçadas, a razão para tal procedimento é obter vantagens no detalhamento e fabricação, com conseqüente redução de custos.

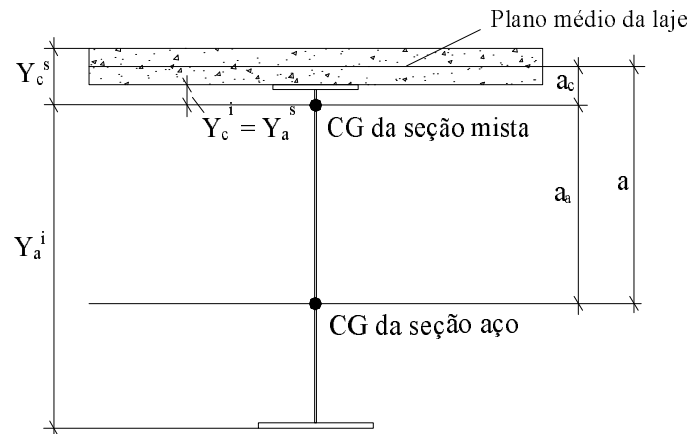


Figura 1. Nomenclatura utilizada para o cálculo das características geométricas

### Definição das características geométricas das vigas mistas

Para a determinação das características geométricas de uma viga mista, esta é apresentada um roteiro apresentado pela SIDERBRÁS<sup>4</sup>. Para uma melhor compreensão é apresentada parte da nomenclatura na Figura 1.

A nomenclatura utilizada está apresentada a seguir:

$S_a$  = área da viga metálica.

$S_c$  = área da seção de concreto.

$S_m = S_a + \frac{S_c}{\eta_{o,f,x}}$  = área da viga mista.

$a$  = distância entre o centro de gravidade da seção de concreto da viga metálica.

$a_c = \frac{S_a}{\frac{S_c}{\eta_{o,f,x}} + S_a}$  .  $a_c$  = distância do centro de gravidade da seção de concreto ao centro de gravidade da viga.

$a_a = \frac{\frac{S_c}{\eta_{o,f,x}}}{\frac{S_c}{\eta_{o,f,x}} + S_a}$  .  $a_a$  = distância do centro de gravidade da viga metálica ao da viga mista.

$J_a$  = momento de inércia da seção de aço.

$J_c$  = momento de inércia da seção de concreto.

$J_m = J_a + S_a \cdot a_a^2 + \frac{1}{\eta_{o,f,x}} \cdot (J_c + S_c \cdot a_c^2)$  = momento de inércia da viga mista.

$W_{aa}^s$  = módulo de resistência superior da viga metálica.

$W_{aa}^i$  = módulo de resistência inferior da viga metálica.

$W_c^s = \frac{J_m}{Y_c^s}$  = módulo de resistência superior do concreto na viga mista.

$W_c^i = \frac{J_m}{Y_c^i}$  = módulo de resistência inferior do concreto na viga mista.

$W_a^s = \frac{J_m}{Y_a^s}$  = módulo de resistência superior da viga metálica na viga mista.

$W_a^i = \frac{J_m}{Y_a^i}$  = módulo de resistência inferior da viga metálica na viga mista.

### Modelagem dos tabuleiros mistos pelo Método dos Elementos Finitos

Após a determinação dos modelos de tabuleiros mistos a serem modelados e de suas características geométricas definidas, foi realizada a modelagem das pontes com programa ANSYS<sup>3</sup>. Na modelagem das vigas de aço e dos tabuleiros de concreto foi utilizado o elemento de casca elástica SHELL63, do programa ANSYS<sup>3</sup>, sendo que para ambos foi utilizado o mesmo elemento, porém com as características dos respectivos materiais. Na Figura 2 esta apresentado o elemento utilizado.

Para os elementos de ligação entre as vigas de aço e a laje de concreto que são definidos como sendo conectores de cisalhamento foram introduzidos vínculos rígidos mediante a incorporação de elemento de viga tridimensional entre os nós da interface, para isto foi utilizado o elemento de viga elástica BEAM4 do programa ANSYS<sup>3</sup>. Na Figura 3 é apresentado este elemento.

Para realizar a modelagem dos elementos de contraventos foi utilizado o elemento de barra de treliça espacial LINK8. Na Figura 4 é exposto o elemento.

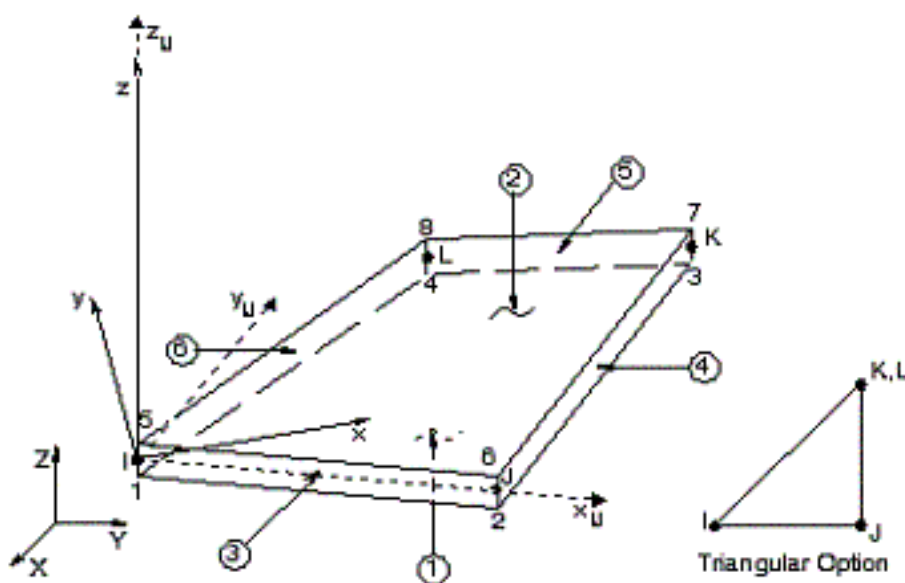


Figura 2. Elemento de casca elástica SHELL63, (ANSYS<sup>3</sup>)

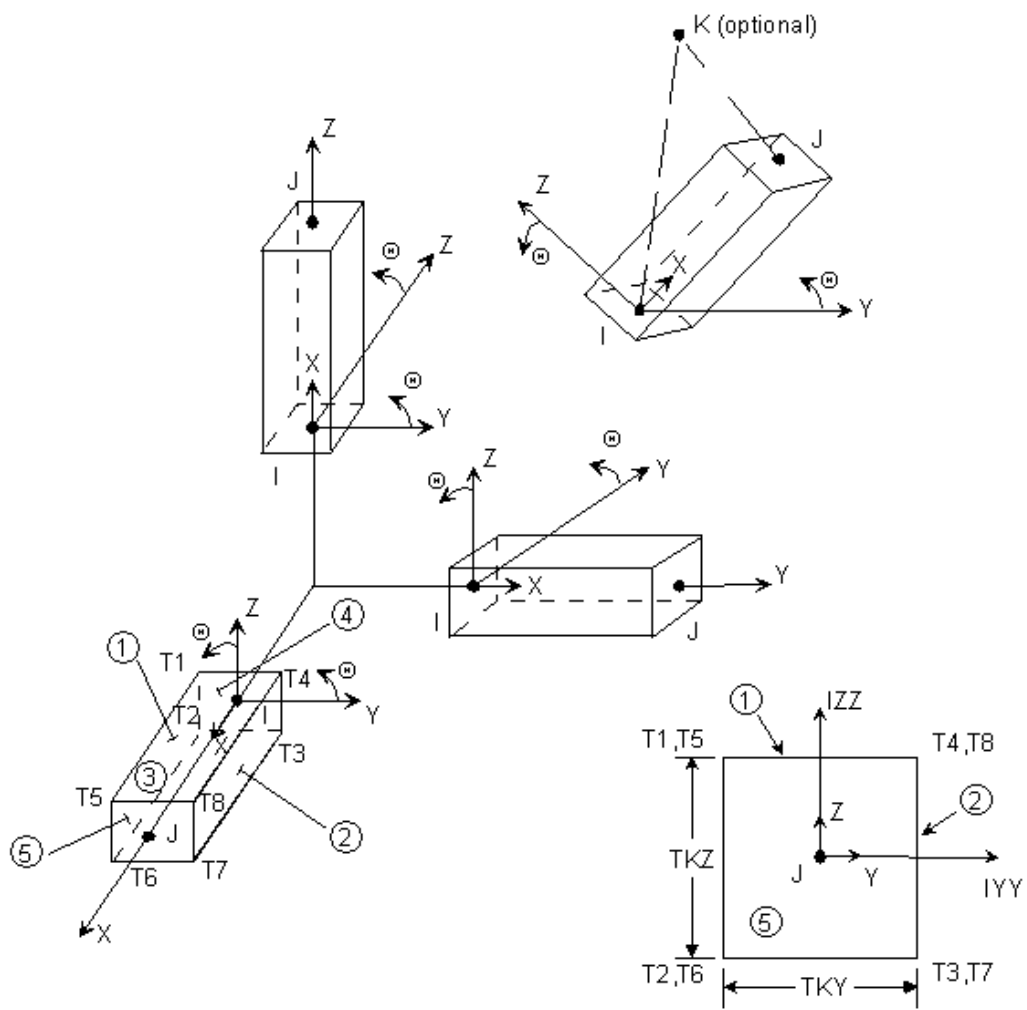


Figura 3. Elemento de viga tridimensional BEAM4, (ANSYS<sup>3</sup>)

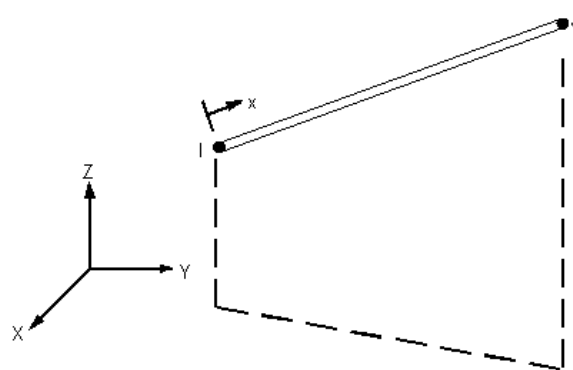
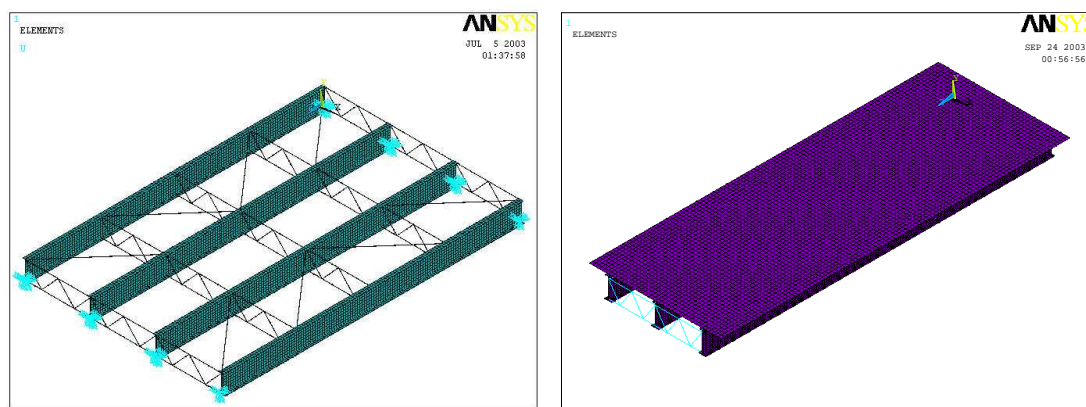
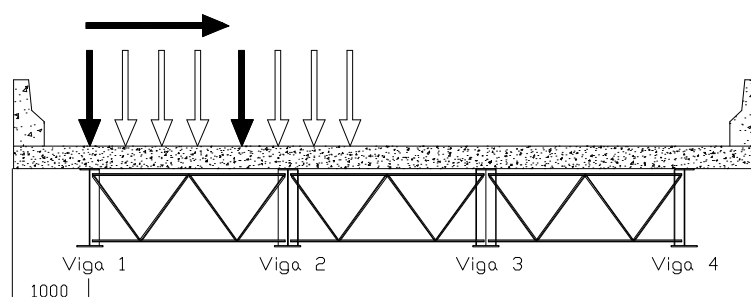


Figura 4. Elemento de treliça espacial LINK8, (ANSYS<sup>3</sup>)



**Figura 5.** Imagens das pontes modeladas (à direita o modelo sem tabuleiro, à esquerda a ponte com tabuleiro)



**Figura 6.** Deslocamento do trem-tipo

## RESULTADOS

### Modelagem das pontes mistas no ANSYS

Neste trabalho foi realizado um estudo detalhado de tabuleiros de pontes mistas através do Método dos Elementos Finitos que requer uma análise estrutural tridimensional, assim dando ao problema um aspecto tridimensional. Foram realizadas análises em pontes com vãos de 16, 20, 24, 26 m, onde foram modeladas com diferentes seções e contendo 3 ou 4 vigas.

Para facilitar a modelagem das pontes e os resultados de saída do programa ANSYS<sup>3</sup>, foi utilizada a linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language), que é uma linguagem paramétrica de programação embutida no programa, com isso para se modelar a ponte que se deseja apenas precisa entrar com as dimensões da mesma, levando em consideração que a programação somente é válida para as pontes especificadas pela SIDERBRÁS. Na Figura 5 observam-se duas imagens retiradas do ANSYS<sup>3</sup> com as modelagens das pontes.

### Análise Estrutural das pontes com um veículo padrão

Uma alternativa de análise foi desenvolvida aplicando um trem-tipo de um veículo padrão completo de Classe 45 conforme a NBR7188/1989<sup>6</sup>. Este veículo padrão possui seis cargas concentradas de 75 kN cada, sendo que são dois eixos de rodas de três cargas cada, com espaçamento de 1,5 m longitudinalmente e 2,0 m transversalmente. Justificou-se o uso do trem tipo definido na Norma brasileira, já que aquele que é usado normalmente no desenvolvimento de todos os projetos de pontes mistas no país.

Para a ponte de 16 m foi utilizado o veículo padrão exposto no parágrafo anterior. Como em uma ponte deve-se levar em consideração que a carga de um veículo pode atuar em diferentes posições na direção transversal, o trem-tipo foi movimentado da extremidade da ponte até o centro da mesma como pode ser visto na Figura 6 abaixo, isto para se obter as tensões máximas atuantes na ponte referida para uma via funcionando, ou seja um único veículo na ponte em uma única pista de rodagem, vide Figura 6 onde se mostra esquematicamente como foram dispostos os carregamentos devidos a carga móvel.

Essas análises foram realizada para as pontes de 16, 20, 24, 26 m de vão, mais somente será apresentada a análise para a ponte de 16 m. O primeiro carregamento deste trem-tipo para a ponte de 16m pode ser observado na Figura 7.

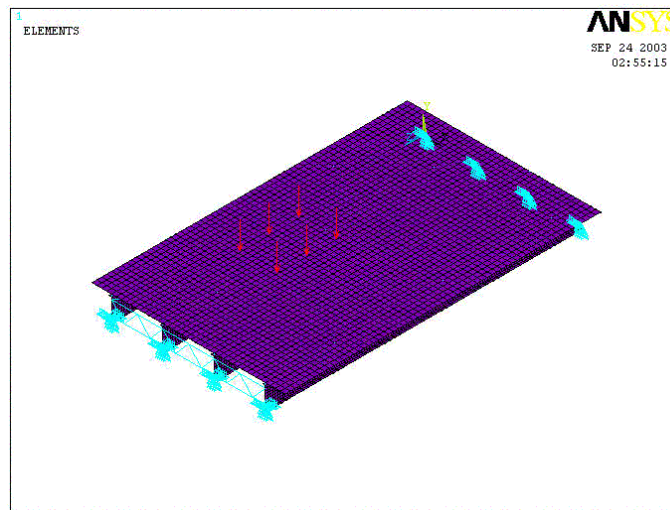


Figura 7. Primeiro carregamento do trem-tipo

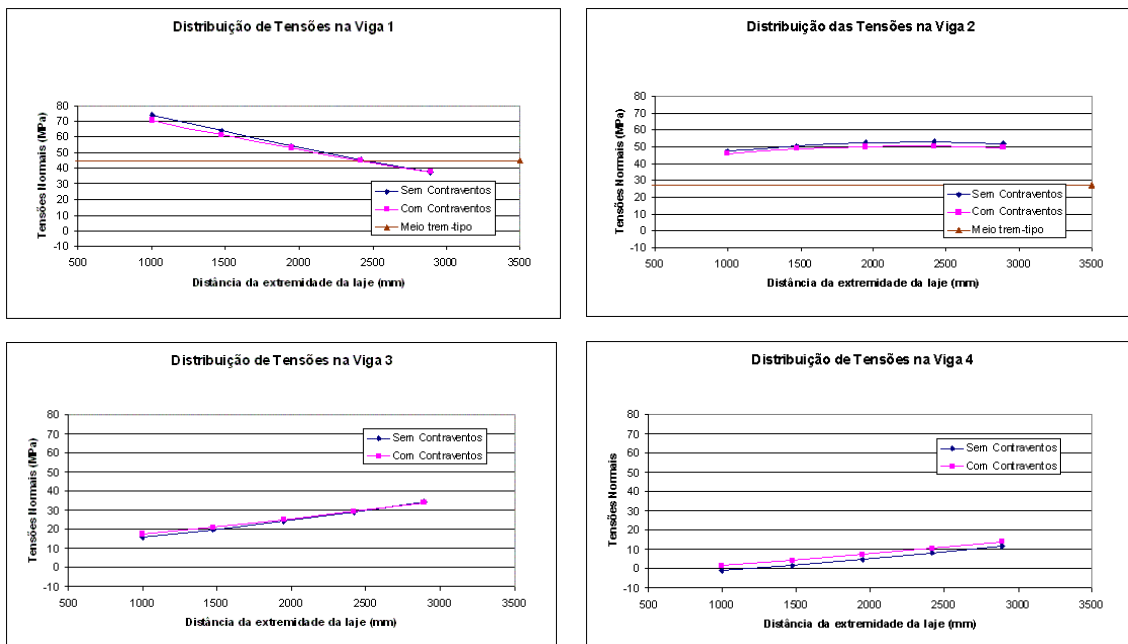


Figura 8. Graficos com a distribuição de tensões nas vigas

Na seqüência esta apresentada a Figura 8, onde podem ser visto os gráficos que mostram a distribuição de tensões em cada viga conforme o trem-tipo vai se movendo, também pode ser observada a tensão atuante em cada viga quando se aplica um carregamento de meio trem-tipo esta sobre ela, e ainda nestes gráficos pode ser visto a comparação entre os valores obtidos utilizando contraventos e não utilizando contraventos.

### Análise estrutural das pontes com dois veículos padrões

Neste item esta apresentada uma análise mais completa para as pontes de 26 m de vão. Esta ponte foi carregada com dois veículos padrões se movimentado em cima da ponte, com isso representado melhor a nossa realidade.

A ponte de 26 m de vão sofreu dois tipos de carregamento. O primeiro carregamento possui dois veículos de eixo padrão da Classe 45 especificada na NBR 7188 (1989), onde estes veículos são movimentados das extremidades até o centro da ponte, o segundo carregamento é os dois veículos se movimentando no mesmo sentido. A movimentação dos veículos para as análises podem ser vistos na Figura 9.

Como parte dos resultados neste trabalho apenas será apresentado a análise para a ponte de 26 m de vão com os veículos movendo-se para o centro. O primeiro carregamento realizado pode ser visto na Figura 10.

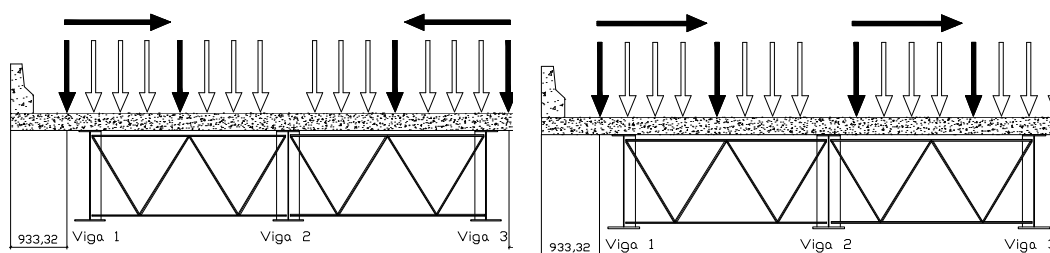


Figura 9. Deslocamentos dos veículos

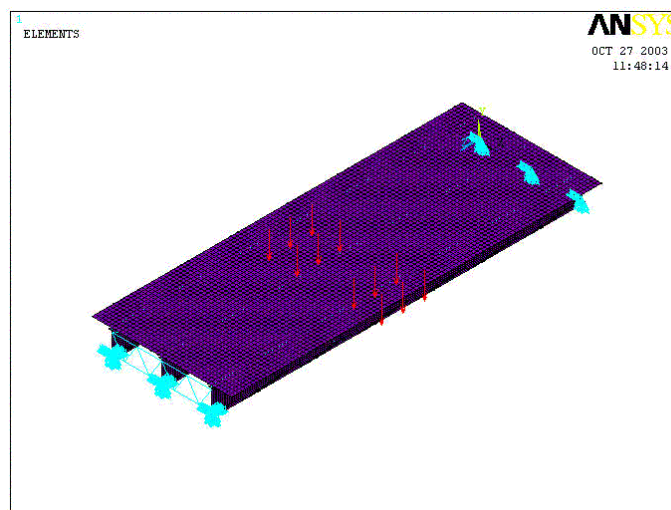


Figura 10. Primeiro carregamento para ponte de 26 m



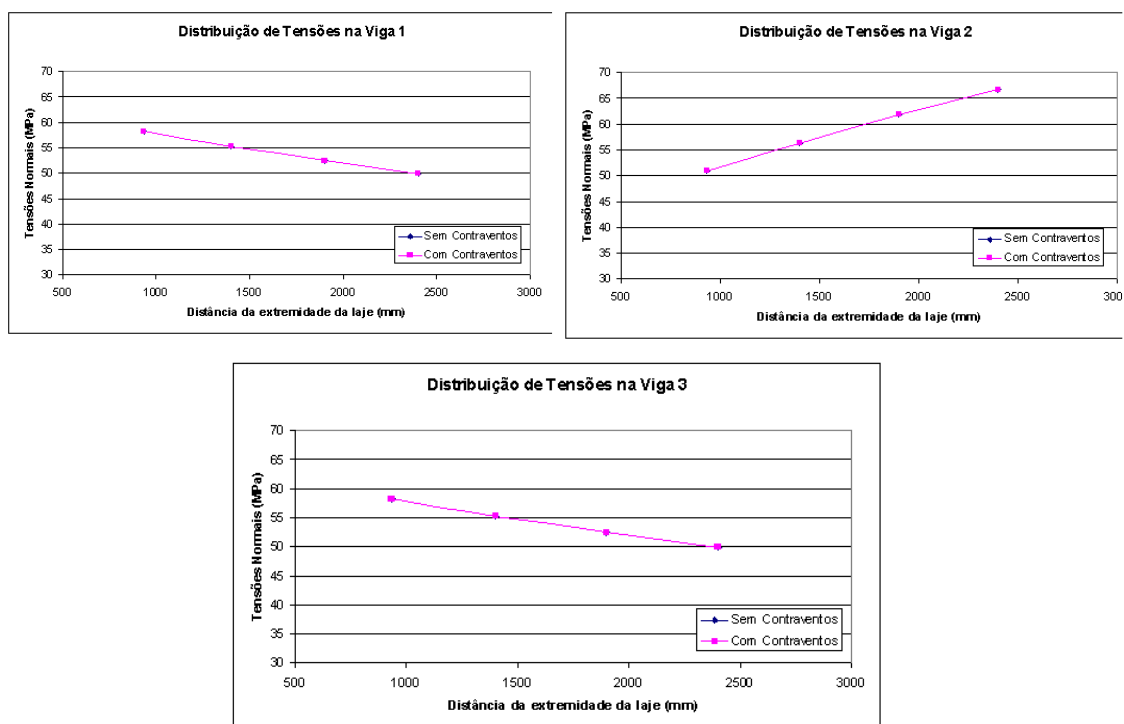


Figura 11. Gráficos com a distribuição de tensões nas vigas da ponte de 26 m

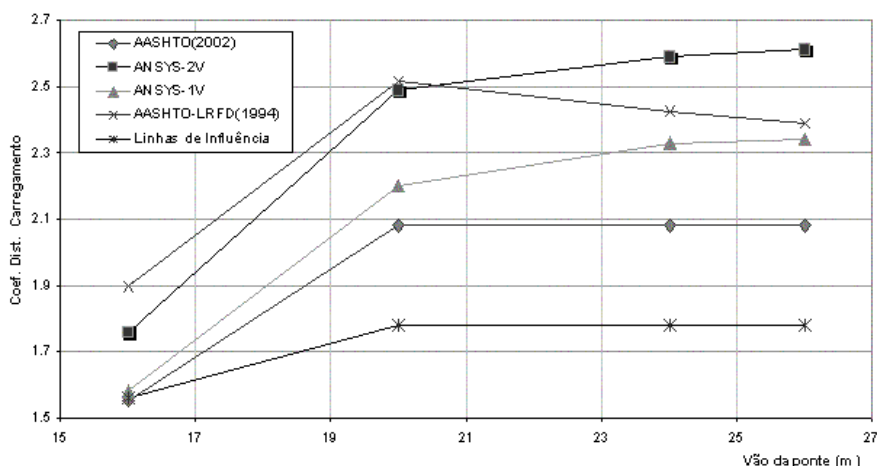
PONTES		RESULTADOS DOS FATORES DE CARGA							
		Linha de Influência		AASHTO		ANSYS (1)		ANSYS (2)	
		Fator	%	Fator	%	Fator	%	Fator	%
L = 16 m (4 Vigas)	VL	1.22	-21.3 %	1.55	100 %	1.58	1.9 %	1.76	13.5 %
	VC	1.56	0.6 %	1.55	100 %	1.31	-15.5 %	1.75	12.9 %
L = 20 m (3 Vigas)	VL	1.66	-20.2 %	2.08	100 %	2.20	5.8 %	2.45	17.8 %
	VC	1.78	-14.4 %	2.08	100 %	1.90	-8.7 %	2.49	19.7 %
L = 24 m (3 Vigas)	VL	1.66	-20.2 %	2.08	100 %	2.33	12.0 %	2.58	24.0 %
	VC	1.78	-14.4 %	2.08	100 %	2.02	-2.9 %	2.59	24.5 %
L = 26 m (3 Vigas)	VL	1.66	-20.2 %	2.08	100 %	2.34	12.5 %	2.59	24.5 %
	VC	1.78	-14.4 %	2.08	100 %	2.06	-1.0 %	2.61	25.5 %

Tabela I. Resultados do fator de carregamento transversal para as alternativas estudadas

Com as distâncias definidas dos trens-tipo a serem aplicados foi realizada a análise para esta ponte de 26 m de vão. Os resultados podem ser vistos nos gráficos expostos na Figura 11 apresentada no decorrer deste trabalho.

### Síntese e análise dos resultados

Na Tabela I estão dispostos os resultados conforme a metodologia de análises realizadas para as alternativas de distribuição de carregamento transversal expostas nos itens anterior-



**Figura 12.** Comparação de diversos coeficientes de distribuição de carregamento transversal

res. Já na Figura 12 mostra-se um gráfico com o resumo dos valores máximos de coeficiente de distribuição para os vãos de pontes aqui analisados.

Observa-se nestes resultados grandes diferenças entre o valor do coeficiente de distribuição obtido através do Método dos Elementos Finitos e o proposto pela AASHTO (2002), principalmente para aqueles análises onde foram dispostos dois veículos sobre o tabuleiro da ponte. Já para os resultados entre a proposta do coeficiente pela AASHTO-LRFD (1994) e o Método de Elementos Finitos, as diferenças são menores, porém acentuam-se a medida que o vão da ponte aumenta. Os resultados usando linhas de influência apresentam as maiores divergências nos resultados em comparação com aqueles obtidos pelo Método dos Elementos Finitos.

## CONCLUSÕES

O escopo deste trabalho alcançou as análises para um conjunto de pontes mistas, tabuleiro de concreto e vigas de aço, onde foram usados diversos métodos para obtenção das tensões solicitantes para carga móvel, embora os cálculos para as cargas permanentes também tinham sido realizados, sendo que para qualquer abordagem empregada a distribuição das cargas permanentes fixas é idêntica.

As pontes foram analisadas pelo Método dos Elementos Finitos usando uma modelagem que pode ser considerada clássica e aceita na literatura, elementos de casca na representação das vigas - almas e mesas - e também esse tipo de elemento para o tabuleiro de concreto, apenas os conectores de cisalhamento são modelados por elementos de barra tridimensional e os travamentos por elementos de treliça. Os resultados usando este tipo de modelagem foram comparados aqueles propostos, através da modelagem de vigas mistas pelo Método dos Elementos Finitos e usando simplificações para usar a teoria clássica de flexão de vigas. Os resultados obtidos neste trabalho, mostram a validade do uso do Método dos Elementos Finitos para análise de pontes mistas.

Das análises realizadas através do Método dos Elementos Finitos pode-se observar:

o uso de travejamento pouco ou nada modifica o resultado das tensões obtidas, porém o uso de travejamento melhora o comportamento a torção da ponte e faz com que as pontes mistas possam ser considera redundantes estruturalmente, aspecto este crucial a estabilidade e segurança na eminência de fraturas.

as tensões resultantes da análise com dois veículos dispostos sobre a ponte mostram ser maiores que aquelas obtidas pelo método simplificado da AASHTO<sup>5</sup> e ainda com grandes divergências em relação a proposta da AASHTO-LRFD de 1994. Deve-se ressaltar que nas análises usadas foi empregado o trem tipo definido nas normas brasileiras NBR 7188/1982<sup>6</sup>.

Observa-se que os resultados das análises obtidas através do uso de linhas de influência foram aqueles que menores resultados forneceram, sendo totalmente inseguro desenvolver projetos com essa metodologia, ao menos na distribuição do carregamento transversal.

Ao mostrar que o valor usado nos projetos realizado pelas indicações da AASHTO<sup>5</sup> é inferior, poderia se perguntar: Como é que as pontes que foram assim projetadas não caem?, a resposta para essa questão pode ser expressa pelos seguintes aspectos:

O uso de um trem tipo definido numa norma brasileira e um método - fator de distribuição - segundo AASHTO<sup>5</sup> provocam grandes diferenças nas tensões finais das vigas, diferenças estas que não aparecem quando usado o trem tipo e a metodologia do fator de distribuição de carregamento transversal, ambas em conformidade com a AASHTO<sup>5</sup>.

A contribuição da carga móvel nas tensões finais não é a principal fonte de tensões, se reavaliar a influência sobre a tensão total que atua nas vigas de aço da ponte mista tais divergências não vão além de 15% (a carga permanente é muito maior que a carga acidental móvel), essa diferença é facilmente absorvida pelo fato de que usando tensões admissíveis (tensão admissível é de 55% da tensão de escoamento do aço) existe uma reserva de segurança para suportar as cargas que atuam na ponte.

Pelos resultados aqui encontrados é recomendável usar o Método dos Elementos Finitos para o projeto e cálculo de pontes, se for usado o trem tipo da NBR7188<sup>6</sup>, método este que fornece tensões mais reais que aquelas obtidas por métodos simplificados. O uso do trem tipo brasileiro com o fator de distribuição transversal de carregamento de acordo com a norma americana AASHTO<sup>5</sup> é contra a segurança e deveria ser abandonado como prática no projeto de pontes mistas.

Duas alternativas podem ser usadas, aquela proposta no início do parágrafo anterior, ou ainda usar a AASHTO<sup>5</sup> em seu conjunto, isto é, trem tipo, tipos de análises simplificadas ou ainda análise mais elaboradas usando análise por programas computacionais que usam o Método dos Elementos Finitos.

Os resultados apresentados neste trabalho são baseados em modelos teóricos obtidos a partir de hipóteses e simplificações propostas na literatura especializada, por tais motivos estes devem ser comparados com valores experimentais que possibilitem a determinação do maior ou menor grau de precisão do método utilizado e validade das hipóteses consideradas.

A continuação natural deste trabalho seria a realização de ensaios experimentais em pontes existentes para medição tensões e correta avaliação das análises aqui propostas, porém tal empreitada é de alto custo no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, J.G.S. "Comportamento dinâmico de pontes rodoviárias submetidas á travessia de veículos sobre superfície irregular do pavimento", *Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing.*, **18**, N° 4, (2002).
- 2 WILLIAMS, M.E., HOIT, M.I., "Bridge pier lines load analysis using neural networks", *Advances in Engineering Software*, Vol. **35**, Issues 10-11, pp. 645-652, doi:10.1016/j.adveng.of.2003.10.009, October (2004).
- 3 ANSYS, Users Manual. Volume I, II, III, IV, Ansys Revision 6.1, USA, SAS IP, (2003).

- 4 SIDERBRAS, Siderurgia Brasileira, “Pontes rodoviárias metálicas. Parte I: Introdução ao Projeto e Cálculo e Parte II: Pontes Padronizadas”, *Publicações técnicas para o desenvolvimento da construção metálica*, Brasília, (1989).
- 5 American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, “*Standard specifications for highway bridges*”, Washington, D.C., (1989).
- 6 Associação Brasileira de Normas Técnica. NBR 7188/1982: “*Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre*”, Rio de Janeiro: ABNT, (1982).