

Tabuleiros de Dupla Ação Mista em Pontes Sujetas a Tráfego de Trens de Alta Velocidade

Marco Antonio Peixer Miguel de Antonio¹

Hermes Carvalho²

Ana Lydia Reis de Castro e Silva³

Resumo

O presente artigo relata um estudo sobre comportamento estático e dinâmico de uma ponte ferroviária em linha de alta velocidade (L.A.V.). A ponte em estudo é denominada “La Scarpe”, está inserida na L.A.V. francesa “TGV Nord” e é composta por um tabuleiro misto de aço-concreto com tipologia estrutural de uma viga contínua com vãos de 28 m + 7x40 m + 25 m, totalizando 333 m de extensão. No atual trabalho, foi avaliada a modificação do tabuleiro da ponte em estudo, através da adição de uma laje inferior de concreto na região do momento fletor negativo entre os pontos de inflexão, transformando-o em uma estrutura conhecida como dupla ação mista. Assim, foi desenvolvida uma metodologia para avaliação estática de pontes ferroviárias de alta velocidade compostas por tabuleiros com dupla ação mista.

Em seguida, foram realizadas modelagens numéricas tanto para o tabuleiro original, quanto para o modificado por meio do Método de Elementos Finitos (MEF). Optou-se por uma malha tridimensional simplificada composta por elementos de casca e de viga que representassem fielmente o comportamento à torção da ponte, desenvolvido no programa computacional ANSYS v. 12. Por último, os resultados obtidos pela modelagem numérica entre o modelo original e o modificado foram comparados a fim de identificar as vantagens e desvantagens resultantes da utilização de tabuleiros mistos aço-concreto com dupla ação mista.

Palavras-chave: L.A.V.; Dupla ação mista; MEF; Comportamento estático e dinâmico de pontes de alta velocidade.

1 Introdução

O desenvolvimento de redes ferroviárias de alta velocidade, definidas por aquelas cujas velocidades são superiores a 200 km/h, vem permitindo uma redução dos problemas de mobilidade existentes na Europa associado ao intenso fluxo de tráfego rodoviário e aéreo. Além do mais, o uso das ferrovias incentiva o crescimento econômico, tanto local como transnacional. Juntamente com essas vantagens, a implantação de redes ferroviárias acarreta a diminuição do impacto ambiental gerado pela emissão de gases poluentes produzidos pelo tráfego rodoviário e aéreo.

As pontes ferroviárias em linhas de alta velocidade (L.A.V.), até o início da década de 1990, em alguns casos, eram construídas em estruturas mistas – tabuleiros compostos por vigas de aço e concreto – que

se restringiam a trechos com pequenos vãos. O passar do tempo e o avanço das técnicas construtivas permitiram que tais estruturas superassem vãos cada vez maiores, entretanto, a utilização desses grandes vãos acarretam em momentos fletores negativos elevados nas seções de apoio do tabuleiro. Tal situação gera dificuldades no dimensionamento do banzo inferior metálico submetido a uma alta compressão. Uma solução que permite contornar tal dificuldade consiste na utilização de uma laje inferior, com a função de estabilizar o banzo inferior metálico e aumentar localmente a sua resistência, método que denominaremos por “tabuleiros com dupla ação mista”. Essa técnica construtiva também apresenta a vantagem de reduzir consideravelmente a deformação relativa à torção do tabuleiro e será aplicada no viaduto do presente estudo, “La Scarpe”, situado na linha de alta velocidade francesa “TGV Nord”.

Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais

¹ marco.peixer@hotmail.com

² hermes@dees.ufmg.br

³ analydiarcs@gmail.com

No decorrer do trabalho foi utilizada metodologia numérica que permitiu avaliar um tabuleiro misto convencional, bem como adaptá-lo a um tabuleiro de dupla ação mista, através do Método dos Elementos Finitos por meio do programa ANSYS v. 12. Na etapa seguinte, os resultados relativos ao modelo de tabuleiro misto de aço-concreto foram comparados ao tabuleiro com dupla ação mista, a fim de identificar as vantagens e desvantagens desse último.

2 Revisão Bibliográfica

As pontes de aço-concreto convencionais se beneficiam principalmente de uma ação composta no meio do vão: uma laje superior de concreto resiste às compressões na região do momento positivo enquanto a estrutura metálica inferior resiste às trações geradas por este momento, sendo essa uma boa adaptação para funcionar nas zonas intermediárias do vão. Entretanto, nas seções de apoio, onde ocorrem os momentos fletores negativos, os tabuleiros mistos apresentam um funcionamento menos eficiente. Para garantir resistência a elevadas compressões na parte inferior, é necessária a utilização de travamentos na estrutura metálica e elevadas espessuras, de forma a garantir estabilidade local e global. No que diz respeito à laje superior, para que o concreto tracionado não fissure, é necessária a utilização de uma quantidade elevada de taxa de armadura.

A fim de melhorar o comportamento da estrutura nessa região, uma ação semelhante à utilizada no meio do vão pode ser aplicada na região do momento negativo através da adição de uma laje inferior entre os pontos de inflexão Figura 1. Tal solução contribui para estabilizar a estrutura metálica e aumentar a sua resistência melhorando, desse modo, o funcionamento da ponte sobre os apoios. Além disso, torna possível uma diminuição dos custos devido à substituição do aço pelo concreto, sendo este economicamente mais viável para resistir às cargas compressivas. Esse recurso é referido como “*dupla ação mista*”, uma vez que utiliza a ação composta nas regiões de momento positivo e negativo.

Embora pontes de dupla ação mista tenham sido projetadas e construídas desde pelo menos 1978, houve pouca pesquisa relacionada ao tema. Desse modo, os projetos atuais se baseiam nas referências existentes para a concepção de pontes compostas convencionais, fato esse que não permite a exploração plena das vantagens do modelo de dupla ação mista ou o reconhecimento das suas limitações (Sen e Stroth, 2010).

Segundo Stroth e Sen (2000) e Saul (1996), a

dupla ação mista acrescenta algumas vantagens em relação à ponte mista de aço-concreto, sendo elas:

- o aumento dos vãos para valores que anteriormente eram alcançados somente pelas pontes de aço com placas ortotrópicas, pontes arqueadas ou pontes estaiadas;
- uma redução dos custos devido à substituição de uma parte do aço estrutural do flange inferior por uma laje de concreto armado, o que pode ser um ponto decisivo para a utilização da dupla ação mista na construção de uma ponte, principalmente em países com capital financeiro limitado;
- uma diminuição das flexas, devido a uma redistribuição favorável dos momentos, com um aumento dos momentos negativos e uma diminuição dos momentos positivos;
- evita soldas espessas no local, com suas correspondentes tensões residuais e deformações.

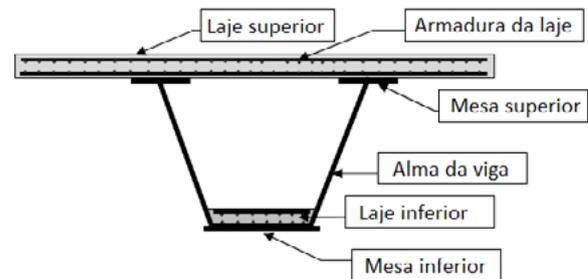


Figura 1 – Seção típica do tabuleiro com dupla ação mista (adaptado de Patel, 2009).

Figueiredo (2007) ainda acrescenta que a utilização de um tabuleiro com dupla ação mista aumenta a rigidez à torção da ponte em relação a um tabuleiro misto comum, reduzindo assim a sua deformação. Esse sistema melhora muito o comportamento e desempenho do sistema estrutural mais comum entre as pontes ferroviárias, composto por duas longarinas paralelas.

3 Estudo de caso

3.1 Descrição do viaduto

O viaduto “La Scarpe”, constituído por um tabuleiro misto de aço-concreto, está localizado na L.A.V. francesa “TGV Nord”, e entrou em funcionamento em 1991 interligando as cidades de Paris e Lille. A tipologia estrutural consiste em uma viga contínua com vãos de 28 m + 7x40 m + 25 m Fig. 2, totalizando 333 m.

A Figura 3 mostra a seção transversal do tabuleiro ao longo de seu comprimento. Segundo Figueiredo (2007), a seção transversal é composta por uma laje superior com 13,0 m de largura sobre duas vigas de 2,5 m de altura, com inércia variável nas regiões dos apoios. A espessura da laje superior varia entre 0,43 metros em relação ao eixo longitudinal do tabuleiro e 0,25 metros na extremidade da laje, o que resulta em uma seção mista de aço e concreto com 2,93 m de altura constante ao longo da seção longitudinal.

As vigas principais são ligadas transversalmente por cinco vigas metálicas vazadas na parte central, igualmente separadas ao longo dos 40 m de vão (septos). As vigas vazadas são presas à laje superior de concreto, através dos conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça, e servem para garantir que a seção transversal não deforme devido ao efeito de distorção considerável, em decorrência da pequena espessura das almas das vigas principais (Figueiredo, 2007).

Para uma maior resistência à torção, o tabuleiro é fechado inferiormente por uma treliça em losango Figura 4, composta por cantoneiras L 150×150×15 mm³.

No caso do tabuleiro com dupla ação mista, parte da treliça localizada nas regiões dos momentos negativos sobre os apoios, aproximadamente 25% do vão, foi substituída por uma laje inferior de concreto, a fim de verificar o ganho de resistência à torção ao se utilizar esse tipo de tabuleiro.

3.2 Modelagem numérica proposta

A modelagem foi realizada por meio do programa comercial ANSYS® versão 12, baseado no Método dos Elementos Finitos. Esse programa está disponível no Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais (DEES-UFMG) e é empregado no desenvolvimento dos modelos numéricos nas instalações do laboratório de Análise Dinâmica e Acústica Estrutural (LADAE).

O modelo foi desenvolvido com uma malha tridimensional de elementos finitos na qual os diversos elementos estruturais do tabuleiro foram modelados isoladamente por meio de elementos de viga e de casca, assumindo um comportamento elástico linear dos

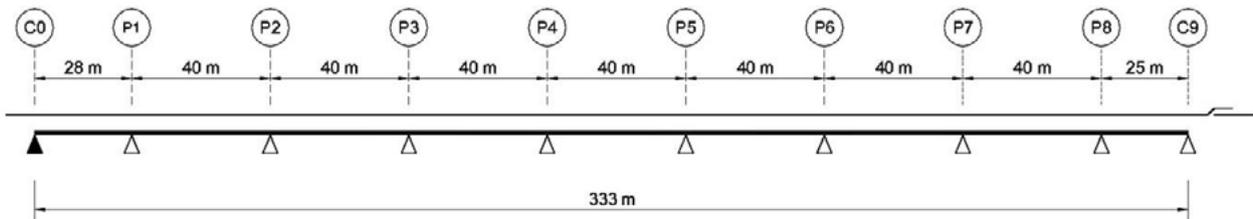


Figura 2 – Seção longitudinal do tabuleiro (Figueiredo, 2007).

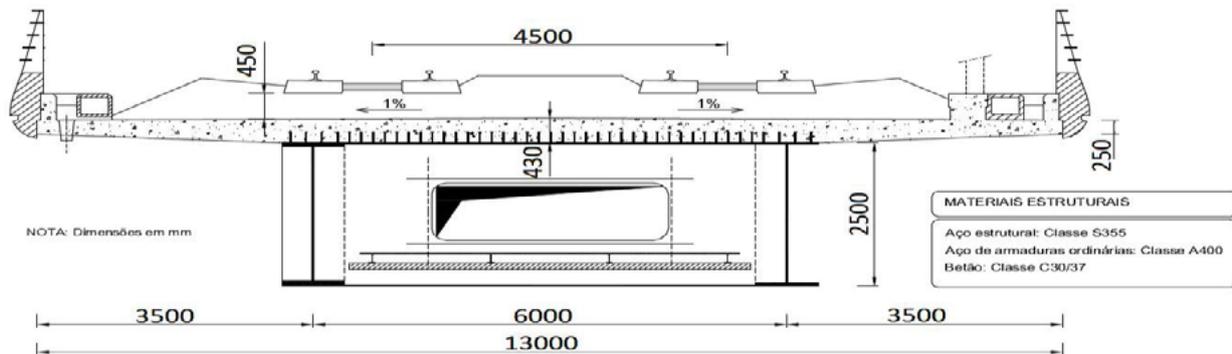


Figura 3 – Seção transversal do tabuleiro (Figueiredo, 2007).

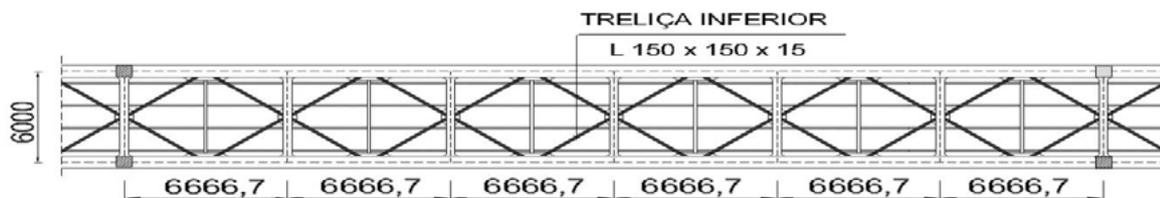


Figura 4 – Vista inferior do tabuleiro (Figueiredo, 2007).

materiais. A laje de concreto foi modelada por meio dos elementos de casca delgada, o que permite uma melhor avaliação dos efeitos de deformação devido à força cortante no plano da laje, dispensando a definição de larguras efetivas.

As lajes para ambos os tabuleiros foram estudadas tanto nas condições normais quanto nas fissuradas. Segundo Figueiredo (2007), a fissuração transversal na laje nas regiões de apoio pode ser representada mediante uma redução da rigidez, que é obtida com a diminuição da inércia à flexão da seção. Considera-se que a fissuração ocorra em uma região que engloba 15% do vão em cada lado dos apoios internos, desde que a proporção entre os vãos vizinhos seja superior a 0,6. Uma vez atendidas essas condições em todos os apoios internos da ponte, é possível utilizar desse critério para determinar as regiões fissuradas, conforme esquematizado na Figura 5.

A quantidade de armadura ordinária não foi disponibilizada, sendo assim foi adotado o valor mínimo de armadura referente a 1 % da área de concreto. A fissuração da laje foi simulada através da consideração de um módulo de elasticidade equivalente E_x , definido de forma a reproduzir uma rigidez axial $E_x \cdot A_c$ idêntica à produzida pelas armaduras ordinárias $E_s \cdot A_{s, reinf}$ de 2 GPa dado por:

$$E_x = E_s \times \frac{A_{s, reinf}}{A_c} = E_s \times \frac{1}{100} = 2GPa \quad (1)$$

As vigas principais e transversais são representadas por uma combinação entre elementos de casca, para representar as almas; e elementos de vigas para as mesas. Por sua vez, a treliça inferior foi modelada através de elementos de barra localizados no banzo inferior das vigas metálicas. Os conectores de cisalhamento modelados por elementos de barra têm grande rigidez em comparação com os demais, de modo a garantir a interação entre as vigas de aço e a laje de concreto.

O tabuleiro modificado foi modelado da mesma forma que o tabuleiro original, com exceção da treliça inferior que foi substituída por uma laje de concreto nas regiões que apresentam momento negativo, sendo esta representada através de elementos de casca.

3.3 Comparação dos modelos em termos das suas características dinâmicas

Foi realizada uma análise modal para os modelos não fissurados a fim de comparar as propriedades dinâmicas em termos das frequências naturais de vibração. Os valores das frequências naturais alcançadas numericamente neste trabalho são comparados com os resultados obtidos por Figueiredo (2007) e com os dados disponibilizados por Hoopah (1997) por meio dos ensaios durante a inauguração da estrutura em 1991.

Depois de calculadas as frequências naturais da ponte, os 40 primeiros modos foram utilizados para o cálculo dos deslocamentos gerados na ponte. O tipo de análise utilizada foi o método de superposição modal que está disponível no programa ANSYS.

O trem utilizado para tal análise foi o comboio Europeu articulado TGV Atlantique, com um comprimento total de 468 m e afastamento médio entre vagões de 18,7 m, tendo uma carga média de 170 kN por eixo. A aplicação da carga foi feita por meio de duas linhas de carregamento em apenas um sentido da via, localizadas sobre os eixos dos trilhos. Essa linha se inicia em uma extremidade da ponte e termina após a saída da última carga na extremidade oposta, simulando assim a passagem do trem sobre a ponte em apenas um sentido. As velocidades de passagem do trem adotadas foram entre 140 km/h e 420 km/h com intervalos de 5 km/h.

4 Resultados e considerações

4.1 Análise da deformabilidade do tabuleiro

Na Figura 6 está representado o deslocamento vertical, sobre o eixo longitudinal da longarina, dos tabuleiros fissurados ao serem solicitados por um carregamento uniforme de 200 kN/m.

Os valores das deformações do tabuleiro misto convencional apresentam boa correlação quando comparados aos dos resultados apresentados por

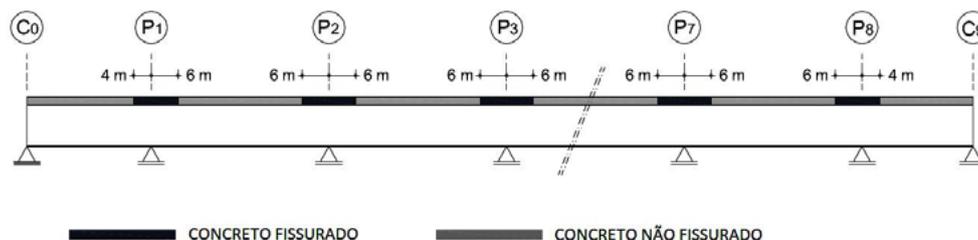


Figura 5 – Distribuição da rigidez ao longo do tabuleiro (Figueiredo, 2007).

Figueiredo (2017) não diferindo em mais que 4%. Quando comparado ao tabuleiro com dupla ação mista com uma laje de 15 cm de espessura, observou-se uma redução do deslocamento vertical superior a 8%, já ao ser comparado ao tabuleiro com uma laje de 30 cm de espessura, essa diferença aumentou para valores superiores a 11,5%.

Na Figura 7 está representado o deslocamento vertical, localizado no centro da longarina, dos tabuleiros fissurados ao serem solicitados ao longo do quinto vão por um carregamento assimétrico constituído por cargas uniformemente distribuídas de ± 100 kN/m.

Observa-se uma redução do deslocamento vertical superior a 35 % quando utilizado o tabuleiro com dupla ação mista, tanto para laje com 15 cm de espessura quanto para 30 cm. Isso se deve ao fato de o tabuleiro com dupla ação mista ter uma maior rigidez à torção devido a emprego da laje inferior que permitiu um maior fluxo de tensões tangenciais em torno da seção, fato similar ao caso da viga caixão.

4.2 Análise do estado de tensão

Na Figura 8 estão representados os mapas de tensão normal S_x na alma das vigas ao longo do quinto vão tanto para o tabuleiro misto comum (localizado a esquerda), quanto para o tabuleiro com dupla ação mista (localizado a direita). Ambos consideram a rigidez fissurada nas zonas de apoio e um carregamento

uniforme de 200 kN/m ao longo de toda a estrutura. Os valores apresentados pelo programa estão na unidade de N/m².

Conforme observado na imagem anterior, ao se utilizar o tabuleiro com dupla ação mista, ocorre um acréscimo das tensões na parte superior da viga sobre os apoios e uma redução das tensões na parte inferior da mesma na região central do vão. Isso se deve ao fato de ocorrer uma distribuição mais favorável dos momentos fletores ao se utilizar o tabuleiro com dupla ação mista, característica marcante deste tipo de estrutura.

4.3 Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados dos modelos numéricos em termos das suas características dinâmicas

Os valores das frequências naturais para modelos fissurados são inferiores aos dos modelos não fissurados devido à sua menor rigidez. Em seu trabalho, Figueiredo (2007) observou uma melhor correlação entre os modelos não fissurados ao serem comparados com os dados experimentais fornecidos por Hoopah (1997), concluindo que uma possível explicação se daria pelo fato de a laje de concreto não se encontrar fissurada durante o início da vida útil da ponte. Resultados similares foram observados no presente trabalho, sendo assim foram comparados apenas os valores dinâmicos dos modelos não fissurados, conforme demonstrado na Tabela 1.

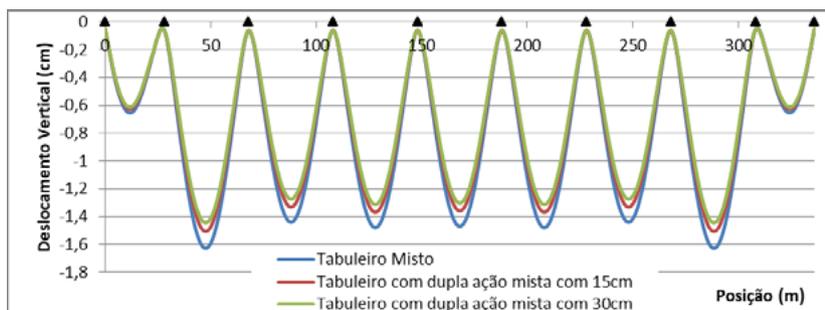


Figura 6 – Deslocamento vertical da ponte ao ser submetida a um carregamento uniforme de 200 kN/m.

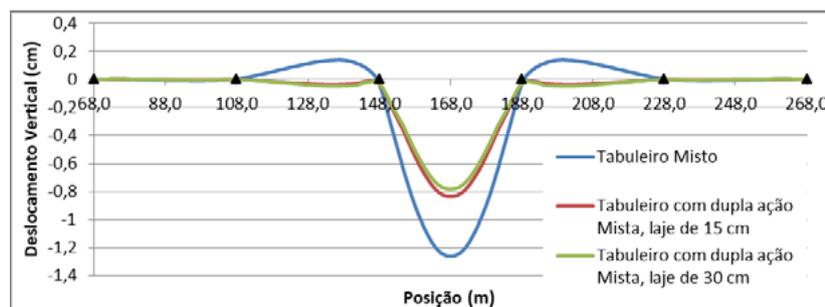


Figura 7 – Deslocamento vertical da ponte ao ser submetida a um carregamento assimétrico uniforme de ± 100 kN/m

4.4 Deslocamentos verticais obtidos da superposição modal.

Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os resultados de deslocamentos verticais no centro da viga solicitada em duas posições estratégicas, a primeira delas referente à metade do 3º vão (88 m), onde se observou maiores solicitações entre os vão centrais. A segunda localizada na metade do 9º vão (322 m) representando um vão de extremidade.

Com os resultados apresentados acima, pode ser observado que os vãos centrais são mais sensíveis tanto ao fissuramento do concreto quanto a tipologia de tabuleiro adotada. Ao ser fissurado, ocorre uma diminuição da rigidez e dos valores modais apresentados pelo tabuleiro, o que ocasiona um aumento do deslocamento vertical máximo obtido ao longo da velocidade. O mesmo pode ser observado ao se utilizar o tabuleiro com dupla ação mista, devido a este apresentar uma maior rigidez em relação o tabuleiro convencional.

5 Conclusão

No presente trabalho foi avaliada a utilização de pontes contínuas com tabuleiros com dupla ação mista sujeitas ao tráfego de trens de alta velocidade. Tal tipologia apresentou vantagens quando comparada ao sistema usual de tabuleiro misto (perfil de aço com laje na porção superior), principalmente devido ao aumento da rigidez à torção e à flexão da seção transversal junto aos apoios.

O aumento da rigidez implicou na redução dos valores dos deslocamentos e tensões na estrutura, principalmente face ao carregamento assimétrico nos trilhos (situação na qual somente uma das linhas férreas é carregada pelo comboio). Outra vantagem da utilização da viga com dupla ação mista foi a alteração dos diagramas de momento fletor, aumentando o momento negativo e consequentemente reduzindo o momento positivo. No dimensionamento da seção transversal sujeita ao momento negativo, apesar do

Tipo do modo	Frequência natural identificada (Hz)			
	Hoorpah (1997)	Figueiredo (2007) Lusas Bridge v13.6	Tabuleiro Misto ANSYS v12	Tabuleiro com Dupla ação Mista ANSYS v12
1º flexão vertical	2,64	2,297	2,367	2,378
2º flexão vertical	2,84	2,500	2,576	2,610
3º flexão vertical	3,12	2,793	2,881	2,947
4º flexão vertical	3,48	3,134	3,244	3,345
5º flexão vertical	3,80	3,482	3,626	3,762
1º torção	3,80	2,929	3,819	4,351
6º flexão vertical	4,12	3,799	3,992	4,166
7º flexão vertical	4,4	4,027	4,275	4,295

Os valores das frequências de vibração apresentadas por Figueiredo (2007) são cerca de 12% inferiores aos dados obtidos experimentalmente por Hoorpah (1997). Os valores do tabuleiro misto convencional obtidos através da modelagem numérica realizada por meio do programa computacional ANSYS v. 12 apresentaram uma melhor correlação, cerca de 5% inferior, quando comparados aos dados experimentais. A utilização do tabuleiro com dupla ação mista aumenta o valor das frequências naturais devido ao ganho significativo de rigidez global da estrutura.

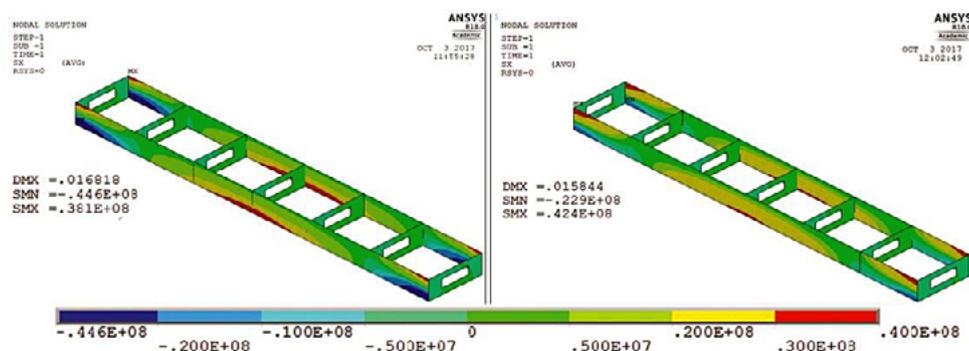


Figura 8 – Esforços normais nas almas das vigas longitudinais ao longo do 5º vão em condições fissuradas.

acréscimo das solicitações, é introduzido o concreto na região comprimida. Já a seção sujeita ao momento positivo poderá apresentar redução quando comparada a estrutura original, devido à redução dos esforços. Diante das vantagens observadas, a solução estrutural de pontes com tabuleiros com dupla ação mista é interessante, podendo levar a redução do peso de aço das estruturas.

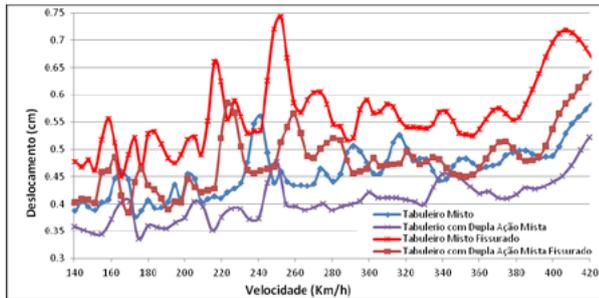


Figura 9 – Comparação das respostas dinâmicas dos tabuleiros em termos de deslocamento vertical no meio do 3º vão.

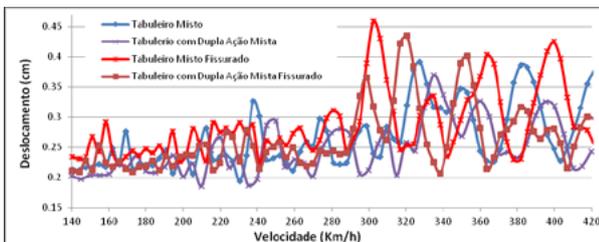


Figura 10 – Comparação das respostas dinâmicas dos tabuleiros em termos de deslocamento vertical no meio do 9º vão.

Agradecimentos

Os autores agradecem o importante apoio da agência de pesquisa brasileira FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

Referências

- FIGUEIREDO, H., S. Dinâmica de pontes mistas aço-betão em linhas de alta velocidade. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 2007.
- HOORPAH, W. Contribution à l'approche numérique du comportement dynamique des ponts-rails. Thèse présentée pour l'obtention du grade de docteur de l'UTC, Université de Technologie de Compiègne, 1997.
- PATEL, P. LRFD design of double composite box girder bridges. Dissertação de Mestrado, University of South Florida, 2009.
- SAUL, R. Bridges with Double Composite Action. Structural Engineering International, International Association for Bridge and Structural Engineering, vol. 6, n. 1, pp. 32-36, 1996.
- SEN, R.; STROTH, S. Design and evaluation of steel bridges with double composite action. Final Report on a Research Project Sponsored by Florida and US Department of Transportation. University of South Florida, 2010.
- STROTH, S.; SEN, R. Steel Bridges with Double-Composite Action: Innovative Design. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, vol. 1, n. 1696, pp. 299-309, 2000.