



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PONTES COM TABULEIROS DE DUPLA AÇÃO MISTA SUBMETIDA AO TRÁFEGO DE TRENS DE ALTA VELOCIDADE

Marco Antonio Peixer Miguel de Antonio

Hermes Carvalho

Ana Lydia Reis de Castro e Silva

marco.peixer@hotmail.com

hermes@dees.ufmg.br

analydiarcs@gmail.com

Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, 31270-901, Belo Horizonte/MG, Brasil

Resumo. O presente artigo relata um estudo sobre comportamento estático 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 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”.

O presente estudo tem como intuito contribuir para o conhecimento científico na área da engenharia ferroviária de alta velocidade, com foco em pontes com o tabuleiro misto duplo de aço-concreto, tema pouco abordado no Brasil e que carece de especialistas no assunto. Além disso, a implementação de uma rede ferroviária de alta velocidade vem ao encontro dos problemas de mobilidade encontrados no país, sendo esta uma solução completa devido às suas vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Nesse sentido, foi estudado o comportamento do tabuleiro misto de aço-concreto do viaduto “La Scarpe”, ao ser adaptado para um tabuleiro com dupla ação mista.

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

2.1 Linhas de Alta Velocidade (L.A.V.)

Na Diretiva 96/48/EC, de 23 de Julho de 1996, o conselho da União Europeia definiu as linhas de alta velocidade por aquelas em que os trens atingem 250 km/h ou mais. Foram

incluídas também neste conceito as L.A.V.s que são especialmente adaptadas e equipadas para velocidades próximas de 200 km/h.

Historicamente a velocidade dos trens representou um quesito importante para o desenvolvimento desse meio de transporte. Desde sua origem, no início do século XIX, na Europa, havia uma competitividade entre as empresas do setor para proporcionar viagens em um tempo menor. A velocidade dos comboios também era um símbolo de status de uma nação, pois representava o desenvolvimento tecnológico de cada país (UIC, 2015).

Em 1829 a locomotiva “Rocket” atingiu a velocidade máxima de 50 km/h, fato que, para a época, foi considerado um feito inédito. A partir de então houve um considerável desenvolvimento em relação às velocidades máximas atingidas pelos trens: 100 km/h antes da metade do século XIX, 130 km/h no ano de 1854 e até 200 km/h no início do século XX. Cabe ressaltar, no entanto, que as velocidades citadas acima se referem apenas aos valores recordes atingidos pelos comboios, não representando a velocidade máxima operacional. Durante as viagens esses valores eram inferiores, não superando os 180 km/h, durante a década 1930 (UIC, 2015).

O advento de outros meios de transporte mais rápidos – o avião – e com maior privacidade e liberdade de trajeto – o automóvel – fez com que as linhas ferroviárias buscassem um diferencial para se tornarem mais atrativas. Em virtude disso, novos recordes de velocidade foram atingidos nos países europeus, chegando a 331 km/h na França, em 1955. Nove anos depois, em 1964, o Japão introduziu um padrão revolucionário que interligava os 515 km entre as cidades de Tokyo e Osaka, denominada Tokaido Shinkansen Fig. 1. Projetada para operar a 210 km/h, com novas tecnologias de operação, possibilitou o rápido crescimento econômico do país, sendo esta a primeira linha de trem de alta velocidade (UIC, 2015).



Figura 1. Inauguração da primeira linha da alta velocidade, Tokaido Shinkansen, em 01 de outubro de 1964 Fonte: <http://www.japantimes.co.jp>

A inauguração da primeira linha da alta velocidade, Tokaido Shinkansen, fomentou o progresso técnico das redes ferroviárias em vários países europeus com o desenvolvimento de novas tecnologias, particularmente na França, Reino Unido, Alemanha e Itália. Em 27 de setembro de 1981 foi inaugurada a primeira linha de alta velocidade europeia, ligando as cidades de Paris e Lyon, com velocidade máxima de 260 km/h. Diferentemente do conceito aplicado em Shinkansen, que consistia na criação de uma nova linha com um novo sistema de transporte para se estender por todo o país, a nova L.A.V. europeia permitia total

compatibilidade com as ferrovias existentes, o que possibilitou um grande desenvolvimento do sistema ferroviário europeu (UIC, 2015). Desde então, a criação de novas linhas de alta velocidade se espalhou pelo mundo, em especial nos países europeus. Desde então, a criação de novas linhas de alta velocidade se espalhou pelo mundo, em especial nos países europeus. Na Figura 2 são apresentadas as ferrovias em operação, em construção e previstas em alguns países pela Europa.



Figura 2. Linhas de alta velocidade na Europa Fonte: <http://www.uic.org>

2.2 Tabuleiros mistos de aço-concreto com dupla ação mista

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 à 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 Fig. 3. 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.

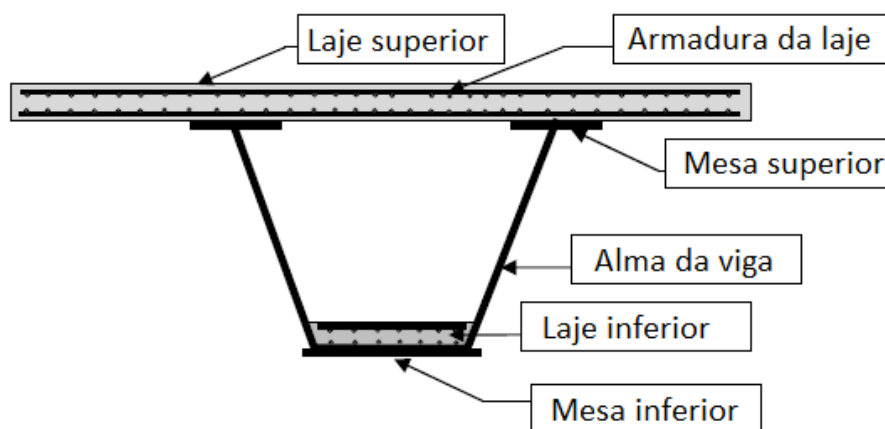


Figura 3. Seção típica do tabuleiro com dupla ação mista (adaptado de Patel, 2009)

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).

Apesar de ter uma aplicação limitada ao redor do mundo, a construção de pontes com dupla ação mista não é algo recente. Sen e Stroth (2010) fazem uma revisão de pontes de tabuleiros mistos executados a partir da década de 1970, sendo que uma das primeiras obras citadas pelo autor está localizada em Ciervana, na Espanha e data de 1978. Após isso, outras pontes foram construídas na Alemanha entre 1992 e 1994 e na América do Sul. Este conceito foi também utilizado na ponte de cabo estaiada de Kap Shui Mun, em Hong Kong. Outro caso aborda uma ponte com dupla ação mista que foi construída no Canadá, na estrada de Fredericton-Moncton em 2001.

Saul (1996) cita três exemplos de pontes que ilustram as vantagens da utilização da dupla ação mista. Primeiramente, uma ponte sobre o Rio Caroni na Venezuela, concluída no ano de 1992, com função mista rodoviária e ferroviária. Para sua construção seria necessário importar o aço estrutural, entretanto, o concreto de alta resistência estava disponível no local, o que tornaria a obra economicamente mais viável, sendo assim, optou-se por uma laje inferior de concreto. Em segundo lugar, para uma ponte ferroviária de alta velocidade através do rio Main na Alemanha, concluída em 1994, foi possível obter uma deformação reduzida com a laje inferior de concreto. No terceiro exemplo, uma ponte rodoviária, concluída em 1993, sobre o Rio Elba, na Alemanha foi decidida a utilização da dupla ação mista por uma questão arquitetônica, pois a visão de um castelo próximo deveria ser minimamente afetada, sendo assim foi utilizada uma viga com seção variável em um lado do rio, junto com uma laje de concreto inferior, o que permitiu uma profundidade de construção reduzida na outra margem.

Mais recentemente foram executados os viadutos de “Archidona” na L.A.V. de Córdoba-Granada e “Arroyo las Piedras” na L.A.V. Corboda-Málaga, ambos localizados na Espanha, sendo esse último, a primeira ponte mista de aço-concreto de alta velocidade na Espanha. Constituída por um feixe contínuo ao longo de 1028,90 m e vãos intermediários de 63,5 m, tornou-se o viaduto com o maior vão de seu tipo na esfera de pontes ferroviárias de alta velocidade, ao superar em 0,50 m de vão o viaduto “Orgon” no francês “TGV Méditerranée” (Millanes *et al.*, 2007). A Figura 4 mostra a seção longitudinal do viaduto.

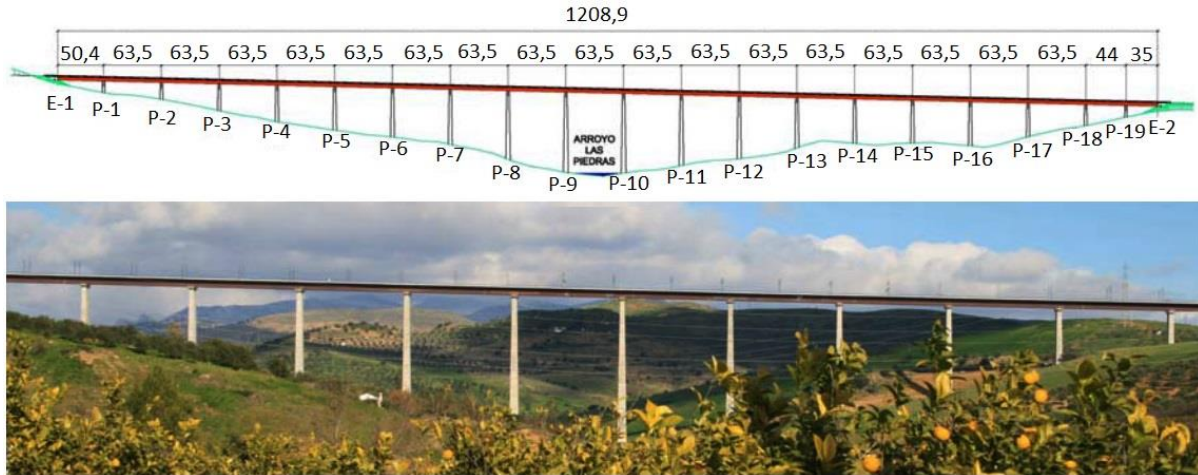


Figura 4. Seção longitudinal do viaduto “Arroyo las Piedras” (Millanes et al, 2009)

Na seção transversal sobre apoio foi realizada a concretagem de uma laje inferior sobre as lajes pré-moldadas, o que proporcionou uma dupla ação mista Fig. 5. Essa laje foi conectada através da armadura passiva e dos conectores de cisalhamento (pino com cabeça) nas vigas principais. A utilização dessa laje permitiu que a espessura máxima de chapa de aço na ponte fosse tão pequena quanto 40,0 mm, muito mais fina do que nas soluções de vigas duplas clássicas (Millanes *et al.*, 2007).

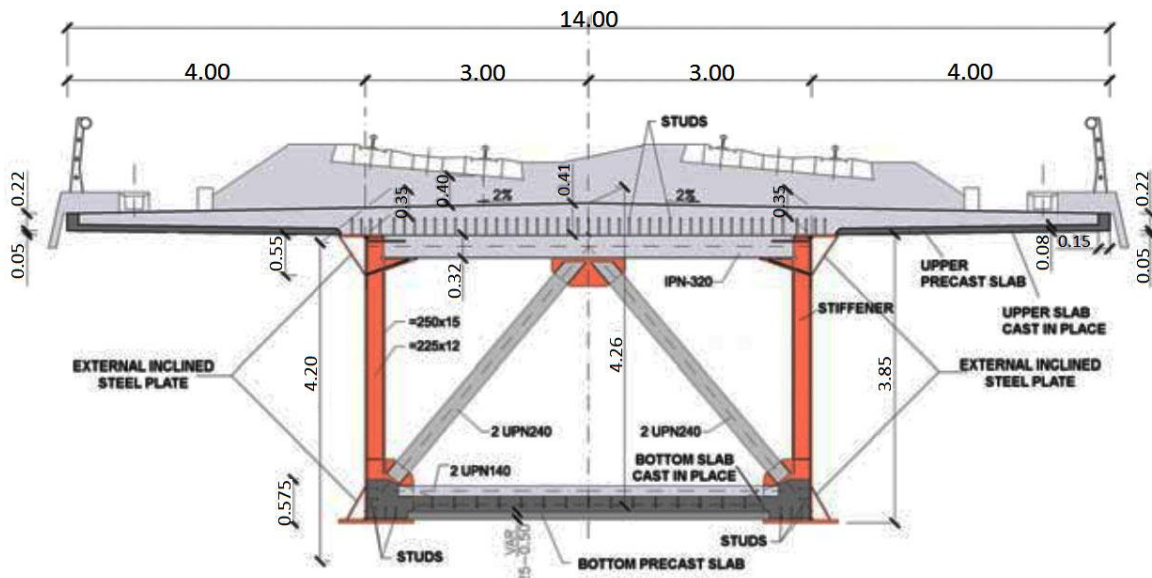


Figura 5. Seção transversal no apoio, viaduto “Arroyo las Piedras” (Millanes et al, 2009)

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 deflexões, devido a uma redistribuição favorável dos momentos, com um aumento dos momentos negativos e uma diminuição dos momentos positivos;
- Devido ao encaixe do flange inferior da viga pela laje inferior, pode-se conseguir uma redução no número de armações transversais;
- Evita soldas espessas no local, com suas correspondentes tensões residuais e deformações.
- Existem algumas desvantagens, por sua vez, na construção de pontes com dupla ação mista, que devem ser consideradas:
- Acarreta em um tempo maior de construção devido ao período necessário para concretagem e cura da laje, podendo ainda ocorrer o vazamento da laje inferior de concreto;
- A laje inferior gera uma carga morta adicional que é transferida pela subestrutura.
- A inspeção na região do apoio é limitada, uma vez que o concreto preenche toda a estrutura metálica.

Figueiredo (2007) ainda acrescenta que a utilização de um tabuleiro com dupla ação mista aumenta a rigidez à torção da ponte em relação ao 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.

2.3 Dinâmica de pontes mistas aço-concreto em linhas de alta velocidade

As pontes ferroviárias são estruturas sujeitas a cargas móveis de alta intensidade, onde os efeitos dinâmicos podem atingir valores significativos. Atualmente, esses efeitos estão se tornando mais importantes devido ao aumento da velocidade de circulação, tanto nas linhas convencionais como também nas novas, como é o caso das linhas de alta velocidade (Ribeiro *et al.*, 2012).

Segundo Delgado *et al.* (2009), o conhecimento desses efeitos dinâmicos é de grande importância no caso das pontes ferroviárias pelas seguintes razões:

- As passagens dos trens pelos trilhos geram vibrações na ponte que originam, em geral, deslocamentos ou esforços internos nas estruturas, sendo esses superiores aos esforços produzidos pelo carregamento estático;

- As vibrações excessivas da estrutura podem levar a uma amplificação dos fenômenos de fadiga;
- Para garantir a estabilidade da via e do contato entre o trilho e a roda em todos os momentos, as deformações e acelerações da ponte devem ser controladas e mantidas dentro de valores limites;
- As acelerações nos veículos devem ser controladas para que o conforto dos passageiros seja garantido.

Figueiredo (2007) reforça a importância da análise dinâmica argumentando que as linhas ferroviárias de alta velocidade estão sujeitas a restrições normativas devido ao aumento da velocidade de circulação e do comprimento dos trens, além de exigir critérios mais rigorosos como a redução das inclinações máximas admissíveis, o aumento dos raios mínimos, entre outros. Essas condições apresentam uma maior importância quando se trata de pontes e de viadutos, pois com a passagem de trens de alta velocidade essas estruturas ficam sujeitas a efeitos dinâmicos mais significativos, fato que coloca em risco a segurança da via, da própria estrutura e dos veículos que circulam sobre essa. Desse modo, as linhas de alta velocidade, principalmente aquelas com velocidade superiores a 200 km/h, devem ser tratadas com um maior rigor conforme a nova regulamentação europeia, a qual introduz os mais recentes avanços na compreensão do comportamento de pontes dimensionadas para altas velocidades.

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. 6, totalizando 333 m.

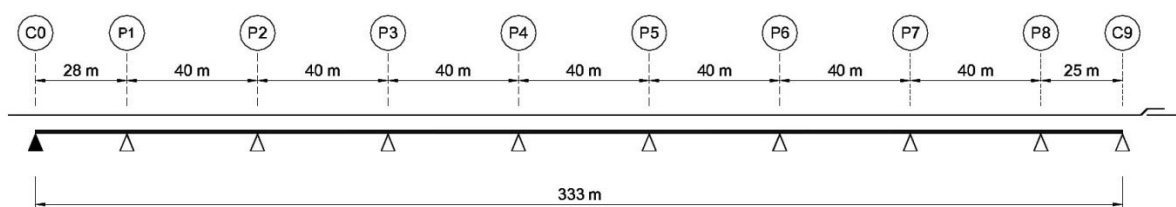


Figura 6. Seção longitudinal do tabuleiro (Figueiredo, 2007)

A Figura 7 demonstra 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.

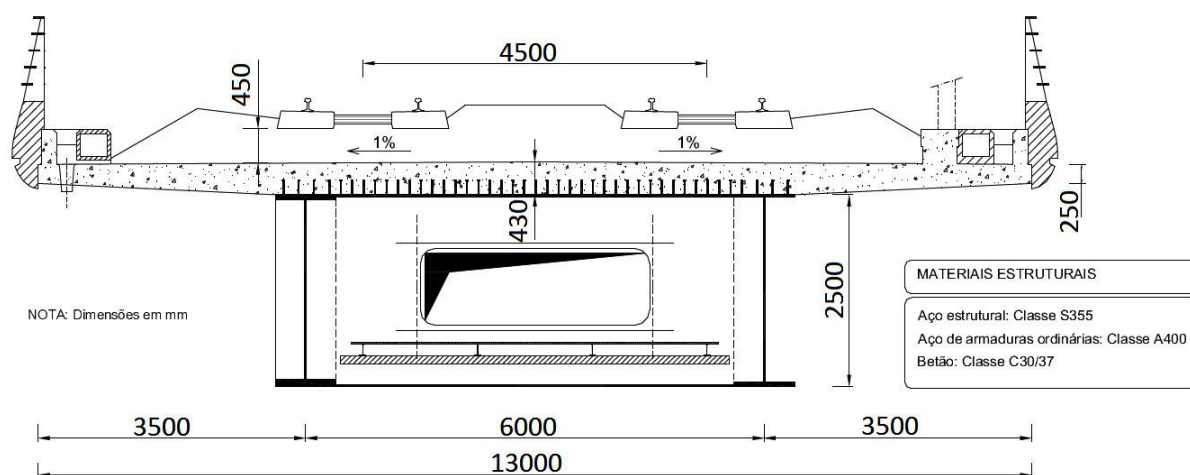


Figura 7. Seção transversal do tabuleiro (Figueiredo, 2007)

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 Fig. 8, composta por cantoneiras L 150×150×15 mm. 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.

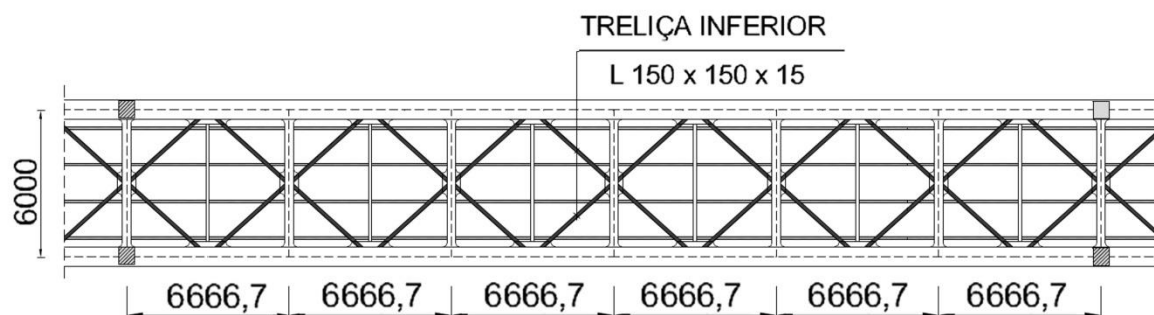


Figura 8. Vista inferior do tabuleiro (Figueiredo, 2007)

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).

Em sua dissertação, Figueiredo (2007) propõe a utilização de quatro modelos com graus de complexidades crescentes, sendo eles comparados entre si e com valores experimentais. Os

dois primeiros são planos e simplificados, utilizando elementos de vigas e o efeito de grelha espacial. Os dois últimos, por sua vez, são mais complexos e formados por modelos tridimensionais. As quatro modelagens numéricas apresentaram uma boa correlação quando submetidas a carregamentos estáticos de flexão e torção, no entanto, quando verificadas as suas propriedades dinâmicas, a correlação foi relativamente menor, principalmente no que diz respeito às configurações de torções, onde os modelos planos exibiram valores de frequência superiores aos obtidos pelos modelos tridimensionais. Sendo assim, foi adotado neste trabalho, tanto para o tabuleiro original como para o modificado, o modelo tridimensional mais completo e mais preciso, sendo descrito a seguir.

O modelo foi desenvolvido com uma malha tridimensional de elementos finitos na qual os diversos elementos estruturais do tabuleiro foram modelados isoladamente através de elementos de viga e de casca, assumindo um comportamento elástico linear dos materiais. A laje de concreto foi modelada através elementos de casca delgada, o que permite uma melhor avaliação dos efeitos de deformação devido ao esforço cortante no plano da laje, dispensando a definição de larguras efetivas. Foram utilizados nove elementos ao longo da seção transversal Fig. 9, considerando uma espessura média t_c para cada elemento e uma massa específica ρ determinada de forma a ter em conta a massa de concreto e os componentes não estruturais suportados pela laje. As propriedades de cada elemento estão indicadas na Tab. 1.

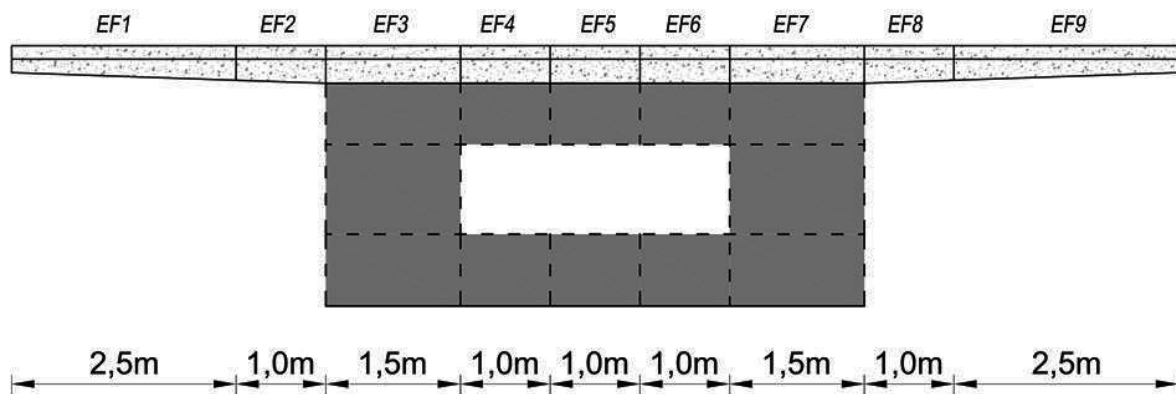


Figura 9. Seção transversal com os elementos finitos da laje

Tabela 1. Propriedades dos elementos da laje

Elemento	EF 1,9	EF 2,8	EF 3,7	EF 4,5,6
t_c (m)	0,32	0,39	0,40	0,40
ρ (t/m ³)	5,6	4,9	5,62	4,79

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 através da 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 Fig. 10.

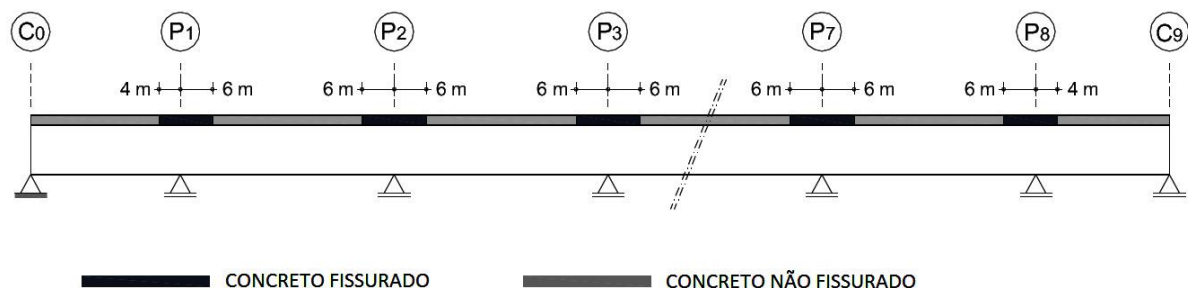


Figura 10. Distribuição da rigidez ao longo do tabuleiro (Figueiredo, 2007)

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 ($E_s \cdot A_{s,rein}$) de 2 GPa conforme demonstrado na Eq. (1):

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

A fim de validar os resultados obtidos pelos modelos foi adotada a mesma discretização para viga longitudinal utilizada por Figueiredo (2007), a qual consiste na consideração de duas seções nas regiões centrais (vãos das extremidades e vãos centrais) e quatro seções de inercia variável sobre as regiões de apoio. As seções localizadas sobre as regiões de apoio foram divididas a cada 2 metros de comprimento, sendo assim foi adotado o valor médio de cada seção como propriedade geométrica Fig. 11, Fig. 12 e Tab 2.

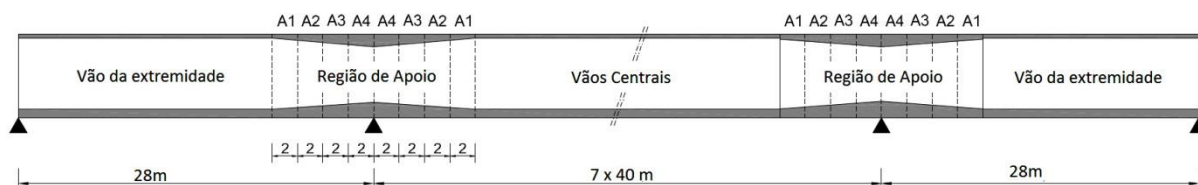


Figura 11. Discretização das vigas metálicas utilizadas na modelação numérica (adaptado de Figueiredo, 2007)

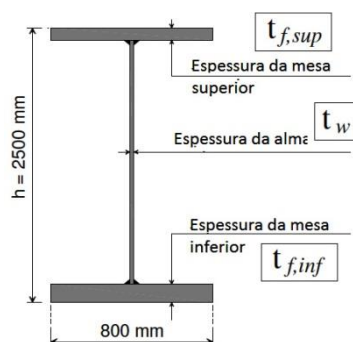


Figura 12. Características geométricas das vigas metálicas

Tabela 2. Características geométricas das vigas metálicas

Seção	$t_{f,sup}$ (mm)	$t_{f,inf}$ (mm)	t_w (mm)
Vão Externo (VE)	25	45	20
Vão Central (VC)	25	60	20
Apoios – Região 1 (A1)	33,74	63,75	22
Apoios – Região 2 (A2)	41,25	71,25	22
Apoios – Região 3 (A3)	48,75	78,75	22
Apoios – Região 4 (A4)	56,25	86,25	22

As propriedades físicas dos materiais empregados nas vigas e em ambos os tabuleiros são apresentadas na Tab. 3 a seguir:

Tabela 3. Propriedades mecânicas dos materiais (Figueiredo, 2007)

Material	E (GPa)	ν (GPa)	ρ (t/m ³)
Aço Estrutural	210	0,3	7,85
Concreto Armado	35	0,2	2,5
Aço das armaduras ordinárias	200	0,3	7,7

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 possuem grande rigidez em comparação com os demais, de modo a garantir a interação entre as vigas de aço e a laje de concreto. A Figura 13 representa uma perspectiva geral do modelo adotado.

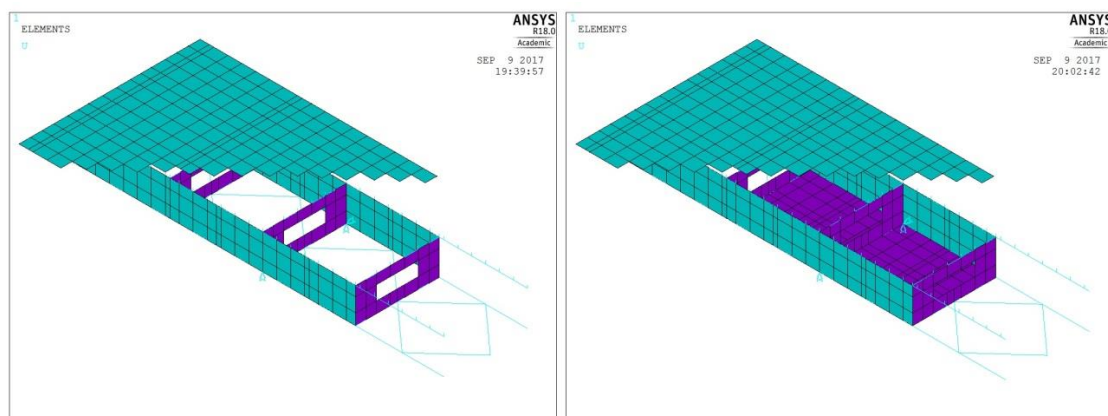


Figura 13. Modelo numérico do tabuleiro original (esquerda) e do tabuleiro com dupla ação mista (direita)

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 Análise da rigidez à flexão e a torção do tabuleiro

A fim de comparar a rigidez à flexão, os tabuleiros foram submetidos a uma carga de 200 kN/m distribuída de forma uniforme ao longo de toda a ponte. Para avaliação da rigidez à torção foi aplicado ao longo do quinto vão um carregamento assimétrico constituído por cargas uniformemente distribuídas de ± 100 kN/m. No caso do tabuleiro com dupla ação mista, foi adotada uma laje inferior com 15 cm e outra com 30 cm com o intuito de verificar a relação entre a espessura da laje e o ganho de rigidez à torção, quando comparado ao tabuleiro misto convencional.

3.4 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) através dos ensaios experimentais durante a inauguração da estrutura em 1991.

4. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

4.1 Análise da deformabilidade do tabuleiro

Na Figura 14 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.

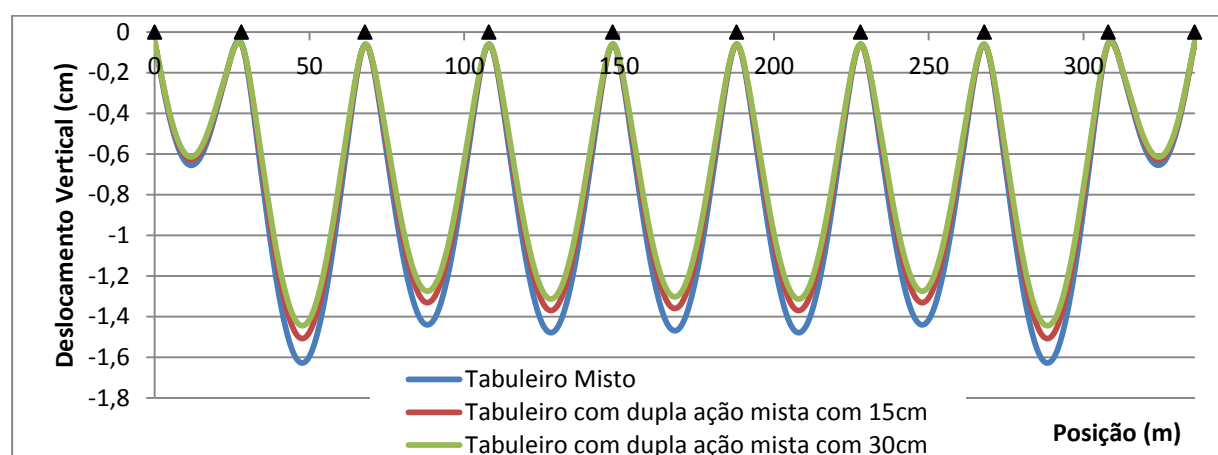


Figura 14. Deslocamento vertical da ponte ao ser submetida a um carregamento uniforme de 200 kN/m

Os valores das deformações do tabuleiro misto convencional apresentam boa correlação quando comparados aos dos resultados apresentados por 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 15 a seguir 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.

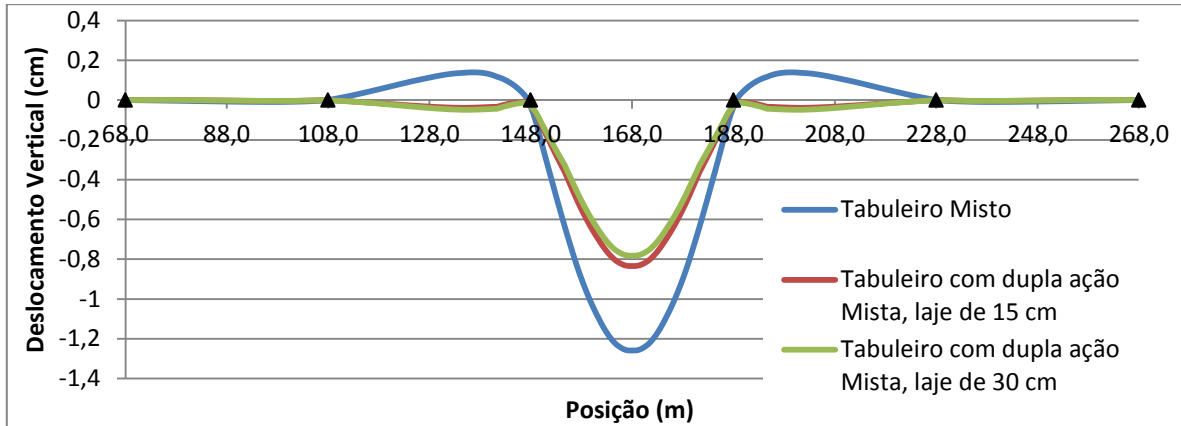


Figura 15. Deslocamento vertical da ponte ao ser submetida a um carregamento assimétrico uniforme de ± 100 kN/m

Pode ser observada 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 possuir 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 16 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.

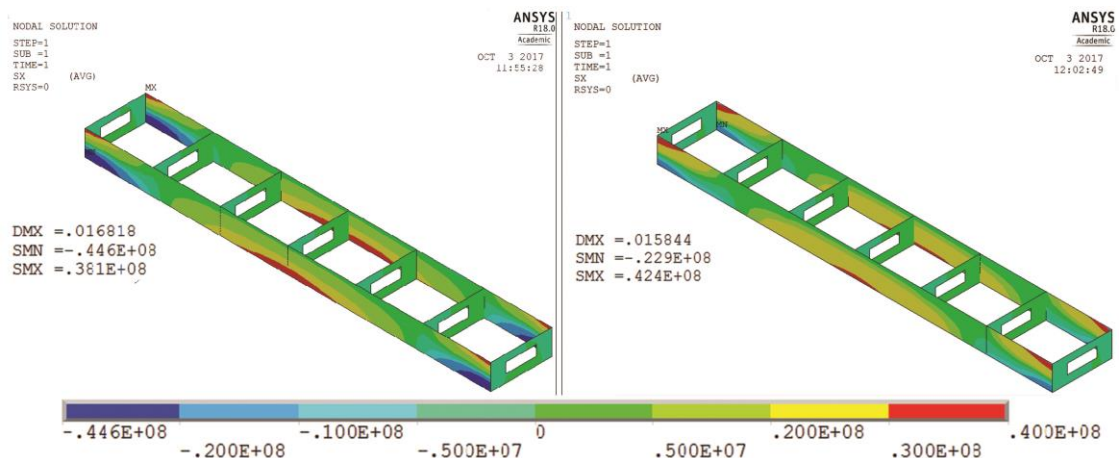


Figura 16. Esforços normais nas almas das vigas longitudinais ao longo do 5º vão em condições fissuradas

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.

Na Figura 17 estão representados os mapas de tensão normal (S_x) nas lajes superiores ao longo do quinto vão, tanto para o tabuleiro misto comum (localizado a esquerda), como para o tabuleiro com dupla ação mista (localizado a direita), ambos considerando a rigidez fissurada nas zonas de apoio. Os valores apresentados pelo programa estão na unidade de N/m^2 , exceto para as tensões longitudinais da laje nas regiões fissuradas (6 m a partir dos apoios nos vãos internos), que são obtidas por meio de um material fictício com um módulo de elasticidade E_x de 2 GPa. Devido à utilização deste procedimento os valores fornecidos pelo programa devem ser multiplicados por um fator de conversão de 100 para obtenção das tensões reais nas armaduras.

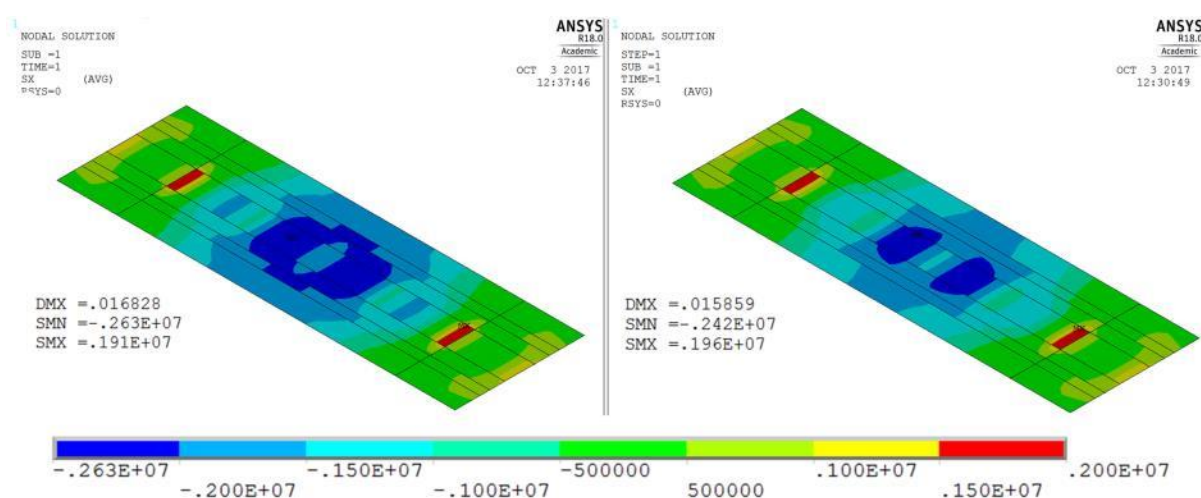


Figura 17. Esforços normais nas lajes ao longo do 5º vão em condições fissuradas

Conforme apresentado na Fig. 17, ao se utilizar o tabuleiro com dupla ação mista, ocorre um pequeno acréscimo das tensões da laje nas regiões próximas os apoios, por outro lado, acontece uma pequena redução das tensões na região central do vão.

A fim de exemplificar melhor as diferentes distribuições de tensões realizadas por ambos os tabuleiros, será apresentado na Fig. 18 uma comparação das tensões normais (S_x) na seção transversal no centro do 5º vão, para condições fissuradas. À esquerda da figura (em azul) estão representados os valores obtidos para o tabuleiro misto convencional e à direita (em vermelho) para o tabuleiro com dupla ação mista.

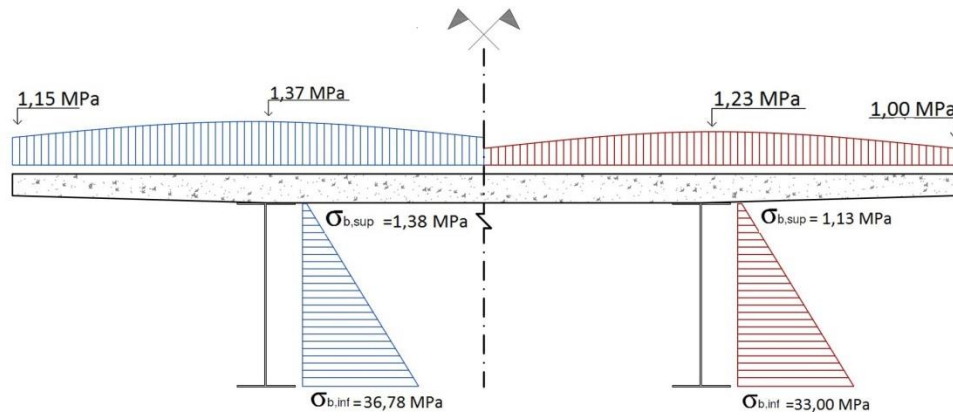


Figura 18. Tensão normal da seção no meio do 5º vão

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 ao 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 Hoorpah (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 Tab. 4.

Tabela 4. Frequências naturais de vibração obtidas numericamente e experimentalmente

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.

Nas Figuras 19 e 20 estão representados os primeiros modos de flexão e torção respectivamente, para o tabuleiro convencional misto assim como para o tabuleiro com dupla ação mista.



Figura 19. 1º Modo de Flexão vertical para o tabuleiro convencional (esquerda) e para o tabuleiro com dupla ação mista (direita)

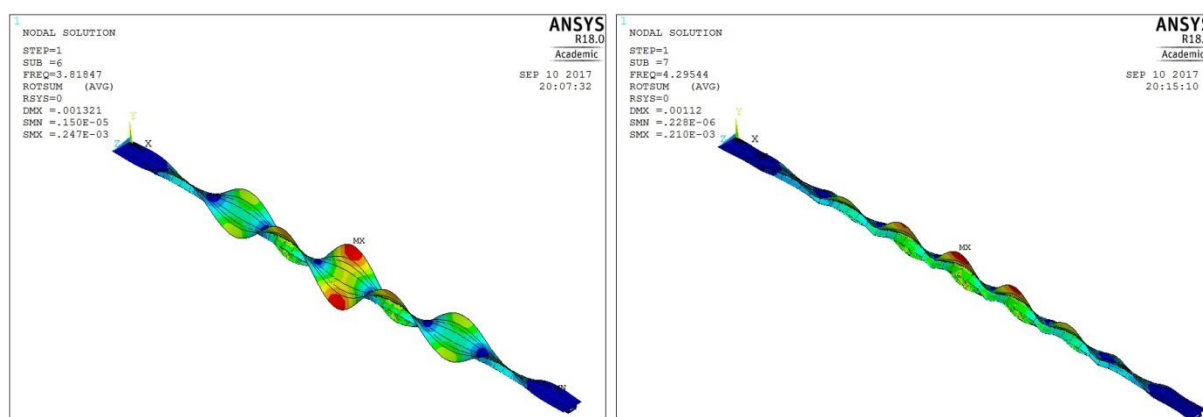


Figura 20. 1º Modo de Torção para o tabuleiro convencional (esquerda) e para o tabuleiro com dupla ação mista (direita)

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 acréscimo dos esforços, 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.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

Delgado, R., Calçada, R., & Faria, I., 2009. Bridge-vehicles dynamic interaction: numerical modelling and practical applications. In Calçada, R., Delgado, R., & Matos, A., eds, *Bridges for High-Speed Railways*, pp. 159–180. CRC Press.

Diretiva 96/48/Ce do Conselho de 23 de Julho de 1996 relativa à interoperabilidade do sistema ferroviário transeuropeu de alta velocidade.

Disponível em: <<http://www.japantimes.co.jp/news/2015/11/27/national/history/grand-bullet-train-system-sought-expansion-threatens-slow-parallel-routes/#.WRXFV1XyuUk>>. Acesso em 12/05/2017.

Disponível em: <<http://www.uic.org/IMG/jpg/01europe.jpg>>. Acesso em 10/05/2017.

Figueiredo, H., S., 2007. *Dinâmica de pontes mistas aço-betão em linhas de alta velocidade*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto.

Hoorpah, W., 1997. *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.

Millanes, F., Matute, L., & Ortega, M., 2009. Development of steel and composite solutions for outstanding viaducts on the spanish H.S.R. Lines. *VII Congresso de Construção Metálica e Mista*, pp. 87-96.

Millanes F., Pascual J., & Ortega M., 2007. Arroyo las Piedras Viaduct: The first Composite Steel-Concrete High Speed Railway Bridge in Spain. *Structural Engineering International*, vol. 17, n. 4 (Eds.: IABSE), pp. 292-297.

Patel, P., 2009. *LRFD design of double composite box girder bridges*. Dissertação de Mestrado, University of South Florida.

Ribeiro, D., Calçada R., Delgado R., Brehm M., & Zabel, V., 2012. Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters. *Engineering Structures*. vol. 40, n. 1, pp 413-435.

Saul, R., 1996. Bridges with Double Composite Action. *Structural Engineering International, International Association for Bridge and Structural Engineering*, vol. 6, n. 1, pp. 32-36.

Sen, R., & Stroth, S., 2010. *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.

Stroh, S., & Sen, R., 2000. Steel Bridges with Double-Composite Action: Innovative Design. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1, n. 1696, pp. 299-309.

UIC. 2015. *High Speed trains – Fast track to sustainable mobility*. Technical brochure, International Union of Railways, Paris.