



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Desenvolvimento de Modelo de Cargas Móveis para Verificação de Fadiga em Pontes Rodoviárias

Lívia Fernandes Santos¹, Michèle Schubert Pfeil²

¹ livia_fernandes@poli.ufrj.br

² POLI – COPPE / UFRJ / mpfeil@coc.ufrj.br

Resumo

As pontes são estruturas sujeitas ao fenômeno de fadiga pela acumulação de danos decorrentes da atuação de ciclos não uniformes de variação de tensão devidos à passagem de veículos com diferentes características. A verificação desse fenômeno em estruturas de obras de arte especiais é essencial para garantir a segurança estrutural, especialmente em pontes em aço. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma proposta preliminar de modelo de cargas móveis próprio para verificação de fadiga em pontes rodoviárias no Brasil. É um estudo voltado para pontes em grelha com vãos biapoitados de comprimento entre 10 a 40m. A calibração do modelo de carga é feita a partir de dados atuais de tráfego de veículos pesados, coletados de postos de monitoramento de diversas rodovias brasileiras. O resultado deste trabalho pretende, de certa forma, contribuir para a modernização da normalização brasileira para projetos de pontes.

Palavras-chave

Fadiga; Pontes rodoviárias; Espectro de veículos reais; Modelo de cargas móveis.

1. Introdução

As estruturas de pontes, por receberem um carregamento variável de caráter cíclico oriundo do tráfego de veículos, estão suscetíveis ao fenômeno de fadiga, o qual pode levá-las à ruptura. A verificação da resistência das pontes a esse fenômeno é feita através de procedimentos de cálculo com base em modelos de carga móvel e coeficientes de segurança, os quais são estabelecidos em normas de projeto. Em geral, as normas apresentam dois métodos distintos: (a) o método do tempo de vida garantido e (b) o método do dano controlado. Estes dois métodos simplificados são desenvolvidos a partir de um método mais geral, que consiste no cálculo do dano acumulado na estrutura através da regra de Palmgren-Miner a partir de um espectro de veículos reais que passam pela ponte.

Este trabalho apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento de modelo de cargas móveis para verificação da resistência à fadiga segundo o método do dano controlado com



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



variação de tensão equivalente, específico para o Brasil, tendo como base os dados do tráfego atual em rodovias brasileiras, coletados e tratados por ROSSIGALI (2013).

O estudo foi desenvolvido (SANTOS, 2013) com base em ações nominais (sem a multiplicação pelos coeficientes de segurança parciais), para pontes em grelha, com longarinas biapoiadas e para uma faixa de vãos com comprimentos entre 10 e 40m. A partir do resultado da calibração para diferentes configurações de veículo para o modelo de carga é feita uma proposta preliminar de modelo que atenda à faixa de vãos considerada. O bom desempenho do modelo proposto é demonstrado com um exemplo numérico de ponte de seção mista aço-concreto com quatro longarinas. Apesar de aplicado para um exemplo de ponte de seção mista, o procedimento pode ser aplicado para verificação de fadiga também em pontes de concreto.

2. Fadiga em Pontes

O fenômeno da fadiga é associado à repetição de ações dinâmicas. É um processo de modificações progressivas e irreversíveis que ocorre na estrutura de um material quando este é submetido ciclicamente a variações de tensões, as quais podem, no caso de um número de ciclos de tensões suficientemente grande, conduzir a fraturas no material (BOLLOTIN, 1999). As curvas S-N relacionam o número de ciclos N necessários para a iniciação da fratura por fadiga (tratado estatisticamente) e a variação de tensões ($S=\Delta\sigma$) imposta por um carregamento harmônico, causando assim uma variação constante de tensão. Para componentes estruturais em aço as curvas S-N têm o aspecto mostrado na Figura 1a, onde o trecho reto (em escala log-log) é geralmente expresso por:

$$N = N_{fad} \left(\frac{\Delta\sigma_{fad}}{\Delta\sigma} \right)^m \quad (1)$$

sendo o expoente m a inclinação do trecho, e o par $(\Delta\sigma_{fad}, N_{fad})$ um ponto da reta. Segundo BOLLOTIN (1999), há evidências de que para alguns materiais como o aço-carbono, o início das microfissuras não acontece se a amplitude das tensões for suficientemente pequena. Nesses casos, há um limite para as tensões abaixo do qual a ruptura por fadiga não ocorre, mesmo para um grande número de ciclos de variação constante de tensão, representado pelo valor denominado limite de fadiga sob amplitude constante ($\Delta\sigma_{fad}$ na Figura 1a).

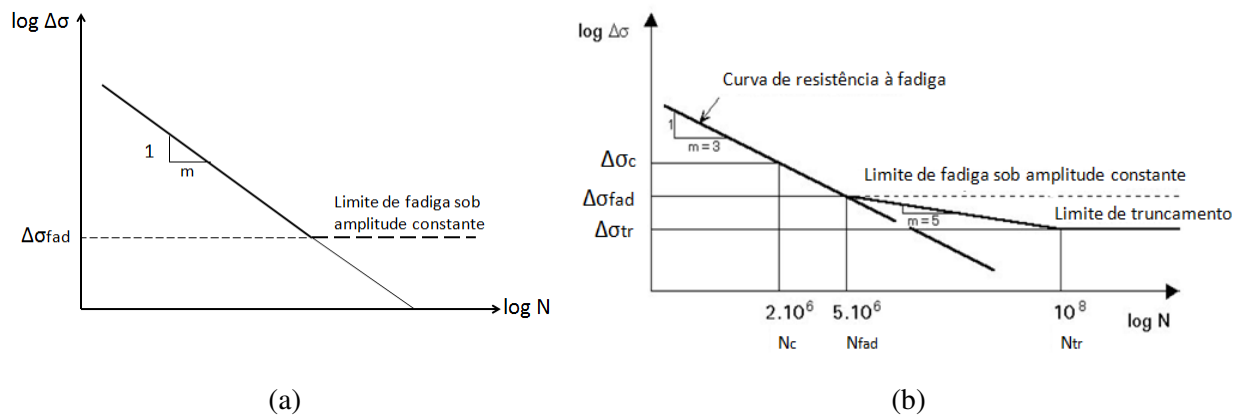


Figura 1 – Exemplos de curva S-N para componentes metálicos (adaptado de ESDEP, 2000)

As pontes são estruturas especialmente sujeitas à fadiga devido à natureza cíclica de seus carregamentos, que consistem majoritariamente na passagem de veículos. As variações de tensões $\Delta\sigma$ impostas pela passagem dos veículos são não uniformes e dependem do peso do veículo e de sua configuração geométrica, entre outros fatores. Nestes casos de variações não uniformes de tensões, pode-se utilizar a regra de Palmgren-Miner para a determinação do dano acumulado na estrutura devido a todos os ciclos de carregamento, mesmo aqueles inferiores a $\Delta\sigma_{fad}$ da Figura 1. Assim sendo, uma vez que se determina o número N de ciclos por unidade de tempo necessário para iniciação da fratura associado a um valor $\Delta\sigma$, pode-se determinar o dano acumulado D , relacionando-o linearmente com o número de ciclos experimentados n , conforme a eq. 2 (BRANCO *et al.*, 1999):

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = D \quad (2)$$

Observa-se que o limite da segurança à fadiga é atingido quando $D = 1$. A vida útil à fadiga de uma estrutura pode, então, ser determinada como o inverso do valor do dano acumulado, conforme a eq. 3:

$$VU = 1/D \quad (3)$$

Para estes casos de variações não uniformes de tensões, algumas normas de projeto, como o Eurocódigo 3, indicam a utilização de curvas S-N com duas inclinações, como na Figura 1b, em que se define o limite de truncamento, abaixo do qual as variações de tensões não precisam ser consideradas no cálculo dos danos.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



3. Métodos de Verificação de Fadiga

Os métodos do tempo de vida garantido e do dano controlado são adotados nas normas de projeto para a verificação da resistência à fadiga em estruturas de pontes. No método do tempo de vida garantido (utilizado pela norma NBR 6118 (2007), por exemplo), a variação de tensão $\Delta\sigma_{m\acute{a}x}$ provocada pela passagem do correspondente modelo de cargas m\oveis \u00e9 comparada ao limite de fadiga para amplitude de tens\o constante $\Delta\sigma_{fad}$. Em termos nominais, a seguran\u00e7a est\aa garantida para $\Delta\sigma_{m\acute{a}x} < \Delta\sigma_{fad}$. Este modelo de cargas \u00e9 desenvolvido de modo que $\Delta\sigma_{m\acute{a}x}$ corresponda a uma varia\u00e7\ao de tens\oes de alta magnitude produzida pelo espectro de ve\u00edculos reais e que seja excedida diversas vezes durante a vida \u00fatil da ponte. Por exemplo, uma varia\u00e7\ao tal que 99% do dano total resultam de todas as varia\u00e7\oes de tens\o abaixo de $\Delta\sigma_{m\acute{a}x}$ (SANPAOLESI & CROCE, 2005).

O m\u00e9todo do dano controlado consiste no atendimento \u00e0 condi\u00e7\ao de dano $D < 1,0$ (em termos nominais) para certa vida \u00fatil requerida pelo projeto. O c\alculo do dano acumulado pode ser feito por meio da eq. 2 considerando o espectro de ve\u00edculos reais ou um espectro representativo de ve\u00edculos derivado do primeiro. Pode-se tamb\u00e9m calcular o dano por meio do conceito de varia\u00e7\ao de tens\oes equivalente $\Delta\sigma_E$ em que um modelo de carga m\ovel \u00e9 desenvolvido de modo a produzir na estrutura o mesmo dano gerado pelo espectro de ve\u00edculos reais ao longo da vida \u00fatil da estrutura. O dano devido \u00e0 $\Delta\sigma_E$ \u00e9 obtido pela raz\ao $N(\Delta\sigma_E) / n_t$, sendo n_t o n\u00famero total de ciclos do espectro de ve\u00edculos reais.

4. Base de Dados de Tr\u00e1fego

Nesse trabalho, para a calibra\u00e7\ao dos modelos de cargas de verifica\u00e7\ao de fadiga em pontes, ser\aa utilizado o banco de dados desenvolvido por ROSSIGALI (2013). A base de dados foi montada, principalmente, com informa\u00e7\oes disponibilizadas pela concession\aria CCR AutoBAn no ano de 2011.

A Figura 2a mostra a composi\u00e7\ao do tr\u00e1fego nas rodovias brasileiras de acordo com as 29 classes de ve\u00edculos da base de dados montada e a Figura 2b apresenta as silhuetas dos ve\u00edculos mais frequentes da base de dados, tipos 3C, 2C, 2S2, 2CC e 2S3-L. Com base no estudo de ROSSIGALI (2013), adotou-se neste trabalho o volume m\u00e9dio di\ario de ve\u00edculos pesados circulando em uma faixa da ponte (VDM) igual 6000 ve\u00edculos por dia.

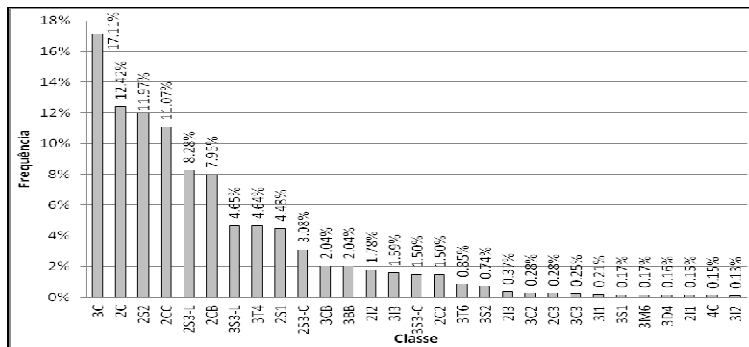


VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Classe	Silhueta
2CC	
2C	
3C	
2S2	
2S3-L	

(a)

(b)

Figura 2 – (a) Histograma de frequência das classes de veículos, (b) Silhuetas das classes mais frequentes (ROSSIGALI, 2013)

5. Modelo de Carga Móvel para Verificação da Fadiga pelo Método de Dano Controlado com Variação de Tensão Equivalente

A Figura 3 ilustra as bases do desenvolvimento do modelo de carga móvel para uso do método de dano controlado por meio de variação de tensão equivalente. O modelo de carga móvel é composto de um veículo padrão cujo peso P foi determinado de modo que a sua passagem sobre a estrutura produza o mesmo dano D_{real} que o espectro de veículos reais para um mesmo número de ciclos total n_t .

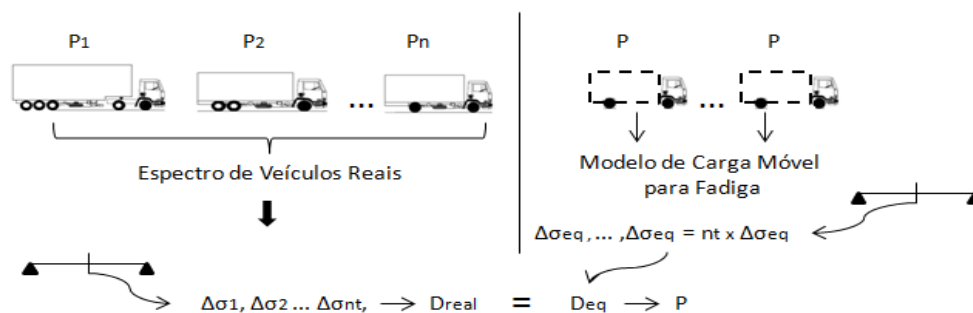


Figura 3 – Desenvolvimento do modelo de carga móvel

O estudo foi desenvolvido (SANTOS, 2013) com base em ações nominais (sem a multiplicação pelos coeficientes de segurança parciais), para pontes em grelha, com longarinas biapoiadas e para uma faixa de vãos com comprimentos entre 10 e 40m para as quais a situação de tráfego livre é determinante. Para simplificar o desenvolvimento do modelo, as seguintes considerações foram feitas: (i) somente um veículo circulando pela ponte, centralizado na faixa de tráfego, não considerando veículos simultâneos na ponte; (ii)



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



cada veículo gera somente um ciclo de tensão; (iii) o efeito dinâmico da passagem do veículo pela ponte foi considerado através do coeficiente de impacto proposto por TIMERMAN e BEIER (2012); (iv) não há alteração do volume de tráfego ao longo da vida útil; (v) todos os veículos do espectro real e o veículo padrão possuem a mesma bitola; (vi) as variações de tensões normais são devidas somente às variações de momento fletor no meio do vão da viga. Em virtude das hipóteses (v) e (vi) anteriores, o cálculo dos danos é feito somente através da análise longitudinal das pontes.

O modelo de cargas móveis para dano equivalente é obtido aplicando-se os conceitos de acumulação de dano e dano equivalente ao do espectro de variações de tensão provocadas pela passagem dos veículos reais pela ponte e considerando-se o número total de ciclos n_t do espectro de veículos reais um intervalo de tempo medido em anos. Aplicando-se a expressão geral da regra de Palmgren-Miner (eq.2) e a equação das curvas de fadiga (eq.1), obtém-se a variação de tensão equivalente ($\Delta\sigma_{eq}$):

$$\Delta\sigma_{eq} = \left(\sum_{i=1}^{n_t} n_i \times \Delta\sigma_i^m / n_t \right)^{-m} \quad (6)$$

onde $\Delta\sigma_i$ é a i -ésima variação de tensão; n_i é o número de ciclos de magnitude $\Delta\sigma_i$.

Assim como no desenvolvimento dos modelos de fadiga do Eurocódigo (SANPAOLESI e CROCE, 2005), neste estudo serão utilizadas curvas de fadiga com somente uma inclinação, $m=5$, e limite de truncamento não definido. De acordo com SANPAOLESI e CROCE (2005), os modelos calibrados com curvas S-N com inclinação igual a 5 não apresentavam erros significativos e reproduziam bem o dano real na estrutura.

A variação de tensão equivalente ($\Delta\sigma_{eq}$) é aquela causada pela passagem do veículo padrão de fadiga. Com a configuração do veículo padrão de fadiga definida, o peso total deste veículo (P) pode ser determinado considerando-se, inicialmente, que este possui peso total unitário (1kN) e obtendo-se a variação de tensão resultante da passagem desse veículo unitário pela ponte ($\Delta\sigma_{st1}$):

$$P = \frac{\Delta\sigma_{eq}}{\Delta\sigma_{st1}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_t} n_i \cdot \Delta\sigma_i^m}{n_t \cdot \Delta\sigma_{st1}^m} \right)^{-m} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_t} n_i \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_{st1}} \right)^m}{n_t} \right]^{-m} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_t} n_i \cdot \left(\frac{\Delta M_i}{\Delta M_{st1}} \right)^m}{n_t} \right]^{-m} \quad (7)$$



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



onde ΔM_i é a i -ésima variação de momentos fletores; ΔM_{st1} é a variação de momentos fletores causada pela passagem do veículo padrão de fadiga de peso unitário.

Como a variação de tensão provocada pelo espectro de veículos e a variação de tensão equivalente são calculadas no mesmo ponto da estrutura, toda a análise da variação de tensão, pode ser reduzida à análise da variação dos momentos fletores na seção mais solicitada.

A Figura 4 ilustra as três configurações selecionadas como candidatas a um modelo de carga móvel para verificação de fadiga no Brasil. A configuração V1 é a de um tandem duplo, escolhida por ser aquela proposta por ROSSIGALI (2013) em seu trabalho visando o desenvolvimento de um novo modelo de cargas móveis para verificação do ELU em pontes rodoviárias brasileiras. A configuração V2 é a de um veículo do tipo 3C, selecionada por ser a classe mais frequente no espectro de veículos reais e por ser responsável por parte considerável do dano acumulado na estrutura. Por fim, também foi estudada uma configuração de veículo adaptada da atual norma brasileira (V3), o trem tipo TB45 da NBR7188 (1984) para verificação do ELU.

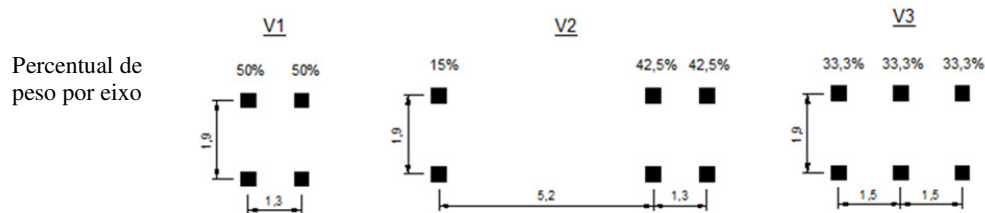


Figura 4 – Configurações das propostas de veículo padrão (dimensões em metros)

A Figura 5 apresenta o gráfico com os resultados obtidos para o peso total P dos modelos de carga móvel, em função do comprimento do vão da ponte. Para todas as configurações de veículo, o peso total do modelo de cargas móveis é mais elevado para as pontes com vão igual a 10m, devido ao coeficiente de impacto adicional aplicado a esse comprimento de vão, no entanto, para os demais comprimentos de vão, as curvas são assintóticas e tendem para um único valor de peso total do modelo de cargas móveis. Isso leva a conclusão que, para vãos maiores que 40 metros, a configuração dos modelos de carga, dentro do universo analisado, não possui muita influência sobre o peso total do veículo padrão necessário para que este provoque um dano equivalente ao espectro de veículos reais.

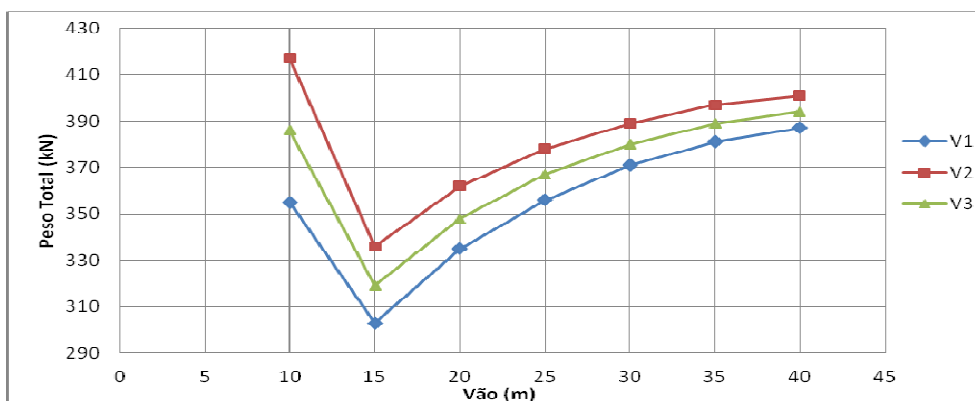


Figura 5- Peso total dos modelos de cargas móveis desenvolvidos segundo o método da variação de tensões equivalente para curvas de fadiga com inclinação $m=5$

Selecionou-se a configuração de tandem duplo (V1) por tratar-se de um modelo de cargas móveis que está sendo proposto como modelo calibrado para ELU (ROSSIGALI, 2013). Observando os pesos totais obtidos com a configuração de tandem duplo, conclui-se que os resultados, para todos os vãos, estão entre 300 e 390 kN. Dessa forma, o peso total do veículo padrão de fadiga pode ser adotado de forma conservadora igual a 400 kN para toda a faixa de vãos analisada.

6. Exemplo Numérico

Utiliza-se como exemplo numérico (SANTOS, 2013) uma ponte mista com quatro longarinas, biapoioada e reta, com 40 metros de comprimento, extraída do trabalho de TOLEDO (2001). Esse exemplo numérico pretende mostrar a eficiência do modelo de cargas móveis proposto para a verificação da fadiga pelo Método de Dano Controlado, desenvolvido através do conceito de variação de tensão equivalente. Foram calculados os danos (eq. 2) para uma vida útil de projeto igual a 100 anos, em um detalhe típico de uma longarina, por três formas distintas: (i) considerando os dados do espectro real de veículos (item 4); (ii) através do modelo de cargas móveis V1 da Figura 4 com peso total calculado para o comprimento de vão específico ($P=387\text{kN}$); (iii) utilizando a proposta para o modelo de cargas móveis V1 para dano equivalente, desenvolvido no item 5 ($P=400\text{kN}$).

O cálculo do dano foi realizado para o detalhe de ligação entre a mesa inferior e a alma do perfil. Essa ligação é feita através de solda de filete, de forma automática e com interrupções, se enquadrando na categoria 112 ($\Delta\sigma_c=120\text{MPa}$), segundo o Eurocódigo 3 – Parte1-9 (2005).



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



A curva S-N adotada possui duas retas: um trecho com inclinação $m=3$ e outro com $m=5$, conforme apresentado na Figura 1b, no entanto, o limite de truncamento não foi considerado nesta análise, assim, todos os ciclos de variação de tensão contribuem para o cálculo do dano.

A Tabela 1 apresenta o resultado obtido para as três situações analisadas. O saldo de vida útil será igual à vida útil calculada menos a vida útil de projeto, igual a 100 anos.

Verifica-se que o dano acumulado resultante da passagem do espectro de veículos reais (situação i) é igual ao dano calculado considerando-se a passagem do modelo de cargas móveis calibrado para o comprimento de vão analisado (situação ii). Esta concordância completa se deve ao fato dos ciclos de variação de tensão serem inferiores ao limite de fadiga $\Delta\sigma_{fad}$, região da curva S-N em que $m=5$.

A eficiência do modelo de cargas móveis proposto é confirmada quando se observa que o dano causado pela passagem deste pela ponte resulta em um dano maior que aquele gerado pelo espectro de veículos reais, sendo, portanto, um modelo de cargas para análise de fadiga conservador, caso todos os ciclos de variação de tensão correspondam a uma inclinação da curva S-N igual a 5.

Tabela 1– Resultado para cálculo do dano por ano e vida útil para cada situação

Situação	M (kN.m)	$\Delta\sigma$ (MPa)	n	N	Dano/ano	Vida Útil (anos)	Saldo de vida útil (anos)
i	-	-	-	-	1.20E-03	832	732
ii	3744	30.06	1.64E+08	1.83E+09	1.20E-03	834	734
iii	3870	31.07	1.64E+08	1.55E+09	1.41E-03	707	607

No que diz respeito à vida útil de fadiga calculada, percebe-se que os resultados obtidos para o detalhe de ligação entre a mesa inferior e a alma do perfil da longarina externa, para as três análises, são bastante superiores à vida útil requerida em projeto, de 100 anos. Entretanto, a garantia da segurança com relação ao fenômeno da fadiga dependerá dos coeficientes de segurança adotados, não considerados no presente trabalho.

7. Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo de cargas móveis para verificação da resistência à fadiga de pontes através do método do dano controlado com variação de



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



tensão equivalente. Foi utilizado um espectro de veículos reais que circulam pelas rodovias brasileiras, sendo possível o desenvolvimento de um modelo de cargas móveis compatível com as características do tráfego de veículos atual nas pontes do Brasil.

Considerando a configuração do veículo padrão V1, um tandem duplo, utilizando o coeficiente de impacto proposto por TIMERMAN e BEIER (2012) e adotando curvas S-N simplificadas com inclinação única $m=5$, chegou-se a um modelo de cargas móveis adequado para a verificação da resistência a fadiga em pontes com vãos dentro da faixa analisada, entre 10 e 40m, o qual possui a configuração de um tandem duplo (V1 da Figura 4) e 400kN de peso total.

O bom desempenho do modelo proposto foi demonstrado através de um exemplo numérico, em que as variações de tensões devidas ao espectro de veículos reais encontram-se na região da curva S-N em que $m=5$. Um novo exemplo deve ainda ser testado, no qual ocorram variações tensão maiores do que $\Delta\sigma_{fad}$ (região em que $m=3$).

8. Referências

- ABNT, *NBR-6118:2007 – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 2007.
- ABNT, *NBR-7188:1984 – Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 1984.
- BOLOTIN, V.V., *Mechanics of Fatigue*, Estados Unidos, CRC Press, 1999.
- BRANCO, C. M., FERNANDES, A. A., CASTRO, P. M. S. T., *Fadiga de Estruturas Soldadas*, Lisboa, Portugal, Editora Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- EN1993-1-9, Eurocode 3 – *Design of Steel Structures – Parte 1-9: Fatigue*. European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- ESDEP (2000), *European Steel Design Education Programme*, ESDEP, disponível em: <<http://www.esdep.org>>. Acesso em 15 dez. 2012.
- ROSSIGALI, C. E., *Atualização do Modelo de Cargas Móveis para Pontes Rodoviárias de Pequenos Vãos no Brasil*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- SANPAOLESI L., CROCE, P., *Handbook 4: Design of Bridges – Guide to basis of bridge design related to Eurocodes supplemented by practical examples*, JRC Scientific and Technical Reports, 2005.
- SANTOS, L. F., *Desenvolvimento de um novo modelo de cargas móveis para verificação de fadiga em pontes rodoviárias*, Projeto de graduação, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- TIMERMAN, J., MARTIN, B., “Considerações Sobre a Revisão da ABNT NBR 7188 - Carga Móvel Rodoviária e de Pedestres em Pontes, Viadutos, Passarelas e outras Estruturas”. In: *V Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Maio de 2012.
- TOLEDO, R. L. S., *Avaliação de vida útil à fadiga em ponte mista aço-concreto considerando o espectro de veículos reais*, Projeto de graduação, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.