

Análise da Influência dos Efeitos Secundários de Flexão no Comportamento à Fadiga de Detalhes Rebitados de uma Ponte Ferroviária Treliçada

Ritermayer Monteiro Teixeira¹, Túlio Nogueira Bittencourt², Rui Artur Bártolo Calçada³, Abílio Manuel Pinho de Jesus⁴

¹ Universidade Federal do Pará / Faculdade de Engenharia Civil / Email: ritermayer@ufpa.br

² Escola Politécnica da Universidade de São Paulo / Departamento de Engenharia Geotécnica e Estrutural / Email: tbitten@gmail.com

^{3,4} Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal / Departamento de Engenharia Civil / Email: ruiabc@fe.up.pt

Resumo

Uma das principais causas da fadiga em detalhes rebitados ou parafusados de pontes de aço está relacionada às diferenças entre as tensões que realmente atuam na estrutura e aquelas consideradas na etapa de projeto. De fato, durante o projeto de uma ponte rebitada ou parafusada, várias simplificações e pressupostos são adotados com relação ao comportamento das ligações, a exemplo da idealização como articulação perfeita para conectar os membros. No entanto, uma ligação real utiliza conectores dispostos em uma determinada extensão, o que pode resultar em alguma restrição das rotações e gerar tensões secundárias não previstas. A modelagem com ligações totalmente rígidas é capaz de capturar estes efeitos secundários, mas pode superestimá-los, uma vez que na realidade, em geral, as restrições são parcialmente aliviadas devido à flexibilidade das placas gusset e dos anexos da ligação entre os membros principais. A fim de avaliar a relevância de possíveis efeitos secundários de flexão em ligações rebitadas de pontes, é apresentado neste artigo um estudo baseado no desenvolvimento de um modelo em elementos finitos de um detalhe rebitado considerado crítico em uma ponte ferroviária treliçada, localizada em uma ferrovia brasileira na qual trafegam trens com elevadas cargas por eixo. Diferentes técnicas de modelagem hierárquica são aplicadas a fim de incorporar de forma pormenorizada as zonas de interesse na ligação, incluindo interações de contato e representação dos elementos conectores. O estudo teve por objetivo avaliar o impacto desses efeitos no dano à fadiga em montantes das treliças. A vida à fadiga foi prevista por meio do método SN baseado em tensões nominais, considerando um modelo de tráfego idealizado definido a partir do volume bruto de cargas anuais.

Palavras-chave: fadiga, ligações rebitadas, efeitos secundários, modelagem hierárquica, ponte ferroviária.

1 - Introdução

Os procedimentos mais comuns para avaliação da fadiga em ligações rebitadas são baseados em curvas SN e constituem a metodologia adotada pelos principais códigos internacionais. Este método possui a conveniência de utilizar tensões nominais, sendo de fácil aplicação em conjunto com uma análise estrutural a nível global. No entanto, tais curvas são obtidas a partir de testes com ligações sob condições simplificadas de carregamento, que podem ser bem diferentes daquelas experimentadas pela estrutura

real. De fato, esforços secundários podem surgir nas ligações devido às interações entre os membros de diferentes partes da ponte. Tais esforços geralmente não são considerados em projeto, mas podem ser relevantes para a fadiga. Connor e Fisher (2006) estimam que aproximadamente 90% de todo processo de danificação por fadiga em pontes está relacionado a algum tipo de distorção ou tensões secundárias no detalhe.

Alguns autores têm utilizado técnicas de submodelagem e modelagem hierárquica em elementos finitos como uma alternativa para realização de análises de ligações rebitadas com aplicação em pontes (TEIXEIRA, 2015; IMAM e RIGHINIOTIS, 2010; LEITE et al., 2010; NTSB, 2008), a fim de considerar, entre outros, os efeitos secundários induzidos por flexão nos membros quando a ponte se deforma espacialmente. A modelagem hierárquica pode ser entendida como uma técnica que utiliza elementos finitos de diferentes ordens dimensionais (lineares, superficiais e sólidos) para refinar as regiões de interesse dentro de um mesmo modelo ou em modelos distintos. Pode ser usada para investigar a distribuição dos esforços ao nível da ligação, a fim de compreender os mecanismos de transferências de cargas e como eles podem influenciar o comportamento à fadiga. Muitas práticas convencionais de modelagem de pontes negligenciam este aspecto, dada a dificuldade de se representar detalhadamente os conectores nas ligações. Sabe-se que a rigidez do conector é um importante parâmetro no controle da distribuição de esforços entre as diferentes partes conectadas no membro (HUTH, 1986) e, dessa maneira, a qualidade dos resultados da análise é fortemente influenciada pela distribuição de cargas obtidas no modelo.

Neste contexto, a fim de avaliar a relevância de possíveis efeitos secundários de flexão no comportamento à fadiga de ligações rebitadas de pontes, este trabalho apresenta um estudo de caso onde é investigado um membro estrutural considerado crítico em uma ponte ferroviária treliçada existente. Para tal, recorre-se à modelagem hierárquica a fim de incorporar, de forma mais detalhada, as zonas de interesse na ligação, considerando as amplitudes variáveis de gamas de tensões geradas pelos carregamentos.

2 - Breve descrição da estrutura e do detalhe analisado

A estrutura selecionada para a investigação é uma a ponte ferroviária existente, conhecida como "*ponte sobre o Rio Fundão*", a qual faz parte do conjunto que integra a Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), situada na região Sudeste do Brasil. A ponte é uma estrutura do tipo THRU projetada em 1943 segundo as especificações da AREA (1941) e composta por treliças *Warren* com 41 m de vão. A estrutura foi projetada considerando placas *gusset* com conexões rebitadas em todas as ligações entre os membros. No entanto, modificações foram feitas ao longo dos anos e a maioria das barras das treliças, sujeitas predominantemente a esforços de tração, foram substituídas por outras com parafusos de alta resistência no lugar dos rebites. As modificações foram feitas a partir do ano de 2005 após a detecção de trincas de fadiga em montantes, particularmente nas zonas de ligações com as placas *gusset*, durante as inspeções de outras pontes similares construídas a partir do mesmo projeto. Uma vista geral da ponte é mostrada na Figura 1 e a representação de todos os membros é ilustrada na Figura 2. Uma descrição detalhada da estrutura e das intervenções realizadas ao longo dos anos, destacando as motivações para as ações de reparo, é apresentada em Teixeira (2015).



Figura 1 – Vistas gerais da ponte sobre o Rio Fundão.

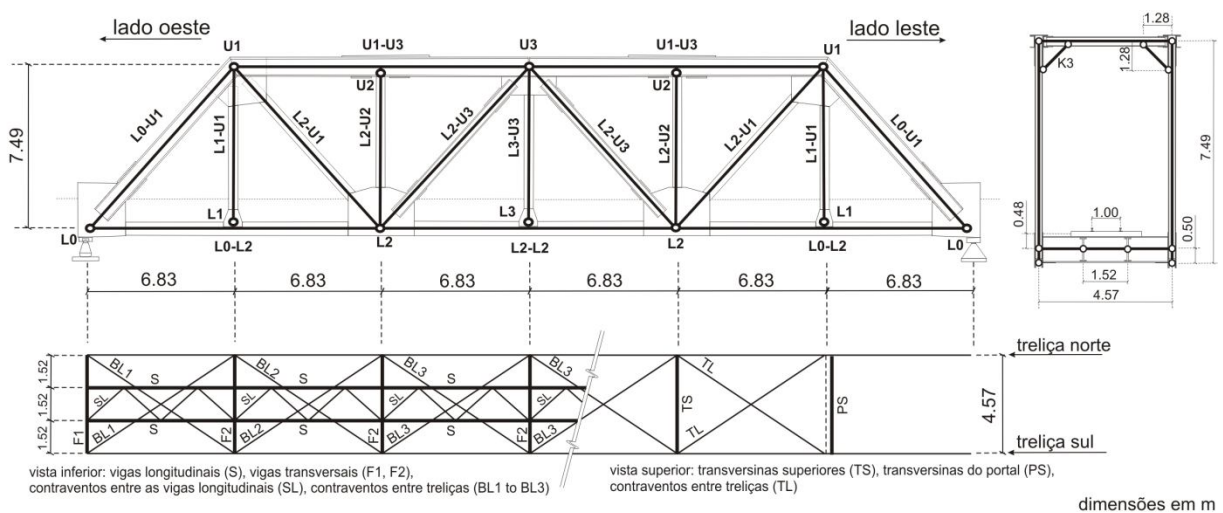


Figura 2 – Identificação dos membros da ponte sobre o Rio Fundão.

Por ser uma amostra representativa do grupo de pontes em treliças *Warren* com 41 m de vão, existentes na EFVM, a ponte sobre o rio Fundão foi escolhida para investigação dos fenômenos que causaram as falhas detectadas nas demais estruturas, antes das ações de reparo. A maioria das falhas reportadas nessas estruturas foram concentradas no montante L1-U1, na zona da ligação U1. A fim de melhor explorar o comportamento desse membro, foi desenvolvido um modelo computacional detalhado, onde a ligação U1 foi incorporada ao modelo global da ponte. As informações sobre a geometria da ligação foram obtidas com base no projeto e na inspeção. A conexão foi analisada considerando rebites como conectores, na tentativa de capturar o comportamento antes da substituição por parafusos. Esta ligação é usada para unir o poste de extremidade L0-U1, a corda superior U1-U3, a diagonal L2-U1 e o montante L1-U1, como mostrado na Figura 2. Fora do plano da treliça, também liga os componentes do portal, PS, e os contraventos superiores, TL (ver Figuras 3).

3 - Modelagem hierárquica da ligação U1

A metodologia de modelagem foi implementada no *software* ABAQUS™ (DASSAULT SYSTEMES, 2012) e utiliza uma hierarquia de elementos finitos para refinar as regiões de interesse na ligação. Zonas intermediárias modeladas com

elementos de superfície (tipo *shell*) permitem a transição entre as regiões com elementos de pórtico espacial (tipo *beam*) e as regiões com elementos volumétricos (tipo *solid*), os quais são utilizados onde há maior exigência para refinamento de malhas. A Figura 4a mostra a incorporação da ligação ao modelo de barras da ponte. Na Figura 4b são esquematicamente mostradas as extensões da região modelada com elementos sólidos e *shells*.

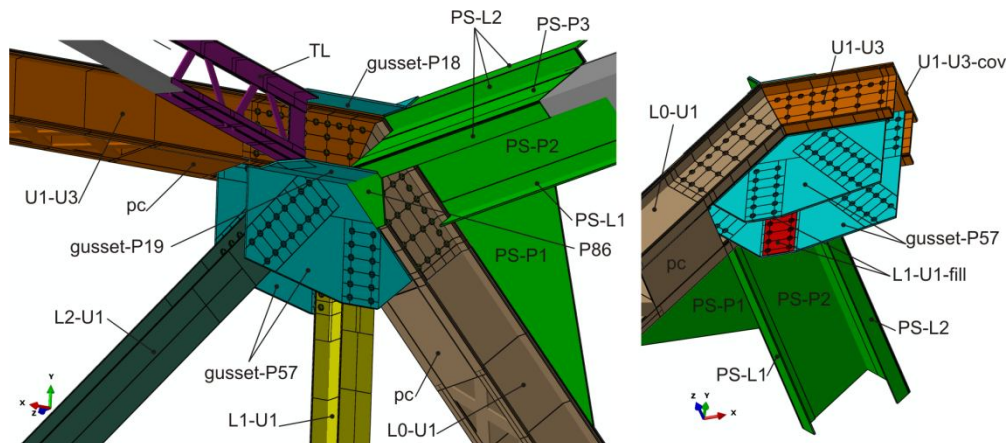


Figura 3 - Componentes da ligação U1.

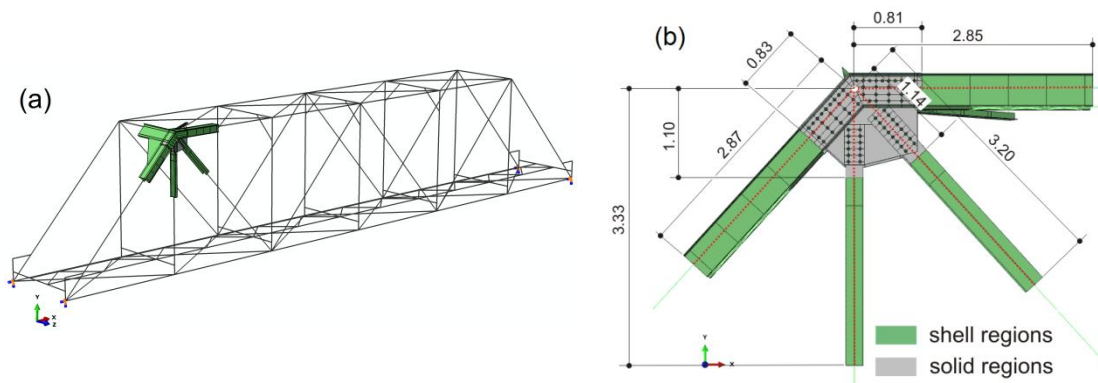


Figura 4 - Modelo computacional da ponte sobre o Rio Fundão: (a) incorporação da ligação U1; (b) dimensões das zonas modeladas em U1.

Dois tipos de acoplamentos disponíveis no pacote ABAQUS™ foram utilizados para modelagem das transições *beam-shell* e *shell-solid*. No primeiro caso, foram utilizados acoplamentos cinemáticos para possibilitar a compatibilidade de deslocamentos e tensões entre os elementos de viga e os elementos de superfícies tipo *shell*, conforme mostrado na Figura 5a. Para os casos abordados neste trabalho, foram restringidos tanto os graus de liberdade de translação quanto os de rotação, de forma que a seção da interface se comporta como um corpo rígido. Para a modelagem das transições tipo *shell-solid* foi utilizado um recurso específico denominado *shell-to-solid coupling constraint*. Neste caso, um conjunto de restrições é criado para acoplar o movimento dos nós, que permanecem na borda de uma malha de elementos *shell*, ao movimento de um conjunto de nós que pertencem a uma determinada face de uma malha modelada com elementos sólidos (ver Figura 5b).

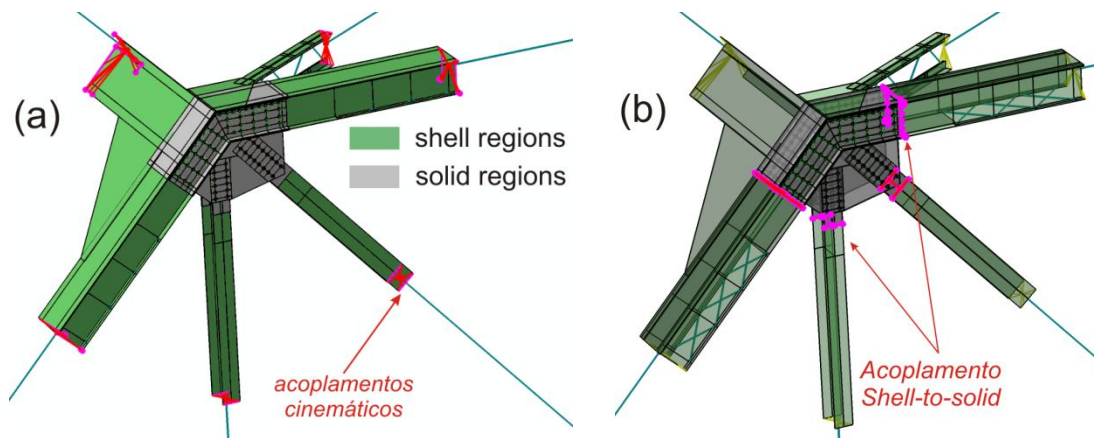


Figura 5 - Acoplamentos utilizados para incorporação da ligação U1: (a) acoplamento cinemático; (b) acoplamento shell-to-solid.

Elementos *shell* quadrilaterais com integração reduzida (tipo S4R) foram utilizados na modelagem das superfícies nas zonas intermediárias da ligação U1. Devido à complexidade das geometrias, a técnica de malhas livres foi usada, gerando a necessidade do uso de elementos triangulares (tipo S3) em alguns pontos. Elementos hexaédricos com integração reduzida (tipo C3D8R) foram utilizados nas regiões sólidas. A geração da malha também exigiu, em alguns casos, a disposição de elementos volumétricos de "cunha" (tipo C3D6). Os membros das treliças posicionados nas zonas distantes das ligações foram representados por elementos espaciais cúbicos de viga (tipo B33). Uma visão geral das malhas dos elementos *shell* e sólidos usados nas diferentes zonas de transição do modelo é representada na Figura 6.

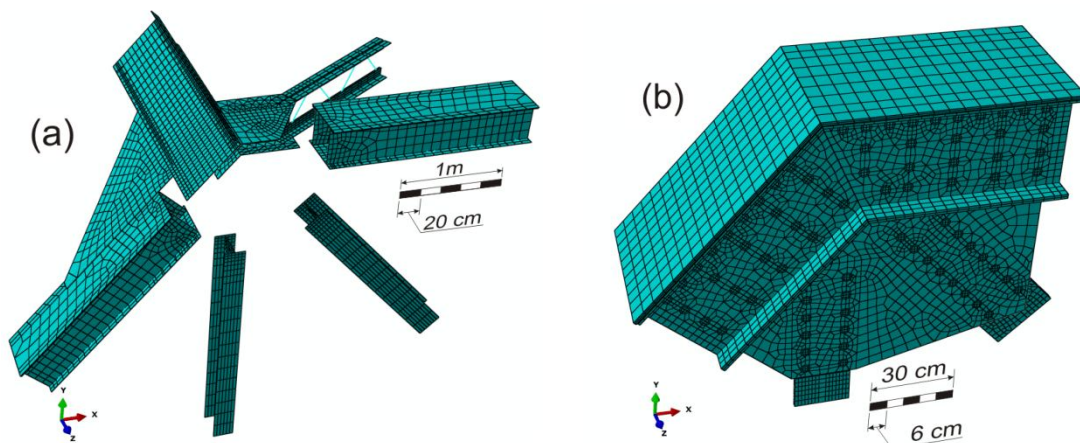


Figura 6 - Malhas de elementos finitos utilizadas no modelo hierárquico: (a) elementos tipo shell; (b) elementos sólidos.

Duas metodologias, baseadas em superfícies, foram aplicadas para modelagem das interações entre os componentes da ligação U1. Onde o efeito das interações são considerados de menor interesse, restrições do tipo "tie" (*surface-based tie constraint*) foram impostas a cada par de superfícies, de forma a eliminar qualquer tipo de movimento relativo (TEIXEIRA, 2015). Este é o caso das ligações que envolvem

componentes transversais (placas *gusset* horizontais, vigas transversais, contraventos) e das ligações que utilizam placas anexas secundárias (a exemplo das placas pc e U1-U3-cov). A segunda metodologia de análise baseou-se na definição de pares de superfícies de contato para estudar de forma mais realista as interações entre os membros principais que se ligam no plano da treliça, onde os conectores são modelados. O algoritmo *Master-Slave* para deslizamentos finitos e o *Método da Penalização* foram aplicados, admitindo tanto o comportamento normal (*hard contact*) quanto tangencial (*modelo de Coulomb*). O coeficiente de fricção $\mu = 0.33$ foi adotado nas interfaces.

Os conectores foram modelados como elementos deformáveis. Todos os rebites conectados às placas *gusset* verticais foram considerados na modelagem, como mostrado na Figura 7a. Os acoplamentos distribuídos usados para simular o efeito da cabeça de cada rebite foram definidos com um diâmetro de influência de 36.44 mm (ver Figura 7b). O cálculo das rigidezes axiais (k_y) e de cisalhamento (k_x e k_z) do elemento conector que simula o fuste do rebite foi realizado considerando o diâmetro de 23.81 mm, admitindo o comportamento como vigas curtas. A Tabela 1 apresenta os valores das componentes de rigidez lançadas no modelo.

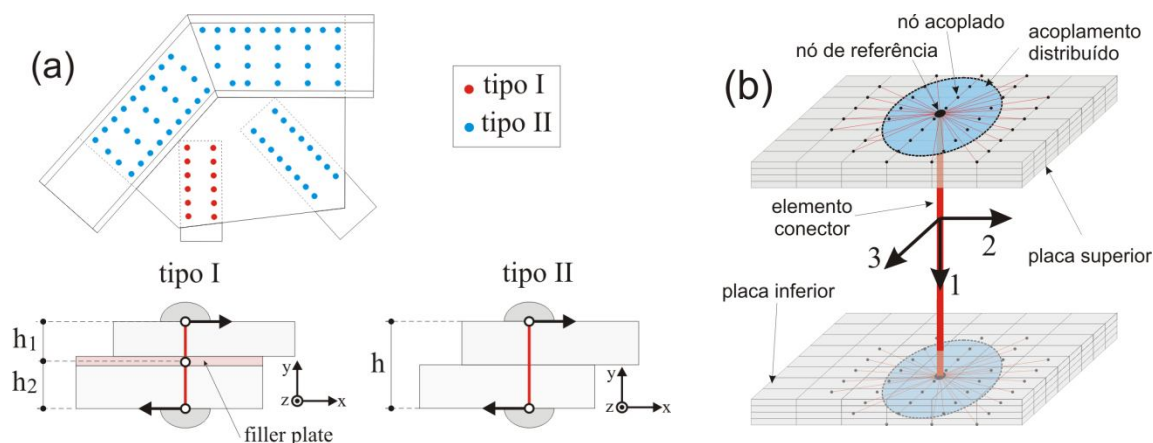


Figura 7 - Modelagem dos conectores da ligação U1: (a) posicionamento e tipo dos conectores; (b) idealização do conector.

Tabela 1 - Componentes de rigidez estimadas para os conectores da ligação U1

Conexão (camada 1/ camada 2)	tipo	comprimento do conector [mm]	$k_x = k_z$ [$\times 10^9$ N/m]	k_y [$\times 10^9$ N/m]
gusset-P57/L2-U1	II	31.70	2.510	2.950
U1-U3/gusset-P57	II	25.91	3.830	3.610
gusset-P57/L1-U1-fill	I	15.87	5.003	5.891
L1-U1-fill/L1-U1	I	14.61	5.928	6.403
L0-U1/gusset-P57	II	25.91	3.830	3.610

4 - Metodologia de avaliação da fadiga

As histórias do dano à fadiga foram determinadas com base na hipótese de Palmgren-Miner (MINER, 1945) e nas diferentes curvas SN classe "D" recomendadas pelo código AREMA (2013) para ligações rebitadas com pré-esforço "baixo" e

"normal". Após a extração da sequência de pontos de viragem (a sequência de máximos e mínimos locais) das histórias de tensões nominais, a contagem de ciclos pôde ser obtida baseada na análise *Rainflow* dos dados simulados (ASTM E1049).

Para estimativa da vida à fadiga foi adotado um modelo de tráfego simplificado. O objetivo fundamental deste modelo foi definir quais os trens típicos com potencial para gerar dano à fadiga e quais são as suas respectivas frequências de passagens sobre a ponte, tomadas a partir de uma base de tempo, considerando um cenário relativamente conservador. O modelo de tráfego foi definido a partir do volume de cargas anual (determinado em milhões de toneladas brutas - MTB) transportado desde o início de operação da ferrovia. O minério de ferro é a principal carga da ferrovia e é transportado em trens com pequena variação no comprimento, os quais utilizam vagões gôndola (GDE). O modelo com duas locomotivas DASH 9W frontais seguidas de 168 vagões GDE (275 kN/eixo) foi adotado como padrão. Para representar os trens que transportam cargas gerais, foram adotados dois grupos. O primeiro (Grupo-1) responde por aproximadamente 64.6% de toda carga geral transportada na ferrovia e é formado por duas locomotivas frontais DASH 9W seguidas de 84 vagões do tipo GFE (250 kN/eixo). Para o segundo grupo (Grupo-2) foi adotado o fator de participação de 35.4% e o vagão *hopper* tipo HFE (250 kN/eixo) foi escolhido, baseado nos mesmos pressupostos admitidos no Grupo-1. A Figura 8 ilustra o cenário de tráfego idealizado.

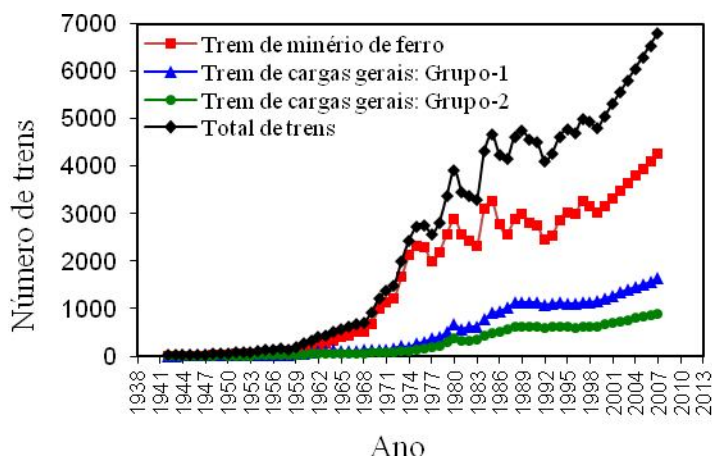


Figura 8 - Cenário de tráfego idealizado: número de trens por ano.

5 - Análise da influência dos efeitos secundários no comportamento à fadiga

A Figura 9 mostra uma comparação das tensões nominais (σ_n) no ponto crítico da seção líquida do montante L1-U1, para simulações com um trem de minério formado por duas locomotivas DASH 9W e seis vagões GDE e um trem cargueiro composto de duas locomotivas DASH 9W e seis vagões HFE. Os momentos fletores e esforços normais foram determinados por meio da integração dos campos de tensões nos nós dos elementos sólidos, relativamente ao sistema local de coordenadas com origem no centróide da seção bruta do membro, a 10 cm abaixo da primeira linha de rebites. Tais esforços são necessários para a estimativa das tensões nominais na seção líquida. Na figura, $\sigma_{n,flexão}$ representa as tensões nominais determinadas, considerando somente o efeito de flexão biaxial e $\sigma_{n,total}$ simboliza os valores das tensões nominais combinadas

devido à ação conjunta da força axial e dos momentos fletores. As máximas gamas de tensões nominais ($\Delta\sigma_{n,max}$), obtidas por meio do algoritmo *Rainflow*, são apresentadas na Tabela 2. Verifica-se que a contribuição das tensões nominais secundárias de flexão variou entre 11% e 24% em relação às máximas gamas de tensões nominais axiais.

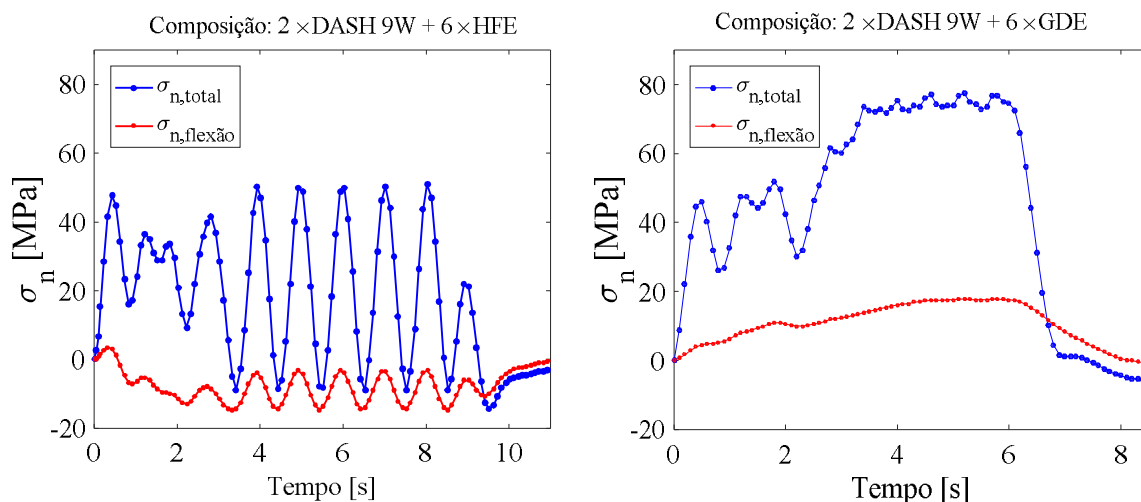


Figura 9 - Comparação de tensões nominais nas seções líquidas do membro L1-U1.

Tabela 2 - Comparativo das gamas de tensões nominais máximas

Composição simulada	$\Delta\sigma_{n,max}$		
	Total [MPa]	Axial [MPa]	Total/Axial
2×DASH 9W + 6×GDE	83.04	67.21	1.24
2×DASH 9W + 6×HFE	65.31	59.05	1.11

Os resultados das previsões de dano (D_f) para simulações com um trem de minério, formado por duas locomotivas DASH 9W mais seis vagões GDE, e um trem cargueiro, composto de duas locomotivas DASH 9W seguidas de seis vagões HFE, são mostrados na Figura 10. As estimativas foram obtidas usando a curva SN AREMA classe "D" com "baixo" pré-esforço nos rebites e a lei de acúmulo linear de *Palmgren-Miner*. A Tabela 3 apresenta valores para razão $D_{f,total}/D_{f,Axial}$, onde $D_{f,total}$ é o dano calculado considerando a combinação de tensões nominais axiais e de flexão e $D_{f,Axial}$ é o dano considerando somente a contribuição da força normal. A contribuição dos efeitos secundários de flexão variou entre 67% e 100% em relação ao dano calculado com base apenas na carga axial. Verifica-se que, devido à forte não-linearidade da curva SN, os efeitos secundários têm influência significativa nas estimativas do dano.

Uma comparação entre as vidas à fadiga previstas com base no modelo de tráfego idealizado é mostrada na Figura 11. Na figura, são comparadas estimativas obtidas considerando também as curvas SN AREMA classe "D" para pré-esforço "baixo" e "normal" com furos de qualidade superior (AREMA, 2013). As estimativas de dano mostradas na figura para idades superiores a 63 anos foram obtidas admitindo que as frequências anuais de passagens dos trens são mantidas constantes após 2007, o que equivale a extrapolar linearmente a curva de dano a partir deste ano. As previsões do modelo indicam vidas relativamente curtas para o detalhe, o que é compatível com a

realidade, pois este membro apresentou trincas em estágio avançado no ano de 2007 e teve que ser substituído. No entanto, é importante ressaltar que as previsões obtidas são apenas de caráter indicativo, pois o método SN é uma abordagem conservadora que geralmente subestima a resistência à fadiga do detalhe. Outras incertezas também são incorporadas devido às simplificações adotadas para o modelo de tráfego no que concerne aos carregamentos e às respectivas frequências anuais de passagens dos trens.

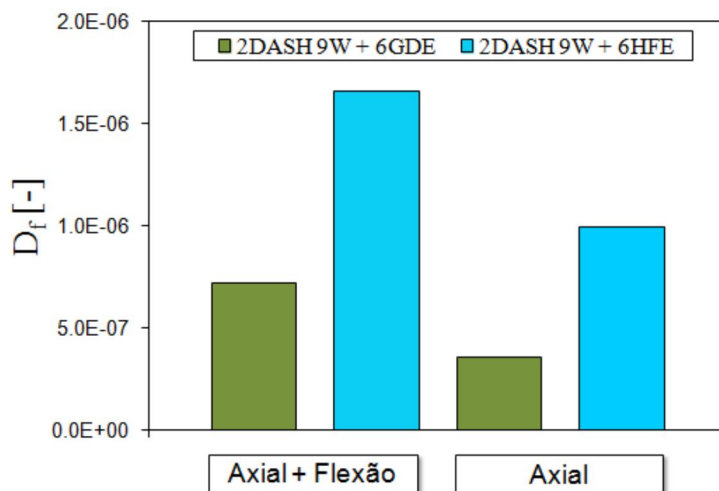


Figura 10 - Estimativas do dano à fadiga no montante L1-U1.

Tabela 3 - Comparativo do dano à fadiga

Composição	$D_{f,total} / D_{f,Axial}$
2×DASH 9W + 6×GDE	2.01
2×DASH 9W + 6×HFE	1.67

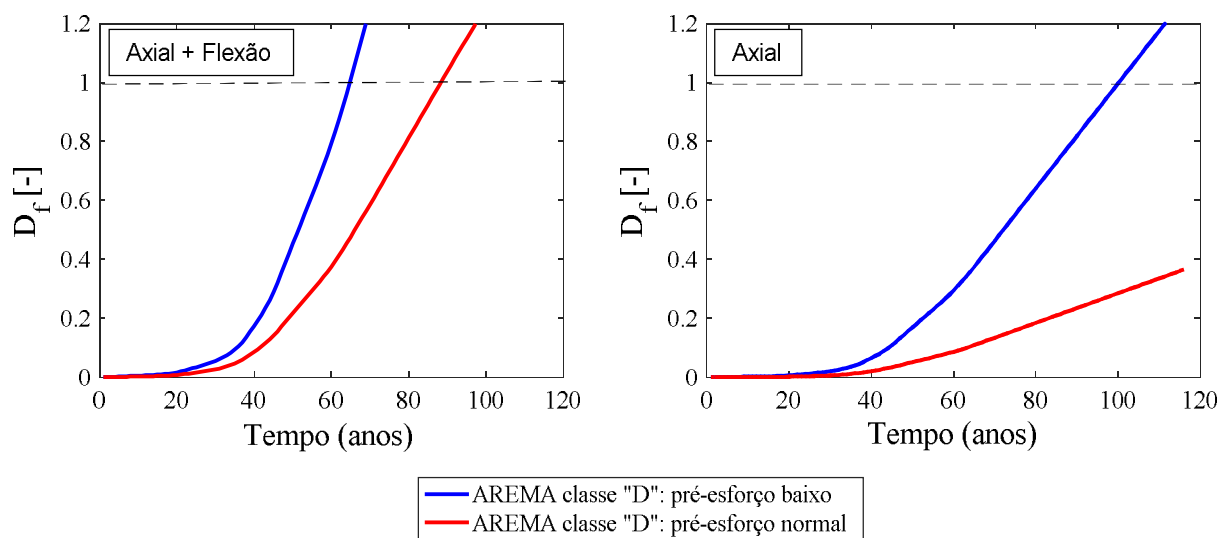


Figura 11 - Estimativas da vida à fadiga do montante L1-U1 considerando o efeito combinado da flexão e força axial (a esquerda) e o efeito isolado da força axial (a direita).

6 - Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um estudo de caso onde uma metodologia de modelagem hierárquica foi aplicada para fins de avaliação da fadiga. As análises com os modelos, baseadas no método das tensões nominais, previram a existência de momentos fletores não desprezíveis tanto no plano longitudinal quanto transversal das treliças da ponte. Sobre este comportamento, as seguintes observações são feitas:

- Os resultados apresentados permitem concluir que as tensões secundárias de flexão são importantes para as previsões de dano e vida à fadiga do detalhe analisado, uma vez que estas variáveis são fortemente sensíveis à elevada não-linearidade da curva SN;
- As magnitudes dos esforços internos secundários de flexão são razoáveis e contrariam a hipótese de ligações rotuladas, frequentemente utilizada nas avaliações do comportamento à fadiga de membros verticais rebitados característicos de treliças. Mesmo que estas respostas sejam um pouco superestimadas pelos modelos, recomenda-se considerá-las durante a avaliação;

Referências

- AREA. Manual for railway engineering. American Railway Engineering Association, Washington, DC., 1941.
- AREMA. Manual for railway engineering. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, Washington, DC, 2013.
- ASTM E1049. Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis 1. Annual Book of ASTM Standards, v. 85, n. Reapproved 2005, p. 1–10, 2010.
- CONNOR, R.; FISHER, J. W. Identifying effective and ineffective retrofits for distortion fatigue cracking in steel bridges using field instrumentation. *Journal of Bridge Engineering*, v. 11, n. 6, p. 745–752, 2006.
- DASSAULT SYSTÈMES. Abaqus 6.12 Analysis User's Manual Providence, RI, USA, 2012.
- HUTH, H. Influence of Fastener Flexibility on the Prediction of Load Transfer and Fatigue Life for Multiple-Row Joints (J. M. Potter, Ed.). *Fatigue in Mechanically Fastened Composite and Metallic Joints*, ASTM STP 927. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1986.
- LEITE, R. C. G.; JORGE, R.; DE JESUS, A. A methodology for reticular structures modeling applied to the fatigue analyses of riveted bridges. *Iberian Conference on Fracture and Structural Integrity*. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- MINER, M. A. Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, v. 12, n. 3, p. 159–164, 1945.
- IMAM, B. M.; RIGHINIOTIS, T. D. Fatigue evaluation of riveted railway bridges through global and local analysis. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 66, n. 11, p. 1411–1421, nov. 2010.
- NTSB. Structural and Local Failure Study of Gusset Plate in Minneapolis Bridge Collapse (final report NTSBC070010). Washington, 2008.
- TEIXEIRA, Ritermayer Monteiro. Metodologias para modelagem e análise da fadiga em ligações rebitadas com aplicação em pontes metálicas ferroviárias. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.