

Ricardo Fabeane
Engenheiro Civil – Mestrando do PPgEng/UPF
ricardo.fabeane@gmail.com

Ricardo A. Ficanha
Engenheiro Mecânico - Mestrando do PPgEng/UPF
ficanha.ricardo@gmail.com

Zacarias Martin Chamberlain Pravia
D. Sc., Professor titular PPgEng/FEAR/UPF
zacarias@upf.br

Verificação à fadiga de vigas de rolamento de pontes rolantes industriais

INTRODUÇÃO

Fadiga é um fenômeno no qual estruturas carregadas repetidamente fraturam a um nível e carregamento menor do que sua resistência estática última. Por exemplo, uma barra de aço pode resistir com sucesso a uma única aplicação estática de uma carga de tração de 300 kN, mas pode falhar após a aplicação de 1.000.000 de repetições de um carregamento de 200 kN (ANSYS, v.11, traduzido).

De acordo com o Design Guide 7 do AISC (traduzido), o dano por fadiga pode ser entendido como o avanço progressivo de uma fissura devido a variações na tensão de um membro. A fissura por fadiga inicia em pequenos defeitos ou imperfeições no metal base ou no metal de solda. Estas imperfeições atuam como amplificadores de tensão que aumentam as tensões elásticas aplicadas em pequenas regiões até tensões plásticas. A medida que os ciclos de carregamentos são aplicados, as deformações plásticas nas pequenas regiões plásticas avançam até que o material se separa e as fissuras aumentam. Nesse ponto, a região de tensões plásticas move-se para a nova ponta da fissura e o processo repete-se novamente. Eventualmente, o tamanho da fissura torna-se grande o suficiente que o efeito combinado do tamanho da fissura e o da tensão aplicada excede a resistência do material e a fratura final ocorre.

Embora os problemas de fadiga em muitos componentes ainda seja uma questão atual, as primeiras falhas por fadiga começaram a ser observadas e investigadas ainda no século XIX. Dentre todos os pesquisadores da época, o que chegou a resultados mais notáveis sobre o fenômeno de fadiga foi o engenheiro alemão August Wöhler.

SCHIJVE (2001) relata que foi Wöhler que reconheceu que uma única aplicação de carga com valor abaixo da resistência estática da estrutura não causava qualquer dano a estrutura; entretanto, se a mesma carga fosse repetida muitas vezes poderia levar a estrutura a falhar completamente.

De acordo com PRAVIA (2003), Wöhler projetou aparelhos e desenvolveu métodos para medições das cargas de serviço, no período de 1852 a 1869 em Berlim, em linhas ferroviárias, e as suas principais conclusões foram (Leis de Wöhler):

- a) A falha do material solicitado dinamicamente pode ocorrer bem abaixo da tensão de falha sob carregamento estático;
- b) A amplitude da tensão é decisiva para a destruição da força de coesão do material;
- c) A amplitude de tensão é o parâmetro mais importante para a determinação da falha, mas tendo a tensão de tração grande influência.

Ainda segundo PRAVIA (2003), foi Wöhler quem introduziu originalmente o conceito de limiar de fadiga em metais – tensão teórica abaixo da qual não ocorre falha por fadiga - e definiu o que viriam ser as curvas S-N (Variação da Tensão x Número de Ciclos) atualmente usadas nos cálculos de fadiga.

Pensava-se, ainda no século XIX, que a fadiga seria um “fenômeno misterioso” do material (porque os danos iniciais gerados não podiam ser vistos) e que as falhas ocorriam de maneira repentina, sem aviso prévio. No século XX, aprendeu-se que a aplicação de cargas repetidas pode iniciar um mecanismo de fadiga no material, principalmente pela nucleação de uma microfissura, propagação da microfissura e, finalmente, até a falha da estrutura (SCHIJVE, 2001).

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA FADIGA

É conhecido que são vários os fatores que têm influência direta no comportamento de fadiga de um determinado elemento ou componente.

Um ponto de fundamental importância em uma avaliação de fadiga relaciona-se à escolha adequada do método que será utilizado para tal. STEPHENS (2001) indica a existência de 4 modelos para as avaliações de fadiga em engenharia, sendo eles:

1. Modelo nominal de vida em função da tensão (stress-life, S-N), inicialmente formulado entre os anos de 1850 e 1870.
2. Modelo local de vida em função da deformação (strain-life, ϵ -N), inicialmente formulado nos anos de 1960.
3. Modelo de propagação de uma fissura de fadiga ($da/dN - \Delta K$), inicialmente formulado nos anos de 1960.
4. Modelo de dois estágios, que consiste na combinação dos modelos 2 e 3 para incorporar tanto a formação da trinca macroscópica de fadiga (nucleação) como sua propagação.

Tal autor ainda comenta que o modelo nominal S-N utiliza as tensões nominais na avaliação e às relaciona à resistência local à fadiga para elementos com ou sem cantos vivos (regiões de alta concentração de tensões). Já o modelo local ϵ -N trabalha diretamente com as deformações locais de uma região com alívio (chanfro ou entalhe). O modelo $da/dN - \Delta K$ de propagação da fenda de fadiga utiliza-se da mecânica da fratura e da integração da equação da taxa de propagação da fenda para determinar o número de ciclos necessário para propagar a fenda de um tamanho inicial para outro tamanho determinado ou até a fratura total. Por fim, o método dos dois estágios, conforme anteriormente citado, incorpora o modelo ϵ -N para determinar o tempo necessário para o aparecimento da microfissura, bem como faz uso da integração da equação de propagação da fenda de fadiga para determinar a vida restante do elemento; após a determinação destas “vidas úteis”, esses períodos são adicionados, resultando na vida total à fadiga do elemento considerado.

Na grande maioria dos casos, o método preferido na avaliação da vida útil à fadiga em vigas de rolamentos de pontes rolantes industriais (ou qualquer outro elemento submetido a carregamentos móveis) é o da vida útil em função da tensão (stress-life, S-N). Isto se deve, principalmente, pela sua facilidade de aplicação e pelo fato de ser o método indicado pela maioria das normas para cálculo de estruturas de aço.

AVALIAÇÃO

A FADIGA DE ACORDO COM AS NORMAS ABNT NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-10 E CSA S16-01

Verificação à fadiga pela ABNT NBR 8800:2008

a) Condições de aplicabilidade:

A ABNT NBR 8800:2008, em seu anexo K, traz as prescrições necessárias para avaliação à fadiga dos elementos. O item K.2.7 deixa claro que a aplicação de tais prescrições é apenas válido para estruturas com adequada resistência à corrosão atmosférica ou sujeitas apenas a atmosferas levemente corrosivas e em temperaturas abaixo de 150°C.

Tal norma, em seu item K.2.3, explicita que a faixa de variação de tensões é definida como a magnitude da mudança de tensão devida à aplicação ou remoção das ações variáveis calculada de acordo com a seguinte combinação (Item K.2.1):

$$F_{d,fad} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + 1,0 \cdot \sum_{j=1}^n F_{Qj,k}$$

O item K.2.3 também indica que no caso de inversão de sinal da tensão em um ponto qualquer, a faixa de variação de tensões deve ser determinada pela diferença algébrica dos valores máximo e mínimo da tensão considerada nesse ponto. O cálculo das tensões deve ser baseado em análise elástica e sem a amplificação pelos fatores de concentração de tensões (item K.3.1).

Além disto, o item K.2.2 deixa claro que as tensões calculadas no metal base não podem ultrapassar o valor máximo de 0,66fy para as tensões normais e 0,40fy para tensões cisalhantes.

b) Etapas para a verificação à fadiga:

A verificação dos elementos à fadiga de acordo com a ABNT NBR 8800:2008 é realizada basicamente com as seguintes etapas:

- Obtenção dos esforços solicitantes com a combinação de ações supracitada;
- Cálculo das tensões solicitantes;
- Definição da faixa de variação de tensões na seção analisada;

- Obtenção dos parâmetros de fadiga para a região analisada (parâmetros obtidos em consulta as tabelas K.1 e K.2 da norma);
- Definição da susceptibilidade à fadiga da região analisada, para uma vida útil pré-definida.

c) Isenção da verificação à fadiga:

Os itens K.2.5 e K.2.6 da norma definem as condições necessárias que dispensam a verificação dos elementos à fadiga. De forma resumida, não é necessário nenhuma verificação a fadiga caso:

- O número de ciclos de solicitação seja inferior a 20000;
- A faixa de variação de tensões esteja abaixo do valor de σ_{TH} dado pela Tabela K.1 da norma.

Verificação à fadiga pelo Design Guide 7 e pela norma ANSI/AISC 360-10

A verificação à fadiga pela norma americana ANSI/AISC 360-10 é feita pelo seu *Appendix 3 – Design for Fatigue*.

Consultando-se o referido apêndice da ANSI/AISC 360-10 percebe-se que a metodologia de verificação à fadiga é exatamente a mesma da utilizada pela norma brasileira, com apenas as seguintes diferenças:

Não há indicação direta de combinação para a verificação à fadiga no apêndice, embora durante o texto do mesmo seja sempre citado que as tensões são calculadas com as cargas de serviço (portanto sem ponderação).

O item 3.1 do apêndice fixa como sendo $0,66f_y$ a tensão máxima permitida, tanto para tração como para cisalhamento, para a aplicação de suas prescrições.

Comparando-se algumas equações do item 3.3 da norma ANSI/AISC 360-10 com o item K.4 da ABNT NBR 8800:2008 percebe-se que há alguns valores nas equações com uma pequena alteração. Entretanto, deve-se ressaltar que tais valores são de amplitude tão pequena que não afetam em nada os resultados obtidos aplicando-se uma ou outra equação.

Um ponto importante que o Design Guide 7 especifica relaciona-se ao fato de que a avaliação à fadiga das vigas de rolamento deve ser baseada em um número equivalente de ciclos de carregamento máximo da ponte rolante. Este número de ciclos é determinado em função da condição de serviço da ponte, seguindo-se a classificação da CMAA 70 (*Crane Manufacturers Association of America*). Tal classificação divide as condições de

trabalho das pontes rolantes em 6 Classes, apresentando simplificada as seguintes características (traduzido):

CLASSE A (Usos Esporádicos ou Serviços Infrequentes):

Esta classe de serviço engloba pontes rolantes que podem ser usadas em instalações onde seja necessário manuseios precisos de equipamentos a baixas velocidades com um grande período de inatividade entre os içamentos. Sua capacidade corresponde aos trabalhos iniciais de instalação de equipamentos e para manutenções infrequentes.

CLASSE B (Serviço Leve):

Esta classe de serviço engloba pontes rolantes onde os carregamentos solicitantes de serviço sejam pequenos e as velocidades de operação baixas. Os carregamentos variam de descarregada para ocasionalmente carregada na máxima capacidade, com a realização de 2 a 5 içamentos por hora, em um altura média de 3,0 metros por içamento;

CLASSE C (Serviço Moderado):

Esta classe engloba pontes onde as solicitações de serviço são moderadas. Neste tipo de serviço a ponte trabalha com uma solicitação de cerca de 50% de sua capacidade, com cerca de 5 a 10 içamentos por hora, a uma altura média de 4,5m, com no máximo 50% dos içamentos na capacidade máxima da ponte.

CLASSE D (Serviço Pesado):

Esta classe engloba pontes que são utilizadas onde são necessárias operações pesadas de produção. Neste tipo de serviço os carregamentos com cerca de 50% da capacidade são manuseados constantemente durante o período de serviço. Velocidades elevadas são desejáveis para estes tipos de serviços, que apresentam de 10 a 20 içamentos por hora, a uma altura média de 4,5m, com no máximo 65% dos içamentos na capacidade máxima.

CLASSE E (Serviço Severo):

Esta classe engloba as pontes capazes de manusear cargas próximas a sua capacidade máxima ao longo de sua vida útil. Suas aplicações incluem operações com 20 ou mais içamentos por hora, próximo ou na capacidade máxima da ponte.

CLASSE F (Serviço Severo Contínuo):

Esta classe engloba as pontes capazes de manusear carregamentos continuamente próximos ao de sua capacidade máxima em condições severas de utilização ao longo de toda sua vida de projeto.

Uma vez que seja definida a classe de serviço da ponte, obtém-se da tabela 12.1.1 do Design Guide 7 do AISC o número de ciclos de carregamentos completos para o qual a ponte deverá ser dimensionada. Tal tabela é reproduzida na sequência.

TABLE 12.1.1 CMAA 70 CLASSIFICATION V. DESIGN LIFE	
CMAA 70 Crane Classification	Design Life
A	20,000
B	50,000
C	100,000
D	500,000
E	1,500,000
F	>2,000,000

Tabela 1: Classificação vs. vida de projeto
(Fonte: Design Guide 7 – AISC)

Além da prévia definição do número de ciclos de solicitação para o dimensionamento das vigas de rolamento, são apresentadas no item 12 do mesmo Design Guide algumas considerações que visam evitar o aparecimento de patologias relacionadas à fadiga. Dentre estas informações, destacam-se:

Fissuras tem sido observadas em seções soldadas na ligação entre a alma e a mesa comprimida da viga de rolamento, quando usam-se filetes de solda para a conexão destes elementos. Tais fissuras são atribuídas a tensões localizadas de tração devido a uma pequena flexão da parte inferior da mesa comprimida a cada vez que a roda passa. Cada passagem de roda pode ocorrer 2 ou 4 (ou mais) vezes com cada passagem da ponte rolante; deste modo os ciclos de solicitação para esta consideração é muito maior do que aqueles considerados na verificação da viga de rolamento devido a passagem da ponte rolante carregada. O cálculo desta tensão de tração devido a flexão localizada é um tanto complexo e impreciso, então prefere-se contornar o problema através da adoção de medidas conservativas que evitem seu aparecimento. Para reduzir a probabilidade do aparecimento destas fissuras o AISE Technical Report N° 13 recomenda que a ligação entre a mesa superior e alma das vigas soldadas seja feita através do uso de soldas de penetração total com filetes de reforço.

Fissuras por fadiga também têm ocorrido na conexão entre os enrijecedores de extremidade e a mesa superior das vigas de rolamento. Tais fissuras têm aparecido em detalhes onde os enrijecedores estão ligados por soldas de filete à face inferior da mesa superior da viga. A passagem de cada roda da ponte rolante produz tensões de cisalhamento nos filetes de solda; entretanto, a determinação do real estado de tensões na solda é extremamente complexa. Deste modo, o AISE Technical Report N° 13 recomenda que soldas de penetração total também sejam usadas

para conectar os enrijecedores de extremidade à mesa superior da viga de rolamento. A parte inferior dos enrijecedores pode ser “encaixada” (preferível) ou soldada com filetes à mesa inferior da viga de rolamento. Além disto, todas as soldas entre os enrijecedores e a alma da viga devem ser contínuas.

Para os enrijecedores intermediários, pelas mesmas razões citadas no item anterior, o AISE Technical Report N° 13 também recomenda o uso de soldas de penetração total para a ligação entre os enrijecedores e a mesa superior da viga. Além disto, indica-se a necessidade de verificação à fadiga na terminação do enrijecedor próximo à mesa tracionada (pé do enrijecedor).

À anexagem de elementos (tais como suportes de cabos, etc.) a viga de rolamento deve ser evitada. O AISE Technical Report N° 13 explicitamente proíbe a soldagem destes anexos à mesa tracionada da viga de rolamento.

Verificação à fadiga pela norma CSA S16-01 e pelo Design Guide do CISC

O procedimento para a avaliação à fadiga dos elementos submetidos a carregamentos móveis é definido pelo capítulo 26 da norma CSA S16-01.

Tal norma tem como principais características o fato de utilizar apenas uma equação para a obtenção da faixa máxima de variação de tensões para o detalhe analisado, variando, portanto, os demais parâmetros para as diferentes categorias de detalhes.

A combinação utilizada na avaliação à fadiga é a combinação C1 da tabela 2.2 do Design Guide do CISC, sendo dada por:

$$C_1 = C_{vs} \cdot 0,5 \cdot C_{ss}$$

onde C_{vs} e C_{ss} correspondem, respectivamente, as cargas verticais e horizontais aplicadas pela ponte rolante nas vigas de rolamento. Conforme pode-se observar, essa combinação não considera o peso próprio e a carga permanente devido ao fato de tais ações estarem sempre presentes nas vigas de rolamento, o que faz com que não contribuam para a variação da tensão quando da passagem da ponte rolante.

Um ponto que merece destaque no Design Guide do CISC corresponde ao item 3.3.4, que apresenta o equacionamento para o cálculo do número equivalente de operações da ponte rolante totalmente carregada quando é conhecido previamente o espectro de solicitação de tal elemento. Com esta abordagem tem-se uma correlação mais próxima do nível real de solicitação das vigas de rolamento.

Outro ponto importante refere-se ao fato de que em seu item 26.3.3 a CSA S16-01 apresenta a metodologia do “dano acumulado de fadiga”, que permite uma avaliação mais precisa das condições de sollicitação das vigas para situações de projeto onde o número real de ciclos de operação já seja conhecido com antecedência. Tal método está baseado na regra de *Palmgren-Miner*, que nada mais é do que uma técnica utilizada para a avaliação do percentual de dano causado à viga de rolamento quando a ponte rolante opera com um determinado nível de sollicitação. O principal interesse na aplicação da metodologia do “dano acumulado de fadiga” está na avaliação da vida útil restante de vigas de rolamento existentes que já estejam operando a um determinado tempo ou que sofreram alterações em seu regime de trabalho.

Por outro lado, quando não se conhece previamente o espectro de sollicitação da ponte rolante, o Design Guide do CISC indica, em sua tabela 3.4, um número estimado de ciclos de sollicitação para as vigas de rolamento baseando-se na classe de serviço obtida para a ponte rolante de acordo com os critérios do CMAA 70 (classes definidos no item 3.2 do presente trabalho).

Structural Class of Service	Recommended ^a Number of Thousands of Full Load Cycles, N
SA	20
SB	40
SC	100
SD	400
SE	1000
SF	Greater than 2000 ^b

a Used as a calibration of the supporting structure (Structural Class of Service) to class of crane service in Chapter 4. As is the case for the crane, the supporting structure will withstand many more cycles of varying amplitude loading.
b Due to the unlimited fatigue life of crane, a duty cycle and analysis is required to define the fatigue design criteria.

Tabela 2: Número de ciclos para dimensionamento das vigas de rolamento.
Fonte: Design Guide do CISC

Analisando a tabela acima percebe-se que o número de ciclos de sollicitação das vigas de rolamento corresponde a 20% do número de ciclos de sollicitação da ponte rolante para as classes A, B e C, e 50% para as classes D, E e F.

Segundo o item 26.3.5 da norma CSA S16-01, ficam dispensados de verificação à fadiga os elementos que apresentarem um número de ciclos de sollicitação menor do que o maior dos valores entre 20000 e f^3 , sendo γ um parâmetro obtido da tabela 10 da referida norma e f_{sr} a tensão sollicitante no elemento.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Com o intuito de comparar de maneira prática os resultados da avaliação à fadiga pelas três normas citadas anteriormente, desenvolveu-se um exemplo prático de aplicação em vigas de rolamento soldadas, dimensionadas pela norma ABNT NBR 8800:2008 para resistirem as ações de uma ponte rolante de modelo ZKKE da empresa DEMAG, com 30tf de capacidade e que vence um vão transversal de 20m.

As vigas de rolamento calculadas apresentam as seguintes características:

- Perfil: Seção I soldada com uso de enrijecedores;
- Vinculação estrutural: biapojada;
- Vãos das vigas: 10m;
- Aço utilizado: A572Gr.50;
- Contenção lateral: com uso de treliça nivelada com a mesa superior do perfil, e com o uso de mãos francesas para a contenção longitudinal das vigas;
- Enrijecedores de extremidade estendendo-se ao longo de toda a altura do perfil;
- Enrijecedores intermediários da viga interrompidos a uma distância de “4tw” da face superior da mesa inferior do perfil;
- Limites de deformação: L/800 para deformação vertical e L/400 para deformação transversal;
- Ponte rolante comandada por controle remoto.

Ao final da realização do dimensionamento e verificação da deformação na viga, optou-se pela utilização de uma seção I soldada com 1300mm de altura, 300mm de mesa, e com as espessuras de 9,5mm para alma e 12,5mm para as mesas. Nesta viga ainda são colocados enrijecedores em chapa 9,5mm a cada 1000mm em seu comprimento longitudinal. Na Figura 1 é mostrado o desenho esquemático das vigas calculadas, enquanto que nas Figuras 2 e 3 são mostrados o trem-tipo com as reações verticais da ponte e a seção transversal escolhida para as vigas, respectivamente.

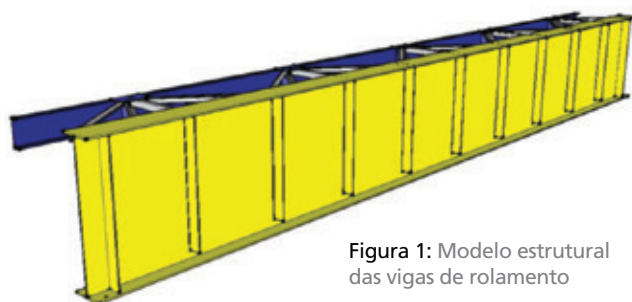


Figura 1: Modelo estrutural das vigas de rolamento

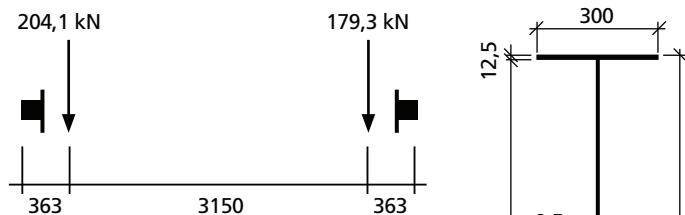


Figura 2: Modelo esquemático do trem tipo com as reações máximas da ponte rolante

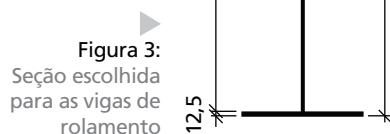


Figura 3: Seção escolhida para as vigas de rolamento

Após avaliações prévias, percebe-se que a seção crítica para a ocorrência do fenômeno de fadiga é na solda de filete utilizada no pé do enrijecedor localizado na metade do vão da viga de rolamento.

A realização da avaliação à fadiga para a viga será feita com base no número de ciclos indicador por cada norma utilizada. O exemplo aqui desenvolvido será baseado na seguinte condição de trabalho para a ponte rolante: *Ponte rolante em operação contínua com a realização da maior parte de seus içamentos próximo a sua capacidade máxima.*

Avaliação à fadiga pela ABNT NBR 8800:2008 (Anexo K)

Como a norma ABNT NBR 8800:2008 não traz referência quanto ao número de ciclos a ser utilizado para esta avaliação, estimou-se que este total será de aproximadamente 73 ciclos diários (cerca de um ciclo a cada 7 minutos, para uma jornada de trabalho de 8 horas), resultando em um número total de 1.335.000 ciclos de trabalho durante uma vida útil de 50 anos.

Sabendo-se que a combinação de projeto para a viga de rolamento é dada pelo item K.2.1 da norma e que o coeficiente de impacto vertical utilizado na amplificação das reações verticais da ponte rolante é de 10% (ponte operada por controle), obteve-se como momentos máximos os seguintes valores:

- Momento pela combinação do item K.2.1 = 788,51 kN.m;
- Momento pelo peso próprio e carga permanente na viga = 26,99 kN.m.

Como avaliação à fadiga é feita pela amplitude de variação de tensões, convém ressaltar que o momento solicitante de projeto é dado por:

$$M_{sd} = 78851 \text{ kN.cm} - 2699 \text{ kN.cm} = 76152 \text{ kN.cm.}$$

Sabendo-se que a maior inércia da seção escolhida vale 474906,8 cm⁴ e que o pé do enrijecedor está afastado do centroide da seção transversal a uma distância de $y = (d/2) - t_f - 4.t_w = (130 \text{ cm}/2) - 1,25 \text{ cm} - (4 \cdot 0,95 \text{ cm}) = -59,95 \text{ cm}$ tem-se que a tensão solicitante no pé do enrijecedor do meio da viga vale:

$$\frac{M_x}{I_x} \cdot y = \frac{76152 \text{ kN.cm}}{474906,8 \text{ cm}^3} \cdot (-59,95 \text{ cm}) = 96,1 \text{ MPa}$$

Verificando-se na tabela K.1 da norma, percebe-se que o caso em questão encaixa-se na descrição do item 5.7, apresentando as seguintes características:

- Categoria de tensão: C;
- Constante C_f : 44×10^8 ;
- Limite σ_{TH} : 69 Mpa.

Com estes dados, e utilizando-se a equação do item K.4.a, verifica-se que a faixa máxima de variação de tensão vale:

$$\sigma_{SR} = \left(\frac{327 \cdot C_f}{N} \right)^{0,333} = \left(\frac{327 \cdot 44 \times 10^8}{1335000} \right)^{0,333} = 102,5 \text{ MPa}$$

Como a tensão calculada está abaixo da faixa máxima de variação de tensão, conclui-se que a região analisada não apresentará problemas de fadiga durante sua vida de projeto.

Avaliação à fadiga pela ANSI/AISC 360-10 (Appendix 3) e Design Guide 7

Segundo o Design Guide 7 do AISC, o número de ciclos de solicitações a ser adotado para a condição de trabalho definida para a ponte rolante é de 1.500.000,0 ciclos (ver Tabela 1 acima para classificação "E").

Sabendo-se que a combinação de projeto para a viga de rolamento é dada por "D+C_{vs}+C_i", sendo C_{vs} as reações verticais e C_i a carga vertical adicionada pelo coeficiente de impacto (adotado como 25% para pontes operadas por controle), tem-se:

- Momento pela combinação = 886,70 kN.m;
- Momento pelo peso próprio da viga = 21,40 kN.m.

As tensões solicitantes e resistentes são calculadas por:

$$M_{sd} = 88670 \text{ kN.cm} - 2140 \text{ kN.cm} = 86530 \text{ kN.cm.}$$

$$\frac{M_x}{I_x} \cdot y = \frac{86530 \text{ kN.cm}}{474906,8 \text{ cm}^3} \cdot (-59,95 \text{ cm}) = 109,2 \text{ MPa}$$

Verificando-se na tabela A-3.1 do *Appendix 3* percebe-se que o caso em questão encaixa-se na descrição do item 5.7, apresentando as seguintes características:

- Categoria de tensão: B;
- Constante C_f : 120×10^8 ;
- Limite F_{TH} : 110 MPa.

Com estes dados, e utilizando-se a equação A-3-1M 1, verifica-se que a faixa máxima de variação de tensão vale:

$$F_{SR} = \left(\frac{329 \cdot C_f}{n_{SR}} \right)^{0,333} = \left(\frac{329 \cdot 120 \times 10^8}{1335000} \right)^{0,333} = 142,8 \text{ MPa}$$

Como a tensão calculada está acima da faixa máxima de variação de tensão, conclui-se que a região analisada está susceptível a ocorrência do problema de fadiga.

Avaliação à fadiga pela CSA S16-01 (Clause 26) e Design Guide do CISC

Segundo o Design Guide do CISC, o número de ciclos de solicitações a ser adotado para a condição de trabalho definida para a ponte rolante é de 1.000.000,0 ciclos (*ver Tabela 2*).

Sabendo-se que a combinação de projeto para a viga de rolamento é dada por “ C_{vs} ”, sendo C_{vs} as reações verticais (incluindo a amplificação pelo coeficiente de impacto de 25%), tem-se:

Momento pela combinação = 865,30 kN.m

$$\frac{M_x}{I_x} \cdot v = \frac{86530 \text{ kN.cm}}{474906,8 \text{ cm}^3} \cdot (59,95 \text{ cm}) = 109,2 \text{ MPa}$$

Verificando-se na tabela 9 da norma CSA S16-01, percebe-se que a região em questão é classificada como sendo da Categoria C1. Entrando-se com essa categoria na tabela 10 da referida norma, obtém-se os seguintes parâmetros de fadiga:

$$\gamma = 1440 \times 10^9$$

$$F_{srt}: 83 \text{ MPa}$$

Com estes dados e utilizando-se a equação apresentada pelo item 26.3.2 da norma, verifica-se que a resistência a fadiga vale:

$$F_{SR} = \left(\frac{\gamma}{nN} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{1440 \times 10^9}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}} = 112,90 \text{ MPa}$$

Como a solicitação de cálculo é maior que a resistência, conclui-se que a região analisada é susceptível à fadiga. O coeficiente de segurança calculado reforça a ideia.

$$CS = \frac{F_{SR}}{f_{SR}} = \frac{112,9 \text{ MPa}}{116,1 \text{ MPa}} \rightarrow CS = 0,97$$

Na Tabela 3 abaixo é apresentado de forma resumida os resultados obtidos.

	ABNT NBR 8800:2008	ANSI/AISC 360-10 e Design Guide	CSA S16-01 e Design Guide
Classificação da Condição de trabalho	–	E (CMAA)	E (CMAA)
Base para Verificação	Anexo K	Appendix 3	Clause 26
Número equivalente de ciclos de operação	1.335.00*	1.500.000	1.000.000
Impacto considerado	10%	25%	25%
Tensão na região crítica (solda)	96,1 MPa	109,2 MPa	109,2 MPa
Tensão admissível na região crítica	102,0 MPa	98,4 MPa	112,9 MPa
Resultado	Aprovada	Reprovada	Aprovada

* Valor estimado para vida útil

Tabela 3: Resumo das verificações à fadiga para as vigas de rolamento do exemplo

CONCLUSÕES

Avaliando-se as informações da revisão bibliográfica e os resultados obtidos com a realização do exemplo de cálculo pode-se enunciar as seguintes conclusões:

Aconselha-se que sejam seguidas as indicações do item 12.2 do Design Guide 7 do AISC, principalmente aquelas referentes a importância da execução de soldas de penetração total na ligação entre a alma e a mesa superior, e entre o enrijecedor e a mesa superior das vigas de rolamento, com o intuito de que sejam evitados problemas de fadiga que por muitas vezes não são contabilizados na fase de cálculo.

Avaliando-se os resultados obtidos, percebe-se que o valor adotado para o coeficiente de impacto vertical (escolhido em função do tipo de ponte rolante que irá atuar sobre as vigas de rolamento) exerce influência direta sobre as tensões atuantes nestas vigas, uma vez que sua aplicação é objetivada na amplificação dos momentos gerados pela passagem das cargas móveis.

Outro ponto de grande influência nos resultados obtidos para fadiga é o número de ciclos de trabalho adotado para as vigas de rolamento, conforme pode-se perceber pelos resultados obtidos nos cálculos.

Quando do cálculo de vigas de rolamento com a ABNT NBR 8800:2008, em que o número de ciclos de carregamentos não seja previamente conhecido, como a norma não apresenta nenhum valor de referência para tal parâmetro aconselha-se (a favor da segurança) que seja tomado como referência o número de ciclos indicados pela CMAA 70, em função da classe da ponte rolante.

CONTINUIDADE DO TRABALHO

Com o objetivo de enriquecer o conteúdo e complementar as informações apresentadas no presente trabalho, pretende-se realizar em estudos futuros as seguintes atividades:

- Verificação à fadiga das vigas de rolamento pela norma BS EN 1993-1-9:2005;
- Inclusão das considerações sobre os ensaios de fabricação necessários para as vigas de rolamento;
- Realização de análises numéricas para a avaliação do grau de influência da flexão localizada gerada pela passagem das rodas da ponte rolante indicada pelo item 12.2 do Design Guide 7 do AISC.

REFERÊNCIAS

1. ABNT NBR 8800:2008 – *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, 2008.
2. ANSI/AISC 360-10 – *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, Illinois, June 2010.
3. ANSYS, Inc. *Chapter 14: Fatigue*. Release 11, 2009.
4. Design Guide do CISC. *Guide for the Design of Crane-Supporting Steel Structures – Second Edition*. Niagara Falls, Ontario, August 2009.
5. Design Guide 7, *Steel Design Guide 7. Industrial Buildings: Roofs to Anchor Rods – Second Edition*. Milwaukee, Wisconsin, March 2005.
6. PRAVIA, Zacarias M. C. *Estabilidade de Estruturas de Pontes Metálicas com Fraturas*. Tese de Doutorado. UFRJ – COPPE. Fevereiro de 2003.
7. SCHIJVE, Jaap. *Fatigue of Structures and Materials*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001.
8. STEPHENS, R.I.; FATEMI, A.; STEPHENS, R.R.; FUCHS, H.O. *Metal Fatigue in Engineering – Second Edition*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
9. CSA S16-01 – *Limit States Design of Steel Structures*. Mississauga, Ontario, June 2003.

Conselho Editorial Técnico Científico: Eng. Luiz Carlos Caggiano Santos – Presidente da ABCEM e Alex Sander Clemente de Souza – D.Sc., UFScar, Carlos Eduardo Javaroni – D.Sc., UNESP e Zacarias M. Chamberlain Pravia – D.Sc., UPF

Associe-se à ABCCEM

Mão de Obra

Desenvolvimento e Qualificação:
Cursos, Workshops,
Seminários e Palestras

Mercado

Promoção e Disseminação
da Construção Metálica

Visibilidade

Eventos, Feiras e Solenidades

Novas Tecnologias

Comitês Técnicos
Programas de Qualidade

Divulgação

site ABCCEM +
Revista Construção Metálica

Espaço ABCCEM

Utilização do Auditório e
Salas de Reunião para palestras,
cursos e treinamentos

Informações:
www.abcem.org.br



ABCCEM
Associação Brasileira da
Construção Metálica