

Estudo do Efeito da Fadiga e Recomendações para o Projeto de Pontes Rodoviárias em Estrutura Metálica

Carlos Henrique Leal Viana¹

¹PCA Engenharia Ltda. /carloshenriquelv@hotmail.com

Resumo

A fadiga de um material define-se como a diminuição de sua resistência mecânica em consequência de esforços repetitivos em grande número. A perda de resistência ocorre devido ao aparecimento de fissuras, em determinados pontos de concentração de tensões, que devido à ação de cargas de ciclos de carga e descarga podem atingir uma certa dimensão e provocar a ruptura da estrutura em tensões inferiores à obtidas em ensaios elásticos. As uniões por solda provocam alteração na estrutura cristalina do aço junto à solda principalmente em estruturas de pontes metálicas, estruturas de pontes rolantes e de máquinas, que são sujeitas frequentemente a condições de fadiga. Diante disso, a norma brasileira NBR 8800:2008 e as normas americanas AASTHO-LRFD:2012 e AWS D1.1/D1.1M:2015 apresentam recomendações de projeto, detalhes construtivos, requisitos de fabricação e montagem, bem como parâmetros para dimensionamento e verificação de elementos estruturais de aço e ligações metálicas sujeitos a ações com grande número de ciclos. Embasado na revisão bibliográfica e nas prescrições normativas, propõe-se um estudo do efeito da fadiga na estrutura metálica de pontes rodoviárias, bem como apresentar recomendações de projeto. A partir desse estudo, evidencia-se a importância da consideração do efeito da fadiga para a durabilidade da estrutura e manutenção do nível de segurança previstos nas normas.

Palavras-chave

Pontes rodoviárias; fadiga; estrutura metálica.

Introdução

Até o final do século XVIII, as pontes eram construídas em estruturas de madeira ou de pedra, sendo que esta última em forma de arcos sujeitos exclusivamente a esforços de compressão. Assim, diante do então cenário da aplicação destes materiais na construção de pontes e do advento da Revolução Industrial, houve grandes avanços científicos que permitiram a utilização em massa de novas tecnologias com a construção de fábricas e a utilização do aço como matéria-prima para diversas aplicações.

Com a Revolução Industrial, o aço estrutural passou a ser utilizado nas construções, sobretudo na de pontes em treliças metálicas e pontes suspensas. A partir daí, houve um vasto desenvolvimento no que diz respeito ao estudo das propriedades físicas, químicas e mecânicas para a evolução do aço estrutural para aplicação em grandes estruturas, desde edifícios a pontes rodoviárias e ferroviárias.

Por volta de 1840 começou o período de transição entre pontes de madeira e de ferro, que durou aproximadamente 40 anos, começando e terminando em uma geração. (PINHO; BELLEI, 2007).

Pinho e Bellei (2007) mencionam que a primeira ponte a usar ferro fundido foi construída pelo exército alemão sobre o rio Oder na Prússia, em 1734. Ainda, a primeira

ponte toda em ferro fundido foi a ponte sobre o rio Severn construída em 1779, na Inglaterra, para um vão de 31m, com 15m de largura e comprimento de 59m.

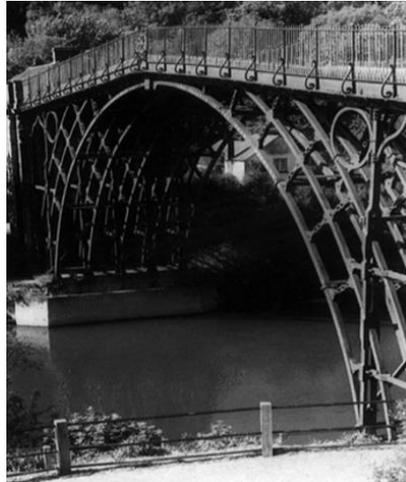


Figura 1 – Ponte Severn.
Fonte: PINHO E BELLEI (2007)

A primeira treliça completamente em aço, foi feita nos Estados Unidos em 1840; este mesmo tipo de construção foi usado em pontes na Inglaterra em 1845, na Alemanha em 1853 e na Rússia em 1857. (PINHO; BELLEI, 2007)

No Brasil, as primeiras pontes rodoviárias em treliça totalmente em aço foram construídas entre 1850 e 1880. Exemplos são a ponte Boa Vista em Recife, de 1850, e a ponte de Sant' Ana sobre o rio Piabanha com um vão de 46m na Estrada União Indústria (antiga Petrópolis – Juiz de Fora) construída em 1860.



Figura 2 – Ponte de Sant' Ana
Fonte: PINHO E BELLEI (2007)

Fadiga

As pontes de aço normalmente estão sujeitas a carregamentos cíclicos de amplitude variável que, posteriormente, podem provocar concentrações locais de tensões devido a defeitos como trincas e porosidades, bem como defeitos de soldagem de peças e no processo de fabricação das mesmas, e conseqüentemente o processo de fadiga.

A resistência à ruptura dos materiais é, em geral, medida em ensaios estáticos. Quando as peças metálicas trabalham sob efeito de esforços repetidos em grande número, pode haver ruptura em tensões inferiores às obtidas em ensaios estáticos. Esse efeito denomina-se fadiga do material. (PFEIL; PFEIL, 2009)

Em virtude do aumento significativo do peso bruto total dos veículos e do volume de tráfego nas rodovias, atualmente, as estruturas de pontes rodoviárias tornam-se sujeitas a diversos fenômenos de degradação. Com o passar do tempo, estes fenômenos manifestam-se através do aparecimento de indícios físicos, como a fissuração. A fadiga é um desses fenômenos de degradação progressiva, fenômeno este induzido por consideráveis variações de tensão a que a estrutura de uma ponte está sujeita com a ação do tráfego rodoviário. (ALENCAR, 2015)

Segundo Afonso (2007), qualquer tensão que varie no tempo pode potencialmente provocar falha por fadiga e que as características destas tensões variam substancialmente de acordo com a aplicação enfocada. Afonso (2007) também divide as tensões variáveis no tempo em dois grupos: o das tensões de amplitude constante e o das tensões de amplitude variável. As tensões de amplitude constante têm, normalmente, natureza determinística e estão relacionadas com máquinas rotativas.

As tensões de amplitude variável estão normalmente associadas, entre outros casos, com o tráfego de veículos, com o vento agindo nas asas de aviões, com as ondas agindo em plataformas marítimas. Estas tensões geralmente têm uma frequência de atuação variável, o que faz com que elas tenham, na maioria das vezes, uma natureza aleatória, que será mais ou menos intensa de acordo com as características da carga. (AFONSO, 2007)

As tensões associadas ao tráfego de veículos têm amplitude e frequências variáveis, sendo assim de natureza aleatória.

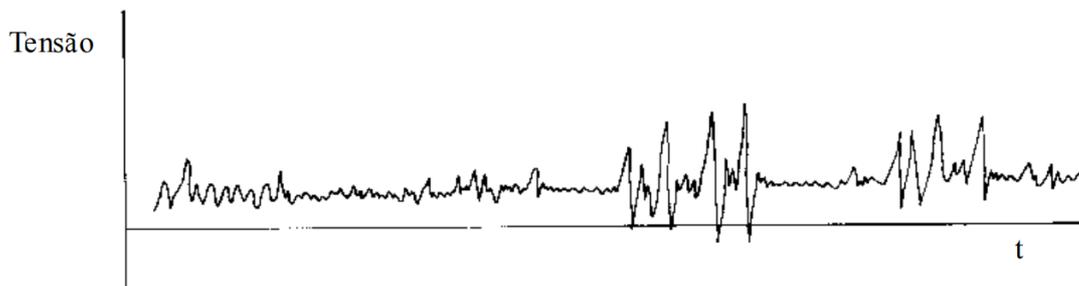


Figura 3 – Tensão com amplitude e frequência variável de natureza semi-aleatória.

Fonte: NORTON (1998)

Os regimes de fadiga podem ser divididos com base no número de ciclos de tensão que são aplicados numa peça durante seu tempo de serviço, assim sendo: de alto ciclo ou de baixo ciclo.

A fadiga de alto ciclo está ligada a baixas tensões, deformações elásticas e um grande número de ciclos até a ruptura da peça. Em contrapartida, a fadiga de baixo ciclo está associada com tensões altas, deformação plástica e pequeno número de ciclos até a ruptura da peça.

Curvas S-N

O engenheiro alemão August Wöhler desenvolveu pesquisas para estudar o comportamento do aço, sobretudo no que tange a teorias sobre a fadiga.

Marques (2006) conta que Wöhler definiu as curvas de resistência à fadiga dos metais (curvas S-N), que se impuseram como parte integrante de uma das grandes vertentes do estudo da fadiga em estruturas metálicas, que ainda hoje se mantém.

Estas curvas permitiam determinar o número de ciclos necessários para um elemento metálico romper, quando sujeito a uma variação de tensão constante, relacionando a magnitude de tensão (S) por número de ciclos (N) em escala logarítmica.

O resultado de maior importância prática que se obtém de uma curva S-N é o limite de fadiga do material, que é definido como a máxima tensão alternante que este suporta sem apresentar falha, independente do número de ciclos de carga. Para a maioria dos aços têm-se um limite de fadiga definido, que normalmente é encontrado na faixa entre 10^6 e 10^7 ciclos. (NORTON, 1998)

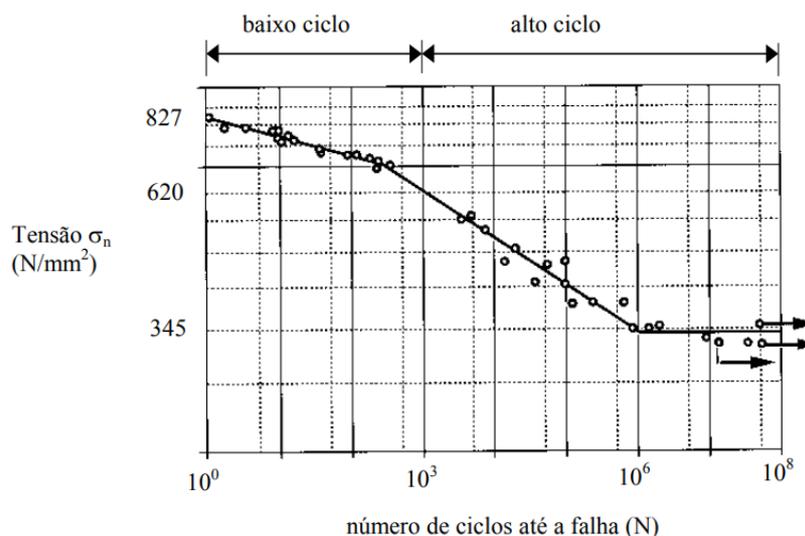


Figura 4 – Curva S-N correspondente a um ensaio tipo *push-pull* para o aço AISI 4130.

Fonte: NORTON (1998)

Norma brasileira NBR 8800:2008

A resistência à fadiga das peças é fortemente diminuída nos pontos de concentração de tensões, provocadas, por exemplo, por variações bruscas na forma da seção, indentações devidas à corrosão etc. (PFEIL; PFEIL, 2009)

Outro fato relevante são as uniões por solda provocam modificação na estrutura cristalina do aço junto à solda, bem como concentrações de tensões, com a consequente redução da resistência à fadiga nesses pontos

A NBR 8800:2008 em seu Anexo K abrange prescrições para elementos estruturais de aço e ligações metálicas sujeitos a ações com grande número de ciclos, com variação de

tensões no regime elástico cuja frequência e magnitude são suficientes para iniciar fissuras e colapso progressivo por fadiga.

Para efeitos de cálculo segundo a Norma, recomenda-se o uso da combinação frequente de fadiga, considerando-se o valor característico das ações permanentes e o valor característico das ações variáveis, sendo que o fator de redução para as ações variáveis deve ser igual a 1,0; ou seja me minoração dessas ações.

No que diz respeito à verificação de resistência à fadiga, a NBR 8800:2008 diz que tal análise não é necessária se a faixa de variação de tensões for inferior ao limite σ_{TH} dado na Tabela K.1 da mesma, que trata de parâmetros de fadiga. Também essa verificação não se faz necessária se o número de ciclos de aplicação das ações variáveis for menor que 20.000.

A norma brasileira chama a atenção para a resistência a ações cíclicas determinada pelos requisitos da mesma é aplicável apenas a estruturas com proteção adequada à corrosão ou sujeitas apenas a atmosferas levemente corrosivas e sujeitas a temperaturas inferiores a 150°C. Daí, tem-se a necessidade de diversos cuidados com as peças, principalmente no que tange ao tratamento contra intempéries.

Para elementos como parafusos e barras redondas rosqueadas sujeitos à tração, as tensões calculadas devem incluir o efeito de alavanca, se existir. Além disso, as tensões de tração à fadiga nos parafusos não devem exceder os seguintes valores, de acordo com o número de ciclos. Assim, Pinho e Bellei (2007) apresentam a seguinte tabela:

Tabela 1 – Tensões de tração de fadiga em parafusos A325 e A490.

| Número de ciclos | A325 (kN/cm ²) | A490 (kN/cm ²) |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| ≤ 20.000 | 26,5 | 33,0 |
| > 20.000 e ≤ 500.000 | 24,5 | 30,5 |
| >500.000 | 19,0 | 23,5 |

No projeto da ligação das barras da treliça (nós), os eixos das barras devem ser concorrentes a um ponto; caso contrário, resulta, no nó, um momento que se distribui entre as barras. Para facilitar a execução no caso de ligações parafusadas de cantoneiras, é usual detalhar a ligação com as linhas de parafusos (e não os eixos das barras) se encontrando em um ponto. Nesses casos, se as barras não estiverem sujeitas à fadiga, a NBR 8800:2008 permite desprezar o momento resultante no nó, oriundo da excentricidade entre os pontos de concorrência das linhas de eixo das barras, que deveria ser distribuído entre as barras. (PFEIL; PFEIL, 2009)

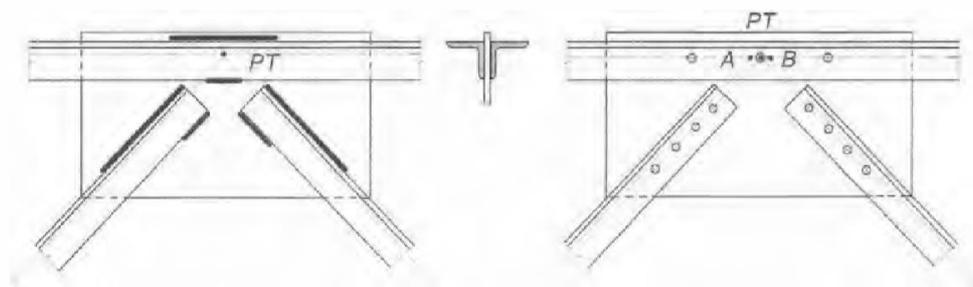


Figura 4 – Ligações no nó de treliça com chapa gusset.

Fonte: PFEIL E PFEIL (2009)



Nas treliças soldadas, ou os nós podem ter *gussets* ou as hastes podem ser ligadas entre si diretamente, sem chapa auxiliar. Modernamente, a construção soldada é mais econômica. A tendência atual, em treliças pequenas, é de fazer as ligações de fábrica com solda e as de campo com parafusos (para evitar o risco de soldas defeituosas no campo). Nas treliças de grande porte, utilizadas em pontes, os nós são feitos, em geral, com parafusos de alta resistência para evitar concentrações de tensões decorrentes de soldas que reduzem a resistência à fadiga. (PFEIL; PFEIL, 2009)

Norma americana AASTHO-LRFD:2012

A norma americana AASTHO-LRFD:2012 da *American Association of State Highway and Transportation Officials* abrange as especificações destinadas ao projeto, avaliação e reabilitação de pontes rodoviárias fixas e móveis nos Estados Unidos.

O estado limite da fratura deve ser tomado como um conjunto de requisitos de resistência do material das especificações dos materiais da AASHTO. Tal estado destina-se a limitar o crescimento da fissura sob cargas repetitivas para evitar fraturas durante a vida de projeto da ponte.

O efeito de força considerado para o projeto de um detalhe da ponte de aço deve ser a faixa de tensão de carga. Para os membros de flexão com conectores de cisalhamento distribuídos ao longo de todo o seu comprimento, as tensões de carga e as faixas de tensão para o projeto de fadiga podem ser calculadas usando a seção compósita de curto prazo assumindo que o convés de concreto seja eficaz tanto para a flexão positiva como negativa. Logo, a norma ressalta que tensões residuais não devem ser consideradas na investigação da fadiga.

A AASTHO-LRFD:2012 apresenta um quadro com as categorias de detalhes e os valores de limites de tensão a serem observados para cada tipo de situação de detalhamento de projeto.

Ao apresentar os detalhes de peças e recomendações de sondagem, a norma americana chama atenção para a forma de fratura quebradiça denominada "fratura induzida por restrições" e que pode ocorrer sem qualquer crescimento de fissuras de fadiga perceptível e, mais importante, sem aviso prévio.

Diante disso, atenta-se a elementos soldados em paralelos à tensão principal que são interrompidos quando se cruzam com um membro transversal completo. Esses elementos são menos suscetíveis à fratura e à fadiga se o elemento em paralelo à tensão principal for contínuo e a conexão transversal é descontínua como mostrado na figura a seguir. Também é mostrado o espaço entre a solda do reforço transversal e a solda do reforço longitudinal necessária para reduzir possíveis pontos de concentração de tensão.

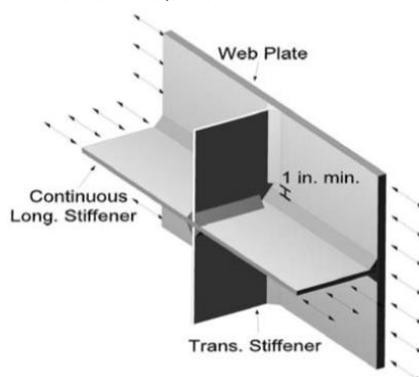


Figura 5 – Detalhe de solda
Fonte: AASTHO-LRFD (2012)

Outro destaque da norma em questão se diz respeito aos conectores de cisalhamento que fazem a interação aço-concreto de uma ponte com tabuleiro de concreto armado apoiado sobre vigas e longarinas metálicas, cujo efeito da fadiga está diretamente ligado ao dimensionamento destes elementos estruturais de ligação.

Norma americana AWS D1.1/D1.1M:2015

A norma americana AWS D1.1/D1.1M:2015 da *American Welding Society* traz importantes recomendações para fabricação e montagem de estruturas de aço soldadas. Tal norma é considerada de grande referência na Engenharia que se torna modelo para outras normas internacionais, dentre elas a norma brasileira NBR 8800:2008.

Diante disso, pode-se destacar os parâmetros de fadiga que determinam a necessidade de verificação de resistência se a faixa de variação de tensões for inferior aos limites normativos.

No que tange à aplicabilidade da Norma para o projeto de ligações soldadas, a verificação para a resistência à fadiga não é normalmente necessária para a construção de estruturas; no entanto, os casos que envolvem carga cíclica que podem provocar a iniciação de fendas e a propagação de fissuras por fadiga são de suma importância, como por exemplo:

- a) Elementos que suportam equipamentos de elevação;
- b) Elementos que suportam cargas de tráfego contínuo;
- c) Elementos sujeitos a vibração harmônica induzida pelo vento;
- d) Suporte para máquinas.

Em face disso, a Norma menciona um exemplo em que se a faixa de tensão no metal-base conectado de um detalhe soldado relativamente sensível devido a ciclos de aplicação e remoção de carga é 210 MPa, a vida prevista para a ruptura na fadiga é de 36.000 ciclos (4 aplicações por dia durante 25 anos). Para o mesmo detalhe, se o alcance da tensão for inferior a 32 MPa, espera-se uma “vida infinita”. Portanto, se os ciclos de aplicação da carga total forem inferiores a alguns milhares de ciclos ou o alcance da tensão resultante for inferior ao limite de tensão, a fadiga não precisa ser verificada.

Conclusões

Com o estudo apresentado, pôde-se apresentar alguns dos critérios importantes para o projeto de elementos estruturais em aço, bem como ligações, de pontes rodoviárias metálicas, apontados tanto nas normas americanas quanto na norma brasileira. Pôde-se perceber que a norma brasileira tem grandes influências destas normas, não só no que se refere aos conceitos e abordagens técnicas para o projeto, mas também a especificações e detalhes construtivos. A abordagem da fadiga nas normas é considerada bastante relevante para o projeto estrutural e que as prescrições apresentadas estão alinhadas com a realidade de projeto e de execução. Destaca-se que as grandes variações de tensões oriundas de aços repetidas podem provocar a danificação do material, de tal forma que a estrutura venha a necessitar desde pequenas intervenções até mesmo o comprometimento estrutural no que diz respeito à segurança. Portanto, o efeito da fadiga é de suma importância para o projeto de estruturas metálicas, sobretudo de pontes. Desta maneira, conclui-se que o tal efeito deve ser sempre levado em consideração para fins de dimensionamento e verificação. Pois, ao se investigar a fadiga na fase de projeto estrutural vislumbra-se buscar as melhores alternativas para o dimensionamento, montagem e detalhes de execução, para então minimizar possíveis efeitos que venham a prejudicar a durabilidade e a segurança da estrutura.

Referências

- AFONSO, D. F. Verificação à fadiga de pontes metálicas ferroviárias. 2007. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- ALENCAR, G. S. Análise dinâmica e verificação à fadiga de obras de arte rodoviárias mistas (aço-concreto) submetidas ao tráfego de veículos sobre o pavimento irregular. 2015. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO-LRFD: Bridge Design Specifications. Washington, 2012. 1661 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 2 ed. Rio de Janeiro, 2008. 237 p.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code - Steel. 23 ed. Miami, 2015. 646 p.
- MARQUES, F. M. S. Avaliação do comportamento estrutural e análise de fadiga em pontes metálicas ferroviárias. 2006. 270 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2006.
- NORTON, R. L. Machine design. New Jersey: Prentice-Hall, 1048p, 1998.
- PFEIL, W. C.; PFEIL, M. S. Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 357 p.
- PINHO, F. O.; BELLEI, I. H. Manual de construção em aço: Pontes e viadutos em vigas mistas. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2007. 138 p.