

# Determinação da frequência de carregamento para ensaios de fadiga de componentes estruturais

Jose Gabriel Vicente\*, Rynaldo Zanotele Hemerly de Almeida e Luiz Eduardo Lopes

Laboratório de Equipamentos  
Mecânicos e Estruturas,  
Instituto de Pesquisas  
Tecnológicas do Estado de São  
Paulo S.A. São Paulo-SP, Brasil.

\* E-mail: gvicente@ipt.br

## Resumo

A fim de diminuir o tempo de execução de ensaios de fadiga de alto ciclo de componentes estruturais, procura-se aumentar suas frequências de carregamento. Entretanto, um aumento indiscriminado pode distorcer os resultados experimentais. Neste trabalho são apresentados diversos fatores que limitam o aumento da frequência de carregamento bem como dois casos de estudo que ilustram alguns desses fatores.

Palavras-chave:

fadiga, frequência, teste,  
ensaio, estrutura

## 1. Introdução

Durante suas vidas úteis, os componentes de uma estrutura ficam comumente sujeitos a carregamentos cíclicos característicos de suas aplicações. Seja por vibração originada de um rotor, seja pela operação do equipamento (ciclos de pressurização/despressurização, de elevação etc.), seja por perturbações externas como rajadas de vento, a existência dos carregamentos cíclicos torna essencial o dimensionamento desses componentes estruturais em função de suas esperadas vidas em fadiga.

Apesar de diversos materiais já terem sido caracterizados quanto a suas vidas em fadiga, as geometrias, processos de fabricação e processos de montagem especificamente utilizados para a manufatura do componente estrutural muitas vezes dificultam a extrapolação dos dados de vida em fadiga dos materiais para os componentes estruturais. Assim, é apropriado que sejam executados ensaios de fadiga diretamente sobre esses componentes.

Com interesse em se avaliar a vida em fadiga de alto ciclo (da ordem de milhões de ciclos), podem ser necessárias algumas semanas para execução de ensaios de um número representativo de amostras. Portanto, é de grande interesse que a frequência do carregamento cíclico utilizado nos ensaios seja elevada ao máximo possível para redução do tempo total de ensaio. Com o objetivo de auxiliar a determinação de uma frequência adequada, este trabalho descreve fatores que limitam a frequência de carregamento e apresenta dois casos reais que ilustram a determinação dessa frequência: barras de aço com uniões mecânicas e chapas de liga de alumínio unidas por rebites.

### Fatores limitantes da frequência de carregamento

Existem algumas possibilidades diferentes para se executar ensaios de fadiga. Para a análise exclusiva de propriedades do material, podem ser utilizadas basicamente máquinas com atuadores lineares, em que o corpo de prova é tracionado/comprimido ou fletido ciclicamente, ou com sistemas rotativos, em que o carregamento cíclico decorre da rotação do corpo de prova. Para análise de fadiga de componentes estruturais, as possibilidades de ensaio são mais abertas, uma vez que é possível ensaiar desde o componente estrutural isoladamente até a estrutura completa, adicionando-se atuadores e aplicando-se esforços de forma mais complexa. Neste trabalho, é dado foco aos ensaios de componentes isolados, utilizando-se máquina com um único atuador linear servo-hidráulico. Não obstante, diversos dos limites listados a seguir também são válidos para outras abordagens de ensaio.

Os fatores que limitam o aumento da frequência de carregamento podem ser classificados entre limites decorrentes de: materiais do componente, características construtivas do componente e características da máquina de ensaio.

Em relação ao material do componente, uma primeira restrição se trata da temperatura máxima de ensaio. O atrito interno do material e o atrito entre peças do componente geram calor, que aumenta

com o incremento da frequência de carregamento, e podem fazer com que a temperatura do componente se eleve a ponto de degradar suas propriedades mecânicas. Muitas vezes a temperatura máxima é definida em norma, como, por exemplo, 40 °C na ISO 15630 ou 65 °C na MIL-1312-21. Se o material for sensível à deterioração em função do ambiente, a temperatura de ensaio normalmente acelera o processo de deterioração, como, por exemplo, a corrosão associada à fadiga. Neste caso, a frequência de ensaio passa a ser um dos parâmetros essenciais a serem definidos, registrados e publicados em conjunto dos resultados obtidos.

Outra restrição advinda de características do material do componente se trata da validade da hipótese de material linear elástico. Normalmente, as estruturas são projetadas para serem solicitadas no regime linear elástico de seus materiais, em uma condição quase-estática (obtendo-se relação unívoca entre carga aplicada e deslocamento). Porém, o aumento da taxa de deformação do material, decorrente do aumento da frequência de carregamento, pode atingir níveis em que o material responde de modo visco-elástico, o que tende a reduzir o deslocamento obtido para um mesmo nível de carga aplicada e aumentar a resistência à fadiga (FUJCZAK, 1984; PAPAKYRIACOU et al., 2001).

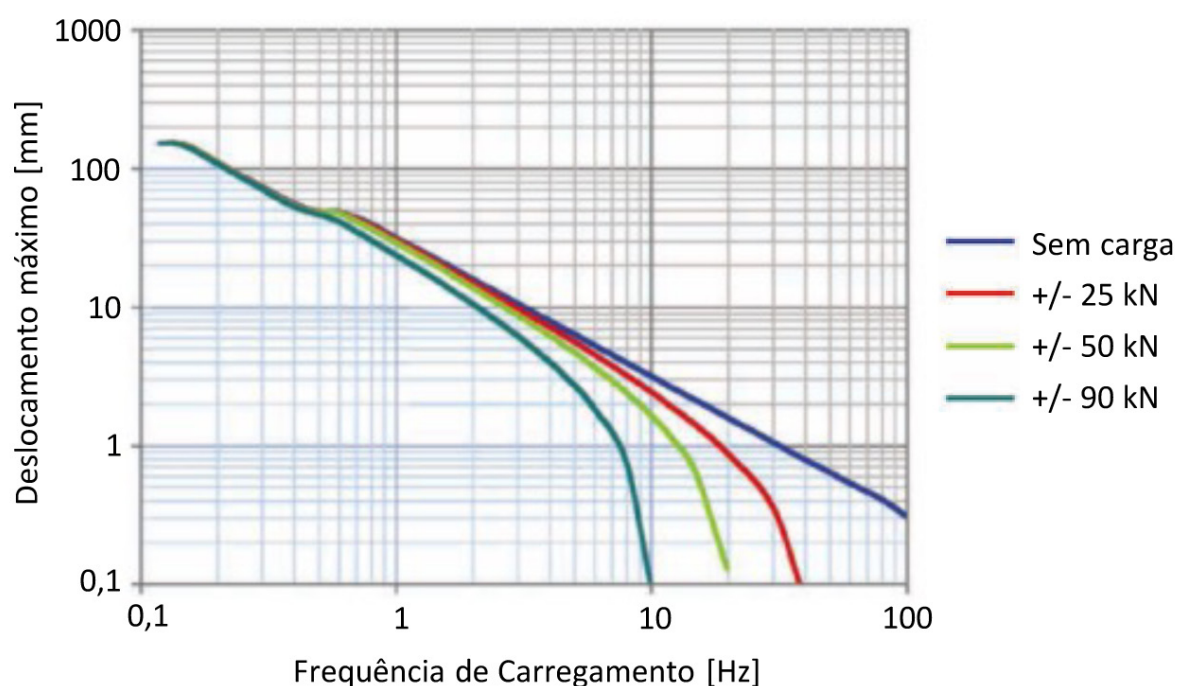


Figura 1 – Resposta em frequência de máquina de ensaio de 100 kN (MTS, 2015).

Quanto às características construtivas, deve-se evitar, de modo geral, a aplicação de carregamento em frequências próximas às frequências de ressonância do componente. Caso contrário, ocorrerá vibração e as tensões e deformações fugirão da condição de equilíbrio quase-estático. Além disso, caso haja folgas no componente estrutural, é apropriado que o ciclo de carregamento permaneça exclusivamente em tração ou exclusivamente em compressão, para evitar tensões originadas em impactos (desde que seja mantida a representatividade de solicitação mecânica conforme a aplicação real).

Por fim, as principais características da máquina de ensaio que limitam a frequência de carregamento são sua resposta em frequência e a qualidade de seu controlador. A resposta em frequência se trata da capacidade da máquina em executar um ciclo de deslocamento de seu êmbolo sob a carga e a velocidade correspondentes ao nível e à frequência de carregamento desejados. Esse desempenho da máquina está limitado às vazões máximas de óleo hidráulico na bomba de óleo e, principalmente, nas servo-válvulas da máquina de ensaio. A Figura 1 mostra a resposta em frequência da máquina utilizada neste trabalho.

Observa-se que há diminuição do deslocamento possível de ser realizado tanto com o aumento da frequência quanto da carga aplicada. Assim, quanto menos rígido for o componente estrutural, maiores serão os deslocamentos necessários e mais restrito será o aumento da frequência de ensaio.

Quanto à qualidade do controlador, é desejado que o controle resulte em um carregamento que se aproxime de uma onda senoidal pura, para que o ensaio seja repetitivo e de análise direta em relação à vida em fadiga. Normalmente são utilizados controladores do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) ou variantes desse, que são relativamente simples e eficazes. Os ganhos do controlador (parâmetros internos que definem seu comportamento) devem ser configurados para cada caso e podem ser determinados manualmente ou automaticamente com auxílio de rotinas de *auto-tuning* disponíveis nos controladores das máquinas de ensaios. Nessas rotinas, a máquina realiza uma varredura em frequência aplicando, sobre a amostra, cargas definidas pelo operador. Em função da resposta de deslocamento medida pela máquina, o controlador sugere valores a serem utilizados como ganhos de forma a se obter uma resposta rápida, que permite aumento da frequência de ensaio, e de qualidade, que evita a flutuação do carregamento em torno do valor desejado.

## 2. Procedimento metodológico

A seguir, são apresentadas características dos componentes estruturais de estudo, barras de aço com uniões mecânicas e chapas de liga de alumínio unidas por rebites, e procedimentos de ensaio que foram realizados de forma a evidenciar alguns dos limites listados na seção anterior.

### Descrição dos componentes estruturais analisados

As uniões mecânicas de barras de aço (tipo vergalhão) são constituídas de dois segmentos de barra unidos por uma luva, em que uma das extremidades da luva é fixada de forma prensada e a outra roscada, como ilustra a Figura 2.

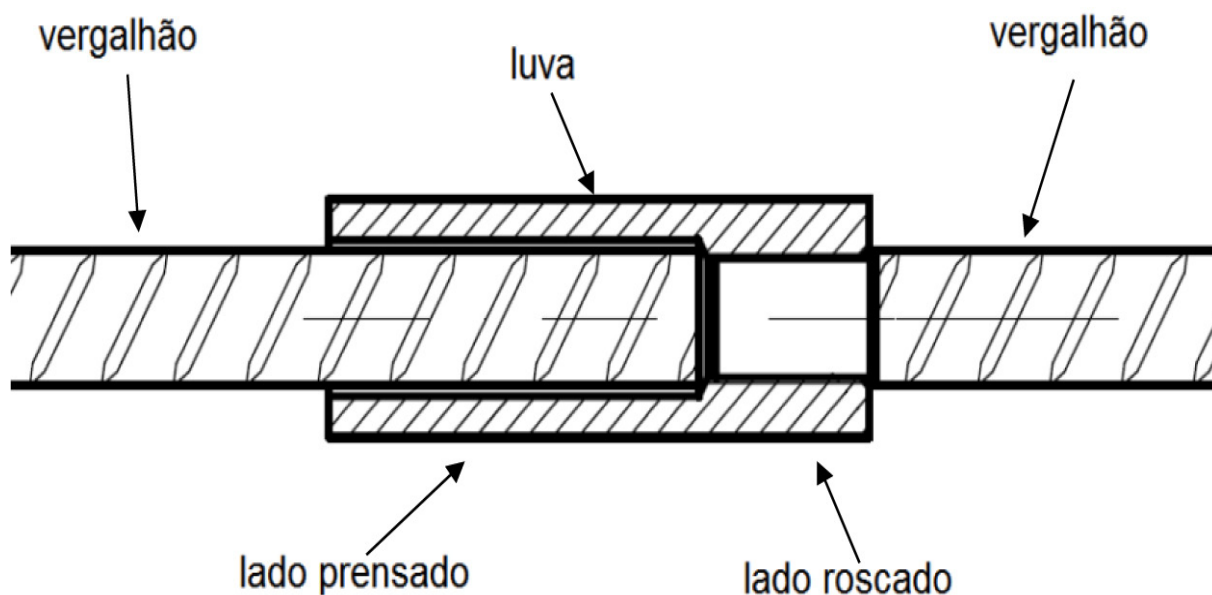


Figura 2 – Barras de aço com uniões mecânicas (prensada e roscada).

Já a união do componente estrutural de chapas de alumínio foi realizada com rebites, utilizando-se uma configuração de topo assimétrica, em que é utilizada chapa de união em apenas um dos lados da junta, conforme ilustra a Figura 3. Tanto as chapas quanto a chapa de união foram fabricadas na liga AA2524 T3 e unidas com rebites Briles® 5/32".

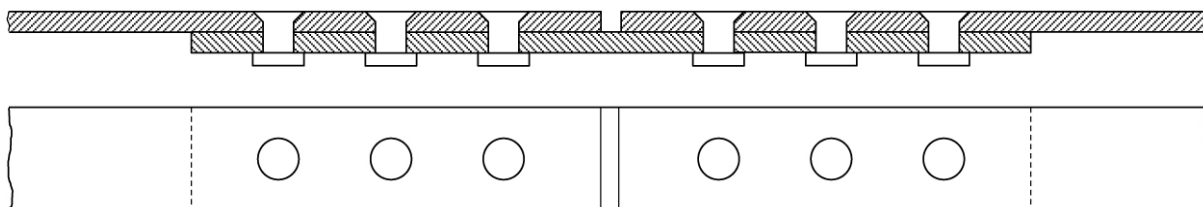


Figura 3 – Chapas de alumínio com uniões mecânicas.

## Procedimentos de ensaio

Foi utilizada uma máquina com atuador servo-hidráulico linear de 100 kN de capacidade de carga, dotada de uma célula de carga de 100 kN, um transdutor LVDT para medição do deslocamento do êmbolo, uma servo-válvula de vazão máxima de 5 gpm (0,315 L/min) e um controlador próprio para execução de ensaios de fadiga.

Primeiramente, para cada componente estrutural, foi realizado o procedimento de *auto-tuning* para

que a máquina ajustasse, de forma automática, os ganhos de seu controlador PID. Em seguida, foram aplicados carregamentos cíclicos com frequências na faixa de 5 Hz a 30 Hz. A Tabela 1 lista os parâmetros de carga máxima, carga mínima, frequências de carregamento empregadas tanto na etapa de *auto-tuning* quanto na etapa de carregamento cíclico, para cada componente estrutural analisado.

Tabela 1 – Parâmetro de carga e frequência de *auto-tuning* / ensaio.

Parâmetros	Barras de aço	Chapas de liga de alumínio
Carga Máxima [N]	94500	3000
Carga Mínima [N]	47250	300
Frequências [Hz]	5, 10, 15, 20, 25, 30	10, 15, 20, 25

Em todos os casos, foram registradas as medições obtidas pela célula de carga e pelo transdutor de deslocamento.

### 3. Discussões e resultados

#### Barras de aço com uniões mecânicas

Os gráficos da Figura 4 mostram a resposta de força em função da frequência para as uniões mecânicas de barras.

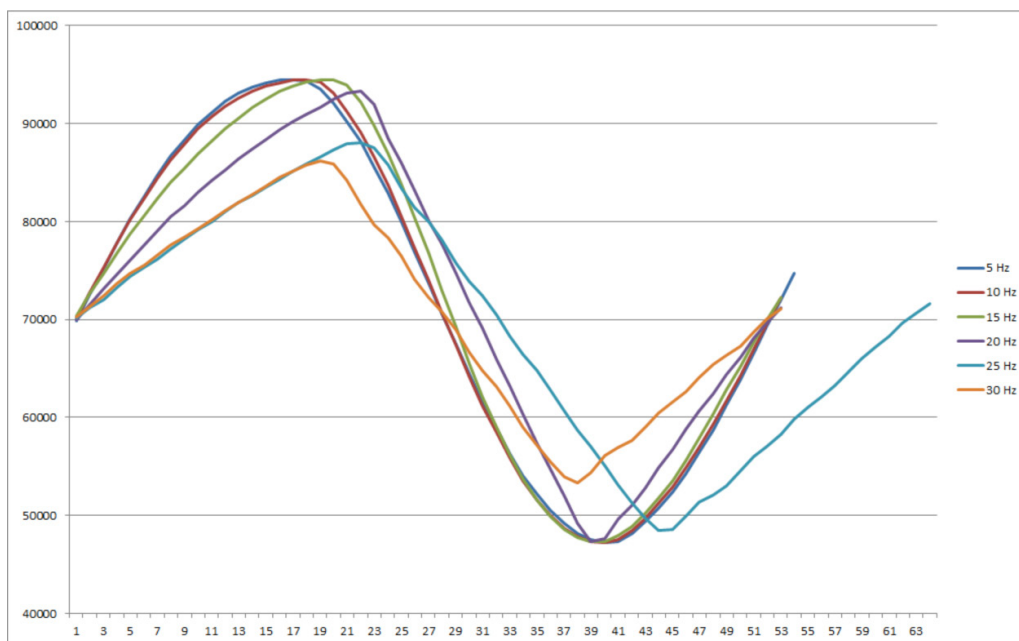


Figura 4 – Resposta de força em função da frequência para uniões mecânicas de barras de aço.

Podemos observar que com o aumento da frequência a máquina tende a não atingir a carga especificada e a onda fica deformada. Para a variação de carga de 47250 N a 94500 N, foi necessário um deslocamento de aproximadamente 1 mm do atuador. Considerando a curva verde da Figura 1, correspondente a um carregamento cíclico entre +25 kN e -25 kN (variação de total de carga semelhante ao do ensaio da união mecânica), observa-se que o deslocamento de 1 mm é atingível apenas para frequências de até aproximadamente 19 Hz. Assim, era de se esperar que apenas nas frequências de 5 Hz, 10 Hz e 15 Hz as cargas máximas e mínimas são atingidas, em função da limitação de resposta em frequência da máquina.

### Chapas de liga de alumínio unidas por rebites

Na figura 5 são apresentados os valores de carga aplicados às chapas de liga de alumínio que foram obtidos para as frequências de 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz. Apesar dos resultados se assemelharem entre si, o detalhe da Figura 5b mostra que a curva da frequência de 25 Hz apresenta indesejada oscilação em torno dos valores desejados de carga, consequentes de limitação do controlador da máquina (para os ganhos definidos por *auto-tuning*).

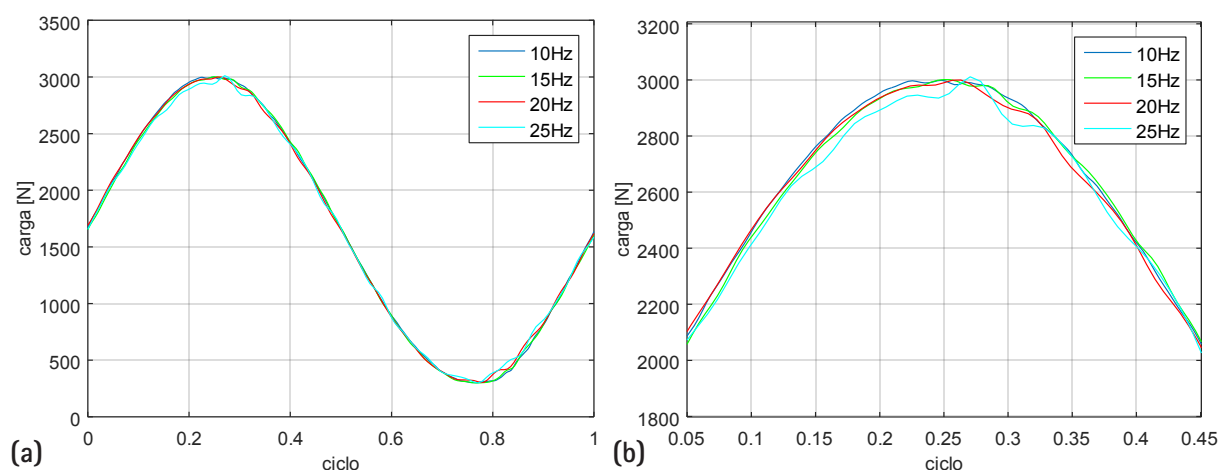


Figura 5 – Cargas aplicadas: (a) durante um ciclo, (b) detalhe no pico de carga.

Observando-se as curvas de deslocamentos apresentadas na Figura 6, nota-se que os valores obtidos sob a frequência de 20 Hz diferem dos demais casos. De fato, variando-se livremente a frequência de carregamento, notou-se que há uma frequência de ressonância do componente estrutural próxima a 18 Hz. A proximidade da frequência de 20 Hz com essa frequência de ressonância fez com que ocorresse vibração do componente estrutural e discrepância de deslocamento, apesar de terem sido atingidos valores de carga condizentes. Constatou-se, assim, que seria possível utilizar a frequência 15 Hz para ensaio desse componente estrutural.

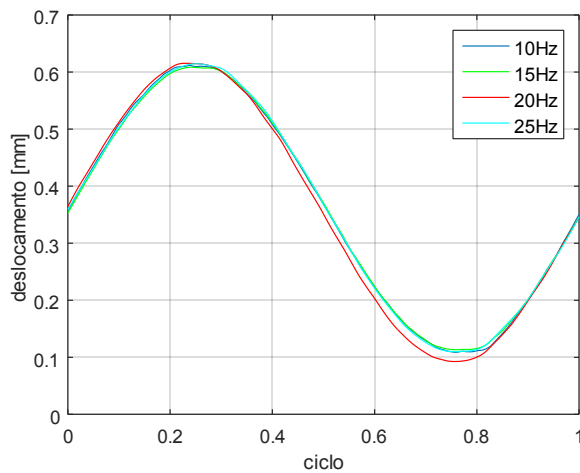


Figura 6 – Deslocamentos resultantes ao longo de um ciclo.

## 4. Conclusões

Conforme apresentados e ilustrados nos casos de exemplo, existem diversos fatores que limitam a frequência de carregamento em ensaios de fadiga. Visando a análise de vida de alto ciclo, essa frequência deve ser aumentada ao máximo para se reduzir o tempo total de ensaio, porém, de forma criteriosa para que a qualidade do ensaio não seja comprometida.

## 5. Referências

DEPARTMENT OF DEFENSE USA. MIL-STD-1312-21: Fastener Test Methods, Method 21, Shear Joint Fatigue, 1985. 23p.

FUJCZAK, R. R., The Effects of Fatigue Loading Frequency on Fatigue Life of High-strength Pressure Vessel Steels. Watervliet: US Army Armament Research, Development and Engineering Center, 1994. 23p. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a285301.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15630-1: Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire. Genebra, 2010. 29p.

MTS Landmark™ Testing Solutions. Eden Prairie: MTS Systems Corporation, 2015. 28p. Disponível em: <[http://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/dev\\_004324.pdf](http://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/dev_004324.pdf)>. Acesso em: 24 nov. 2015.

PAPAKYRIACOU, M., MAYER, H., PYPEN, C., PLENK Jr., STANZL-TSCHEGG, S. Influence of loading frequency on high cycle fatigue properties of b.c.c. and h.c.p. metals. Materials Science and Engineering A, v.308, n.1-2, p.143-152, 2001.