



Testes de Carga em Pontes Ferroviária: Uma Análise Comparativa das Práticas Internacionais

Lucas Almeida Botelho¹, Hermes Carvalho², Túlio Nogueira Bittencourt³

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas; lucassbotelho@hotmail.com

²Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas; hermes@dees.ufmg.br

³Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil; tulio.bittencourt@poli.usp.br

Resumo

Os testes de carga são fundamentais para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas. No entanto, as normas técnicas vigentes, não abordam de forma suficientemente específica os procedimentos para esses testes em pontes ferroviárias, especialmente no caso de testes estáticos, resultando em uma lacuna que impacta a padronização e a segurança das avaliações. No Brasil, embora existam normas relacionadas a provas de carga, como a NBR 9607 (provas de carga estática em estruturas de concreto) e a NBR 15307 (provas de carga dinâmica), não há uma norma nacional que estabeleça critérios específicos para provas de carga em pontes ferroviárias. Este artigo tem como objetivo analisar como os testes de carga são realizados em diferentes países, com foco nos critérios de parada/aceitação e metodologias que garantem a segurança da estrutura sem causar danos. Devido às dificuldades práticas do carregamento estático, como o peso e a complexidade das cargas ferroviárias, os testes dinâmicos e os quase-estáticos são frequentemente priorizados, sendo considerados menos arriscados e mais viáveis em muitos contextos. A análise comparativa abrange práticas adotadas em diversos países, incluindo Brasil, Alemanha, República Tcheca, Eslováquia e Espanha, destacando as variáveis monitoradas, a forma de carregamento e os critérios técnicos que orientam a execução dos testes. Conclui-se que, embora as práticas atuais atendam às demandas locais, a elaboração de normas específicas para testes de carga em pontes ferroviárias, tanto no Brasil quanto em nível internacional, traria benefícios significativos. Este estudo busca fomentar a discussão sobre a padronização desses testes, propondo diretrizes adaptadas às particularidades dessas estruturas.

Palavras-chave

Teste de carga; Pontes ferroviárias

1. Introdução

As pontes ferroviárias são elementos críticos e indispensáveis da infraestrutura de transporte, criando uma rede essencial para a conectividade e segurança ferroviária (CHEN^[5] et al., 2018). A capacidade dessas estruturas de suportar cargas e permitir o tráfego ininterrupto é fundamentalmente importante para assegurar a operação segura e eficiente das ferrovias, impactando diretamente a economia e a mobilidade (LI^[4] et al., 2019).

Atualmente, muitas pontes ferroviárias em operação estão passando por processos de degradação devido ao envelhecimento físico e químico, além do aumento das deformações causadas pelo crescimento das cargas móveis e pelas altas frequências de carregamento. Esta realidade tem criado uma necessidade crescente de inspeções periódicas e avaliações precisas da capacidade de carga dessas estruturas, especialmente quando os relatórios de inspeção indicam sinais de deterioração que podem comprometer sua segurança estrutural.

A crescente demanda pelo transporte ferroviário, aliada ao uso de trens de carga mais pesados e trens de alta velocidade, torna essencial a avaliação precisa da capacidade de carga das pontes ferroviárias (CHEN^[5] et al., 2018). Garantir testes de carga confiáveis é fundamental para prevenir falhas estruturais catastróficas. Falhas em pontes ferroviárias podem causar interrupções operacionais, resultando em grandes perdas econômicas e impactando a mobilidade e o comércio (LI^[4] et al., 2019).

Apesar da importância crítica dessas avaliações, ainda não existe uma norma específica para a realização de testes de carga em pontes ferroviárias, e os critérios de parada durante esses testes não são bem definidos, o

que pode comprometer a precisão e a eficácia dos resultados obtidos. Esta lacuna normativa representa um desafio significativo para engenheiros e gestores de infraestrutura ferroviária, especialmente considerando as diferenças fundamentais entre pontes ferroviárias e rodoviárias em termos de requisitos de carga e comportamento estrutural.



Figura 1 - Teste de Carga e Modelo de Elementos Finitos de uma Ponte
Fonte: FILAR^[3], 2017

Este artigo tem como objetivo analisar diferentes abordagens para testes de carga em pontes ferroviárias utilizadas internacionalmente e discutir como essas práticas podem ser adaptadas para o contexto brasileiro. A pesquisa é motivada pelo contínuo desenvolvimento de tecnologias avançadas de monitoramento e avaliação estrutural, que têm o potencial de aumentar a precisão e a eficiência dos testes de carga. À medida que as metodologias de teste evoluem, torna-se necessário integrar esses avanços em diretrizes práticas que reflitam as práticas internacionais mais recentes.

A estrutura do artigo está organizada da seguinte forma: inicialmente, apresentamos os fundamentos dos testes de carga em pontes ferroviárias, destacando suas particularidades em relação às pontes rodoviárias; em seguida, realizamos uma análise comparativa detalhada das abordagens internacionais para testes de carga; posteriormente, discutimos as possibilidades de adaptação dessas metodologias para o contexto brasileiro; e, por fim, apresentamos conclusões e recomendações para o desenvolvimento de normas e práticas nacionais.

2. Testes de Carga em Pontes Ferroviárias

Uma diferença fundamental entre pontes ferroviárias e rodoviárias é a natureza e magnitude da carga de serviço. As pontes ferroviárias são projetadas para suportar cargas muito mais elevadas e concentradas do que as rodoviárias, devido ao peso dos trens e às forças dinâmicas envolvidas. Esse fator torna os testes de carga em pontes ferroviárias particularmente desafiadores, pois replicar condições reais de carregamento de maneira segura e controlada é uma tarefa complexa que requer um entendimento aprofundado das especificidades dessas estruturas.

As pontes ferroviárias podem apresentar diferentes configurações, incluindo estruturas de aço e de aço-concreto, cada uma com desafios específicos que exigem abordagens de teste adequadas. Compreender a complexidade inerente a essas estruturas é essencial para obter resultados confiáveis e aplicáveis. Para isso, diferentes tipos de testes de carga foram desenvolvidos, cada um com propósitos específicos e metodologias distintas.

2.1. Classificação e Objetivos dos Testes de Carga

Os testes de carga em pontes podem ser classificados em dois tipos principais: testes de carga diagnósticos e as provas de carga (Proof Load Tests).

2.1.1. Testes de Carga Diagnósticos

Os testes de carga diagnósticos, também chamados de testes de carga suplementares em algumas normas, são os mais comumente utilizados e podem ser realizados tanto em pontes recém-inauguradas quanto em estruturas mais antigas. Estes testes têm como objetivos principais:

- Verificar o comportamento real da estrutura sob carregamento controlado
- Ajustar previsões de modelos analíticos e computacionais
- Avaliar pontes com elementos críticos à fratura
- Examinar pontes de concreto suscetíveis a falhas frágeis (como cisalhamento e punção)

Um dos principais propósitos desse tipo de teste é estimar com precisão a distribuição das cargas de tráfego entre os principais elementos estruturais. Estes testes são especialmente úteis quando modelos estruturais, como métodos de grelha ou elementos finitos, não conseguem prever adequadamente o comportamento da estrutura devido às incertezas nas propriedades dos elementos, nas condições de contorno e na influência de elementos secundários.

Para avaliar o impacto da deterioração dos materiais na distribuição da carga móvel, é essencial comparar a rigidez de uma ponte recém-construída com a de uma ponte após décadas de uso. Durante um teste de carga diagnóstico, diversos efeitos da carga — como deformações, tensões, rotações, aberturas de fissuras e deslocamentos — são monitorados em resposta às cargas aplicadas. Essas medições permitem determinar as forças internas e os momentos nos componentes da ponte.

Os testes diagnósticos são classificados de acordo com a variação na posição e no tempo da carga aplicada à ponte:

- **Testes Estáticos:** A carga (veículo ou peso) é aplicada em pontos fixos da estrutura, com medições cuidadosas das deformações, tensões e deslocamentos. Esta abordagem convencional permite uma avaliação detalhada da capacidade da ponte de suportar cargas especificadas, comparando o efeito real da carga com os valores teóricos previstos pelas normas de projeto. No entanto, apresenta desvantagens como custos elevados, atrasos significativos, interrupção do tráfego e potencial risco de danos estruturais em pontes com condições precárias.
- **Testes Pseudo-estáticos:** Um veículo atravessa a ponte em velocidade muito baixa, permitindo medições quase-estáticas com variação gradual da posição da carga.
- **Testes Dinâmicos:** O veículo cruza a ponte em velocidade normal ou máxima. Nestes testes, são empregados trens de carga reais ou veículos de teste equipados com instrumentação especializada para registrar as respostas dinâmicas da ponte, como acelerações, velocidades, frequências naturais e amortecimento. Essa abordagem tem se tornado proeminente devido à sua eficiência e conveniência em comparação com os testes de carga estática tradicionais. Os testes dinâmicos têm sido empregados para diversas finalidades, incluindo a detecção de danos, a identificação de parâmetros modais e a avaliação da capacidade estrutural.

2.1.2. Provas de Carga (Proof Load Test)

As provas de carga são utilizadas para fornecer uma avaliação mais realista da capacidade de carga de uma ponte do que aquela obtida por meio de análises teóricas, especialmente em casos onde há grandes incertezas. Essa situação ocorre quando:

- Não há plantas estruturais disponíveis para o desenvolvimento de modelos estruturais
- Os métodos de cálculo não possuem a precisão necessária para garantir uma avaliação confiável
- Existem dúvidas significativas sobre a integridade estrutural da ponte

Diferentemente dos testes diagnósticos, as provas de carga não são amplamente regulamentadas pelas normas atuais. Uma vez que o objetivo de uma prova de carga é determinar diretamente uma capacidade de carga segura sem a necessidade de análises teóricas adicionais, a definição da carga-alvo do teste é um aspecto crítico. Os níveis de carga envolvidos são consideravelmente mais altos do que nos testes diagnósticos, e os efeitos correspondentes devem estar alinhados com os efeitos da carga móvel permitida com fator de segurança.

Durante o teste, a carga é aumentada gradualmente, e a resposta estrutural é monitorada continuamente até que os critérios de parada sejam atendidos. A carga pode ser aplicada utilizando veículos especiais, macacos hidráulicos ou até mesmo cabos de protensão ancorados ao solo. Um planejamento detalhado do teste, incluindo medidas de gestão de risco, é essencial devido aos altos níveis de carga envolvidos.

É importante destacar que pontes que passaram por esse tipo de teste devem ser inspecionadas periodicamente após os ensaios, pois eventuais danos estruturais resultantes dos testes podem não ser imediatamente visíveis, podendo se manifestar apenas após um determinado período.

2.2. Parâmetros Críticos e Critérios de Avaliação

Independentemente do tipo de teste realizado, diversos parâmetros estruturais devem ser monitorados durante os testes de carga em pontes ferroviárias para garantir uma avaliação precisa e segura. Os resultados obtidos, ou as forças e momentos derivados, são então comparados com os valores calculados por meio de um modelo analítico, como a Análise por Elementos Finitos (FEM). Quaisquer discrepâncias entre os valores medidos e calculados são utilizadas para ajustar a classificação de carga da estrutura ou de seus componentes.

As respostas obtidas no teste de carga devem estar alinhadas com os cálculos preliminares. Se houver discrepâncias significativas, uma investigação detalhada deve ser conduzida para compreender e corrigir essas

diferenças antes de prosseguir com novas análises. Esta abordagem sistemática e comparativa é essencial para garantir avaliações precisas e eficazes da capacidade de carga das pontes ferroviárias, contribuindo diretamente para a segurança, eficiência e sustentabilidade das operações ferroviárias.

3. Normas e Limitações

Foram analisadas as principais normas europeias que abordam testes de carga em pontes, as quais, mesmo que de forma breve, contemplam aspectos específicos relacionados a pontes ferroviárias e suas particularidades. A análise incluiu as práticas e critérios estabelecidos por normas como as da Alemanha (DAfStb^[12], 2000), Espanha (MINISTERIO DE FOMENTO^{[8][10]}, 1999 e 2010) e a da República Tcheca/Eslováquia (CSN^[11], 1996). Embora algumas dessas normas não sejam exclusivamente voltadas para pontes ferroviárias, elas oferecem algumas informações valiosas sobre como os testes de carga podem ser adaptados para esse tipo de estrutura, considerando as cargas dinâmicas e concentradas características do tráfego ferroviário.

3.1 Normas Brasileiras

No Brasil, os testes de carga em pontes são regulamentados principalmente pelas normas NBR 9607^[1] (2023), que trata de provas de carga estática em estruturas de concreto, e NBR 15307^[2] (2005), que aborda ensaios não destrutivos e provas de carga dinâmica em grandes estruturas. No entanto, essas normas não são específicas para pontes ferroviárias, o que resulta em uma lacuna significativa na padronização e segurança das avaliações.

A NBR 9607 recomenda a realização de testes de carga em diversas situações, como na inauguração de estruturas, mudanças no uso da estrutura, após acidentes ou anomalias, e em casos de falta de elementos de projeto. Para pontes ferroviárias, a norma estabelece que a carga de teste (P_{test}) deve ser calculada como:

$$P_{test} = 0.70 \times Q \quad (1)$$

Onde Q representa as ações variáveis previstas ao longo da vida útil da estrutura. A norma também recomenda que o teste seja realizado em múltiplas etapas, com pelo menos quatro fases de carregamento e duas de descarregamento, limitando cada etapa a 25% da carga total.

Para pontes e viadutos, o deslocamento residual após um teste de carga não deve exceder 5% do deslocamento máximo registrado durante o teste.

Durante cada estágio do teste de carga, os limites de deslocamento estabelecidos no projeto são monitorados, juntamente com a abertura de fissuras e a estabilização dos deslocamentos. A progressão para o próximo estágio só deve ocorrer quando a segurança da estrutura em avaliação for garantida. O intervalo máximo entre as leituras dos sistemas de monitoramento em cada estágio de carregamento não deve exceder 15 minutos. A estabilização dos deslocamentos é considerada alcançada quando a diferença entre duas leituras consecutivas não for maior que 5% do deslocamento registrado no mesmo estágio.

Após o estágio final de carregamento e a estabilização dos deslocamentos, a carga total do teste deve ser mantida por no mínimo 10 minutos. Se deslocamentos contínuos e não estabilizados que excedam os limites aceitáveis forem observados, o supervisor deve avaliar se é necessário descarregar a estrutura.

Apesar dessas diretrizes, a NBR 9607 não estabelece critérios específicos para pontes, especialmente em relação a cargas dinâmicas e critérios de parada mais objetivos como uma carga limite ou tamanho de novas fissuras. Essa lacuna normativa dificulta a realização de testes de carga que considerem as particularidades das pontes ferroviárias, como as cargas concentradas e os efeitos dinâmicos causados pela passagem de trens. Por sua vez, a NBR 15307 aborda ensaios não destrutivos e provas de carga dinâmica, mas também não fornece diretrizes específicas para pontes ferroviárias. A norma sugere a utilização de métodos dinâmicos para avaliar a resposta estrutural sob cargas variáveis, mas não detalha procedimentos ou critérios de aceitação para pontes sujeitas ao tráfego ferroviário.

3.2 Alemanha

Na Alemanha, a norma DAfStb (DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON^[12], 2000) estabelece diretrizes rigorosas para testes de carga em estruturas de concreto, originalmente desenvolvidas para edifícios, mas que pode ser adaptada para pontes. Durante a fase de preparação para o teste de carga, é necessário identificar vários elementos-chave: as medições esperadas durante o teste, o impacto de mudanças no estado ou sistema (como a diferença entre seções fissuradas e não fissuradas ou variações de temperatura), as tensões e deformações previstas sob a carga aplicada, e o impacto potencial do teste de carga na subestrutura.

Para testes de prova de carga, a carga deve ser posicionada para representar o cenário de carregamento mais desfavorável. A diretriz alemã também especifica um protocolo de carregamento cíclico, exigindo que a carga seja aplicada em pelo menos três incrementos, com descarregamento necessário pelo menos uma vez após

cada incremento. Após o teste de carga, os resultados devem ser analisados minuciosamente e comparados com os cálculos pré-teste. Além disso, estruturas similares podem ser avaliadas com base nos resultados do teste de carga, desde que sua equivalência em todos os aspectos essenciais possa ser demonstrada.

3.2.1 Carregamento e Procedimentos

Antes de realizar um teste de carga, é necessária uma inspeção visual detalhada, juntamente com testes destrutivos e não destrutivos, para garantir que as características da estrutura sejam bem documentadas e compreendidas. O carregamento é realizado utilizando veículos pesados, como locomotivas e vagões, que simulam as condições reais de tráfego ferroviário. A carga é aplicada em etapas incrementais, com medições realizadas em cada etapa para monitorar o comportamento da estrutura.

A diretriz alemã estabelece níveis de carga específicos para a realização dos testes:

- Carga limite (F_{lim}): Carga na qual um critério de parada é atingido, indicando que qualquer carga adicional pode resultar em danos permanentes à estrutura.
- Carga alvo total (F_{target}): Carga máxima planejada antes do teste.
- Carga alvo aplicada ($ext.F_{target}$): Carga de prova aplicada externamente, sem considerar as cargas permanentes existentes.

A carga de prova é calculada com base na seguinte equação:

$$ext.F_{target} = \sum_{j>1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{Q,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

com a restrição:

$$0.35G_{k,1} \leq ext.F_{target} \leq ext.F_{lim} \quad (3)$$

Onde, $G_{k,1}$ é o valor característico da carga permanentes durante o teste; $G_{k,j}$ é o valor característico das cargas permanentes que ocorrem após o teste; $Q_{k,1}$ é o valor característico das cargas vivas; $\gamma_{G,j}$, $\gamma_{Q,1}$, $\gamma_{Q,i}$ são os fatores de carga para cargas permanentes e vivas; $\psi_{Q,i}$ é o fator de combinação para cargas vivas.

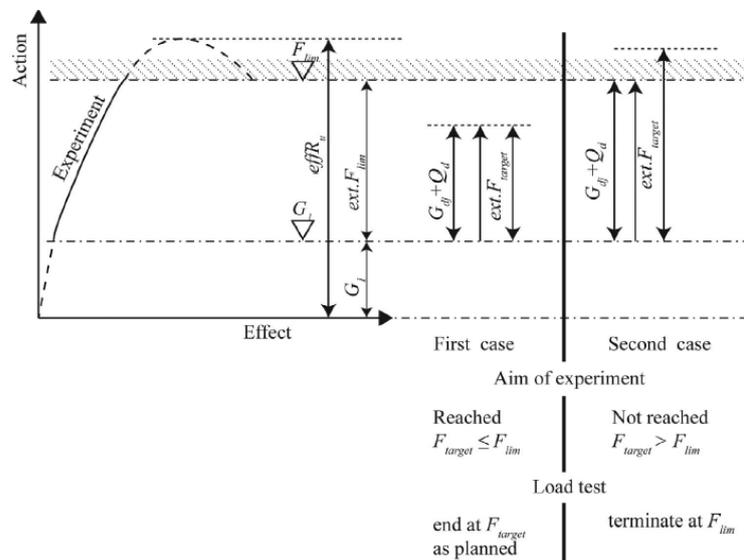


Figura 2 - Filosofia de segurança da diretriz alemã

Fonte: DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON^[12], 2000

3.2.2 Critérios de Parada

A diretriz alemã estabelece cinco critérios de parada para testes de carga para serem críticos à flexão. O teste deve ser interrompido se qualquer um desses critérios for excedido. O primeiro critério especifica uma deformação limite no concreto. A deformação no concreto (ϵ_c) não deve exceder:

$$\epsilon_c < \epsilon_{c,lim} - \epsilon_{c0} \quad (4)$$

Onde $\epsilon_{c,lim}$ é tipicamente 0,6‰ para concreto com resistência inferior a 25 MPa e 0,8‰ para concreto de alta resistência, e ϵ_{c0} é a deformação inicial devido às cargas permanentes.

O segundo critério de parada relaciona-se a uma deformação limite na armadura de aço. A deformação no aço (ϵ_{s2}) não deve exceder:

$$\varepsilon_{s2} < 0.7 \frac{f_{ym}}{E_s} - \varepsilon_{s02} \quad (5)$$

Ou, se a relação tensão-deformação do aço for conhecida:

$$\varepsilon_{s2} < 0.9 \frac{f_{0.01m}}{E_s} - \varepsilon_{s02} \quad (6)$$

Onde ε_{s2} é a deformação medida no aço, ε_{s02} é a deformação analítica causada pelas cargas permanentes, f_{ym} é a resistência média ao escoamento do aço, e E_s é o módulo de elasticidade do aço.

O terceiro critério de parada refere-se à largura w de novas fissuras que podem se desenvolver durante o teste de carga, bem como ao aumento Δw na largura de fissuras existentes. Existem limites tanto para a largura máxima da fissura quanto para a largura residual da fissura após a remoção da carga. Essas limitações estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos para a largura de fissuras w e aumento na largura de fissuras Δw :

	Durante o teste	Depois do teste
Fissuras existentes	$\Delta w \leq 0.3 \text{ mm}$	$\leq 0.2 \Delta w$
Novas fissuras	$w \leq 0.5 \text{ mm}$	$\leq 0.3 \Delta w$

O quarto critério de parada refere-se à deflexão medida. Considera-se que foi excedido se for observado um aumento significativo na porção não linear da deformação ou se permanecer mais de 10% de deformação permanente após a remoção da carga.

O critério final de parada aplica-se especificamente às vigas com armadura de cisalhamento. Para essas vigas, as deformações no vão de cisalhamento são ainda mais restritas: a deformação máxima para o critério de parada da deformação do concreto, é estabelecida em 60% da sua deformação máxima, e para o critério de parada da deformação do aço é estabelecida em 50% da deformação máxima.

O teste também deve ser interrompido quando há:

- Mudanças Estruturais Críticas: Se medições indicarem mudanças significativas na estrutura que possam levar a danos com aumentos adicionais de carga.
- Perda de Estabilidade: Se a estabilidade da estrutura não puder mais ser garantida.
- Deslocamentos Críticos: Se correrem deslocamentos críticos nos apoios.

3.3 República Tcheca e Eslováquia

A norma tcheca e eslovaca para testes de carga em pontes (CSN^[11], 1996), introduzida em 1968 e com sua última revisão em 1996, desempenha um papel fundamental na padronização dos procedimentos de avaliação estrutural (FRÝBA e PIRNER^[6], 2001). Essa norma abrange testes estáticos, dinâmicos e de longa duração, sendo amplamente aplicada a pontes rodoviárias e ferroviárias. Classificados como testes de carga diagnósticos, esses ensaios permitem comparar o comportamento real das estruturas com as previsões teóricas, auxiliando na validação de métodos de dimensionamento e na verificação do desempenho estrutural. Ao longo das décadas, essa abordagem tem contribuído significativamente para a evolução das práticas de engenharia, reforçando a importância de diretrizes bem estabelecidas para garantir a segurança e a confiabilidade das infraestruturas (LANTSOGHT^[7], 2017). Os testes estáticos são realizados a pedido das autoridades governamentais ou do projetista da ponte. Nas primeiras versões dessa norma, os testes eram obrigatórios para inauguração de novas pontes com vãos superiores a 18 metros.

A aplicação da carga é geralmente realizada utilizando veículos pesados apropriados para o tipo de ponte:

- Para pontes ferroviárias: locomotivas, vagões, guindastes ferroviários
- Para pontes rodoviárias: caminhões, veículos sobre trilhos, máquinas de construção, caminhões-pipa

A carga aplicada varia entre 50% e 100% da carga padrão, considerando o fator de impacto dinâmico. O carregamento deve ser mantido por pelo menos 30 minutos em pontes de concreto e 15 minutos em pontes de aço. As medições são realizadas antes da aplicação da carga, imediatamente após a aplicação carga e em intervalos de no máximo 10 minutos durante o teste. O processo de carregamento é geralmente repetido duas vezes para confirmar os resultados.

3.3.1 Testes Estáticos

O código tcheco/eslovaco descreve três critérios de aceitação para testes de carga estática, que são eles: os valores totais de deformação S_{tot} , deformações permanentes S_r e elásticas S_e dos valores medidos. A relação entre esses valores é dada por:

$$S_{tot} = S_r + S_e \quad (7)$$

A ponte testada deve atender a três condições listadas abaixo (valores de α_1 , α_2 , e β se encontram na tabela abaixo Tabela 2.

Condição de Deformação Elástica: (S_{cal} é o valor calculado)

$$\beta < \frac{S_e}{S_{cal}} \leq \alpha \quad (8)$$

Condição de Deformação Permanente:

$$\frac{S_r}{S_{tot}} \leq \alpha_1 \quad (9)$$

Largura de Fissuras: Para pontes de concreto, a largura das fissuras deve estar dentro dos limites especificados na Tabela 3.

Tabela 2 - Determinação dos Parâmetros por Tipo de Ponte

Tipo da Ponte	α	α_1	α_2	α_3	β
Prestressed	1.05	0.2	0.5	0.1	0.7
Reinforced	1.10	0.25	0.5	0.125	0.6
Steel	1.05	0.1	0.3	0.05	0.8

Tabela 3 - Limitações para a Largura de Fissuras em Testes de Carga

Tipo da Ponte	Classe de agressividade	Largura máxima de fissura
Concreto Armado	1(seco)	0.4 mm
	2, 3 (úmido)	0.3 mm
	4, 5 (agressivo)	0.1 mm
Parcialmente protendido	1 (seco)	0.2 mm
	2, 3 (úmido)	0.1 mm para pós-tensionamento
		0 mm para protensão
	4, 5	0 mm
Totalmente protendido	any	0 mm

Para pontes novas, a Equação 9 pode ser ajustada, permitindo que o carregamento seja repetido se os resultados do carregamento inicial atenderem ao critério abaixo:

$$\alpha_1 < \frac{S_r}{S_{tot}} < \alpha_2 \quad (10)$$

Após a repetição, a condição de deformação permanente deve ser:

$$\frac{S_r}{S_{tot}} < \alpha_3 \quad (11)$$

Se a Equação 11 não for atendida, o carregamento pode ser repetido mais uma vez, e a condição final deve ser:

$$\frac{S_r}{S_{tot}} \leq \frac{\alpha_1}{6} \quad (12)$$

Se os valores medidos não atenderem aos critérios especificados acima, será necessária uma investigação especial, monitoramento de longo prazo e/ou ensaios dinâmicos.

3.3.2 Testes Dinâmicos

Os testes dinâmicos são realizados para simular condições reais de uso das pontes. Para pontes ferroviárias, a carga é aplicada com vagões carregados atravessando a estrutura em várias velocidades. Estes ensaios geralmente começam em baixas velocidades, em torno de 5 km/h, e progressivamente aumentam até atingir as velocidades máximas possíveis ou relevantes para cada tipo de estrutura. É aconselhável realizar o ensaio estático antes de aplicar cargas dinâmicas. O fator de impacto dinâmico é dado por:

$$\delta_{obs} = \frac{S_{max}}{S_m} \quad (13)$$

Onde S_{max} é a resposta dinâmica máxima devido à carga no ponto medido e S_m é a resposta estática máxima devido à mesma carga no mesmo ponto.

Os desvios das frequências naturais são apresentados abaixo e devem estar em conformidade com os limites especificados na Tabela 4.

$$\Delta_{(f)} = \frac{f_{(j)theor} - f_{(j)obs}}{f_{(j)theor}} \times 100 \quad (14)$$

Onde $f_{(j)theor}$ é a frequência natural calculada e $f_{(j)obs}$ é a frequência medida.

Tabela 4 - Limitações para o Desvio entre Frequências Medidas e Calculadas

Frequencia	$f_{(1)}$	$f_{(2)}$	$f_{(3)}$	$f_{(4)}$	$f_{(5)}$
Protendido	-15 to +5	-15 to +10	±15	±20	±25

Fonte: FRÝBA e PIRNER^[6], 2001; LANTSOGHT^[7], 2019

Para pontes ferroviárias, existe um critério de aceitação adicional relacionado ao fator de impacto dinâmico, que deve satisfazer a seguinte condição:

$$(\delta_{obs} - 1)k_{dyn} \leq \delta - 1 \quad (15)$$

Onde δ_{obs} é o fator de impacto dinâmico medido, δ é o fator de impacto dinâmico padrão e k_{dyn} é o fator de eficiência para o teste dinâmico:

$$k_{dyn} = \frac{U_{dyn}}{U} \quad (16)$$

Onde U_{dyn} é a resposta à carga de teste e U é a resposta à carga padrão sem δ no ponto medido. O fator k_{dyn} deve satisfazer a condição:

$$\delta k_{dyn} \leq 1 \quad (17)$$

Pelo menos 10 passagens de veículos ferroviários são necessárias, e 90% dos valores de δ_{obs} devem atender à Equação 15.

3.4 Espanha

Na Espanha, as diretrizes para testes de carga em pontes ferroviárias são estabelecidas pelo MINISTERIO DE FOMENTOS^[8] (1999) e MINISTERIO DE FOMENTO^[10] (2010). Para pontes ferroviárias com vãos superiores a 10 metros, os testes de carga diagnósticos são obrigatórios, incluindo tanto testes estáticos quanto dinâmicos. Esses testes são realizados antes da instalação dos trilhos, utilizando caminhões para aplicar a carga, já que os trilhos ainda não estão presentes. Dois tipos de caminhões são utilizados: um de 26 toneladas (3 eixos) e outro de 38 toneladas (4 eixos). A carga deve refletir níveis de serviço com um período de retorno de 5 anos, produzindo aproximadamente 60% do efeito de carga do Estado Limite Último (ELU) e não ultrapassando 70% do ELU.

Após o teste, um relatório detalhado deve ser preparado, incluindo informações como a data e horário do teste, descrição da estrutura, veículos utilizados, configurações de carga, medições realizadas e comparação com as respostas analíticas. Os critérios de aceitação para pontes ferroviárias seguem as mesmas diretrizes gerais para pontes rodoviárias, com foco em deflexões, fissuras e deformações residuais (α).

3.4.1 Testes Estáticos

1. Estabilização das Medições:

Após 10 minutos de carga, a estabilização é avaliada conforme a equação:

$$|f_{10} - f_0| < 0.05|f_0| \quad (18)$$

Onde f_{10} é a medição após 10 minutos e f é a resposta estrutural instantânea. Se o critério não for atendido, a estabilização é reavaliada após 20 minutos usando:

$$|f_{20} - f_{10}| < 0.2|(f_{20} - f_{10})| \quad (19)$$

Onde f_{20} é a medição após 20 minutos.

2. Deformação residual (α):

A deformação residual é calculada conforme a equação:

$$\alpha = 100 \frac{f_r}{f} \quad (20)$$

Onde f_r é a medição residual após a descarga e f é a medição total. Os limites para α são:

- 20% para pontes de concreto armado.
- 15% para pontes de concreto protendido ou compostas.
- 10% para pontes de aço.

3. Critérios de Aceitação:

- A deflexão máxima observada não deve exceder 10% a mais do que a prevista analiticamente para pontes protendidas e de aço, e 15% para pontes compostas e de concreto armado.
- A largura máxima de fissuras deve estar dentro dos limites estabelecidos pelo Estado Limite de Serviço (ELS) para fissuração.
- Não deve haver evidência de danos ou redução da capacidade de carga da estrutura

3.4.2 Critérios de Aceitação para Testes Dinâmicos

1. Frequências:

A frequência principal medida durante o teste deve estar próxima do valor calculado.

2. Amortecimento:

O amortecimento é calculado conforme a equação:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{A_0}{A_n} \right) \quad (21)$$

Onde n é o número de ciclos, A_0 é a resposta dinâmica no início do intervalo e A_n é a resposta no final do intervalo. O amortecimento também pode ser expresso como uma porcentagem:

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} \quad (22)$$

com valores típicos entre 0,5% e 2%.

3. Fator de Impacto (ϕ):

O fator de impacto é definido conforme a equação:

$$\phi = \frac{f_{dyn}}{f_{sta}} \quad (23)$$

Onde f_{dyn} é a resposta dinâmica máxima e f_{sta} é a resposta estática máxima. O fator de impacto é categorizado como:

- Baixo: $\phi \leq 1.10$;
- Médio: $1.10 < \phi \leq 1.30$
- Alto: $\phi > 1.30$.

Os testes dinâmicos são realizados para avaliar propriedades como linhas de influência, espectros de frequência, modos de vibração, fator de impacto (amplificação dinâmica) e amortecimento. Esses testes podem ser realizados em três velocidades diferentes:

- Velocidade Lenta: Aproximadamente 5 km/h, adequada para testes quase estáticos.
- Velocidade Média: Entre 30 km/h e 40 km/h.
- Velocidade Alta: Superior a 60 km/h, se as condições do local permitirem.

Tabela 5 - Recomendações para Execução de Testes Dinâmicos

Objetivo do Teste	Configuração de Carga	Velocidade	Aplicação de Obstáculo
Linhas de influência	1 caminhão	Lenta	Não
Frequência	1 caminhão	Média e rápida	Opcional
Amortecimento	1 caminhão	Média e rápida	Opcional
Fator de impacto	1 caminhão	Lenta, média e rápida	Não
Aceleração	1 ou mais caminhões	Média e rápida	Não

Fonte: MINISTERIO DE FOMENTO^[10], 1999

4. Conclusão

A análise das normas internacionais revela que as práticas europeias são mais detalhadas e adaptadas às particularidades das pontes ferroviárias, especialmente no que diz respeito a cargas dinâmicas, critérios de parada e monitoramento de parâmetros como deformação, fissuras e deslocamentos. Enquanto as normas brasileiras (NBR 9607 e NBR 15307) fornecem diretrizes gerais para testes de carga em estruturas de concreto e obras de artes especiais (OAE), elas não abordam especificamente as demandas únicas das pontes, como cargas concentradas e efeitos dinâmicos causados pela passagem de trens.

Um dos pontos mais críticos é a ausência de critérios de parada claros e objetivos. Normas como a alemã (DAfStb) e a Tcheca/Eslovaca (CSN) estabelecem limites rigorosos para deformação no concreto e no aço, largura máxima fissuras novas e já existentes, e deslocamentos residuais. A falta desses critérios específicos aumenta o risco de danos à estrutura durante os testes, o que pode levar a falhas catastróficas e interrupções operacionais, resultando em prejuízos financeiros e de segurança significativos para o sistema ferroviário.

Portanto, este estudo reforça a necessidade de desenvolver normas específicas para testes de carga em pontes ferroviárias no Brasil, alinhadas com as práticas internacionais mais recentes. A padronização desses procedimentos não apenas aumentaria a confiabilidade das avaliações estruturais, mas também promoveria a segurança e a eficiência do sistema ferroviário nacional, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da infraestrutura de transporte no país.

Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15307**: Ensaios não destrutivos – Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas – Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9607**: Prova de carga estática em estruturas de concreto — Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- [3] FILAR, Ł.; KALUZA, J.; WAZOWSKI, M. Bridge load tests in Poland today and tomorrow – the standard and the new ways in measuring and research to ensure transport safety. *Procedia Engineering*, v. 192, p. 183–188, 2017.
- [4] LI, X.; XIA, Y.; GAO, W.; WANG, D. Dynamic response monitoring and finite element model updating of a high-speed railway bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, v. 9, n. 5, p. 637-652, 2019.
- [5] CHEN, Y.; XU, X.; WANG, Y. Structural health monitoring of a long-span railway bridge subjected to high-speed trains. *Structural Control and Health Monitoring*, v. 25, n. 7, 2018.
- [6] FRYBA, L.; PIRNER, M. Load tests and modal analysis of bridges. *Engineering Structures*, 2001.
- [7] LANTSOGH, E. O. L.; VAN DER VEEN, C.; HORDIJK, D. A.; DE BOER, A. Development of recommendations for proof load testing of reinforced concrete slab bridges. *Engineering Structures*, v. 152, p.202-210, 2017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.018.
- [8] MINISTERIO DE FOMENTO. Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril (IAPF). Madrid: Ministerio de Fomento, 2010.
- [9] MINISTERIO DE FOMENTO. Instrucciones para la Puesta en carga de estructuras (pruebas de carga provisionales). Madrid: Ministerio de Fomento, 2009.
- [10] MINISTERIO DE FOMENTO. Dirección General de Carreteras. Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera. Madrid: Ministerio de Fomento, 1999.
- [11] CSN. CSN 73 6209: Load Testing of Bridges (em Tcheco). Praga: Czech Republic, 1996.
- [12] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON. DAfStb-Guideline: Load tests on concrete structures (em alemão). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2000.