



Desempenho de Pontes Rurais com o avanço agrícola dos Rodotrens canavieiros - Análise baseada em Confiabilidade Estrutural

Tainá Mascarenhas Borghi¹, Lucas Antônio Moraes Oliveira², Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs³, André Teófilo Beck⁴

^{1,2} Doutorandos em Engenharia de Estruturas/ Departamento de Estruturas/ Escola de Engenharia de São Carlos/ Universidade de São Paulo/ São Carlos, Brasil/ tainaborghi@usp.br / lucasantonio12@usp.br

^{3,4} Docente/ Departamento de Estruturas/ Escola de Engenharia de São Carlos/ Universidade de São Paulo/ São Carlos, Brasil/ analucia@sc.usp.br / atbeck@sc.usp.br

Resumo

O objetivo desse artigo é apresentar a problemática e dar luz a uma análise de segurança estrutural da flexão de longarinas de pontes rurais frente às ações decorrentes do Rodotrem canavieiro. Conforme a norma nacional ABNT NBR 7188 (2013) “em obras em estradas vicinais municipais de uma faixa e obras particulares, a critério da autoridade competente, a carga móvel rodoviária é no mínimo igual ao tipo TB-240”, indicando a possibilidade do projeto com essa carga móvel. No entanto, com o avanço sucroalcooleiro em regiões do país, a passagem desses Rodotrens por estradas rurais tem se tornado mais frequentes, não sendo contemplados razoavelmente pelo TB-240 e se tornando necessária uma revisão às prescrições de projeto e indicação da verificação de pontes antigas para esses novos carregamentos. Dessa forma, o presente artigo apresenta um estudo de caso de uma ponte rural situada em estrada não-pavimentada, com análise comparativa dos esforços solicitantes advindos do TB-240 e com a passagem do Rodotrem canavieiro. Além disso, traz uma análise de confiabilidade estrutural das longarinas à flexão da ponte de concreto utilizando a Simulação de Monte Carlo e o método FORM. Os resultados indicam que para a distribuição de peso dos veículos canavieiros baseada nas pesagens da safra 2017-2019, acarretam um acréscimo considerável dos esforços com a passagem da CVC e um aumento da probabilidade de falha, ficando este abaixo do índice de confiabilidade alvo. Dessa forma, a passagem desses veículos em pontes similares pode representar um desafio em muitas regiões do país, dado à verificação de sobrecargas não previstas e a necessidade de estudos adicionais sobre os efeitos de fadiga e, por fim, a indicação de inspeções das obras de artes existentes na garantia da segurança estrutural.

Palavras-chave

Pontes rurais de concreto armado; Longarinas; Segurança estrutural; Confiabilidade estrutural; Simulação de Monte-Carlo.

1. Introdução

No Brasil, o transporte rodoviário é responsável por 58% do transporte de cargas e por 96% do movimento de passageiros, sendo o sistema modal mais utilizado em todo o país (IBL, 2021). As atividades do agronegócio brasileiro se destacam nesse ponto com o escoamento da produção pela infraestrutura rodoviária nacional. Segundo CEPEA (2021), o agronegócio teve participação de 26,6% no PIB brasileiro e vem em uma crescente, principalmente na última década. O agronegócio canavieiro acompanha esse crescimento, já que a cana de açúcar é matéria-prima para a produção de combustíveis, alimentos e cogeração de energia.

O transporte dessas cargas pelas rodovias e, principalmente por estradas rurais não-pavimentadas cresceu muito nos últimos anos, e, atualmente, é realizado majoritariamente por veículos do tipo CVC (Composição Veicular de Carga), como os Rodotrens, que podem ter comprimento de mais de 30 metros, de 9 ou 11 eixos e capacidade para transportar mais de 100 toneladas. Devido à essa mudança no transporte ao longo dos anos, é importante voltar a atenção às pontes localizadas nessas vias.

Conforme a ABNT NBR 7188 (2013) “em obras em estradas vicinais municipais de uma faixa e obras particulares, a critério da autoridade competente, a carga móvel rodoviária é no mínimo igual ao tipo TB-240”. Desse modo, o projeto de obras de arte rurais vê a possibilidade do projeto com essa carga móvel. Com o avanço do agronegócio canavieiro com as CVCs, essas pontes merecem atenção adequada. Além disso, um levantamento mostra que cerca de 70% das pontes registradas no Brasil possuem idade superior a 30-40 anos (MENDES, 2009), ou seja, além de estarem sujeitas à um carregamento maior que o projetado, essas pontes podem apresentar um estado de deterioração a ser avaliado.

Assim, o presente artigo apresenta a problemática por meio de um estudo de caso, demonstrando o acréscimo nos esforços solicitantes com a passagem do Rodotrem canavieiro, quando comparado ao do TB-240. Além disso, traz a confiabilidade estrutural como uma alternativa para a análise dessas estruturas, considerando as incertezas, relacionadas, por exemplo, às propriedades dos materiais, à geometria dos elementos e aos carregamentos suportados. Dessa forma, utiliza-se a Simulação de Monte Carlo e o Método FORM na quantificação dos índices de confiabilidade e probabilidades de falha das longarinas à flexão, como ferramenta de decisão na análise da segurança dessas estruturas.

2. Pontes no Brasil

As pontes no Brasil apresentam grande variabilidade, tanto no que diz respeito aos tipos estruturais e formas, quanto aos materiais e ano de construção. Até 2018, estavam cadastradas no Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) 8.336 obras de arte especiais (OAEs), o que inclui pontes, viadutos, passarelas, túneis, bueiros e muros de contenção. Entretanto, Timerman (2017) estima existirem 120 mil pontes e viadutos no país, segundo um catálogo particular. Assim, percebe-se que existe uma grande defasagem no cadastro e monitoramento dessas estruturas, sendo o número de pontes no Brasil ainda impreciso. Contudo, um levantamento realizado por Mendes (2009) conseguiu encontrar 5.619 pontes cadastradas no DNIT, construídas principalmente a partir de 1940. Esse levantamento caracterizou as pontes brasileiras em um estudo percentual, mostrando que 63% delas têm extensão inferior a 50 m, 79% têm largura total inferior a 12 m, 83% das pontes possuem sistema estrutural em viga de concreto armado e 90% foram projetadas com o trem tipo classes TB-24 ou TB-36.

Nacionalmente, vale destacar as principais normativas associadas ao projeto em concreto estrutural, sendo a NBR 6118 (2014) “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento” utilizada como norma base. Para obras de artes especiais, complementações e ajustes com normas específicas são necessários, e para isso, são utilizadas a NBR 7187 (2003) e NBR 7188 (2013). A primeira traz requisitos de projeto, execução e controle das pontes de concreto armado e pretendido e a segunda define os valores básicos das cargas móveis rodoviárias de veículos e ações de pedestres. Por fim, a NBR 8681 (2003) aborda requisitos para verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil.

A NBR 7188 (antiga NB-6) merece especial atenção quando se trata de projetos de pontes antigas, devido à sua modificação durante os anos. Até 1940, a norma utilizada para cargas móveis era a alemã DIN 1072. Com a criação da Associação Brasileira de Normas Técnicas, as primeiras normas brasileiras de estruturas foram elaboradas, como a NB-6, em 1946, para cargas móveis em pontes. Cargas móveis são combinações de cargas verticais geradas pelo veículo e cargas distribuídas (de multidão), devendo ser aplicadas na posição mais desfavorável para cada seção de cálculo. A Tabela 1 mostra um comparativo das Normas para cargas móveis, desde a NB-6 (1946), passando pela NB-6 (1960) e NBR 7188 (1984), até a NBR 7188 (2013).

Tabela 1 - Comparaçāo das normas de cargas móveis em pontes

Norma	Classe	Veículo	Multidão (kN/m ²)	Coeficiente de Impacto Vertical
NB-6 (1946)	Classe I	Compressores + Caminhões	4,5 4,0	-
	Classe II e III			
NB-6 (1960)	Classe 36	360	5,0	$1,4 - 0,007 \times L$
	Classe 24	240	4,0	
	Classe 12	120	3,0	
NBR 7188 (1984)	Classe 45	450	5,0	$1,4 - 0,007 \times L$
	Classe 30	300	5,0	
	Classe 12	120	4,0	
NBR 7188 (2013)	Classe 450	450	5,0	$1 + 1,0 \times \left(\frac{20}{L_i + 50} \right)$
	Classe 240	240	4,0	

Como visto na Tabela 1, a NB-6 (1946) utilizava como trem-tipo caminhões e compressores. A partir da NB-6 (1960), passou-se a empregar a configuração do trem tipo com três eixos, espaçados em 1,50 m, com 6 m de comprimento por 3 m de largura. Segundo Mendes (2009), 70% das pontes cadastradas até aquele ano possuíam idade superior a 30 anos, o que representa mais de 40 anos nos dias atuais, e, naquela época, 18% já tinham atingido a vida útil para qual foram projetadas. Assim, percebe-se que a maioria das pontes da infraestrutura rodoviária brasileiras foram projetadas utilizando a norma NBR 7188 (1984) ou anteriores.

3. Estudo de caso: Ponte Ribeirão da Cachoeira

A Ponte Ribeirão da Cachoeira, situada numa estrada rural não-pavimentada, em município do triângulo mineiro, se apresenta como uma das inúmeras pontes brasileiras antigas que irão receber carregamentos de veículos canavieiros. Inaugurada em 1975, teve premissa de projeto com trem-tipo TB-24 (NB-6, 1960). Dado avanço sucroalcooleiro nessa região, prevê-se para a safra de 2021/2022 o tráfego das CVCs canavieiras com 30 m, podendo atingir mais de 100 toneladas, conforme pesagens obtidas em safras anteriores. Essa ponte, objeto de estudo do presente trabalho, possui vão efetivo de 14,00, largura de faixa única de 4,60 m, com sistema bi apoiada entre os apoios e constituída por duas longarinas, seis transversinas e laje, todas em concreto armado. A Figura 1 apresenta a situação atual da ponte.



Figura 1 – Fotos do estado atual da Ponte Ribeirão da Cachoeira

A Ponte Ribeirão da Cachoeira encontra-se nas estatísticas mencionadas por Mendes (2009), com idade superior a 30 anos. Ela teve inauguração em 1975 e atualmente (2021) está com quase 46 anos, prestes a atingir a vida útil usual de projeto nos dias atuais de 50 anos, sendo a norma vigente na época a NB-6 (1960). Apesar do projeto estrutural da ponte não ter sido encontrado junto à prefeitura local e departamento de rodagens estadual, a partir da inspeção e colhimento de algumas informações e assumidas as prescrições das NB-1 (1940) e NB-6 (1960) foi realizado um *retrofit* ao dimensionamento mais próximo ao original esperado.

Os coeficientes de ponderação das ações para o estado limite último utilizados na época de construção da ponte eram de 1,65 para cargas permanentes e de 2,00 para cargas móveis. O f_{ck} assumido foi o de 18,00 MPa e o f_y de 250,00 MPa, classe de aços mais comuns à época. O coeficiente de impacto vertical também era calculado diferentemente da atual, sendo de $1,4 - 0,007 \times L = 1,30$, conforme Tabela 1.

A Figura 2 ilustra a geometria da ponte: as longarinas possuem altura de 1,20 m, considerando a laje, e largura de 0,30 m; as quatro transversinas são igualmente espaçadas no comprimento, com altura de 0,45 m, considerando a laje, e largura de 0,20 m. Existe uma pequena barreira ao longo de toda a ponte de 0,30 m de altura e 0,55 m de largura. Desse modo, a faixa única de rolamento, possui 3,50 m de largura.

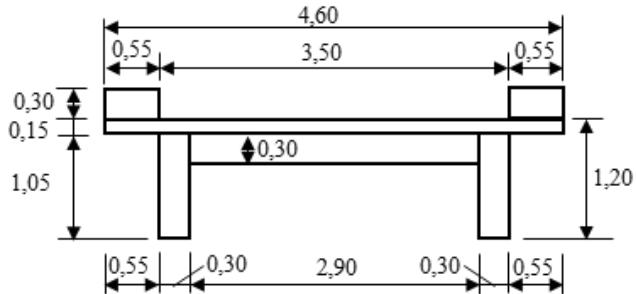


Figura 2 – Seção transversal da Ponte Ribeirão da Cachoeira

Para a consideração da carga da uma ponte rural, o trem-tipo empregado foi o TB-24, de 80 kN por eixo. A Figura 3 mostra o valor das ações permanentes, sendo o peso próprio de 20,73 kN/m e as transversinas consideradas cargas pontuais de 4,30 kN, assim como os diagramas de esforço cortante e momento fletor relativos à ação permanente.

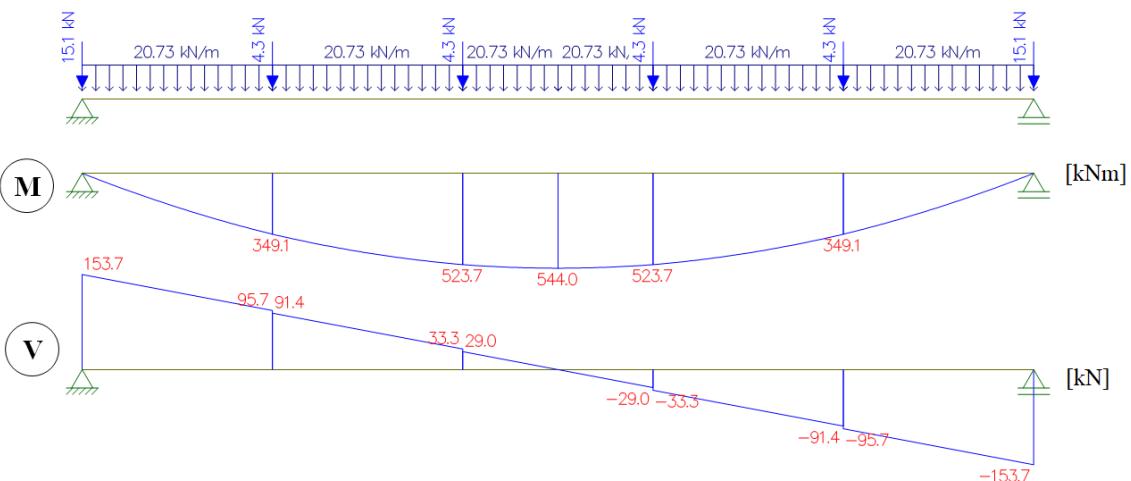


Figura 3 – Diagramas de ações permanentes

A contribuição da carga móvel foi calculada segundo o *Método de Fauchart*, no quinhão de carga para cada longarina. Assim, a longarina recebe um carregamento de 55 kN de cada eixo do trem-tipo (TB-24) e uma carga de multidão de 7 kN/m (Figura 4). As envoltórias dos esforços das longarinas para o TB-24 também estão representadas na Figura 4.

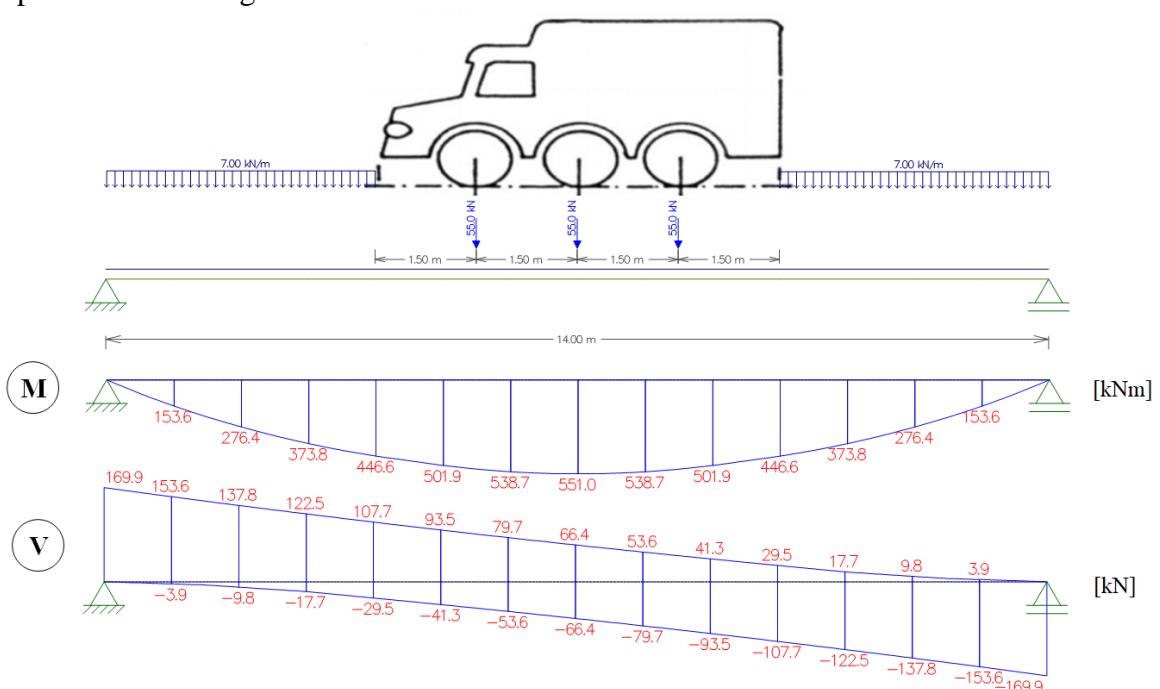


Figura 4 – Diagramas de envoltória dos esforços das longarinas com o TB-24

Considerando os carregamentos das Figuras 3 e 4, foram obtidos os valores do esforço cortante e momento fletor totais, sendo que a cortante máxima se dá nos apoios, no valor de 323,6 kN, e o momento máximo ocorre no meio do vão da longarina, valendo 1.095 kN.m. Utilizando os dados apresentados, foi realizado o dimensionamento da ponte, encontrando linha neutra em 14,85 cm, momento máximo solicitante de 2000,1 kN.m, taxa de armadura à compressão de 2,46 cm² e a tração de 83,59 cm².

Com a recente produção de cana de açúcar em terras da região para abastecer a fábrica da Usina sucroalcooleira, veículos com 9 eixos e 30 metros de comprimento passarão a trafegar pela ponte Ribeirão da Cachoeira. Em uma investigação da capacidade de transporte, foram obtidos dados de 103 mil pesagens dos Rodotrens, baseada na safra 2017-2019 da frota que abastece a fábrica. Foi montando um histograma próprio para os veículos típicos empregados no transporte, conforme a Figura 5.

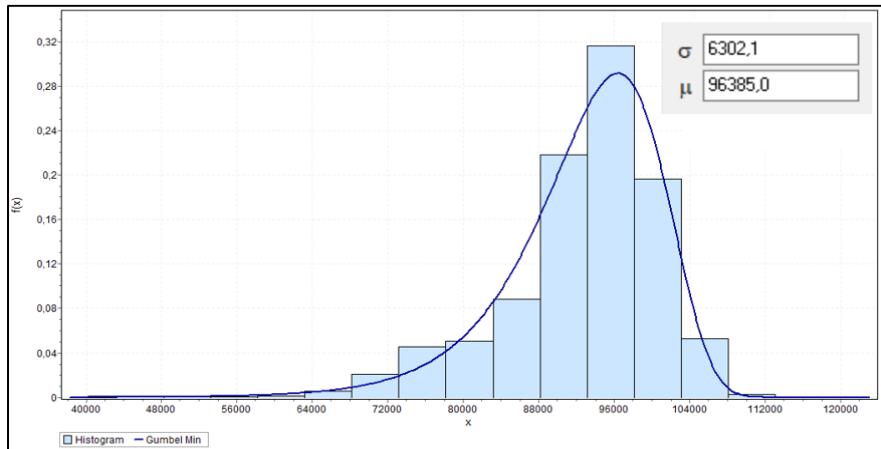


Figura 5 – Histograma de pesagens Rodotrens Canavieiros (Safras 2017-2019)

Segundo os dados obtidos, o peso médio dos Rodotrens foi de 96,385 toneladas e desvio padrão de 6,30 toneladas, numa distribuição de extremos do tipo Gumbel. A Figura 6 apresenta o carregamento médio distribuído por eixo, com a aplicação do *Método de Fauchart*, bem como as dimensões do veículo. Nota-se que o Rodotrem (30 m) tem maior comprimento que a ponte (14 m), sendo necessário encontrar a posição crítica do carregamento, indicado na Figura 6. O veículo possui largura típica de 2,60 m e distância entre eixos de 2,10 m. As envoltórias de esforços das longarinas para o Rodotrem também são representadas na Figura 6.

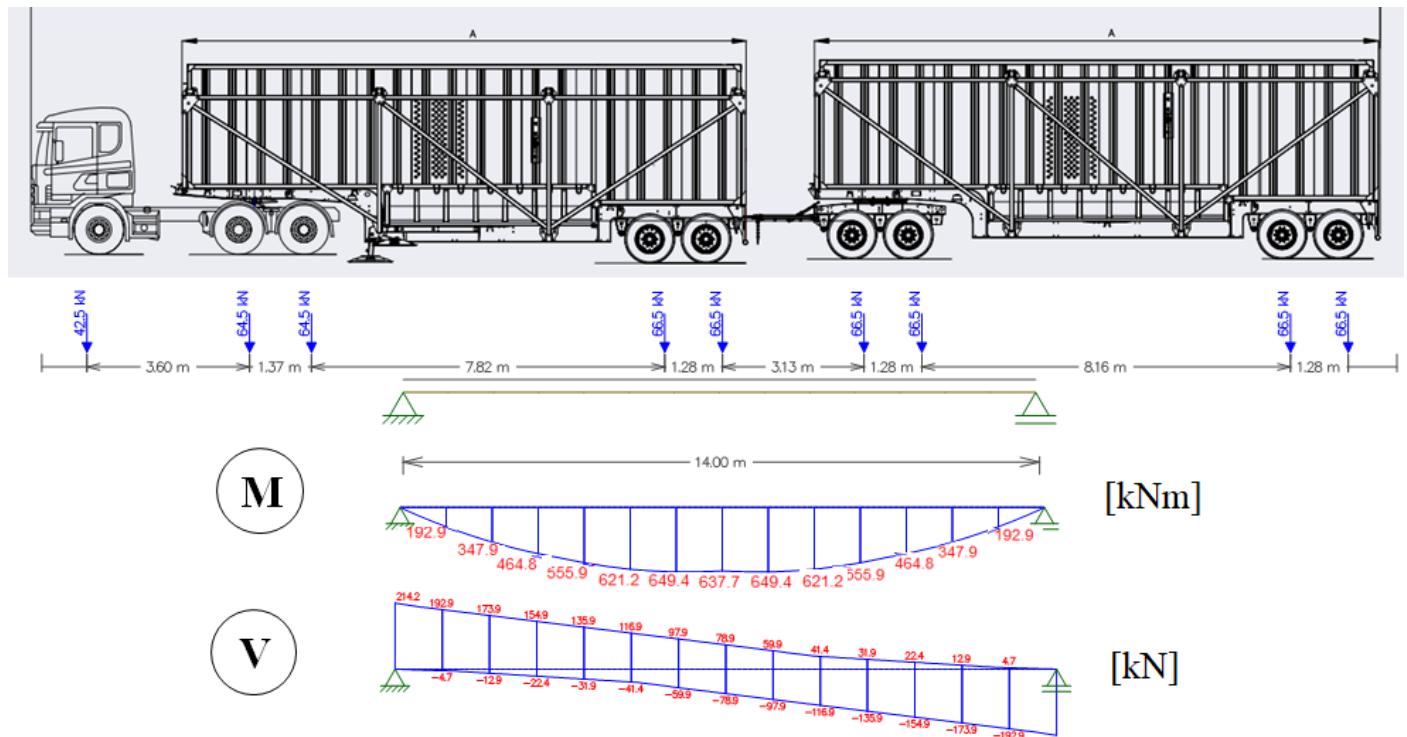


Figura 6 – Diagramas de envoltória de esforços das longarinas com a passagem do Rodotrem

É notória a diferença de dimensão e carregamento entre o trem tipo utilizado no projeto, TB-24, e o Rodotrem. Entretanto, por ser maior que a ponte, o Rodotrem não aplica todo o carregamento a que está submetido, sendo que, na posição crítica, apenas 4 eixos estão sobre a ponte. Assim, considerando a ação permanente e a carga móvel relativa ao Rodotrem, obtém-se uma cortante máxima nos apoios, de 367,9 kN e momento fletor máximo no meio do vão de 1.181,7 kN.m. Nota-se que, comparativamente ao TB-24, houve um acréscimo de 13,7% do esforço cortante máximo advindo da passagem do Rodotrem e de apenas 8% no momento fletor máximo.

A análise dos esforços solicitantes permite perceber que a passagem do Rodotrem influencia na segurança estrutural da Ponte Ribeirão da Cachoeira, aumentando os esforços cortante e de momento. Assim, afim de obter resultados mais fundamentados a cerca dessa segurança, foi realizada a análise de confiabilidade para a ponte em situação de projeto (TB-24) e para ponte com a passagem do Rodotrem, comparando os dois casos e verificando se a ponte garantirá o nível de segurança necessário para o tráfego do primeiro Rodotrem.

4. Análise de confiabilidade estrutural

Em Engenharia de Estruturas cada projeto é único e, na execução desses projetos, a presença de incertezas deve ser considerada. Essas incertezas podem estar relacionadas às propriedades dos materiais, à geometria dos elementos, aos carregamentos, dados estatísticos, de modelo, dentre muitas outras, e se tornam ainda mais evidentes quando é necessário analisar estruturas já construídas, visto que, muitas vezes, não se tem acesso ao projeto ou é difícil mensurar o seu estado atual. A Ponte Ribeirão da Cachoeira se encaixa nesse contexto, sendo uma ponte rural não-pavimentada, objeto do estudo de caso do presente artigo e nos próximos meses, receberá o primeiro transporte de cana de açúcar, feito por Rodotrens de 30 m.

A Confiabilidade Estrutural pode ser definida, segundo Beck (2019), como a capacidade de uma estrutura atender aos requisitos técnicos de projeto, durante a vida útil especificada, respeitando as condições de uso, manutenção e projeto. Para a realização de uma análise de confiabilidade estrutural, parte-se da definição de estado limite como sendo a fronteira entre comportamentos desejados e indesejados. Este limite pode ser representado matematicamente por uma função de estado limite, que descreve o comportamento que se quer analisar. A partir dessa definição e com o auxílio de métodos analíticos e numéricos, podem ser obtidos o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha da estrutura ou componente estrutural. No presente estudo, os métodos empregados foram o First Order Reliability Method (FORM) e Simulação de Monte Carlo (SMC), utilizando o programa StRAnD (BECK, 2017) nas simulações.

Assim, deve-se definir a equação de estado limite para o problema a ser estudado, que pode ser representada como um problema em duas variáveis, a resistência (R) e a solicitação (S). Essa função $g(R, S)$ pode ser definida como a função margem de segurança $M = R - S$, como forma de avaliar a confiabilidade. Assim, é possível definir o valor médio da margem de segurança μ_M , como sendo $\mu_M = \mu_R - \mu_S$, ilustrado na Figura 7, que mostra também a típica condição do projeto em análise.

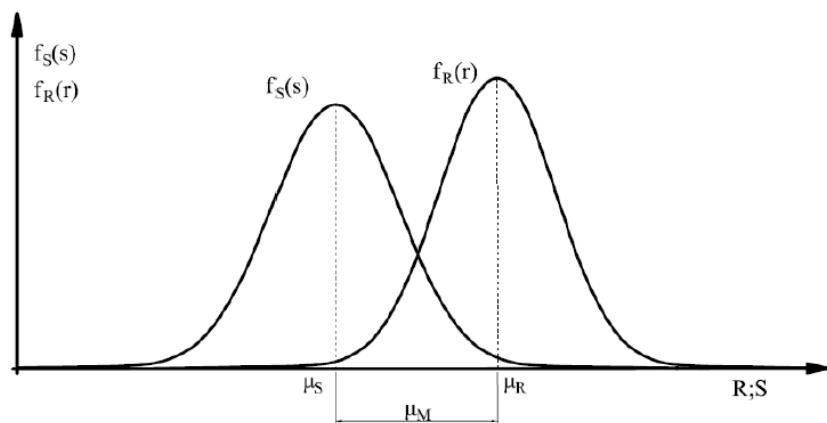


Figura 7 – Função densidade de probabilidade das resistências (R) e solicitações (S)

No presente estudo, as longarinas da Ponte Ribeirão da Cachoeira foram verificadas em relação ao estado limite último a flexão, podendo ser representada de maneira geral pela Equação (1), sendo a resistência representada pelo momento resistente, M_r , multiplicado pelo erro de modelo, θ_r , e a solicitação definida pelo somatório dos momentos da carga permanente, M_g , com a carga variável, M_q , multiplicado por um fator de incerteza das ações, θ_s .

$$g(X) = \theta_r M_r - \theta_s (M_g + M_q) \quad (1)$$

A definição do momento resistente de uma longarina de concreto armado no estado limite último, deve seguir hipóteses básicas que levam a considerar que a seção transversal está no domínio 2, verificando-se que a zona comprimida encontra-se dentro da mesa ($x < 15\text{cm}$, conforme dimensionamento realizado previamente). A Figura 8 apresenta um esquema geral para uma viga T.

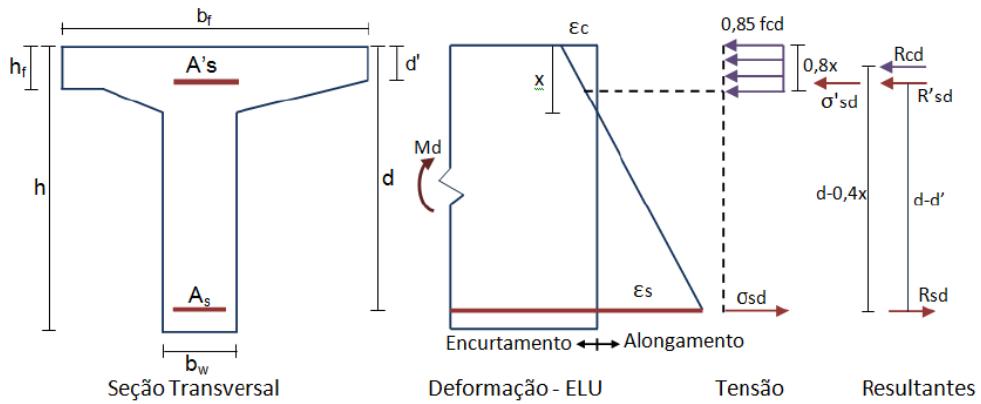


Figura 8 – Esquema geral para uma viga T

Pelo equilíbrio de forças e momentos, obtemos a equação de momento resistente (Equação (2)).

$$M_r = 0,68 \times b_f \times x \times f_{cd} \times (d - 0,4 \times x) + A'_s \times E_s \times \varepsilon_s \frac{x-d'}{d-x} \times (d - d') \quad (2)$$

O momento solicitante é dividido em duas partes, uma relativa às cargas permanentes, dada pela Equação (3), e uma relativa às cargas móveis, explicitada a seguir.

$$M_g = \frac{g \times l^2}{8} \quad (3)$$

Para essa segunda parte, é necessário saber a parcela de carga que cada longarina receberá. Esse cálculo é feito a partir do Método de Fauchart, mostrado na Figura 9(a). Por esse método é possível obter ordenadas, indicando a parcela de carga que a viga recebe da roda mais à esquerda (Y_{f1}) e da roda mais à direita (Y_{f2}). Após a aplicação desse método, deve-se obter a linha de influência da longarina analisada (Figura 9(b)).

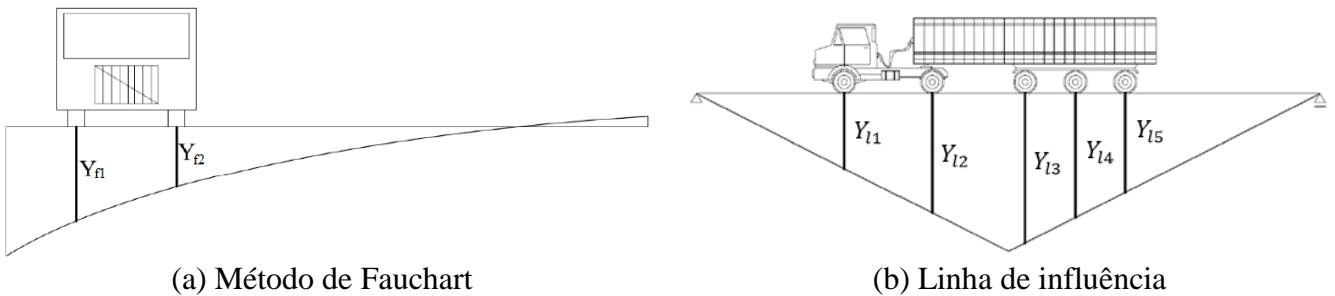


Figura 9 – Método de Fauchart e Linha de influência

Assim, o momento causado pela carga móvel na viga é dado pela Equação 4.

$$M_q = CIV \times (Y_{f1} + Y_{f2}) \times \sum \frac{Q_i}{2} \times Y_{li} \quad (4)$$

Sendo Q_i a carga de cada eixo; Y_{li} a ordenada obtida através da linha de influência longitudinal para cada eixo e CIV o coeficiente de impacto vertical. Logo, a equação de estado limite usada na análise de confiabilidade é dada pela Equação 5.

$$g(X) = \theta_r \left(0,68 b_f \times x \times f_{cd} (d - 0,4x) + A'_s \times E_s \times \varepsilon_s \frac{x-d'}{d-x} (d - d') \right) - \theta_s \left(\frac{gl^2}{8} + CIV(Y_{f1} + Y_{f2}) \times \sum \frac{Q_i}{2} \times Y_{li} \right) \quad (5)$$

No presente trabalho, foram consideradas sete variáveis aleatórias, três relacionadas à resistência, sendo elas a incerteza do modelo, θ_r , a resistência do concreto, f_c , e a resistência do aço da armadura passiva, f_y , e quatro relativas à solicitação, incerteza das cargas, θ_s , carga permanente, g , carga móvel, Q , e coeficiente de impacto vertical, CIV . As sete variáveis foram tratadas como independentes e são detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo das variáveis aleatórias do modelo

Variáveis aleatórias	Média	Desvio Padrão	CV	Distribuição	Referência	
Erro do modelo (Resistência) - θ_r	X1	1,00	0,05	0,05	Lognormal	Santos, Stucchi e Beck (2014)
Erro do modelo (Solicitação) - θ_s	X2	1,00	0,05	0,05	Lognormal	Santos, Stucchi e Beck (2014)
Carga Permanente - g (kN)	X3	$g_k \cdot 1,05 = 22,05$	2,21	0,10	Normal	Galambos et al. (1982)
Carga móvel – Q (kN)	X4	80,0 (TB-240) 220,3 (Rodotrem)	12 15	0,15 0,07	Gumbel Max Gumbel Min	Nowak (1999) <i>Dados de campo</i>
Resistência a compressão do concreto - f_c (kN/m ²)	X5	$f_{ck}/(1 - 1,65 \cdot CV) = 21.556,89$	1.940,1	0,09	Lognormal	Ferreira (2006) Moura (2019)
Resistência a tração do aço - f_y (kN/m ²)	X6	$f_{yk} + 2 \cdot \sigma = 310000$	30000	0,10	Lognormal	Ferreira (2006) Moura (2019)
Coeficiente de Impacto Vertical - CIV	X7	1,33125	0,11	0,08	Normal	Nowak (1999) Moura (2019)

Como mencionado, a carga móvel média devida o Rodotrem foi obtida através de dados de pesagens de safras anteriores da Usina sucroalcooleira. Utilizando-se o software EasyFit, montou-se a curva de distribuição (Figura 5), como o melhor ajuste estatístico para a distribuição de Gumbel para Mínimos.

As variáveis determinísticas (área de aço à compressão, base maior, linha neutra e altura útil) possuem valores obtidos no dimensionamento. Dessa forma, substituindo as variáveis aleatórias e determinísticas na Equação (5), a equação final de estado limite é detalhada pela Equação (6).

$$g(X) = X1(0,155563 \times X5 + 0,0000295446 \times X6) - X2 \times (24,5 \times X3 + X7 \times 6,1875 \times X4) \quad (6)$$

A análise de confiabilidade foi realizada com o auxílio do programa StRAnD (Beck, 2017). As variáveis em azul são ditas de variáveis de resistência e as em vermelho, as de solicitação.

5. Resultados da análise de confiabilidade

Utilizando como dados de entrada a equação de estado limite, as variáveis aleatórias com o tipo de distribuição e os valores de média e desvio-padrão de cada uma, determinou-se o índice de confiabilidade, a probabilidade de falha, o ponto de projeto e os coeficientes de sensibilidade para duas situações das longarinas da Ponte Ribeirão da Cachoeira: Caso 1) em situação de projeto (TB-24) e Caso 2) com a passagem do Rodotrem. A Figura 10 ilustra o resultado da sensibilidade das variáveis para os dois casos.

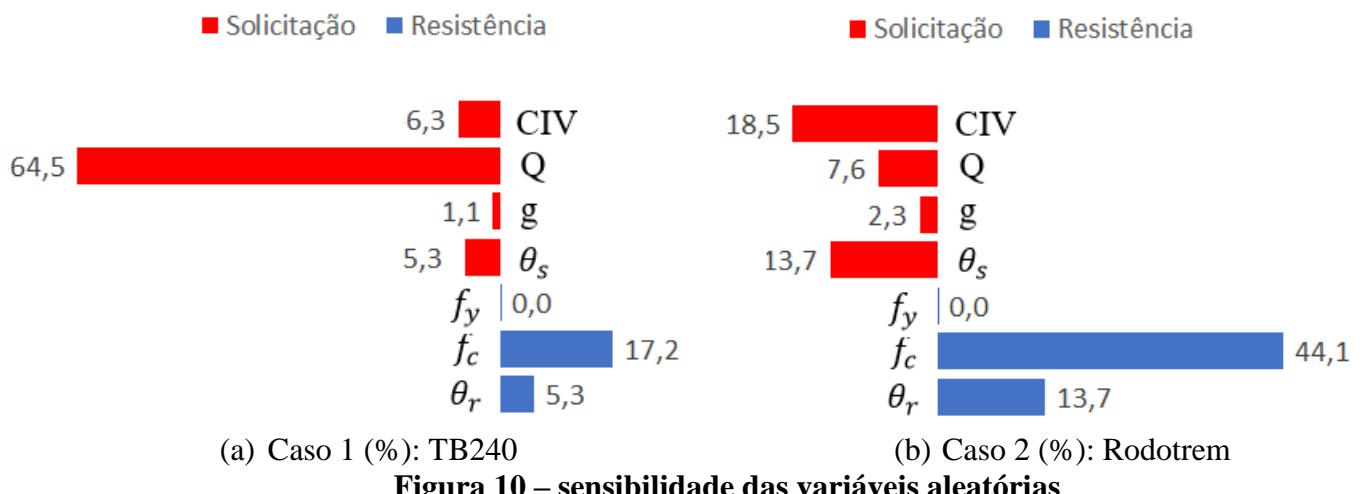


Figura 10 – sensibilidade das variáveis aleatórias

A partir dos gráficos, percebe-se que no primeiro caso (Figura 10(a)), a carga móvel (Q) foi a variável aleatória de maior sensibilidade (64,5%), devido seu coeficiente de variação alto (15%). No segundo caso (Figura 10(b)), o coeficiente de variação da carga móvel foi bem menor, de apenas 7,6%. A resistência a compressão do concreto (f_c) apresentou-se como a variável com maior sensibilidade (44,1%). Observa-se que

algumas variáveis aleatórias, como resistência à tração do aço (f_y) e carga permanente (g), poderiam ser consideradas como determinísticas, devido à baixa influência na análise de confiabilidade. Os valores dos índices de confiabilidade estão apresentados no gráfico comparativo da Figura 11 tanto em relação ao Caso 1: TB-24 com o Caso 2: Rodotrem, quanto em relação aos métodos FORM e SMC.

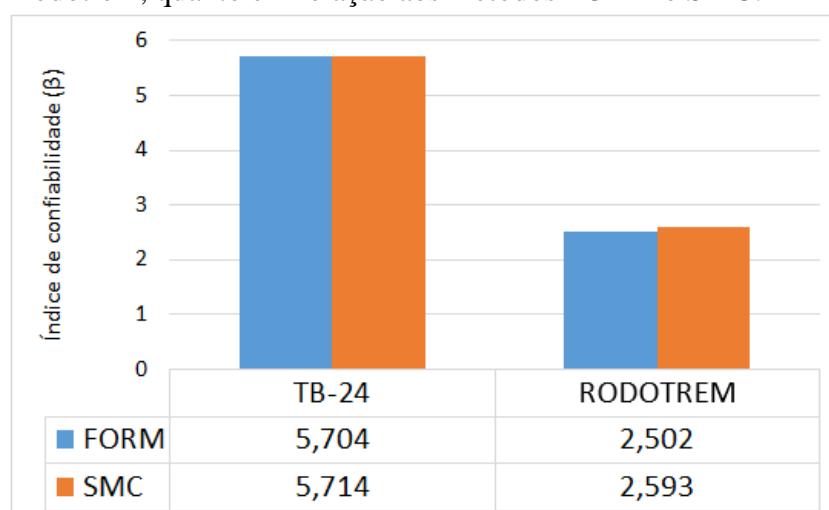


Figura 11 – Comparativo entre os resultados do índice de confiabilidade (β)

O gráfico da Figura 11 mostra, nas primeiras duas colunas, os índices de confiabilidade das longarinas da ponte com o TB-24 (Caso 1) pelo FORM (5,704) e pelo SMC (5,714). As duas últimas colunas são relativas à análise das longarinas da ponte com os Rodotrens (Caso 2) pelo FORM (2,502) e pelo SMC (2,593). Pode-se perceber que os valores dos índices de confiabilidade do FORM e SMC, para cada caso, foram bem próximos. Assim, ambos se mostraram adequados para a análise, porém, para fins comparativos, será utilizado o índice de confiabilidade obtido pela Simulação de Monte Carlo.

Quando comparados o Caso 1 com o Caso 2, constata-se que o índice de confiabilidade teve uma significativa redução, indicando que a probabilidade de falha aumentará com a passagem do Rodotrem pela ponte. Essa confirmação é feita observando os valores da probabilidade de falha, $p_{fSMC} = 5,533 \times 10^{-9}$ para a ponte em situação de projeto (TB-24) e $p_{fSMC} = 4,753 \times 10^{-3}$ para a ponte com a passagem do primeiro Rodotrem. Admitindo-se um índice de confiabilidade alvo (β_{alvo}) de 2,8 (NOWAK, 1999) percebe-se que para o Caso 1 o índice encontrado é bastante satisfatório ($\beta_{SMC} = 5,7$), entretanto, para o Caso 2 ($\beta_{SMC} = 2,6$), o índice de confiabilidade encontrado foi menor que β_{alvo} , sendo contraindicado por estudos e normas.

6. Conclusões

Utilizando os princípios teóricos e dados probabilísticos abordados durante o trabalho, foi realizada a comparação dos esforços solicitantes e a análise de confiabilidade estrutural das longarinas da Ponte Ribeirão da Cachoeira, utilizando o programa StRAnD (Beck, 2017). Foi comparado o caso de projeto, trem tipo TB-24, com o caso que a ponte será exposta nos próximos meses, tráfego de Rodotrens.

Comparando os resultados dos esforços solicitantes, percebe-se que a cortante máxima teve significativo aumento com a passagem do Rodotrem, principalmente no apoio da direita. O momento máximo cresceu apenas 8%, entretanto a sua distribuição na longarina sofreu modificações. Para obter resultados mais precisos quanto à segurança estrutural da longarina da ponte, foi realizada a análise de confiabilidade.

Quanto à análise de confiabilidade, percebe-se que os dois métodos (FORM e Simulação de Monte Carlo) foram bem satisfatórios. Além disso, notou-se que o índice de confiabilidade diminuiu com a passagem do Rodotrem, assim como a probabilidade de falha das longarinas aumentou consideravelmente (de $p_{fSMC} = 5,533 \times 10^{-9}$ para $p_f = 4,753 \times 10^{-3}$). Esse resultado reforça a necessidade de avaliação dessas pontes rurais antigas para esses novos usos devido aos avanços do agronegócio.

Assim, o presente artigo apresenta a problemática, mostrando, por meio de um estudo de caso, o acréscimo nos esforços solicitantes com a passagem do Rodotrem canavieiro. Além disso, avaliando a segurança estrutural das longarinas da Ponte Ribeirão da Cachoeira por meio da análise de confiabilidade, pode-se concluir que, mesmo com a probabilidade de falha não indicando o colapso imediato da ponte, ou seja, na primeira passagem do Rodotrem, a segurança da estrutura não está garantida para o período que os Rodotrens irão trafegar. Isso porque, o índice de confiabilidade encontrado para a ponte com a passagem do

Rodotrem ($\beta = 2,6$) foi menor que o alvo ($\beta_{alvo} = 2,8$), sendo uma contra-indicação em aspecto de segurança. Vale lembrar também que não foi considerada a deterioração da ponte nem a quantidade de ciclos de fadiga que já foi submetida, sendo recomendada a inclusão dessas análises em trabalhos futuros. A verificação de pontes com vãos maiores e com outros sistemas estruturais também é indicada para trabalhos futuros. Dessa forma, recomenda-se o planejamento de intervenções de manutenção e reforço na Ponte Ribeirão da Cachoeira.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NB-1: Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro, RJ. 1940.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NB-6: Carga móvel em ponte rodoviária. Rio de Janeiro, RJ. 1946.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NB-6: Carga móvel em ponte rodoviária. Rio de Janeiro, RJ. 1960.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, RJ. 2003
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7187: Projeto de Pontes de Concreto Armado e de Concreto Protendido – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188: Carga Móvel Rodoviária e de Pedestres em Pontes, Viadutos, Passarelas e Outras Estruturas. Rio de Janeiro, 2013.
- BECK, A. T. Confiabilidade e Segurança das Estruturas. Brasil: GEN LTC. 448 p. 2019.
- CEPEA ESALQ. PIB do agronegócio Brasileiro. 2021. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>. Acesso em: 26, março, 2021.
- FERREIRA, L. M. Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2006.
- GALAMBOS, T. V. Design Codes, Engineering Safety. MC Gral Hill, 1982.
- LEMOS, R. Instituto Brasil Logístico. 2019. Modal Rodoviário. Disponível em: <<https://institutobrasillogistico.com.br/modal-rodoviaro/>>. Acesso em: 26, março, 2021.
- MELCHERS, R. E; BECK, A. T. Structural reliability: Analysis and prediction. England, John Wiley & Sons. 424 p. 2018.
- MENDES, P. D. T. C. Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicada à rede de rodovias brasileiras. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2009.
- MOURA, M. W. Avaliação da confiabilidade de longarinas de concreto protendido de pontes rodoviárias em relação ao estado limite último de flexão. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina 2019.
- NOWAK, A. S. Calibration of LRFD Bridge Design Code. National Cooperative Highway Research Program. Report 368. 1999.
- SANTOS, D. M.; STUCCHI, F. R.; BECK, A. T. Confiabilidade de vigas projetadas de acordo com as normas brasileiras. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Volume 7, Number 5, p. 723-746, October, 2014.