

Metodologia de Avaliação Estrutural para Longarinas de Pontes de Concreto Armado sem Dados de Projeto: Uma Análise Probabilística

*Matheus Sant'Anna Andrade*¹

*André T. Beck*²

*Diogo S. Oliveira*³

*Carol F. R. Santos*⁴

*Bruno S. Borges*⁵

*Fernando G. Bellon*⁶

*José Carlos L. Ribeiro*⁷

*José Maria F. Carvalho*⁸

*Kléos M. L. César Jr.*⁹

Resumo

As pontes têm uma vida útil de serviço e, com o passar dos anos, tais estruturas estão naturalmente sujeitas a processos de deterioração que afetam a sua capacidade de resistir aos esforços. Devido à idade avançada de grande parte das pontes brasileiras e à inexistência de um sistema de gestão eficiente, muitas informações se perderam ao longo dos anos. Desse modo a ausência de dados básicos de projeto dificulta a análise do comportamento de estruturas antigas frente aos carregamentos atuais e às cargas especiais. Este trabalho busca analisar o comportamento de pontes antigas por meio de três níveis de análise estrutural, considerando um nível crescente de informações, denotados Nível I, Nível II e Nível III. Foram realizadas as análises de três pontes de concreto armado considerando os três níveis de informações. Além disso, cada ponte foi analisada para o trem-tipo de projeto (Classe 36 ou TB450), o trem-tipo vigente TB450 (45 t) e um veículo especial transportando uma carga indivisível, PBT200 (200 t). Por meio da análise probabilística desenvolvida observou-se que pontes antigas tendem a apresentar maiores probabilidades de falha por terem sido dimensionadas para cargas menores e, também, por adotarem materiais com resistência inferior. Quanto aos níveis de análise, conforme aumenta-se o nível utilizado na análise estrutural, o índice de confiabilidade β da análise é aumentado e a probabilidade de falha é reduzida. Além disso, observou-se que o Nível I de análise mostra-se conservador em comparação aos demais, o que favorece a adoção de uma análise simplificada para avaliação da segurança estrutural de pontes de concreto armado sem dados de projeto.

Palavras-chave: Pontes de concreto armado; Pontes sem dados de projeto; Segurança Estrutural; Análise Probabilística.

1 Introdução

As pontes são importantes estruturas para o sistema socio e econômico de um país, pois conectam pessoas e possibilitam o transporte de bens e serviços. Tais estruturas se tornam especialmente importantes em um país como o Brasil, em que o transporte rodoviário é o modal predominante. (MASCARENHAS; CARVALHO; VITÓRIO, 2019). No contexto nacional um estudo realizado por Mendes (2009) mostrou

que grande parte das pontes que compõem a malha rodoviária federal brasileira tinham, já naquela época mais de 40 anos. Inevitavelmente, em 2022 essas estruturas já ultrapassaram sua vida útil de projeto.

Paralelamente ao envelhecimento das estruturas, ao longo desse período, houve grande evolução dos critérios normativos de dimensionamento de estruturas e das propriedades dos materiais utilizados (MITRE, 2005). Outro ponto que vem somar aos diversos problemas, está relacionado às características dos

¹ Universidade Federal de Viçosa (UFV) / Departamento de Engenharia Civil (DEC)/ matheus.andrade@ufv.br

² Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Eng. de São Carlos, USP / atbeck@sc.usp.br

^{3,4,5,6,7,8,9} DEC/UFV/ diogooliveira@ufv.br³, carolrezende@ufv.br⁴, bruno.s.borges@ufv.br⁵, fernando.bellon@ufv.br⁶, jcarlos.ribeiro@ufv.br⁷, josemaria.carvalho@ufv.br⁸, kleos@ufv.br⁹

veículos que trafegam nas rodovias brasileiras, que têm mudado significativamente nas últimas décadas, principalmente aumentando em variedade, quantidade e capacidade de carga transportada (JUNGES, 2017; MENDES; MOREIRA; PIMENTA, 2012). Ao mesmo tempo em que as estruturas se deterioraram com o passar dos anos, houve o aumento das solicitações às quais elas estão submetidas.

Deve-se destacar que, devido à idade avançada de grande parte das estruturas e à inexistência de um sistema de gestão eficiente, muitas informações se perderam ao longo dos anos, desde as básicas como o ano de construção ou veículo-tipo de projeto até informações mais complexas como o detalhamento do projeto estrutural. Desse modo a ausência de dados básicos dificulta muito a função de engenheiros encarregados deste tipo de análise.

De acordo com a NBR 7187 (ABNT, 2021), para estruturas em que não se tem acesso aos dados de projeto e não existem detalhes construtivos suficientes para embasar uma análise completa do comportamento da estrutura, deve-se reconstituir o projeto original utilizando critérios, recomendações e normas da época de sua construção. Além disso, a segurança estrutural deve ser verificada para as condições atuais de solicitações e normas vigentes. No entanto, apesar de exigir reconstituição do projeto, a NBR 7187 (ABNT, 2021) não estabelece critérios para considerar a deterioração da estrutura, conforme adotado em outros países (AASHTO, 2018; KUŠAR; ŠELIH, 2014; OZAKGUL; YILMAZ; CAGLAYAN, 2022; ŽNIDARIČ *et al.*, 2015).

Desse modo é essencial que as pontes antigas passem por um processo de avaliação estrutural para analisar a capacidade de resistir a esforços do tráfego atual e cargas especiais. Este trabalho se propõe a realizar uma análise probabilística do comportamento estrutural de pontes em viga de concreto armado considerando a inexistência dos dados de projeto.

2 Avaliação da confiabilidade estrutural de pontes de concreto armado

A análise de confiabilidade estrutural avalia a segurança de uma estrutura pela sua probabilidade de falha de acordo com as equações de estado limite. A margem de segurança de uma estrutura $-G(x)$ é dada pela diferença entre a capacidade resistente de uma estrutura $-R(x)$ e as solicitações $-S(x)$, conforme a Equação (1). O problema fundamental da probabilidade de falha é determinar a probabilidade de que esse estado limite seja atendido, conforme a Equação (2):

$$G(x) = R(x) - S(x) \quad (1)$$

$$p_f = P\{S(x) > R(x)\} = P\{G(x) \leq 0\} \quad (2)$$

Normalmente, em uma análise de confiabilidade estrutural, determina-se a probabilidade de falha p_f de uma estrutura e o seu índice de confiabilidade β . A probabilidade de falha de uma estrutura e o índice de confiabilidade se correlacionam de acordo com a Equação (3). Para uma variável normal padrão o índice de confiabilidade pode ser entendido como uma medida geométrica em função da margem de segurança $-G(x)$.

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

Santos *et al.* (2022) avaliaram a segurança estrutural de pontes de concreto armado e verificaram que as incertezas relacionadas às propriedades geométricas dos elementos apresentam baixa influência sobre a ruptura da estrutura. De maneira semelhante, Al-Ansari (2015) conduziu uma análise de confiabilidade para vigas T, considerando as propriedades geométricas da seção como variáveis determinísticas e, portanto, sem considerar as incertezas relacionadas à essas grandezas.

Santos *et al.* (2022) também avaliaram a segurança estrutural de pontes de concreto armado considerando dois critérios para determinação das solicitações características de acordo com os coeficientes parciais de segurança propostos pela NBR 8681 (ABNT, 2004) e pela NBR 7187 (ABNT, 2021). A NBR 8681 (ABNT, 2004) é voltada para projeto de estruturas, ou seja, obras novas, enquanto a NBR 7187 (ABNT, 2021) propõe coeficientes para a avaliação da segurança estrutural de estruturas existentes. Tal análise mostrou que algumas pontes só apresentam segurança adequada quando considerados os coeficientes propostos pela NBR 7187 (ABNT, 2021). Além disso, verificou-se que para todas as pontes analisadas as seções dos apoios apresentaram índices de confiabilidades menores que as seções do vão.

3 Metodologia

3.1 Níveis de análise estrutural

Visto que as estruturas em análise não possuem dados de projeto estrutural disponíveis, são propostos três níveis de análise considerando um nível crescente de informações. O acréscimo de informações sobre a estrutura é considerado neste trabalho por meio da obtenção de informações sobre a resistência do concreto e, a partir deste dado estima-se a área de armaduras necessárias, conforme descrito a seguir:

- Nível 1 – não existem informações disponíveis sobre a resistência do concreto. A resistência do concreto é estimada com base em critérios de projeto e as áreas das armaduras são obtidas por reconstituição do projeto com base nas normas da época de construção da estrutura;
- Nível 2 – são utilizados modelos de previsão da resistência com base em resultados de ensaio de propagação de pulso ultrassônico. Assume-se uma distribuição normal com a média e desvio-padrão a partir dos ensaios realizados;
- Nível 3 – a resistência do concreto é obtida com base na extração e ruptura de testemunhos. Adota-se uma distribuição normal para a resistência do concreto com a média e o desviopadrão obtidos pela ruptura dos testemunhos.

3.2 Reconstituição do projeto estrutural

Apesar de partirem de quantidades diferentes de informações sobre a estrutura, todos os níveis de análise têm em comum o processo de reconstituição do projeto estrutural para obtenção das áreas de armaduras necessárias para resistir aos esforços de projeto. Para a reconstituição é essencial determinar o ano de construção da estrutura, a partir do qual será identificada a norma técnica em vigência na época de construção.

A partir de uma inspeção rotineira, podem ser obtidas as medidas de geometria necessárias para determinar os esforços e os parâmetros de projeto. Tem-se como resultado do processo de reconstituição em Nível I, a resistência mínima do concreto $f_{ck,min}$ e a área de aço necessária correspondente $A_{s,nec}$. Para os Níveis II e III, a resistência do concreto é um parâmetro de entrada na reconstituição e obtém-se apenas a área de aço necessária para resistir as solicitações de projeto.

Conforme proposto por Cardoso (2022), a resistência do concreto $f_{ck,min}$ a ser considerada no Nível I, é obtida pelo valor mínimo entre o estabelecido por norma (mínimo permitido) e a resistência necessária para que a estrutura passe na verificação da biela comprimida ao se verificar a força cortante resistente da seção mais carregada.

4 Verificação Estrutural

No caso de pontes em viga de concreto armado submetidas à flexão, são realizadas três verificações quanto à segurança estrutural, sendo estas a verificação

aos momentos fletores positivo e negativo e a verificação ao cisalhamento. Para a verificação quanto às forças de tração na flexão (momento fletor positivo e negativo), pode-se estimar a resistência da seção com base no equilíbrio de forças entre as resultantes comprimida e tracionada.

A análise da segurança de uma viga longarina submetida à flexão aos momentos fletores positivo e negativo é dada pela Equação (4). Neste trabalho, estas verificações são tratadas como os Estados Limites I e II, respectivamente.

$$G = A_s f_y \cdot \left(d - \frac{1}{2} \cdot \frac{A_s f_y}{0.85 \cdot f_c \cdot b} \right) - (\gamma_G M_{Gk} + \gamma_G \varphi M_{Qk}) = 0 \quad (4)$$

sendo A_s a área de armaduras positiva ou negativa; f_y , a resistência do aço ao escoamento; d , a altura útil da seção transversal; f_c , a resistência do concreto; b , a largura da seção; M_{Gk} e M_{Qk} são as solicitações características aos carregamentos permanente e móvel, respectivamente; φ o fator de amplificação dinâmica; e γ_G e γ_Q são os coeficientes de majoração para combinação de ações.

A verificação estrutural ao cisalhamento é realizada de acordo com os princípios normativos da NBR 6118 (ABNT, 2014), que indica a necessidade de verificação da tração nos tirantes representados pela armadura transversal (Equação (5)). Esta verificação é tratada neste trabalho como o Estado Limite III.

$$G = 0,6 \cdot f_{ct} \cdot b_w \cdot d + \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yw} - (\gamma_G V_{Gk} + \gamma_Q \varphi V_{Qk}) = 0 \quad (5)$$

sendo α_{v2} um fator em função da resistência do concreto à compressão; f_{ct} , a resistência do concreto à tração e A_{sw}/s a área de armadura transversal.

5 Estudos de caso

Este trabalho se propõe a analisar a probabilidade de falha de três pontes em viga de concreto armado, considerando diferentes níveis de informação sobre as estruturas. Inicialmente deve-se realizar o levantamento de informações sobre as estruturas em análise, conforme apresentado na Tabela 1. Todas as estruturas em análise são pontes em viga de concreto armado, dimensionadas de acordo com as respectivas

de um coeficiente de impacto φ igual a 1,0. Ainda, a combinação de ações a ser considerada nesse caso também é diferente, tratando-se de um Combinação Especial ou de Construção, conforme estabelecido na NBR 8681 (ABNT, 2004). Os coeficientes majoradores das solicitações e o coeficiente de impacto são definidos a partir da normatização brasileira atual. A NBR 7187 (ABNT, 2021) permite, para obras rodoviárias existentes sem limitações estruturais identificadas, a redução dos coeficientes de majoração das solicitações ($\gamma_G=1,2$ e $\gamma_Q=1,35$).

5.2 Definição das variáveis aleatórias

5.2.1 Resistência do concreto

Conforme observado por Santiago e Beck (2017) assumiu-se uma distribuição normal para a variável aleatória que representa a resistência do concreto. No entanto, como essa variável é dependente tanto da estrutura quanto do nível de detalhamento da análise, a resistência é caracterizada por distribuições com média e desvio-padrão específicos para cada caso, conforme apresentado na Tabela 2. Destaca-se o Nível I de análise, para o qual assumiu-se uma única distribuição normal com os parâmetros determinados por Santiago e Beck (2017) para um concreto com resistência característica igual a 20 MPa.

5.2.2 Demais variáveis aleatórias

Assim como destacado anteriormente, o aumento do nível de análise é caracterizado inicialmente pelas informações mais precisas sobre a resistência do concreto adotada. Sendo assim, todas as demais variáveis aleatórias apresentam as mesmas propriedades em todos os níveis de análise, conforme apresentado na Tabela 3.

5.3 Deterioração da capacidade resistente da estrutura

A consideração da perda de capacidade resistente da estrutura devido à deterioração de seus elementos, foi obtida por meio da formulação proposta pela AASHTO (2018). Como a análise deste trabalho incluiu a realização de inspeção especial com diversos ensaios não-destrutivos, descritos detalhadamente em Cardoso (2022), pode-se verificar a real condição de cada estrutura. Desse modo optou-se por considerar o coeficiente de degradação da capacidade resistente apenas para o Nível I, em que a resistência do concreto é estimada através da norma de projeto. Para a ponte de Teixeira adotou-se um coeficiente igual a 0,85 e para as demais pontes o coeficiente igual a 0,95.

Tabela 2 – Variáveis aleatórias para representação da resistência do concreto.

Nível	Estrutura	Distribuição	Média	Desvio	Fonte
	fc (C20)	Normal	1,30 fck	0,20· μ	Santiago e Beck (2017)
		–	15		
		–	25		
		–	15	–	
		Normal	14,83	4,60	
		Normal	36,07	4,63	
		Normal	33,87	6,48	
		Normal	13,9	3,1	
		Normal	36,4	2,6	
		Normal	39,3	5,6	
Nível I	Teixeiras			–	
	Piranga			–	Cardoso (2022)
	Coimbra				
	Teixeiras				
Nível II	Piranga				*
	Coimbra				
	Teixeiras				
Nível III	Piranga				Cardoso (2022)
	Coimbra				

* Dados obtidos pelo autor a partir de ensaios de velocidade de propagação de pulso ultrassônico.

6 Resultados

6.1 Reconstituição do projeto estrutural

Conforme estimado, as pontes de Teixeira e Coimbra, foram construídas aproximada em 1985, de acordo com os critérios da NBR 6118 (1980), para um veículo-tipo Classe 36. A ponte de Piranga, possui ano de construção estimado em 2013, com veículo-tipo TB-450, dimensionada conforme a NBR 6118 (2008).

Com base nos critérios normativos das normas citadas, foram estimadas as áreas de aço necessárias para resistir aos esforços de projeto de cada estrutura, conforme apresentado na Tabela 4. De acordo com os preceitos normativos tanto da NBR 6118 (1980) quanto da NBR 6118 (2008), o cálculo da área de armadura para resistir ao momento fletor se baseia no equilíbrio de forças da seção transversal. Desse modo, o aumento da resistência do concreto provoca a redução da área de aço necessária, similar ao que pode ser observado na Tabela 4.

Com base nos resultados obtidos a partir da reconstituição, percebe-se que, para a análise ao momento fletor positivo, o aumento da resistência do concreto, mesmo que significativo, não resulta em uma redução proporcional da área de aço. Por exemplo, no caso da ponte de Coimbra, entre o Nível I e o Nível III

de análise, houve um aumento de 162% na resistência do concreto, que resultou em uma redução de apenas 2,7% na área de aço necessária para resistir ao momento fletor positivo.

Tal comportamento está relacionado aos princípios de dimensionamento de uma viga-T, uma vez que devido à grande dimensão da mesa colaborante, o aumento da resistência do concreto, provoca pequenas alterações na posição da linha neutra e consequentemente, pequenas mudanças na área de armadura necessária. Isso indica que a resistência do concreto apresenta pouca influência sobre a área de aço necessária e, portanto, sobre o momento positivo resistente da seção transversal.

Por outro lado, quando se analisa a área de armadura necessária para resistir ao momento fletor negativo, a área de concreto comprimida é obtida em função da largura da viga, b_f , e portanto, o aumento da resistência do concreto leva a uma maior alteração da posição da linha neutra. Desse modo, o aumento da resistência, apresenta maior influência na área de armadura necessária, como pode ser observado pela mudança do Nível I de análise para o Nível II na ponte de Coimbra, em que houve uma redução de 20% da área de aço. De maneira similar, a resistência do concreto também apresenta uma maior influência sobre o momento negativo resistente da seção transversal.

Tabela 3 – Variáveis aleatórias constantes em todos os níveis de análise.

Categoria	Variável	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Fonte
Propriedades do aço	f_y	Normal	$1,22 \cdot f_{yk}$	$0,04 \cdot \mu$	Santiago <i>et al.</i> (2020)
	$A_s/A'_s/(A_{sw}/s)$	Normal	A_s	$0,02 \cdot \mu$	JCSS (2001)
Parâmetros geométricos	$b_f / b_w / d$	Normal	b_w	4mm $+ 0,006 \cdot \mu$	JCSS (2001)
Solicitações	G	Normal	$1,06 \cdot G_{1k}$	$0,12 \cdot \mu$	Santiago <i>et al.</i> (2020)
	Q	Gumbel Max	094 TB450	$0,18 \cdot \mu$	Lyra <i>et al.</i> (2020)

Tabela 4 – Áreas de armadura obtida por reconstituição do projeto estrutural.

Variável	Estrutura	Nível I	Nível II	Nível III
A_s (cm ²)	Teixeiras	107	107,1	107,5
	Piranga	80,3	79,5	79,5
	Coimbra	95,1	92,8	92,5
A_s' (cm ²)	Teixeiras	94,5	94,8	97,0
	Piranga	84,2	81,1	81,0
	Coimbra	152,1	122,0	120
A_{sw}/s (cm ² /m)	Teixeiras	19,0	19,1	19,2
	Piranga	23,9	22,5	22,5
	Coimbra	25,6	23,1	22,5

6.2 Solicitações características

As solicitações características para os veículos-tipos analisados foram obtidas por meio de modelos de elementos finitos desenvolvidos para cada estrutura utilizando o *software* CSI Bridge v.23.3. Por meio dos resultados obtidos, percebe-se algumas particularidades quanto às solicitações. Apesar de o veículo PBT-200 ter peso bruto total muito acima dos demais veículos analisados, o fato de ser um veículo muito longo e possuir várias linhas de eixos, afeta de maneira diferente a distribuição de esforços em cada estrutura. Desse modo, o veículo PBT-200, não resulta no carregamento crítico em todas as situações.

Além disso, o veículo especial PBT-200 tem especificação de tráfego lento sobre a estrutura, o que resulta em um coeficiente de amplificação dinâmica é igual a 1,0. Desse modo, além de o TB-450 apresentar solicitações características mais elevadas que o PBT-200, sua carga será multiplicada pelo fator de amplificação dinâmica, o que indica que o veículo TB-450 tende a ser o veículo crítico para as estruturas em análise.

6.3 Análise probabilística

O índice de confiabilidade para cada estrutura,

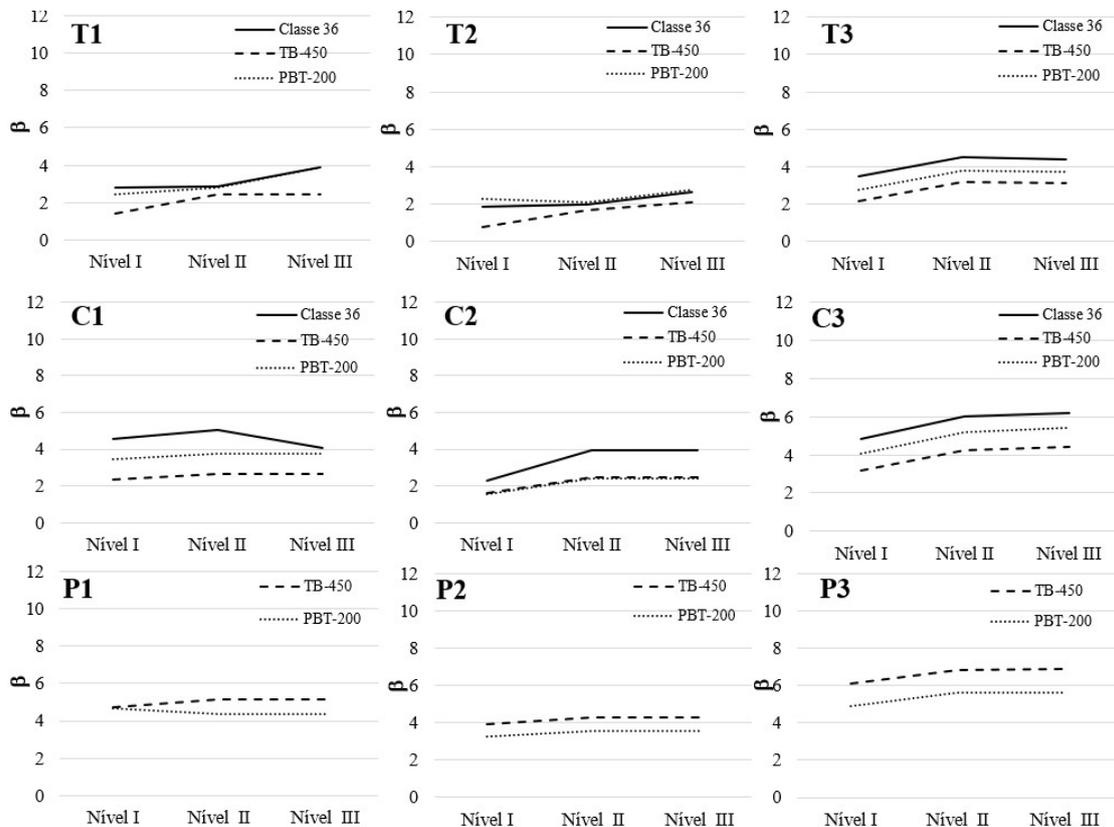


Figura 2 – Índices de confiabilidade obtidos para as estruturas em análise.

de acordo com o nível de informações e o veículo analisado é apresentado na Figura 2, onde os gráficos estão identificados pela inicial da ponte (C-Coimbra, P-Piranga ou T-Teixeiras) e de acordo com equação de estado limite analisada (1 – Momento Fletor Positivo, 2 – Momento Fletor Negativo e 3 – Esforço Cortante). Inicialmente, destaca-se que existe uma tendência geral de que o índice de confiabilidade aumente e conforme aumenta-se o nível de informações utilizado na análise, como pode ser observado pelos gráficos apresentados na Figura 2. No entanto, deve-se destacar, que o aumento do nível de informações torna a análise mais precisa e, não necessariamente, resulta em um maior índice de confiabilidade, como pode ser observado para a ponte em Teixeira, em que a extração de corpos de prova indicou uma resistência abaixo da necessária segundo os critérios normativos da época.

Além disso, o veículo PBT-200, apesar de ser o maior e mais pesado, não apresenta o carregamento móvel crítico. Assim, de maneira geral, verificou-se que o veículo TB-450 resulta nos menores índices de confiabilidade, sendo este o veículo crítico para as estruturas. Com base nos gráficos apresentados na Figura 2 é possível observar ainda que em todas as estruturas, a equação de estado limite número 2, que representa a análise ao momento fletor negativo, apresentou os menores índices de confiabilidade,

sendo, portanto, o modo de falha crítico em todos os casos analisados. Esse resultado se assemelha ao identificado por Santos *et al.* (2022).

6.3.1 Probabilidade de falha

A partir das análises desenvolvidas, foram obtidas as probabilidades de falha apresentadas na Figura 3. De acordo com Melchers e Beck (2018), a probabilidade de falha histórica observada de pontes, para uma vida média de 40 anos, é da ordem de 10^{-3} , sendo assim, esse valor será tomado como referência para analisar os resultados obtidos nesse trabalho.

De maneira geral a ponte de Teixeira apresentou as maiores probabilidades de falha, enquanto a ponte de Piranga apresentou as melhores condições de segurança, com probabilidades de falha inferiores ao valor de referência fornecido por Melchers e Beck (2018). Isso mostra que pontes antigas, dimensionadas para um veículo-tipo com carga inferior ao TB 450, apresentam maiores probabilidades de falhas que pontes atuais.

Por outro lado, destacam-se os resultados obtidos para Teixeira no Estado Limite II (momento fletor negativo) por apresentar probabilidade de falha em uma ordem de grandeza maior que 10^{-3} para todos os veículos estudados nos Níveis I e II. Além disso, a

máxima probabilidade de falha observada neste estudo foi identificada para a ponte de Teixeira, em uma análise Nível I para o veículo TB-450. Nessa condição, a estrutura apresentou uma probabilidade de falha igual a 0,22. Tal probabilidade de falha é considerada elevada e pode estar relacionada, entre outros fatores, ao fato de esta estrutura ter sido dimensionada para uma carga inferior (veículo Classe 36) à analisada. Além disso, como a análise em Nível I é baseada em uma série de simplificações sobre a estrutura, esta é acrescida de um fator de redução da sua capacidade resistente que visa considerar uma perda de capacidade devido à deterioração da estrutura durante seu tempo em serviço.

Ademais, destaca-se o comportamento da ponte Coimbra que também apresentou probabilidades de falha superiores à sugerida por Melchers e Beck (2018) em análises Nível I para o Estado Limite II em todos os veículos analisados. Nesse caso a maior probabilidade de falha em comparação aos Níveis II e III provavelmente está relacionada com a estimativa da resistência à compressão do concreto (15 MPa) ter se mostrado muito abaixo da resistência real nessa estrutura (39 MPa), influenciando negativamente a probabilidade de falha observada.

Por meio da metodologia de análise proposta nesse trabalho, considera-se que o Nível III de análise é aquele que mais se aproxima do comportamento

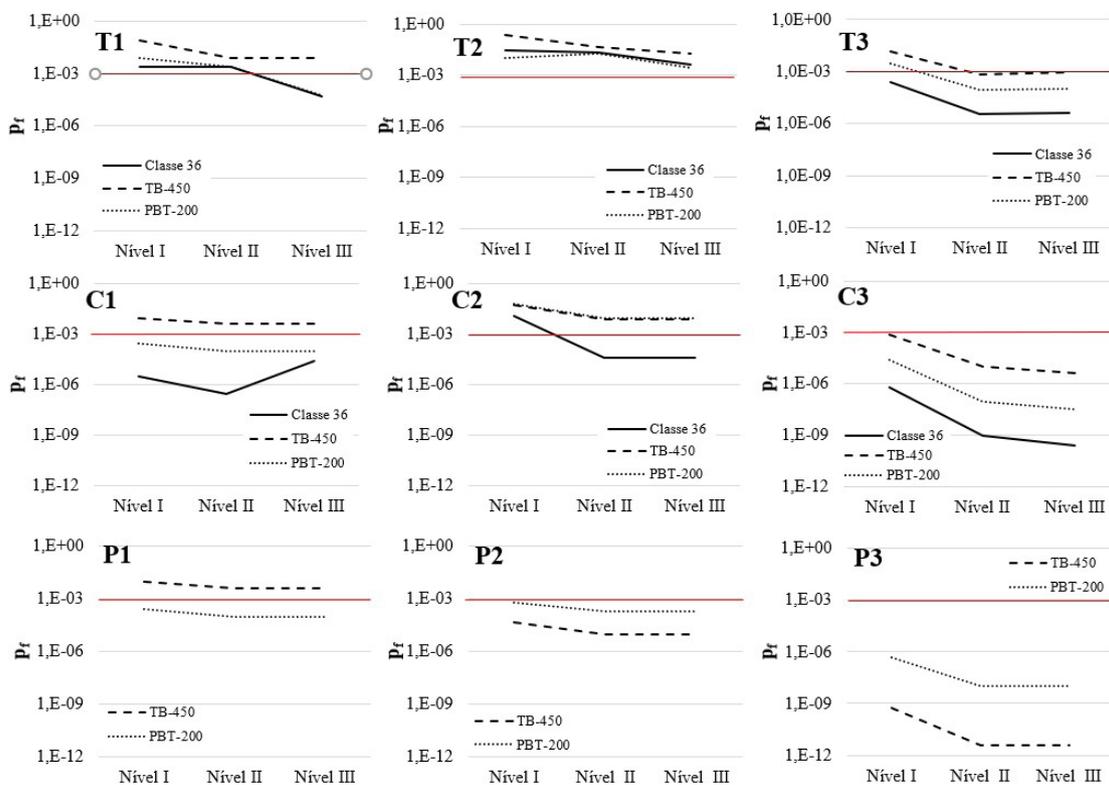


Figura 3 – Probabilidades de falha obtidas para as estruturas em análise

real da estrutura, desse modo assume-se que os resultados obtidos para esse nível são os que melhor caracterizam a estrutura. Verificou-se que o Nível I de análise se mostra bastante conservador, fornecendo probabilidades de falha maiores que o valor de referência proposto por Melchers e Beck (2018), enquanto a análise mais complexa em Nível III indica maiores níveis de segurança.

Assim, a metodologia proposta, mesmo que de maneira preliminar, indica que a simplificação da análise da estrutura por meio da reconstituição do projeto estrutural se mostra como uma boa alternativa para superar a falta de dados de projeto de pontes antigas.

7 Conclusões

A partir da análise probabilística desenvolvida neste trabalho foram obtidas as conclusões relacionadas a seguir:

Em geral, conforme aumenta-se o nível de informações utilizado na análise estrutural, aumentase o índice de confiabilidade da análise e diminui-se a probabilidade de falha.

Quando a resistência do concreto utilizada em projeto é maior do que a mínima exigida por norma, um nível maior de informações, tende a gerar maiores índices de confiabilidade e menores probabilidades de falha. Por outro lado, quando a resistência do concreto é menor que o mínimo exigido por norma, informações mais precisas geram a redução dos índices de confiabilidade.

O momento fletor negativo foi a solicitação crítica em todos os casos analisados, resultando sempre em maiores probabilidades de falha.

A pontes antigas tendem a apresentar menores índices de confiabilidade e maiores probabilidades de falha.

O Nível I de análise se mostra conservador em comparação aos demais, o que favorece a adoção de uma análise simplificada para avaliação da segurança estrutural de pontes de concreto armado sem dados de projeto.

Referências

- AASHTO. *The Manual for Bridge Evaluation*. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <www.transportation.org>.
- ABNT. ABNT NBR 7187 – Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto. 2021, [S.l.: s.n.], 2021. p. 72. Disponível em: <www.abnt.org.br>.
- ABNT. ABNT NBR 7188 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Disponível em: <www.abnt.org.br>.
- ABNT. ABNT NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. [S.l.: s.n.], 2004. Disponível em: <www.abnt.org.br>.
- AL-ANSARI, Mohammed S. Reliability and flexural behavior of triangular and T-reinforced concrete beams. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, v. 7, n. 4, p. 377-386, 1 dez. 2015.
- CARDOSO, Marco Antônio Nakata. *Metodologia de avaliação da segurança estrutural de pontes de concreto armado*. 2022. 389 f. Dissertação de Mestrado – 2022. JCSS. *Probabilistic Model Code*. [S.l.: s.n.], 2001.
- KUŠAR, Matej; ŠELIH, Jana. Analysis of bridge condition on state network in slovenia. *Gradjevinar*, v. 66, n. 9, p. 811-822, 1 set. 2014.
- LYRA, P. H. C. De; BECK, A. T.; STUCCHI, F. R. Reliability analysis of a prestressed bridge beam designed in serviceability limit state as recommended by NBR 6118 and 7188. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 13, n. 2, p. 380-397, abr. 2020.
- MASCARENHAS, Fernando Junior Resende; CARVALHO, Roberto Chust; VITÓRIO, José Afonso Pereira. An analysis of the current conditions of bridges and viaducts of Brazilian highways. out. 2019, [S.l.]: IBRACON, out. 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/344858553>.
- MENDES, Paulo de Tarso Cronemberger. *Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras*. 2009. 235 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- MITRE, Marcos Pedrosa. *Metodologia para inspeção e diagnóstico de pontes e viadutos de concreto*. 2005. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- OZAKGUL, Kadir; YILMAZ, Mehmet Fatih; CAGLAYAN, Barlas Ozden. Assessment of an old reinforced concrete open-spandrel arch railway bridge. *Structures*, v. 44, p. 284-294, 1 out. 2022.
- SANTIAGO, Wagner Carvalho *et al.* Reliability-based calibration of main brazilian structural design codes. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 17, n. 1, 2020.
- SANTIAGO, W.C.; BECK, A.T. A new study of Brazilian concrete strength conformance. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 4, p. 906–923, ago. 2017.
- SANTOS, Ademir *et al.* Avaliação da segurança de pontes existentes por meio da análise de confiabilidade – Estudos de Casos. nov. 2022, Lisboa: [s.n.], nov. 2022. p. 1623–1638.
- ŽNIDARIČ, Aleš *et al.* Management of Bridges in Slovenia. 2015, [S.l.: s.n.], 2015.