CAPÍTULO 48 · Parte III · Infraestrutura e projetos complementares
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/n9k6m621
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/bxr3ba45

AVALIAÇÃO DO RISCO ESTRUTURAL EM PONTES DE CONCRETO BRASILEIRAS: INFLUÊNCIA DA IDADE E DAS DEFICIÊNCIAS NO SISTEMA DE INSPEÇÃO

Pedro Matiazzi da Silva[1]*, Gilmar Andretta Filho[2]
*Autor de contato: gilmarandretta2000@gmail.com

[1] Engenharia Civil, Faculdade Fasipe, Sinop, Brasil

RESUMO

A infraestrutura rodoviária brasileira enfrenta um cenário crítico de degradação estrutural, particularmente no que concerne às obras de arte especiais (OAEs). Das 113.168 pontes rodoviárias estimadas no território nacional, apenas 13% possuem registros de inspeção atualizados, evidenciando uma lacuna significativa na gestão de ativos de infraestrutura. Aproximadamente 37% do inventário nacional possui mais de 50 anos de idade, tendo sido projetado segundo normas técnicas que não contemplavam as intensidades de tráfego e cargas atuais. Este estudo apresenta uma análise sistemática do risco estrutural em pontes de concreto brasileiras, correlacionando a idade das estruturas, a classificação de condição segundo a ABNT NBR 9452:2023 e as deficiências nos sistemas de inspeção e manutenção. Mediante revisão bibliográfica sistemática e modelagem probabilística baseada em taxas de falha reportadas na literatura internacional, estimou-se que as 903 OAEs classificadas como críticas ou ruins pelo DNIT apresentam uma probabilidade de 56% de ocorrência de pelo menos um colapso anual, correspondendo a uma expectativa de falha a cada 15 meses na ausência de intervenções. Os resultados evidenciam a correlação entre o agravamento de patologias estruturais e as falhas nos sistemas de fiscalização, sublinhando a urgência de políticas de manutenção preventiva mais rigorosas e transparentes.

Palavras-chave: pontes de concreto; patologias estruturais; inspeção de pontes; infraestrutura rodoviária.

ABSTRACT

Brazilian road infrastructure faces a critical scenario of structural degradation, particularly concerning special engineering structures (OAEs). Of the estimated 113,168 road bridges in the national territory, only 13% have updated inspection records, evidencing a significant gap in infrastructure asset management. Approximately 37% of the national inventory is over 50 years old, having been designed according to technical standards that did not contemplate current traffic intensities and loads. This study presents a systematic analysis of structural risk in Brazilian concrete bridges, correlating the age of structures, condition classification according to ABNT NBR 9452:2023, and deficiencies in inspection and maintenance systems. Through systematic literature review and probabilistic modeling based on failure rates reported in international literature, it was estimated that the 903 OAEs

classified as critical or poor by DNIT present a 56% probability of at least one collapse occurring annually, corresponding to a failure expectation every 15 months in the absence of interventions. The results evidence the correlation between the aggravation of structural pathologies and failures in inspection systems, underlining the urgency of more rigorous and transparent preventive maintenance policies.

Keywords: concrete bridges; structural pathologies; bridge inspection; road infrastructure.

INTRODUÇÃO

As obras de arte especiais (OAEs) constituem elementos críticos da infraestrutura de transportes, caracterizando-se por estruturas de engenharia civil que transpõem obstáculos naturais ou artificiais, conectando vias e exigindo projetos estruturais de elevada complexidade técnica. No contexto brasileiro, a gestão dessas estruturas enfrenta desafios significativos relacionados à escassez de dados precisos, deficiências nos sistemas de inspeção e manutenção inadequada.

Segundo Santos et al. (2024), estima-se a existência de aproximadamente 113.168 pontes rodoviárias no território nacional, número substancialmente superior aos 6.176 registros oficiais do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2020). Esta discrepância evidencia uma lacuna crítica no inventário nacional de OAEs, comprometendo a capacidade de planejamento e gestão da infraestrutura rodoviária.

A problemática agrava-se ao considerar que apenas 13% das pontes brasileiras possuem registros de inspeção atualizados, deixando mais de 98.000 estruturas sem qualquer avaliação documentada de suas condições estruturais e funcionais (SANTOS et al., 2024). Adicionalmente, aproximadamente 37% do inventário nacional possui mais de 50 anos de idade, tendo sido projetado segundo normas técnicas vigentes nas décadas de 1950 e 1960, que não contemplavam as intensidades de tráfego e magnitudes de carregamento atuais (SILVA et al., 2018).

Silva et al. (2018) destacam que a maioria das pontes brasileiras foi construída entre as décadas de 1950 e 1970, período em que a norma NB-6 de 1946 estabelecia limites de carga de apenas 24 toneladas para veículos. Com a evolução das demandas de transporte, a NB-6/1960 elevou esse limite para 36 toneladas, e posteriormente a NBR 7188 de 1982 passou a prever cargas de até 45 toneladas. Consequentemente, muitas estruturas em operação atualmente suportam carregamentos superiores aos previstos em seus projetos originais.

A negligência na manutenção preventiva e a ausência de sistemas eficazes de monitoramento têm contribuído para o surgimento e agravamento de patologias estruturais. Conforme o Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias do DNIT (2004), as principais manifestações patológicas em pontes de concreto incluem fissuração, corrosão de armaduras,

desagregação do concreto, carbonatação, desgaste superficial, perda de aderência e danos decorrentes de colisões.

Santana, Neto e Lima (2022) enfatizam que a falta de fiscalização e manutenção preventiva tem contribuído significativamente para falhas e incorreções nessas estruturas, sendo que as influências ambientais sobre os materiais também podem causar manifestações patológicas. Mascarenhas et al. (2019) complementam que o declínio estrutural das OAEs resulta de uma combinação de fatores agressivos, manifestando-se através de fissurações oriundas de esforços estruturais, fenômenos químicos como carbonatação e corrosão, e agentes biológicos que promovem a desagregação do concreto ao longo do tempo.

O colapso da ponte Juscelino Kubitschek de Oliveira, ocorrido em 22 de dezembro de 2024, que conectava os municípios de Aguiarnópolis (TO) e Estreito (MA), exemplifica tragicamente as consequências da negligência na manutenção de estruturas críticas. Segundo documentos do DNIT divulgados pela imprensa, a estrutura havia sido classificada com nota técnica 1 (crítica) em inspeção realizada em 2020, porém não foram executadas as intervenções necessárias para prevenir o colapso.

Diante deste cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar o risco estrutural em pontes de concreto brasileiras, analisando a correlação entre a idade das estruturas, a classificação de condição segundo a ABNT NBR 9452:2023, e as deficiências nos sistemas de inspeção e manutenção. Mediante revisão bibliográfica sistemática e modelagem probabilística exploratória baseada em taxas de falha reportadas na literatura internacional, busca-se quantificar o risco de colapso e subsidiar a formulação de políticas públicas de manutenção preventiva mais eficazes.

A relevância desta pesquisa fundamenta-se na necessidade premente de compreender e mitigar os riscos associados à infraestrutura rodoviária nacional, contribuindo para a segurança dos usuários e a preservação do patrimônio público.

REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Patologias em Estruturas de Concreto Armado

As patologias em estruturas de concreto armado constituem um campo de estudo fundamental da engenharia civil, abrangendo a identificação, diagnóstico e tratamento de manifestações que comprometem o desempenho estrutural e a durabilidade das construções. Santos (2024) destaca que as principais patologias incluem fissuras, desplacamentos e corrosão de armaduras, que comprometem a integridade estrutural e apresentam riscos significativos, gerando custos elevados de reparo.

2.1.1. Mecanismos de Degradação

Os mecanismos de degradação em estruturas de concreto armado podem ser classificados em físicos, químicos e biológicos. Formisano et al. (2019) enfatizam que fenômenos de corrosão e degradação são causas significativas de problemas de segurança em estruturas civis, resultando na perda de capacidade de resistência devido à redução da seção de aço e do concreto.

Corrosão de Armaduras: A corrosão do aço em estruturas de concreto armado constitui uma das principais ameaças à durabilidade. Harnisch et al. (2019) identificam dois mecanismos principais que causam a quebra da camada protetora passiva: (i) a carbonatação, caracterizada pela degradação em larga escala da camada passiva devido a reações químicas do dióxido de carbono com componentes alcalinos do concreto, resultando em queda do pH para aproximadamente 9; e (ii) a corrosão induzida por cloretos, que ocorre quando a concentração de cloretos no nível da armadura excede um valor crítico, levando à quebra localizada da camada passiva.

Benítez et al. (2019) complementam que a carbonatação induzida pela corrosão representa um risco significativo para estruturas de concreto armado, comprometendo a integridade estrutural através da corrosão do aço de reforço. El-Reedy (2007) destaca que a corrosão do concreto armado constitui um problema de bilhões de dólares para o investimento imobiliário global, enfatizando a necessidade de implementação de sistemas de gestão de integridade para estratégias de manutenção abrangentes.

Fissuração: As fissuras em estruturas de concreto podem originar-se de diversas causas, incluindo esforços estruturais (flexão, cisalhamento, torção e tração), retração, variações térmicas e recalques diferenciais. Mascarenhas et al. (2019) observam que os danos se manifestam através de fissurações oriundas de esforços estruturais, bem como por impactos ou incêndios.

Degradação Química: Além da carbonatação e corrosão, outros processos químicos contribuem para a degradação do concreto. Martins et al. (2016) identificam que eflorescências e lixiviação ocorrem pela migração e evaporação de soluções aquosas salinizadas ou concreto mal adensado, dissolvendo hidróxido de cálcio.

2.1.2. Metodologias de Diagnóstico

A identificação precoce de patologias estruturais é fundamental para a implementação de intervenções eficazes. Apaza (2024) ressalta que o diagnóstico precoce e a manutenção preventiva são fundamentais para prolongar a vida útil das construções e evitar riscos à segurança.

Ensaios Não Destrutivos (END): Omar et al. (2018) descrevem diversas metodologias de inspeção e diagnóstico para pontes de concreto, incluindo: (i) inspeção visual, embora subjetiva, constitui a abordagem padrão; (ii) testes de carga para avaliar os níveis de carga segura; (iii) avaliação não destrutiva, incluindo métodos como arrasto de corrente, ultrassom, radar de penetração no solo (GPR) e potencial de meia célula, permitindo a detecção precoce de

deterioração; e (iv) monitorização da saúde estrutural utilizando sensores para monitorar a resposta estrutural.

Gucunski et al. (2010) enfatizam a importância de múltiplas tecnologias complementares de avaliação não destrutiva para a avaliação de condição de tabuleiros de pontes de concreto. Bryden (2022) demonstra a aplicação prática dessas metodologias, empregando um programa de ensaios não destrutivos que incluiu levantamento de deterioração/delaminação utilizando GPR e levantamento de potencial de meia-célula para identificar áreas prováveis de corrosão, complementados por testes laboratoriais de amostras de núcleo.

Inspeção Visual Sistemática: Gonçalves et al. (2015) propõem uma abordagem sistemática para inspeção, diagnóstico e reparo, na qual o inspetor identifica anomalias através de análise visual e utiliza ferramentas do sistema para correlacionar com suas origens, estabelecer um diagnóstico preciso e determinar a melhor técnica de reparo.

2.2. Sistemas de Inspeção e Classificação de OAEs

No Brasil, a inspeção e avaliação do estado de conservação de pontes são regulamentadas pela ABNT NBR 9452:2023, que estabelece requisitos para inspeção de pontes, viadutos e passarelas, visando avaliar suas condições de segurança e desempenho.

2.2.1. Tipos de Inspeção

Segundo o Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias do DNIT (2004), as inspeções classificam-se em: (i) cadastral, realizada após a conclusão da obra para registro inicial; (ii) rotineira, programada com intervalos de um a dois anos, destinada a coletar informações por meios visuais; (iii) especial, efetuada com intervalos de no máximo cinco anos, normalmente realizadas quando julgado necessário após uma inspeção de rotina para análise mais precisa da estrutura; e (iv) extraordinária, realizada após eventos excepcionais como enchentes, terremotos ou acidentes.

2.2.2. Sistema de Classificação de Condição

A ABNT NBR 9452:2023 estabelece um sistema de classificação de condição baseado em parâmetros de durabilidade, funcionalidade e segurança estrutural. O critério de durabilidade possui características associadas à vida útil, ou seja, o tempo estimado em que as estruturas devem cumprir suas funções em serviço, resistindo contra-ataques de agentes ambientais agressivos.

A classificação de condição varia de 5 (excelente) a 1 (crítica), conforme apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 – Classificação de Condições segundo Parâmetros de Durabilidade

Nota	Condição	Caracterização de Durabilidade

5	Excelente	A OAE apresenta-se em excelentes condições, exigindo apenas manutenções de rotina.
4	Boa	A OAE apresenta pequenas e poucas patologias que comprometem sua durabilidade.
3	Regular	A OAE apresenta pequenas e poucas patologias que comprometem sua durabilidade, em região de moderada e alta agressividade.
2	Ruim	A OAE apresenta patologias de moderadas a abundantes, que comprometem sua durabilidade, em região de alta agressividade ambiental.
1	Crítica	A OAE encontra-se em alto estágio de degradação, apontando problemas já de risco estrutural e desmoronamento.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9452:2023 [19].

Alencar (2020) apud Garcia e Albuquerque (2025) observa que existe uma forte correlação entre anomalias patológicas, desempenho e durabilidade das estruturas, sendo possível definir o desempenho de uma estrutura com base nas suas manifestações patológicas.

2.3. Modelos de Avaliação de Risco Estrutural

A avaliação de risco estrutural em pontes constitui um campo de pesquisa fundamental para a gestão de infraestrutura. Cook et al. (2014) realizaram um estudo abrangente sobre taxas de falha de pontes, consequências e tendências preditivas, analisando dados históricos de colapsos nos Estados Unidos.

2.3.1. Taxas de Falha e Fatores de Risco

Um estudo publicado por Cook et al. (2014) identificou que nos Estados Unidos 53% das pontes que colapsaram já possuíam falhas estruturais conhecidas, calculando uma taxa de falha de 1 em cada 1.100 para estruturas deficientes. Os autores reforçaram que o risco de colapso por deterioração ou excesso de carga está diretamente ligado ao tempo de vida da obra.

Santos e Pfeil (2014) demonstram que pontes são estruturas que, com o tempo, sofrem de fadiga devido ao acúmulo de danos causados pela passagem contínua de diversos veículos, gerando variação de tensão na estrutura. Este problema intensificou-se nos últimos anos devido ao aumento no fluxo de veículos nas rodovias brasileiras, conforme registrado pela Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (ABCR, 2025), que constatou crescimento de 2,1% no tráfego de veículos pesados e 2,5% no de veículos leves em 2025.

2.3.2. Modelagem Probabilística

A modelagem probabilística constitui uma ferramenta fundamental para a avaliação quantitativa de risco estrutural. A distribuição binomial pode ser empregada para estimar a probabilidade de falha em um conjunto de estruturas, assumindo independência estatística entre elas. A probabilidade de que nenhuma estrutura falhe em um período determinado é dada por

Q^N, onde Q representa a probabilidade de sobrevivência de uma estrutura individual e N o número total de estruturas. Consequentemente, a probabilidade de ocorrência de pelo menos um evento de falha é dado por 1 - Q^N.

O valor esperado de falhas em um período é calculado por E = N × P, onde P representa a taxa de falha anual. Esta abordagem permite quantificar o risco agregado em um inventário de estruturas e subsidiar decisões de gestão de ativos de infraestrutura.

2.3.3. Cenário Brasileiro

Dados publicados pelo DNIT (2020) apresentam que 6151 OAEs que estavam sob sua responsabilidade, 903 estavam em estado de risco estrutural, sendo 159 estruturas com nota 1 (crítica) e 749 com nota 2 (problemática). No ano de 2020, em decorrência das restrições impostas pela pandemia de COVID-19, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) não disponibilizou dados sobre a extensão da malha rodoviária vistoriada, tampouco registros oficiais sobre o volume de colapsos estruturais naquele exercício.

Em anos adjacentes como em 2019 o DNIT inspecionou 108.863 km de rodovias, marca que evoluiu para 109.103 km em 2021, 111.502 km em 2023 e atingiu 111.853 km em 2024.

Em termos comparativos, observa-se uma progressão no número de OAEs sob jurisdição do DNIT, em 2023 foi registrado 6.355 OAEs, deste inventário, 162 estruturas foram classificadas em estado crítico (nota 1) e 725 como problemáticas (nota 2), totalizando 887 unidades em situação de risco. Dados de 2023 são muito similares com os dados de 2020 de 903 OAEs em situação de risco.

No ano de 2024 foi apresentado pelo mesmo órgão o número de 9 pontes que colapsaram no respectivo ano. Sendo esse o único relatório dos analisados que apresenta essa informação. Devido à similaridade dos dados de inspeção das rodovias e quantidades de OAEs diagnosticadas em situação de risco, pode-se prever uma similaridade de dados em anos anteriores em relação a queda dessas estruturas.

3. METODOLOGIA

3.1. Delineamento da Pesquisa

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza descritiva, qualitativa, quantitativa e analítica, fundamentada em revisão bibliográfica sistemática e modelagem probabilística exploratória. A investigação não envolveu visitas técnicas às estruturas analisadas, baseando-se exclusivamente em dados secundários disponíveis na literatura científica e em relatórios institucionais.

3.2. Coleta e Análise de Dados

3.2.1. Fontes de Dados

A coleta de dados foi realizada mediante consulta a múltiplas fontes:

1. **Literatura Científica:** Artigos científicos nacionais e internacionais indexados em bases de dados acadêmicas, abrangendo temas relacionados a patologias estruturais, inspeção de pontes, avaliação de risco e gestão de infraestrutura.
2. **Relatórios Institucionais:** Documentos oficiais do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), incluindo o Relatório de Gestão 2019, 2020, 2021, 2023, 2024, e o Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias Brasileiras (2004).
3. **Publicações Técnicas:** Relatórios de entidades técnicas como a Confederação Nacional do Transporte (CNT), incluindo a Pesquisa CNT de Rodovias 2024 e estudos sobre pontos críticos nas rodovias brasileiras.
4. **Normas Técnicas:** ABNT NBR 9452:2023 (Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto) e ABNT NBR 7187:2021 (Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto).
5. **Dados Estatísticos:** Informações sobre o inventário nacional de pontes, distribuição geográfica, idade das estruturas e classificação de condição, obtidas de Santos et al. (2024) e outras fontes acadêmicas.

3.2.2. Critérios de Seleção

Os critérios de inclusão para seleção de fontes bibliográficas compreenderam:

- Relevância temática para patologias estruturais em pontes de concreto;
- Abordagem de metodologias de inspeção e diagnóstico;
- Apresentação de dados quantitativos sobre taxas de falha ou risco estrutural;
- Publicação em periódicos científicos revisados por pares ou relatórios institucionais oficiais;
- Disponibilidade de texto completo para análise detalhada.

3.3. Modelagem Probabilística

3.3.1. Fundamentação Teórica

A modelagem probabilística empregada neste estudo baseia-se na distribuição binomial, assumindo independência estatística entre as estruturas analisadas. Esta abordagem é apropriada para estimar a probabilidade de ocorrência de eventos raros (colapsos) em um conjunto de estruturas com características similares.

3.3.2. Parâmetros do Modelo

Os parâmetros utilizados na modelagem foram:

- **N:** Número total de estruturas no conjunto analisado (903 OAEs classificadas como críticas ou ruins pelo DNIT);
- **P:** Taxa de falha anual individual, obtida de Cook et al. (2014), correspondente a 1/1.100 ≈ 0,000909 ou 0,0909%;
- **Q:** Probabilidade de sobrevivência individual, calculada como Q = 1 - P ≈ 0,999091.

3.3.3. Cálculos Realizados

Probabilidade de Nenhuma Falha:

A probabilidade de que nenhuma das N estruturas sofra colapso em um período de um ano é dada por:

P(0 falhas) = Q^N = (0,999091)^903 ≈ 0,4437 ou 44,37%

Probabilidade de Pelo Menos Uma Falha:

A probabilidade de ocorrência de pelo menos um colapso em um ano é:

P(≥1 falha) = 1 - Q^N ≈ 1 - 0,4437 ≈ 0,5563 ou 55,63%

Valor Esperado de Falhas:

O número esperado de colapsos em um ano é calculado por:

E = N × P = 903 × 0,000909 ≈ 0,821 colapsos/ano

Isto corresponde a uma expectativa de um colapso a cada 1/0,821 ≈ 1,22 anos, ou aproximadamente 15 meses.

Projeções Temporais:

Para períodos superiores a um ano, a probabilidade de pelo menos uma falha aumenta significativamente:

- **2 anos:** P(≥1 falha) = 1 - Q^(2N) ≈ 80,7%
- **5 anos:** P(≥1 falha) = 1 - Q^(5N) ≈ 98,0%

3.3.4. Limitações do Modelo

É fundamental reconhecer as limitações inerentes à modelagem probabilística empregada:

1. **Transferibilidade de Dados:** A taxa de falha de 1/1.100 foi obtida de estudos realizados nos Estados Unidos, onde as condições de manutenção, clima, padrões de tráfego e práticas de gestão podem diferir significativamente do contexto brasileiro.
2. **Independência Estatística:** O modelo assume independência entre as estruturas, o que pode não refletir completamente a realidade, considerando que fatores sistêmicos

(políticas de manutenção, recursos disponíveis, capacitação técnica) afetam múltiplas estruturas simultaneamente.

3. **Homogeneidade do Conjunto:** O modelo divide as 903 OAEs em estado crítico e problemático, seguindo os parâmetros de classificação da 9452:2023, sendo 159 estruturas em estado crítico (nível 1) e 749 em estado problemático (nível 2), ambas possuindo risco de queda.
4. **Ausência de Intervenções:** Os cálculos pressupõem a ausência de intervenções de manutenção ou reabilitação durante o período analisado, representando um cenário conservador.

Não obstante estas limitações, a modelagem fornece uma estimativa quantitativa útil para dimensionar a magnitude do risco e subsidiar discussões sobre políticas de gestão de infraestrutura.

Considerando que a taxa de falha de 1/1.100 foi derivada de estudos norte-americanos (COOK et al., 2014), propõe-se a aplicação de um fator de ajuste (FA) para aproximar o modelo à realidade brasileira. Como proxy para as condições de manutenção, utiliza-se a comparação entre os percentuais de rodovias em estado inadequado nos dois países:

Segundo o Relatório CNT de Rodovias 2024, 67,0% da malha rodoviária brasileira avaliada foi classificada como regular, ruim ou péssima. Em comparação, dados do Federal Highway Administration (FHWA, 2023) indicam que aproximadamente 7,5% das pontes nos EUA são classificadas como estruturalmente deficientes.

Adotando como fator de ajuste a razão entre os índices de degradação da infraestrutura:

FA = (% rodovias inadequadas BR) / (% pontes deficientes EUA) = 67,0% / 7,5% ≈ 8,9

Aplicando o fator de ajuste à taxa de falha original:

P_ajustada = (1/1.100) × FA_normalizado

Ressalta-se que este ajuste é exploratório e de natureza qualitativa, dado que os indicadores comparados não são diretamente equivalentes. Contudo, o exercício demonstra que, sob condições de manutenção brasileiras, a probabilidade de colapso tende a ser significativamente superior à estimada pelo modelo original, reforçando a urgência das intervenções. Recomenda-se que estudos futuros utilizem dados diretos de taxas de colapso de pontes brasileiras — como os 9 colapsos registrados pelo DNIT em 2024 — para calibrar modelos probabilísticos específicos para o contexto nacional.

3.3.5. Proposta de Reclassificação da OAESs Críticas

Para aprimorar o rigor da análise probabilística, o presente estudo propõe que estudos futuros realizem a reclassificação das 903 OAEs em estado crítico ou problemático segundo quatro critérios complementares: (i) faixa etária, segmentando as estruturas em grupos de até 30 anos, de 30 a 50 anos e acima de 50 anos de idade, considerando que estruturas mais antigas apresentam taxas de falha potencialmente superiores à média adotada; (ii) tipologia estrutural, distinguindo pontes de vigas T, vigas caixão, arcos, estruturas protendidas e treliças metálicas, uma vez que cada sistema estrutural possui mecanismos de deterioração e vulnerabilidades específicas; (iii) Classe de Agressividade Ambiental (CAA) conforme ABNT NBR 6118:2023, classificando as estruturas em ambientes rurais (CAA I), urbanos (CAA II), marinhos ou industriais (CAA III e IV), dado que a agressividade ambiental acelera os processos de corrosão e carbonatação; e (iv) volume médio diário de tráfego (VMDa), diferenciando estruturas submetidas a tráfego leve, médio e pesado, visto que o acúmulo de ciclos de carga é determinante para a fadiga estrutural. A ausência de dados desagregados nessa granularidade nos relatórios públicos disponíveis constitui, em si, uma limitação sistêmica da gestão de OAEs no Brasil, reforçando a necessidade de modernização do inventário nacional

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O panorama nacional evidencia significativa discrepância entre o inventário estimado de 113.168 pontes rodoviárias e os 6.151 registros oficiais do DNIT, indicando lacuna aproximada de 94% no conhecimento da infraestrutura. Apenas 13% das estruturas possuem histórico de inspeções documentado, deixando mais de 98.000 pontes sem avaliação formal de condição estrutural.

A existência de 98.000 pontes carente de avaliações formais de integridade configura um cenário de risco iminente à infraestrutura nacional. O caso da Ponte Juscelino Kubitschek exemplifica a insuficiência dos protocolos atuais: embora tenha sido submetida a uma inspeção de rotina em 2020, na qual se constatou comprometimento estrutural, o diagnóstico isolado não foi capaz de viabilizar as intervenções necessárias. Observa-se, portanto, uma dualidade crítica: por um lado, a ineficácia das ações corretivas em estruturas já monitoradas e, por outro, a total ausência de dados sobre ativos não cadastrados, cujas condições de estabilidade permanecem desconhecidas.

Do ponto de vista da gestão pública, essa lacuna representa um passivo de risco não quantificado que compromete a alocação eficiente de recursos orçamentários. A ausência de dados estruturados sobre o estado de conservação das pontes impede a priorização racional de intervenções, resultando em manutenções reativas e de maior custo. Estudos internacionais demonstram que cada real investido em manutenção preventiva evita entre R$ 5 e R$ 10 em custos de reabilitação ou reconstrução (FHWA, 2023). Nesse contexto, a adoção de estratégias de manutenção baseada em risco (MBR) metodologia que prioriza intervenções conforme a probabilidade de falha e a severidade das consequências emerge como alternativa técnica e economicamente viável para a gestão das OAEs brasileiras. A implementação de um sistema

nacional de gestão de pontes (Bridge Management System BMS), integrado ao inventário do DNIT e alimentado por inspeções periódicas, permitiria identificar, classificar e priorizar as estruturas com maior risco de colapso, otimizando o uso dos recursos públicos disponíveis

Cerca de 37% das pontes brasileiras possuem mais de 50 anos, tendo sido projetadas sob normas que previam carregamentos substancialmente inferiores aos atuais. A evolução normativa (NB-6/1946, NB-6/1960 e NBR 7188/1982) demonstra que estruturas antigas operam sob cargas até 87,5% superiores às originalmente previstas, intensificando processos de fadiga e deterioração.

Esse descompasso entre o carregamento de projeto e o carregamento real implica redução significativa da vida útil residual dessas estruturas. Para pontes projetadas na década de 1960 ou 1970, com vida útil de projeto (VUP) nominal de 50 anos, o término do período de desempenho garantido já ocorreu ou está próximo, sem que as condições de serviço tenham sido aliviadas pelo contrário, o tráfego de veículos pesados cresceu continuamente. Agrava esse cenário o fato de que as normas vigentes à época, em especial a NB-6/1960 e a NBR 7188/1982, não contemplavam de forma explícita o fenômeno da fadiga estrutural em seus critérios de projeto. A fadiga, caracterizada pelo acúmulo de danos microscópicos em elementos estruturais submetidos a ciclos repetidos de carregamento variável, pode conduzir a falhas progressivas mesmo sob cargas inferiores à capacidade última da estrutura fenômeno que só passou a ser sistematicamente tratado nas normas brasileiras a partir da NBR 7187:2003 e, com maior rigor, na versão de 2021. Estruturas projetadas sem critérios de fadiga e submetidas a décadas de tráfego crescente apresentam, portanto, probabilidade de falha superior à estimada por modelos baseados apenas na classificação de condição visual, reforçando a necessidade de inspeções especiais com ensaios não destrutivos para avaliação da integridade dos elementos mais solicitados.

Das OAEs sob responsabilidade do DNIT, 903 foram classificadas como críticas ou problemáticas, sendo 159 estruturas em estado crítico (nível 1) e 749 em estado problemático (nível 2), ambas possuindo risco de queda. As regiões Norte e Nordeste apresentam as piores médias de condição, com estados como Pará, Maranhão e Piauí registrando classificações inferiores a 1,5, indicativas de elevado risco estrutural.

As principais manifestações patológicas incluem fissuração, corrosão das armaduras, desagregação do concreto, infiltrações e danos por impactos. O processo de degradação resulta da combinação de ações mecânicas, fenômenos químicos (carbonatação e corrosão), agentes biológicos e aumento do tráfego. Dados recentes indicam crescimento contínuo do fluxo de veículos pesados, agravando a fadiga estrutural.

A aplicação de modelagem probabilística às 903 OAEs críticas resultou em probabilidade de 55,6% de ocorrência de pelo menos um colapso anual, com valor esperado de 0,82 colapsos/ano, equivalente a um evento a cada 15 meses na ausência de intervenções. Em horizonte de cinco anos, a probabilidade aproxima-se de 98%, evidenciando risco acumulado elevado. Ressalta-se que o modelo considera taxa de falha baseada em estudos internacionais e

apenas estruturas oficialmente classificadas, podendo o risco real ser superior diante da baixa cobertura de inspeções.

Os estudos de caso reforçam a análise estatística. O colapso da Ponte Juscelino Kubitschek (1961) ocorreu quatro anos após classificação como crítica, evidenciando que diagnóstico sem intervenção é insuficiente. Casos recentes de interdição preventiva demonstram a importância de inspeções regulares para mitigação do risco. Dados da CNT indicam que 48,1% das pontes colapsadas entre 2012 e 2022 ocorreram na região Norte, majoritariamente sob gestão pública, apontando fragilidades sistêmicas na manutenção e gestão da infraestrutura.

5. CONCLUSÃO

O estudo realizou uma análise sistemática do risco estrutural em pontes de concreto brasileiras, correlacionando idade, condição estrutural conforme a ABNT NBR 9452:2023 e deficiências nos sistemas de inspeção e manutenção. Observou-se significativa lacuna no inventário nacional, com discrepância entre o número estimado de pontes e os registros oficiais, além de baixa cobertura de inspeções atualizadas.

Cerca de 37% das estruturas possuem mais de 50 anos e foram projetadas para solicitações inferiores às atualmente exigidas, o que, aliado ao aumento do tráfego pesado, intensifica processos de deterioração e fadiga. A modelagem probabilística aplicada às OAEs classificadas como críticas ou ruins indicou elevada probabilidade de ocorrência de colapsos em curto e médio prazo na ausência de intervenções.

Os resultados evidenciam desigualdades regionais na condição das estruturas e reforçam que diagnósticos isolados, sem ações corretivas imediatas, são insuficientes para garantir a segurança estrutural. Conclui-se pela necessidade urgente de implementação de políticas integradas de gestão de pontes, com inventário nacional consolidado, ampliação da cobertura de inspeções, adoção de sistemas de gestão baseados em risco, capacitação técnica e financiamento contínuo da manutenção preventiva.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7187: **Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido** – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9452: **Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto** – Procedimento**.** Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

APAZA, F. R. **Patologia estrutural e reparo das estruturas de concreto.** Revista Fisio&Terapia, v. 28, n. 11, p. 1714–1732, 2024. DOI: https://doi.org/10.69849/revistaft/cs10202411301714.

BENÍTEZ, P. A. et al. **Efficiency analysis of optimal inspection management for reinforced concrete structures under carbonation-induced corrosion risk.** Construction and Building Materials, v. 211, p. 1000–1012, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.028.

BRYDEN, P. **Assessment and rehabilitation of a 50-year old concrete bridge deck in Nackawic NB**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIVIL ENGINEERING, 2022. Proceedings... Singapore: Springer, 2022. p. 485–498. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-0503-2_39.

COOK, W.; BARR, P. J.; HALLING, M. W. **Bridge failure rates, consequences, and predictive trends**: Report No. UT-14.09. Logan: Utah State University; Salt Lake City: Utah Department of Transportation, Research Division, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de inspeção de pontes rodoviárias brasileiras**. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2004

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Relatório de Gestão 2019**. Brasília, DF: DNIT, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Relatório de Gestão 2020**. Brasília, DF: DNIT, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Relatório de Gestão 2021**. Brasília, DF: DNIT, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Relatório de Gestão 2023**. Brasília, DF: DNIT, 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Relatório de Gestão 2024**. Brasília, DF: DNIT, 2025.

EL-REEDY, M. A. **Steel-reinforced concrete structures: assessment and repair of corrosion.** Boca Raton: CRC Press, 2007.

FORMISANO, A. et al. **Advanced methods and techniques against the degradation of civil structures: detection, evaluation and retrofitting.** The Open Construction and Building Technology Journal, v. 13, p. 197–215, 2019. DOI: https://doi.org/10.2174/1874836801913010197.

GARCIA, M. P.; ALBUQUERQUE, R. S. **Correlação entre manifestações patológicas e desempenho estrutural em pontes de concreto.** Revista Brasileira de Engenharia de Estruturas, v. 12, n. 4, p. 156–173, 2025.

GONÇALVES, A. et al. **Systematic approach to inspect, diagnose, and repair masonry walls.** Journal of Performance of Constructed Facilities, v. 29, n. 5, 2015. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000650.

GUCUNSKI, N. et al. **Multiple complementary nondestructive evaluation technologies for condition assessment of concrete bridge decks.** Transportation Research Record, n. 2201, p. 34–44, 2010. DOI: https://doi.org/10.3141/2201-05.

HARNISCH, J. et al. **The new DGZfP Specification B12 "Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures**". In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING, 2019. Proceedings... 2019.

MARTINS, L. F. et al. **Investigação de manifestações patológicas em sistemas estruturais de concreto armado: estudo de caso em edificação pública.** Revista de Patologia das Construções, v. 8, n. 2, p. 67–84, 2016.

MASCARENHAS, F. J. R. *et al*. **Análise de manifestações patológicas em viadutos de concreto: estudo de caso realizado em viadutos localizados em Teresina** – PI. **Revista Fisio&Terapia**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 89–105, 2019

OMAR, T. et al. **Condition assessment of reinforced concrete bridges: current practice and research challenges**. Infrastructures, v. 3, n. 3, p. 36, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/infrastructures3030036.

SANTANA, M. R.; NETO, J. A.; LIMA, P. F. **Manifestações patológicas em obras de arte especiais: análise e prevenção**. Revista de Engenharia Civil, v. 18, n. 3, p. 112–128, 2022.

SANTOS, J. P. et al. **Panorama geral das pontes no Brasil**. Revista Brasileira de Infraestrutura, v. 15, n. 2, p. 45–67, 2024.

SANTOS, L. M.; PFEIL, M. S. **Análise de fadiga em pontes de concreto armado sob tráfego de veículos pesados**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 7, n. 5, p. 789–812, 2014.

SANTOS, R. M. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado. Revista de Construção Civil**, v. 12, n. 1, p. 34–52, 2024. DOI: https://doi.org/10.29327/41406228.

SILVA, A. C. et al. **Structural and functional conditions of bridges and viaducts on federal highways in Pernambuco.** Revista ALCONPAT, v. 8, n. 1, p. 74–88, 2018. DOI: https://doi.org/10.21041/RA.V8I1.199.