



## **Engenharia e Gestão de Pontes e Viadutos: Desenvolvimento de Ferramentas para Suporte à Definição do Plano Estratégico de Manutenção**

**Flavio Reis<sup>1</sup>, João Junqueira<sup>2</sup>, Diego Rosa<sup>3</sup>, Luana Sampaio<sup>4</sup>, José Fernando Rodrigues<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>MRS Logística / Gerencia Geral de Infraestrutura / flavio.reis@mrs.com.br

<sup>2</sup>MRS Logística / Gerencia Geral de Infraestrutura / joao.junqueira@mrs.com.br

<sup>3</sup>MRS Logística / Gerencia Geral de Infraestrutura / diego.rosa@mrs.com.br

<sup>4</sup>MRS Logística / Gerencia Geral de Infraestrutura / luana.sampaio@mrs.com.br

<sup>5</sup>Procert Engenharia / Engenharia / fernando.rodrigues@procertengenharia.com.br

### **Resumo**

As pontes e viadutos são bastante relevantes na infraestrutura rodoviária ou ferroviária, tendo um papel fundamental na promoção do desenvolvimento econômico de regiões. No Brasil, considerando os últimos anos, tem-se notado um significativo estímulo à eficiência e ampliação do modo de transporte ferroviário, mas que esbarram em um cenário de décadas de baixo investimento em manutenção, caracterizando, portanto, um grande desafio de engenharia mantê-los em níveis adequados de segurança estrutural, de funcionalidade e de durabilidade. A gestão de obras de arte especiais (OAEs) existentes, considerando-se a diversidade de sistemas estruturais, materiais e idades, é um desafio estratégico no contexto das entidades que administram a infraestrutura brasileira, demandando ferramentas e métodos eficazes para o monitoramento e a manutenção desses ativos. No presente trabalho, propõe-se uma ferramenta para suporte à gestão dos ativos, integrando conceitos da engenharia de manutenção, com base nas normas e referências técnicas, especialmente aquelas que regulamentam a inspeção, a avaliação e a manutenção de pontes e viadutos. Para isso, foram desenvolvidas matrizes de priorização, com as quais foi possível hierarquizar intervenções de acordo com critérios técnicos, como o estado de conservação, a criticidade e o impacto operacional. Os primeiros esforços nesse sentido resultaram em matrizes simplificadas, desenvolvidas inicialmente em planilhas. Recentemente, essas matrizes foram ampliadas, abrangendo um número maior de variáveis, com a implantação de novas rotinas visando melhor avaliar os ativos. A tecnologia também vem sendo atualizada, com destaque para a utilização da plataforma ArcGIS, que permite o mapeamento geoespacial dos ativos e a análise integrada dos dados coletados em inspeções. Como resultado do trabalho desenvolvido, a ferramenta proposta contempla especificações normativas, métodos de priorização de manutenção e suporte orçamentário, utilizando tecnologias recentemente incorporadas ao meio da engenharia, visando aprimorar o processo de gestão de ativos, contribuindo para a segurança, a eficiência operacional e a sustentabilidade da infraestrutura.

### **Palavras-chave**

Pontes ferroviárias; confiabilidade das estruturas; matriz de priorização; gestão de pontes; gestão de ativos.

### **Introdução**

As pontes e viadutos são elementos essenciais na infraestrutura de transporte, desempenhando um papel estratégico na conectividade de regiões e na viabilização do fluxo contínuo de pessoas e cargas. Em sistemas rodoviários e ferroviários, essas obras de arte especiais (OAEs) garantem a transposição de obstáculos naturais, como rios e vales, além de intersecções urbanas e vias expressas, permitindo a expansão e integração dos territórios.

No Brasil, um país de dimensões continentais, a presença de uma malha extensa e um grande número de OAEs tornam a gestão e manutenção desses ativos um desafio constante. Muitos desses elementos estruturais foram

construídos há décadas, com metodologias e materiais que podem não atender às demandas atuais de tráfego e carga. O crescimento da frota de veículos pesados e o aumento da demanda por transporte ferroviário impõem esforços adicionais às infraestruturas existentes, tornando ainda mais evidente a necessidade de monitoramento contínuo e intervenções planejadas.

Apesar da importância estratégica das pontes e viadutos, o setor enfrenta um histórico de baixo investimento em manutenção. Durante muito tempo, a abordagem predominante foi a manutenção corretiva, ou seja, intervenções realizadas apenas quando os danos já comprometiam a segurança e a funcionalidade das estruturas. Esse modelo gera custos elevados e riscos operacionais significativos, podendo levar a falhas estruturais severas que impactam diretamente a mobilidade, a economia e até mesmo a segurança da população.

Diante desse cenário, a engenharia de infraestrutura tem evoluído para um modelo de gestão mais eficiente e sustentável, baseado na manutenção preventiva e preditiva. Essas abordagens envolvem inspeções periódicas, avaliação detalhada das condições estruturais e a aplicação de ferramentas avançadas para prever falhas antes que elas ocorram. A implementação de novas tecnologias, como sensores para monitoramento remoto, análise de dados geoespaciais e inteligência artificial para detecção de anomalias, tem sido fundamental para aprimorar a eficiência das operações e prolongar a vida útil das OAEs.

A gestão dessas estruturas exige um planejamento detalhado, considerando a diversidade de sistemas construtivos, materiais utilizados e idades dos ativos. Para isso, a aplicação de ferramentas de monitoramento e manutenção é essencial para garantir a segurança operacional e otimizar a alocação de recursos. Nesse contexto, este artigo apresenta estratégias e soluções tecnológicas desenvolvidas para auxiliar na gestão dessas infraestruturas, integrando conceitos de engenharia de manutenção e normas técnicas que regulamentam as inspeções, as avaliações e as intervenções de manutenção. Além disso, discute-se a importância da digitalização dos processos e da centralização das informações para tornar a tomada de decisão mais ágil e eficiente.

## Metodologia

A metodologia utilizada neste estudo baseia-se na elaboração e aprimoramento de matrizes de priorização para manutenção de pontes e viadutos, baseadas nos requisitos técnicos da norma ABNT NBR 9452 (2023) – Inspeção de Pontes, Viadutos e Passarelas de Concreto. Essa norma define diretrizes para a realização de inspeções, classificações de anomalias e indicativos para avaliação da condição estrutural dessas obras de arte especiais (OAEs).

Inicialmente, as matrizes de priorização foram desenvolvidas em planilhas eletrônicas, permitindo uma abordagem sistemática para hierarquizar as intervenções com base em critérios técnicos essenciais, tais como:

- **Estado de conservação:** avaliação qualitativa do nível de degradação da estrutura com base em inspeções visuais.
- **Criticidade:** análise do impacto de uma eventual falha na segurança e operação da infraestrutura;
- **Impacto operacional:** avaliação da influência da OAE na continuidade do serviço de transporte e no fluxo viário.

Com a evolução do estudo, as matrizes foram ampliadas para incorporar um conjunto mais abrangente de variáveis e metodologias de análise, alinhadas às diretrizes da NBR 9452. Dessa forma, a avaliação passou a contemplar os seguintes aspectos:

- **Identificação dos danos:** mapeamento de defeitos estruturais, como fissuras, corrosão de armaduras, deslocamentos de concreto e recalques diferenciais, com levantamento de variáveis que indiquem suas dimensões e região de abrangência, tendo como objetivo compará-los a um limite ou padrão de referência;

- **Determinação dos graus de severidade:** categorização dos danos identificados e mapeados de acordo com seu impacto na funcionalidade e segurança da estrutura;
- **Avaliação da necessidade de intervenções:** definição de ações corretivas ou preventivas conforme o grau de severidade identificado;
- **Registro sistemático das inspeções:** padronização da coleta de dados e documentação das condições estruturais ao longo do tempo, permitindo análises comparativas e tomada de decisão mais eficiente.

Além disso, foram implantadas novas rotinas de análise para otimizar a priorização das manutenções, levando em conta fatores como a idade da estrutura, volume de tráfego, histórico de inspeções e disponibilidade de recursos para intervenções. Com esse aprimoramento, busca-se não apenas a identificação precoce de falhas estruturais, mas também a definição de estratégias mais eficazes para garantir a segurança, a durabilidade e o desempenho das OAEs.

### Aspectos técnicos das matrizes de priorização

Para o desenvolvimento das matrizes de priorização das OAEs, foram empregados conceitos de diversas disciplinas da engenharia civil e de manutenção, com o intuito de desenvolver uma ferramenta capaz de quantificar o grau de deterioração da estrutura através da estimativa do risco associado aos danos identificados nos elementos que compõem a estrutura.

Para isso inicialmente foi padronizado o processo de cadastro dos ativos, idealizando a discretização da estrutura em componentes, e dessa forma adotando-se uma orientação direcionada ao objeto. A filosofia de orientação a objeto tem como base alguns conceitos como a criação de classes de objetos. As classes idealizadas, ou seja, os sistemas de interesse adotados para discretização dos ativos estão apresentados na Figura 1.

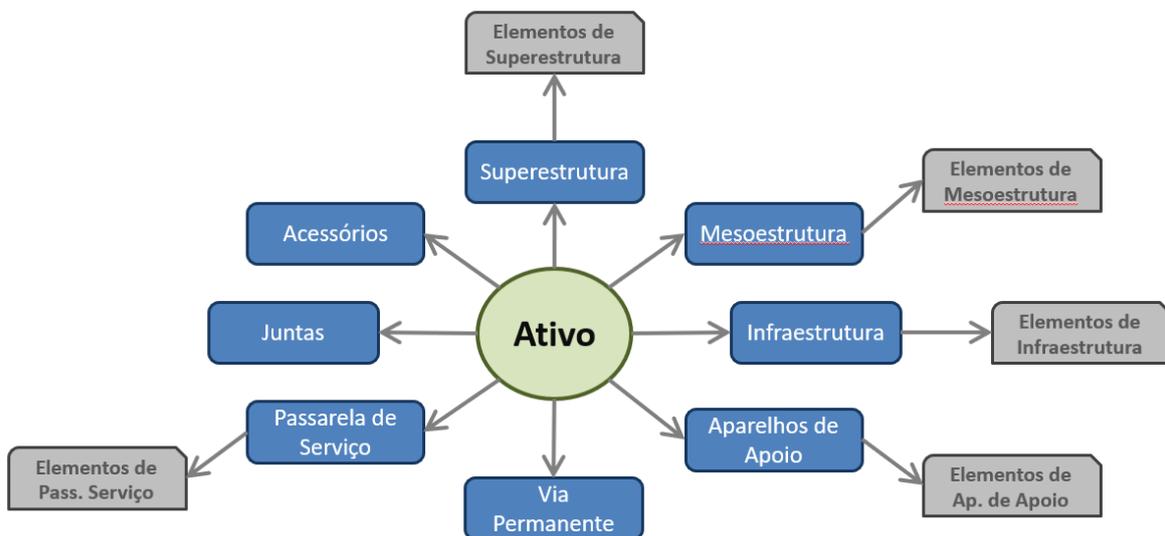


Figura 1 – Discretização do ativo e relações entre classes

## Conceitos empregados na priorização de ativos

Na engenharia de manutenção, o conceito de risco é frequentemente associado a probabilidade de falha de um elemento e a consequência da sua falha. A equação a seguir representa a relação entre os três conceitos.

$$\text{Risco} = \text{Prob. de Falha} \times \text{Consequência}$$

Esse conceito foi empregado para priorizar as intervenções nos ativos. Portanto, o risco representa um valor relativo que indicará a urgência em realizar intervenção na estrutura. Logo, ativos com risco relativo maior deverão ter sua intervenção priorizada.

A probabilidade de falha de uma estrutura civil está relacionada a chance do sistema estrutural atingir um estado de desempenho defeituoso ou de ruína durante a sua utilização normal. Essa probabilidade não se encontra de forma explícita em muitas normas de projeto e operação estrutural, mas esses valores são utilizados para balizar essas normas.

Na avaliação de estruturas existentes, a identificação de danos indica um possível comprometimento do desempenho estrutural, fazendo a estrutura se aproximar de um estado de desempenho defeituoso ou de ruína, aumentando, portanto, a probabilidade de falha.

Portanto, os danos identificados em inspeções estão sendo utilizados para quantificação do aumento da probabilidade de falha do componente estrutural. Além dos danos identificados, os resultados dos ensaios de campo e laboratoriais realizados nos materiais do ativo e os resultados obtidos através do uso de sensores em campanhas de monitoração indicam o quanto o desempenho do ativo está distante dos padrões de qualidade esperados para esses ativos.

Os índices de probabilidade de falha calculados a partir dos danos mapeados em inspeções e resultados de ensaios serão utilizados para quantificar o risco que um determinado dano ou resultado de ensaio representa para o elemento não atender aos seus requisitos de funcionalidade, durabilidade e estabilidade estrutural.

O procedimento adotado permite que, no cálculo da probabilidade de falha associado ao dano identificado na inspeção, a severidade do dano seja considerada por meio de sua extensão. Por exemplo, danos lineares, como fissuras de flexão e cisalhamento, serão relacionados ao comprimento do elemento. Da mesma forma danos que se estendem em duas dimensões serão relacionados a área lateral, e danos volumétricos serão associados ao volume do elemento. Para considerar as diferentes naturezas de dano e, portanto, os diferentes níveis de comprometimento desse dano, a razão entre as dimensões do dano e do elemento estrutural deve ser ponderada pelo fator  $w_{\text{dano}}$ .

$$\text{Prob}_{\text{dano}} = \frac{d_{\text{1.dano}}}{d_{\text{elem}}} w_{\text{dano}}$$

Dessa forma o índice de probabilidade relativo ao dano em determinado elemento estrutural é definido como um número adimensional ou percentual, em função das características geométricas do elemento, ponderado pelo grau de comprometimento representado pela natureza do dano (peso do dano, fator  $w_{\text{dano}}$ ).

Após a ponderação dos efeitos dos danos nos elementos estruturais, também se leva em conta a relevância do elemento para o sistema do qual faz parte. Assim, elementos como contraventamentos possuem menor relevância que vigas transversinas, e essas por sua vez são menos relevantes que vigas longarinas, no caso de sistemas em vigas.

Finalmente é realizada a ponderação do sistema em relação ao ativo. Como sistemas podem ser relacionados superestrutura, mesoestrutura, aparelhos de apoio, infraestrutura, etc, e para cada um deles foi atribuído um peso que representa a sua importância e funcionalidade para o sistema estrutural como um todo.

Na etapa atual do estudo, o cálculo da probabilidade baseia-se somente no resultado de inspeções rotineiras e detalhadas, ainda sem considerar os ensaios realizados. Portanto as equações a seguir mostram como cálculo

da probabilidade de falha do ativo é calculado em função dos danos mapeados na inspeção e das diferentes funcionalidades de cada elemento e parte da estrutura.

Nessas equações é possível identificar a discretização do ativo e a aplicação do conceito de herança no sentido inverso, o ativo (pai) herda a probabilidade de falha dos seus sistemas (filhos) que por sua vez herda a probabilidade de falha de seus elementos (netos), e a probabilidade de falha está relacionada com os danos do elemento.

$$\begin{aligned}
 Prob_{ativo} &= \left( \sum_{sist=1}^{n_{sist}} Prob_{sist\ sist} \right) w_{ativo} Prob_{proj} w_{subjetivo} \\
 Prob_{sist} &= \left( \sum_{el=1}^{n_{elem}} Prob_{elem\ el} \right) w_{sist} \\
 Prob_{elem} &= \left( \sum_{d=1}^{n_{danos}} Prob_{dano\ d} \right) w_{elem} \\
 Prob_{dano} &= \frac{d_{1.dano}}{d_{elem}} w_{dano} \varphi(d_{2.dano})
 \end{aligned}$$

Onde:

$Prob_{proj}$  é a probabilidade de projeto assumida através do coeficiente de segurança global ou dos coeficientes de segurança parciais;

$Prob_{ativo}$  é a probabilidade de falha do ativo referente a probabilidade acumulada de falha de todos os sistemas do ativo conforme o cadastro da estrutura;

$Prob_{sist}$  é a probabilidade de falha do sistema referente a probabilidade acumulada de falha de todos os elementos do sistema conforme o cadastro da estrutura;

$Prob_{elem}$  é a probabilidade de falha do elemento referente a probabilidade acumulada de falha de todos os danos mapeados no elemento;

$Prob_{dano}$  é a probabilidade de falha que o dano representa ao elemento;

$w_{ativo}$  é o peso do ativo em relação ao trecho ou ramal ferroviário, conforma planilha (conceito em desenvolvimento);

$w_{sist}$  é o peso do sistema em relação ao ativo, conforma planilha;

$w_{elem}$  é o peso do elemento em relação ao sistema estrutural, conforma planilha;

$w_{dano}$  é o peso do dano em relação ao elemento ou material estrutural, conforma planilha;

$d_{n,dano}$  é a dimensão n do dano medida na inspeção;

$d_{elem}$  é a dimensão do elemento referente ao tipo de dimensão do dano associado;

$\varphi(d_{2,dano})$  é a função de ponderação determinada a partir da dimensão 2 do dano medida na inspeção;

O termo ‘Consequência’ da equação 1 está associado a consequência da falha de um componente ou do ativo. Na literatura é possível encontrar algumas formas de quantificar essa variável. A forma mais usada e mais aceita é relacionar a consequência da falha as perdas financeiras (e depreciação da imagem da empresa perante a sociedade e seus clientes) que decorrem da mesma.

As perdas financeiras podem ser estimadas considerando alguns fatores que vão desde o custo do componente ou ativo que falhou, ou possa vir a falhar, até os custos gerados com o processo de recuperação ou substituição.

Entretanto, em empresas do ramo ferroviário esses custos podem ser pouco significativos se comparados ao custo de paralisação da operação ferroviária, que são os custos diretos, além das multas de contratuais com prazo e volumes transportados que podem ser impactados pela paralisação, que são os custos indiretos.

Para o método de priorização de OAEs, inicialmente admitiu-se a consequência como sendo o valor financeiro do ativo e seus componentes. Na adoção desses valores foram considerados os valores informados para as apólices de seguro dos ativos.

Futuramente, na estimativa da consequência podem também ser considerados os custos relacionados a paralisação do ramal ferroviário que normalmente são maiores que os valores dos próprios ativos. Contudo esse valor depende de análises complexas que envolvem diversos setores da empresa. Assim, a consideração desses custos será considerada como parte do processo de melhoria contínua e desenvolvimento do processo de priorização e da ferramenta de gestão de manutenção de ativos.

## Tecnologias Aplicadas

O aprimoramento das ferramentas de gestão de ativos envolveu a incorporação de novas tecnologias, destacando-se:

- **Plataforma ArcGIS:** A utilização do ArcGIS permite o georreferenciamento das obras de arte especiais, associando dados de inspeção a coordenadas geográficas. Isso possibilita a visualização espacial dos ativos, facilitando a identificação de regiões críticas e a otimização de rotas para equipes de manutenção. Ademais, o ArcGIS possibilita a integração de camadas de informação, como histórico de inspeção e condições ambientais, permitindo uma análise preditiva da degradação estrutural.
- **Banco de dados estruturados:** A centralização de informações em um banco de dados estruturado possibilita o armazenamento seguro e a consulta rápida de registros históricos e dados atualizados em tempo real. Esse recurso permite a rastreabilidade de intervenções anteriores, garantindo que decisões de manutenção sejam baseadas em evidências concretas. A implementação de um banco relacional facilita a interconexão de dados entre diferentes fontes, possibilitando a integração com sistemas de gestão patrimonial e ERPs.
- **Automatização de relatórios:** A geração automatizada de relatórios proporciona maior eficiência no acompanhamento dos ativos, reduzindo o tempo gasto com documentação manual e minimizando erros humanos. Com base nos dados coletados e armazenados no banco de dados, é possível gerar diagnósticos detalhados sobre o estado das estruturas, indicando a necessidade de intervenções corretivas ou preventivas. Além disso, a automatização possibilita a geração de dashboards interativos, permitindo uma visualização intuitiva dos indicadores-chave de desempenho.

## 4. Resultados e Discussão

A implantação das ferramentas propostas resultou em melhorias significativas na gestão das OAEs. Entre os principais avanços, destacam-se:

- **Maior previsibilidade na gestão de manutenção:** A hierarquização das intervenções permitiu um planejamento mais eficiente, possibilitando a alocação de recursos de forma estratégica. Com a categorização das estruturas conforme seu estado de conservação e criticidade, foi possível antecipar necessidades de manutenção e evitar falhas inesperadas que poderiam comprometer a operação.
- **Redução de custos:** A implementação de um modelo baseado em manutenção preventiva minimizou custos relacionados a reparações emergenciais e intervenções corretivas de grande porte. O planejamento eficiente das inspeções e manutenções permitiu uma alocação mais inteligente dos recursos, otimizando os investimentos na conservação das infraestruturas.

- **Segurança aprimorada** A identificação precoce de falhas estruturais reduziu significativamente os riscos de colapso ou restrições operacionais. A utilização de dados geoespaciais e análises preditivas tornou possível detectar padrões de degradação e atuar de forma preventiva, garantindo a integridade das estruturas e a segurança dos usuários.
- **Gestão otimizada:** O uso da tecnologia geoespacial proporcionou um monitoramento em tempo real das condições das OAEs. Isso permitiu que as equipes responsáveis pela manutenção tivessem acesso a informações atualizadas e precisas, facilitando a tomada de decisões e garantindo um acompanhamento mais eficaz das intervenções planejadas.

## 5. Conclusão

Em complexas malhas ferroviárias, ou até mesmo rodoviárias, a gestão de grande quantidade de ativos de obras de arte especiais é um desafio, principalmente considerando a sua diversidade de idades, materiais, sistemas estruturais e níveis de utilização, além de outros fatores importantes, tal como a operação de produtos perigosos, questões ambientais e densidade operacional do trecho. Dessa forma, a matriz de priorização é uma importante ferramenta que permite ao gestor um direcionamento mais eficiente de recursos em ativos que possam ter seus requisitos de funcionalidade, durabilidade ou segurança estrutural abaixo de um nível de desempenho desejado num curto prazo, evitando-se paralizações indesejadas no transporte ferroviário.

De maneira geral o desenvolvimento de ferramentas para gestão de obras de arte especiais representa um avanço significativo na engenharia de infraestrutura, proporcionando maior segurança, eficiência operacional e sustentabilidade. A incorporação de tecnologias como o ArcGIS e a ampliação de matrizes de priorização são passos fundamentais para modernizar o setor.

Futuras pesquisas podem explorar a integração dessas ferramentas com Inteligência Artificial e Machine Learning, BIM e gêmeos digitais para aprimorar a previsibilidade e eficiência na manutenção dessas infraestruturas vitais para a mobilidade e o desenvolvimento econômico do país.

## Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e protendido. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BARROS, M. H.; MEDEIROS, M. H. Avaliação de estruturas de concreto: Inspeção e Diagnóstico. São Paulo: Pini, 2014.

COSTA, M. H.; SOUSA, J. F. Gestão de Infraestruturas de Transporte: Inspeção e Manutenção de Pontes e Viadutos. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2020.

DELLAZZANA, D. A.; AGUIAR, R. Critérios de Avaliação em Pontes e Viadutos: Inspeção e Gestão de Obras de Arte Especiais. Revista de Engenharia Civil, v. 25, n. 2, p. 45-62, 2020.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Manual de Inspeção de Obras de Arte Especiais (DNIT 010/2004-PRO). Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2004.

RIBEIRO, M. C.; ALMEIDA, S. Metodologias para a Gestão de Manutenção de Infraestruturas Viárias. Revista Brasileira de Engenharia Civil, v. 19, p. 155-170, 2018.

ROCHA, C. B.; SILVA, F. P. Avaliação Estrutural de Pontes: Procedimentos e Normas Técnicas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Civil, 2019.

SOUZA, V. M.; ALMEIDA, M. A. Inspeção e Monitoramento de Pontes em Concreto Armado: Uma abordagem baseada na NBR 9452. Revista de Engenharia de Estruturas, v. 17, n. 3, p. 123-138, 2021.

ZANON, R. Gestão e Manutenção de Obras de Arte Especiais: Desafios e Perspectivas. In: Simpósio Brasileiro de Infraestrutura de Transporte, 2022.