



26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

INDICADORES DE DESEMPENHO COMO FERRAMENTA DE SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO PARA A GERÊNCIA DE ESTRUTURAS NO ÂMBITO DO DNIT

*Paulo Fernando Matos de Santana¹; Sarah da Silva Brito¹; Wallas Borges Araújo¹;
Jorge Martins Sarkis¹; Rogério Calazans Verly²; Cintia Adriana Azevedo de Liz Anhaia³*

RESUMO

As Obras de Arte Especiais (OAEs), como pontes e viadutos, desempenham um papel crucial na infraestrutura de transporte. No âmbito Federal, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é responsável por gerir e manter todas as estruturas pertencentes à Malha Rodoviária Federal (MRF) no Brasil. Para garantir continuamente a segurança, durabilidade e funcionalidade, é essencial realizar o monitoramento do estado de condição dessas estruturas, por meio das inspeções periódicas. Até o momento, o DNIT utiliza um único indicador para avaliar o estado de condição e indicar estratégias de atuação para a manutenção das estruturas. Neste artigo, apresenta-se a proposição de indicadores de desempenho como ferramentas analíticas de suporte à tomada de decisão no âmbito da gerência de estruturas na Autarquia. Os índices avaliam objetivamente aspectos específicos das estruturas, como a obsolescência funcional, durabilidade e o aspecto estrutural. No que se refere à avaliação funcional, foi empregada a metodologia Analytic Hierarchy Process (AHP) na combinação de fatores intrínsecos à obra e que impactam na funcionalidade da estrutura. Quanto à durabilidade, foram realizadas adaptações da metodologia GDE/UnB, assim como para a formulação do indicador de avaliação estrutural. Com base no Índice Funcional (IF), Índice de Durabilidade (ID) e o Índice Estrutural (IE), os gestores podem tomar decisões embasadas, além de priorizar investimentos durante o planejamento das ações de manutenção e reabilitação das estruturas de forma otimizada, visando atender aos objetivos e metas estratégicas do órgão.

PALAVRAS-CHAVE: Obras de Arte Especiais; DNIT; indicadores de desempenho; suporte à decisão.

ABSTRACT

Structures, such as bridges and viaducts, play a crucial role in transport infrastructure. At the Federal level, the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) is responsible for managing and maintaining all structures belonging to the Federal Highway Network (MRF) in Brazil. To continuously guarantee safety, durability, and functionality, it is essential to monitor the condition of these structures through periodic inspections. To date, DNIT uses a single index to assess the condition state and indicate action strategies for the maintenance of structures. In this article, we present the proposition of performance indexes as analytical tools to support decision-making within the scope of structure management in the Autarchy. The indexes objectively evaluate specific aspects of the bridges, such as functional obsolescence, durability, and structural appearance. Concerning functional assessment, the Analytic Hierarchy Process (AHP) methodology was used to combine the bridge's intrinsic factors, which impact the functionality of the structure. Regarding durability, adaptations were made to the GDE/UnB methodology, as well as for the formulation of the structural assessment indicator. Based on the Functional Index (IF), Durability Index (ID), and Structural Index (IE), managers can make informed decisions, in addition to prioritizing investments during the planning of maintenance and rehabilitation actions of structures in an optimized way, aiming to meet the organization's strategic objectives and goals.

KEYWORDS: Structures; DNIT; Performance index; Support decision-making.

¹ Consórcio Engefoto-Pavesys, paulosantana@consorcioep.com.br; sarahbrito@consorcioep.com.br; wallasaraujo@consorcioep.com.br; jorgesarkis@consorcioep.com.br

² Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), rogerio.calazans@dnit.gov.br

³ Engefoto, cintializ@engefoto.com.br



INTRODUÇÃO

As Obras de Arte Especiais (OAEs), como pontes e viadutos, desempenham um papel crucial na infraestrutura de transporte. No âmbito Federal, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), órgão responsável pela gestão da Malha Rodoviária Federal (MRF) no Brasil, tem a incumbência de gerir e manter todos os seus ativos. Para assegurar de forma contínua a segurança, durabilidade e funcionalidade das estruturas, é crucial realizar inspeções regulares para monitorar o estado de condição dessas estruturas. A gerência de estruturas consome os dados de avaliação das estruturas e, por meio de ferramentas analíticas, realiza a priorização dos investimentos a serem empregados na manutenção do parque de obras, visando atender às metas institucionais da Autarquia.

O planejamento das ações de manutenção em estruturas é pautado, principalmente, no desempenho dos ativos. Também denominados “indicadores”, a sua utilização na gerência de estruturas favorece o monitoramento das atividades realizadas, assim como a avaliação do impacto de diferentes cenários de investimentos na qualidade da rede de estruturas. Na prática, existem dois tipos de abordagem na gestão de ativos: “de cima para baixo” (*top-down*) e “de baixo para cima” (*bottom-up*). A primeira é focada no planejamento e gerenciamento estratégico no nível de rede, enquanto a segunda compreende a análise no nível de projeto que, por sua vez, dita a estratégia de rede (MATOS e CASAS, 2017). A Figura 1, a seguir, demonstra os níveis de tomada de decisão comumente encontrados em uma agência de infraestrutura.

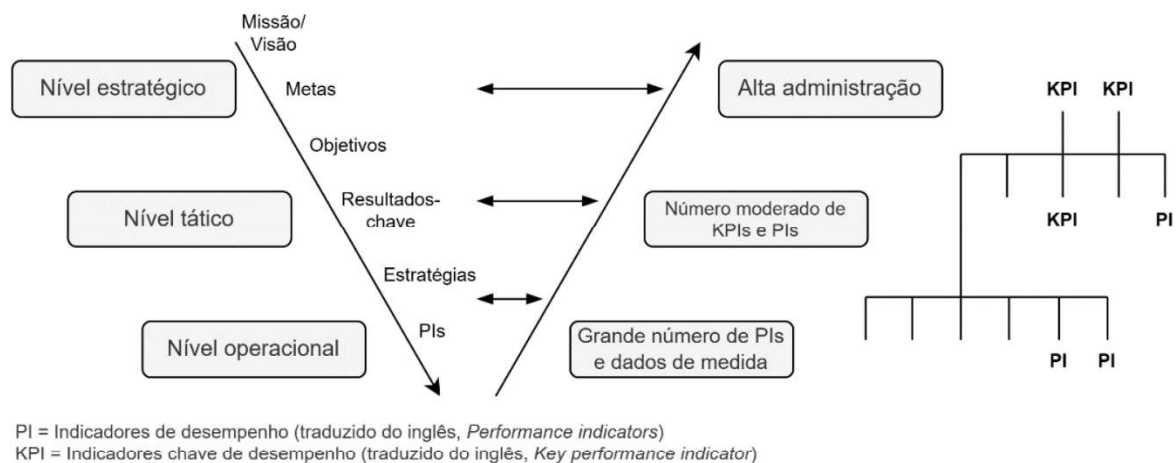


Figura 1 – Níveis de planejamento (adaptado de MATOS e CASAS, 2017)

A figura acima traz luz sobre o processo de gerenciamento de ativos, principalmente a respeito das decisões tomadas nos diferentes estratos de uma organização. Observa-se, também, o uso de indicadores de desempenho (PIs) e de indicadores chave de desempenho (KPIs) como ferramentas de gestão.

Partindo do nível estratégico, a alta administração de uma agência é responsável por definir quais serão os compromissos firmados com a sociedade relacionados à atuação do órgão, traduzidos pela



sua missão e visão. Nesse nível, são estabelecidos as metas e os objetivos, acompanhados por meio dos indicadores chave de desempenho, bem como o valor de investimento disponível para a execução de obras. No nível tático, a gerência do órgão é responsável por cumprir as metas de desempenho definidas pela alta administração e, ao mesmo tempo, atender às restrições orçamentárias impostas. Nesse nível, o papel da gerência é traduzir os objetivos do nível estratégico em “o quê”, “onde” e “quando” realizar as ações no nível tático e operacional. O acompanhamento das ações e a efetividade destas está intimamente relacionado aos indicadores chave de desempenho, que são alimentados pelos indicadores de desempenho. Por fim, a execução das ações em campo compete ao nível operacional, inclusive as atividades de monitoramento, realizadas por meio de inspeções, ensaios e outros tipos de avaliação de desempenho. O resultado desses levantamentos é indispensável para o cômputo dos indicadores. Observa-se, portanto, a similaridade, ante o exposto, em relação à estrutura organizacional do DNIT: a tomada de decisão é realizada pelas diretorias (nível estratégico), pelas coordenações (nível tático) e pelas unidades descentralizadas (nível operacional).

Atualmente o DNIT dispõe de um único indicador que representa a avaliação da condição global das estruturas, retrata a criticidade dos danos, define a indicação das intervenções (manutenção e reabilitação) e é empregado na priorização dos investimentos. Dessa maneira constitui-se um desafio a proposição de novos indicadores de desempenho para auxiliar na gerência de estruturas no âmbito do DNIT. O presente trabalho propõe a implementação de três indicadores de desempenho, sendo eles: Índice Funcional (IF), Índice de Durabilidade (ID) e Índice Estrutural (IE), que servem como ferramentas analíticas para o suporte à tomada de decisão, uma vez que sintetizam avaliações específicas com relação à parâmetros funcionais, de durabilidade e estruturais das OAEs.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na Austrália, tanto em abordagens *top-down* como *bottom-up*, indicadores de desempenho são fundamentais para guiar o planejamento das ações, seja em função dos recursos disponíveis ou das metas institucionais da agência. São considerados indicadores-chave: condição, segurança, nível de suficiência e confiabilidade da rede, que aborda critérios relacionados à ataques sísmicos, possibilidade de erosões, confiabilidade estrutural e rotas alternativas (AUSTROADS, 2013).

No guia de codificação para o inventário de estruturas (FHWA, 1995), o aspecto referente à suficiência da estrutura é retratado de maneira geral em um indicador que engloba diversas análises, como a adequação estrutural e segurança (avaliação da superestrutura e infraestrutura, classificação do inventário), capacidade de manutenção e obsolescência funcional (quantidade de faixas, Volume Médio Diário (VMD), largura da rodovia, largura da estrutura, tipo e importância da rodovia, gabaritos, nível d'água, dentre outros), e essencialidade para o uso público (comprimento do desvio, VMD e importância da rodovia).

Em 2015, Rashidi, Samali e Sharafi (2015) publicaram a proposição de um índice de prioridade que tem o objetivo de auxiliar à tomada de decisão quanto ao planejamento das ações de manutenção nas estruturas. O indicador conta com três fatores, que pondera características das obras sobre os seguintes aspectos: eficiência estrutural, eficiência funcional e impacto ao cliente. Desse estudo foram analisados os termos componentes do fator de eficiência funcional que, no cômputo do índice de prioridade proposto pelos autores, tem um peso adotado de 20%. Os autores ponderaram os



seguintes atributos da estrutura, com os respectivos pesos indicados entre parênteses: capacidade de carga (70%), avaliada conforme a norma de projeto australiana AS 5100.7, gabarito vertical (10%), gabarito horizontal (10%), tipo de barreira instalada (5%) e condição da drenagem do tabuleiro (5%).

Os parâmetros considerados são obtidos, principalmente, a partir dos dados de inspeções cadastrais e rotineiras. Além disso, dados de projeto são necessários, como é o caso da capacidade de carga, tendo este o maior peso atribuído para a eficiência funcional de uma OAE. Destaca-se que, dentre os parâmetros considerados no estudo, apenas características inerentes às OAEs são levantadas, ou seja, são atributos que não se alteram em função de fatores externos, exceto quando a estrutura passa por grandes modificações em suas características, como uma reabilitação, por exemplo.

No que se refere aos estudos relativos à durabilidade das estruturas, além das avaliações de inventário e classificação dos elementos, por meio de notas, uma metodologia desenvolvida e aperfeiçoada por pesquisadores brasileiros aborda especificamente o tema da deterioração em estruturas de concreto. A Metodologia GDE/UnB foi desenvolvida por Castro (1994), com o objetivo de avaliar quantitativamente estruturas de concreto convencionais. Após uma série de aplicações realizadas por Lopes (1998), Boldo (2002) e Fonseca (2007), obteve-se um melhor ajuste das formulações e dos parâmetros empregados com foco em estruturas de concreto de edificações.

Uma aplicação posterior foi realizada por Euqeres (2011), em onze pontes escolhidas aleatoriamente no estado de Goiás. Por fim, sumarizando todo o arcabouço técnico adquirido ao longo das aplicações da metodologia GDE/UnB em estruturas, seja em edificações ou em OAEs, a pesquisa de Verly (2015) apontou fragilidades do modelo quando aplicado em OAEs, além de particularidades da formulação que evoluíram com o tempo. O estudo então propôs uma correção para a formulação do grau de deterioração da estrutura, sanando os problemas observados e detalhando em exemplos o impacto da proposta de alteração na formulação.

Resumidamente, Verly (2015) apresenta a metodologia GDE/UnB como sendo um processo composto por etapas que abrangem atividades de escritório e de campo, sendo que as etapas de campo podem se limitar à atribuição dos valores para os Fatores de intensidade (F_i) do dano e para os Fatores de ponderação (F_p) de um dano. Já em escritório, podem ser criadas regras para o Fator de relevância estrutural (F_r) a ser aplicado para todas as famílias de elementos, independentemente da inspeção do indivíduo. O procedimento para o cálculo do grau de deterioração de uma estrutura se inicia com o cálculo do Grau do dano (D), seguido do Grau de deterioração do elemento (G_{de}), que considera todos os danos atribuídos ao mesmo elemento. Em seguida, determina-se o Grau de deterioração de uma família de elementos (G_{df}), e por fim, o Grau de deterioração da estrutura (G_d). De acordo com os resultados obtidos por Euqeres (2011) e Verly (2015), a metodologia GDE/UnB se mostrou bastante promissora quando aplicada também à Obras de Arte Especiais, considerando sobretudo os ajustes na formulação propostos por Verly (2015). Assim, o G_d pode ser adaptado às necessidades do DNIT de maneira a compor um indicador de desempenho especializado na avaliação da durabilidade das estruturas.

No que se refere à avaliação estrutural em OAEs, além da condição frente aos danos identificados na estrutura por meio das inspeções rotineiras, a análise da redundância estrutural é um tema discutido há muito tempo nos documentos técnicos e manuais para inspetores em agências de infraestrutura



internacionais (FHWA, 2012). A redundância estrutural é um conceito de grande relevância na análise estrutural e avaliação da estabilidade de estruturas, visto que a capacidade de redistribuição de esforços, bem como a configuração do sistema construtivo adotado em uma estrutura, podem ser determinantes no comportamento dela, tanto em casos de colapso parcial quanto progressivo. O mesmo manual estabelece que o principal tipo de redundância a ser avaliado nas estruturas é a redundância para os caminhos de carga. Consideram-se nesse tipo de redundância as estruturas projetadas com três ou mais elementos principais para o caminho das cargas entre apoios. Entende-se que, em caso de falha de um desses elementos, a carga pode ser redistribuída para os demais elementos e a estrutura pode vir a não sofrer um colapso global. Abaixo de três elementos principais, as estruturas são consideradas não redundantes.

No campo de pesquisa de métodos para priorização de estruturas, Darban *et. al.* (2021) empregaram o Analytic Hierarchy Process (AHP) como ferramenta para priorizar OAEs no Irã, fazendo uso de dados de monitoramento da saúde estrutural do parque de obras. Os resultados da pesquisa indicaram a possibilidade de uso do método AHP em programas de priorização, devido a facilidade de implementação da metodologia e flexibilidade para adaptação de acordo com os requisitos de cada gestor.

METODOLOGIA

Nos itens a seguir são apresentadas as sistemáticas utilizadas pelos autores nas proposições do Índice Funcional, Índice de Durabilidade e Índice Estrutural, considerando o embasamento teórico apresentado anteriormente.

Analytic Hierarchy Process (AHP)

Com base na pesquisa de Rashidi, Samali e Sharafi (2015) e, considerando as necessidades do DNIT, foram adaptados os parâmetros sugeridos pelos autores para a avaliação funcional das estruturas. No lugar de pesos arbitrados para cada parâmetro, utilizou-se uma análise de importância entre as variáveis, por meio do método AHP, em dois níveis. Ampliando o escopo de variáveis a serem analisadas, apresenta-se, a seguir, os parâmetros para a avaliação funcional das estruturas sob administração do DNIT que compõem o Índice Funcional:

- **TT** – Capacidade de carga, avaliada conforme o trem-tipo de projeto da OAE e o ano de construção;
- **ER** – Percentual de estrangulamento da plataforma da rodovia sobre a OAE, em conjunto com a extensão da OAE;
- **BNJ** – Tipo de barreira instalada;
- **GV** – Deficiência funcional de gabarito vertical;
- **DR** – Deficiência funcional de drenagem de pista;
- **PA** – Ausência de passeio para pedestres.

Com relação a capacidade de carga, uma vez que o conhecimento da capacidade resistente de uma estrutura envolve grandes incertezas, sobretudo em estruturas sujeitas a carregamentos móveis e efeitos de fadiga, optou-se por utilizar a informação do trem-tipo de projeto, se conhecido. Durante as inspeções, em caso de desconhecimento da informação baseada em registros do projeto de construção, o inspetor pode aproximar a informação do trem-tipo e do ano de construção em função



da geometria e características físicas da obra, comparando com os requisitos dispostos no Manual de Inspeção de Obras de Arte Especiais (BRASIL, 2004). O percentual de estrangulamento da plataforma da rodovia sobre a OAE e a extensão são parâmetros que, quando analisados em conjunto, representam uma análise de segurança e limitação do nível de serviço da rodovia devido à obsolescência funcional da estrutura. Os tipos de barreiras instaladas são avaliados considerando que o padrão New Jersey é o mais adequado, por questões de segurança. Logo, outros tipos de barreiras e também a ausência delas, são levadas em consideração na análise de importância dos parâmetros. Deficiências funcionais de gabarito vertical, drenagem de pista e a ausência de passeio para pedestres são outros critérios importantes para a funcionalidade da estrutura, indicados nas inspeções cadastrais.

Para cada uma das variáveis, são atribuídos fatores de criticidade, quanto à obsolescência funcional, que variam de 1 a 4, sendo 1 o fator menos crítico e 4 o mais crítico. O método AHP foi aplicado em dois níveis, ou seja, primeiramente foram analisadas as importâncias isoladas dos critérios considerados, por exemplo: trem-tipo é um critério mais importante que o tipo de barreira instalada? Ou a deficiência funcional de gabarito vertical é um critério mais importante que a ausência de passeio para pedestres? A matriz de importância dos critérios (nível 1) é apresentada na Figura 1, a seguir.

	TT	ER	BNJ	GV	DR	PA	Autovetor
TT	1	0,25	0,50	3	5	0,33	0,111
ER	4,000	1	3	7	9	2	0,394
BNJ	2,000	0,333	1	4	6	0,50	0,165
GV	0,333	0,143	0,250	1	2	0,20	0,049
DR	0,200	0,111	0,167	0,500	1	0,14	0,030
PA	3,000	0,500	2,000	5,000	7,000	1	0,251

Figura 1 – AHP Nível 1: critérios

Nos subcritérios (nível 2), são definidos os graus de importância entre as características analisadas. Da Figura 2 a 7, a seguir, apresentam-se as matrizes de importância obtidas para todos os subcritérios. Na análise do estrangulamento da rodovia sobre a OAE (Figura 3), o percentual de estrangulamento é representado por w e a extensão da OAE é representada por EX .

TT	Fator crit.	Classe 24 (Até 1960)	Classe 36 (1961 a 1985)	Classe 45 (1986 a 2013)	Classe 45 (Após 2013)	Autovetor
Classe 24 (Até 1960)	4	1	2	3	4	0,469
Classe 36 (1961 a 1985)	3	0,500	1	2	3	0,280
Classe 45 (1986 a 2013)	2	0,333	0,500	1	1	0,136
Classe 45 (Após 2013)	1	0,250	0,333	1	1	0,115

Figura 2 – AHP Nível 2: subcritério TT



ER	Fator crit.	$w \geq 40\%$ & $EX \geq 50m$	$w \geq 40\%$ & $EX < 50m$	$31\% \leq w < 40\%$ & $EX \geq 100m$	$31\% \leq w < 40\%$ & $EX < 100m$	$16\% \leq w < 31\%$ & $EX \geq 150m$	$16\% \leq w < 31\%$ & $EX < 150m$	$w < 16\%$	Autovetor
$w \geq 40\%$ & $EX \geq 50m$	4	1	2	4	5	6	7	8	0,372
$w \geq 40\%$ & $EX < 50m$	3,75	0,500	1	2	4	5	6	7	0,245
$31\% \leq w < 40\%$ & $EX \geq 100m$	2,90	0,250	0,500	1	2	4	5	6	0,156
$31\% \leq w < 40\%$ & $EX < 100m$	2,70	0,200	0,250	0,500	1	2	4	5	0,099
$16\% \leq w < 31\%$ & $EX \geq 150m$	1,80	0,167	0,200	0,250	0,500	1	2	4	0,063
$16\% \leq w < 31\%$ & $EX < 150m$	1,60	0,143	0,167	0,200	0,250	0,500	1	2	0,038
$w < 16\%$	1	0,125	0,143	0,167	0,200	0,250	0,500	1	0,026

Figura 3 – AHP Nível 2: subcritério ER

BNJ	Fator crit.	Barreira inexistente	Guarda-corpo obsoleto ou qualquer	Barreira New Jersey	Autovetor
Barreira inexistente	4	1	3	9	0,658
Guarda-corpo obsoleto ou qualquer	3	0,333	1	6	0,282
Barreira New Jersey	1	0,111	0,167	1	0,060

Figura 4 – AHP Nível 2: subcritério BNJ

GV	Fator crit.	Gabarito vertical insuficiente	Sem deficiência de gabarito vertical	Autovetor
Gabarito vertical insuficiente	4	1	5	0,833
Sem deficiência de gabarito vertical	1	0,200	1	0,167

Figura 5 – AHP Nível 2: subcritério GV

DR	Fator crit.	Drenagem de pista insuficiente	Sem deficiência de drenagem	Autovetor
Drenagem de pista insuficiente	4	1	3	0,750
Sem deficiência de drenagem	1	0,333	1	0,250

Figura 6 – AHP Nível 2: subcritério DR

PA	Fator crit.	Calçada para pedestre inexistente	Sem deficiência de passeio	Autovetor
Calçada para pedestre inexistente	4	1	9	0,900
Sem deficiência de passeio	1	0,111	1	0,100

Figura 7 – AHP Nível 2: subcritério PA

Com todos os subcritérios definidos e fatores de criticidade atribuídos, o método AHP retorna um autovalor que é utilizado na combinação com o autovalor do critério analisado no nível 1. Assim, o



cálculo do Índice Funcional é realizado por meio da Equação 1, a seguir, e o seu valor final é convertido para uma escala contínua que varia de 0 a 10, onde 0 significa uma obra totalmente suficiente e 10 significa uma obra totalmente deficiente, em termos do aspecto funcional.

$$IF = (p_{TT,1} \cdot p_{TT,2}) + (p_{ER,1} \cdot p_{ER,2}) + (p_{BNJ,1} \cdot p_{BNJ,2}) + (p_{GV,1} \cdot p_{GV,2}) + (p_{DR,1} \cdot p_{DR,2}) + (p_{PA,1} \cdot p_{PA,2}) \quad (3)$$

Onde,

$P_{TT,1}$ e $P_{TT,2}$ – Autovalores do trem-tipo para os níveis 1 e 2, respectivamente;

$P_{ER,1}$ e $P_{ER,2}$ – Autovalores do estrangulamento da rodovia para os níveis 1 e 2, respectivamente;

$P_{BNJ,1}$ e $P_{BNJ,2}$ – Autovalores do tipo de barreira instalada para os níveis 1 e 2, respectivamente;

$P_{GV,1}$ e $P_{GV,2}$ – Autovalores do gabarito vertical para os níveis 1 e 2, respectivamente;

$P_{DR,1}$ e $P_{DR,2}$ – Autovalores da drenagem de pista para os níveis 1 e 2, respectivamente;

$P_{PA,1}$ e $P_{PA,2}$ – Autovalores da ausência de passeio para os níveis 1 e 2, respectivamente.

Metodologia GDE/UnB

A proposição do Índice de Durabilidade baseou-se no cálculo do G_d da metodologia GDE/UnB, salvo algumas adaptações necessárias nos fatores de intensidade e de ponderação. Para a determinação do F_i foi utilizada uma proposta de Estado de Condição (EC) para cada dano na estrutura. Para o F_p foram propostos pesos para cada dano aplicável a cada elemento presente no Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO), com foco no impacto à durabilidade da estrutura. Para o cálculo do G_d , foi utilizada uma adaptação da formulação já corrigida por Verly (2015), com o objetivo de alterar a escala final do ID para que o mesmo varie de 0 a 100 em 5 classes discretas com razão igual a 20. A equação ajustada para o cálculo do ID é apresentada na Equação 2, a seguir.

$$ID = \frac{K_{máx}}{8,8885} \sqrt{1 + \frac{(\sum_{i=1}^n K_i) - K_{máx}}{\sum_{i=1}^n K_i}} \quad (2)$$

Onde $K_{máx}$ é o maior valor dentre os K_i , que representa o produto entre os $G_{d,i}$ e o respectivo Fator de relevância estrutural (F_r) de cada família. n é o número de famílias da estrutura. A constante 8,8885 é um ajuste para que a escala do G_d , ou seja, do ID, seja de 0 e 100.

Redundância estrutural

Com o objetivo de incluir a análise da redundância estrutural no cômputo do Índice Estrutural de OAEs, buscou-se empregar sistemáticas simplificadas, observando características de cadastro das estruturas. Dessa maneira, considerando que a redundância transversal tem uma importância mais acentuada que as demais elencadas na literatura, evidenciou-se três grupos de famílias de elementos: aparelhos de apoio, arcos e pontes sobre vigas. Outros sistemas construtivos como pontes em laje, viga caixão e outros, são grupos onde a análise da redundância transversal não se aplica.

A proposição do Índice Estrutural visa não destoar significativamente da filosofia atualmente empregada no DNIT para a Nota Técnica (NT), atribuída a cada família de elementos durante as



inspeções, tendo em vista que esse indicador possui um forte viés de criticidade. Portanto, propõe-se que a avaliação estrutural de uma OAE seja comandada por dois indicadores. O primeiro é a Nota Técnica, adicionando-se a ela a avaliação dos possíveis ganhos decorrentes de uma eventual capacidade de redistribuição de esforços, devido à redundância transversal da estrutura em cada vão. O segundo indicador é o Índice Estrutural, que terá o papel de avaliar a extensão dos problemas identificados nas estruturas, por meio de uma adaptação da metodologia GDE/UnB, tal como realizado no cálculo do grau de deterioração da estrutura.

A ideia de utilizar a metodologia GDE/UnB é a de agregar defeitos, partindo-se da condição mais grave de um elemento, ainda que seja considerada a possibilidade de redundância transversal. Dessa maneira, propõe-se uma rotina de avaliação da existência de redundância transversal em cada vão da estrutura, com o objetivo de considerar um possível ajuste de nota para aquele(s) elemento(s) principal(is) que estejam com a menor Nota Técnica dentre os elementos do mesmo vão. Importante destacar que, por se tratar de um procedimento analítico para gerência, os dados de avaliação das estruturas não são alterados no banco de dados. A Equação 3, a seguir, apresenta o cálculo da NT ajustada para o caso de haver redundância transversal dos elementos principais por vão da estrutura. O valor final é arredondado para o inteiro mais próximo.

$$NT^+ = arred\left\{NT + \left(\frac{Q_{elem}}{Q_{NT \leq 2}} \cdot \frac{\sum NT}{80}\right)\right\} \quad (3)$$

Onde NT é a Nota Técnica atribuída pelo inspetor para o elemento individual. Q_{elem} é a quantidade de elementos considerados no vão. $Q_{NT \leq 2}$ é a quantidade de elementos no vão com NT menor ou igual a 2 e $\sum NT$ é o somatório de todas as NTs dos elementos individuais no vão analisado. Uma vez realizado o possível ajuste de notas daqueles elementos principais em pior condição, busca-se, por componente da estrutura (transição, vão ou apoio), a menor NT dentre todos os elementos vinculados, não apenas dentre os elementos ditos principais para a redundância. Nesse processo, considera-se que os elementos com função secundária também possuem relevância ao ponto de poderem subsidiar a NT do componente, acrescentando-se 1 ponto à NT originalmente atribuída, se a mesma for menor que 5. Desse modo, o cálculo do Índice Estrutural é realizado por meio da Equação 4, proposta em adaptação à formulação da metodologia GDE/UnB, e utilizando as Equações 5 e 6, a seguir.

$$IE = K_{1,máx} \sqrt{1 + \frac{\sum_{i=1}^n K_{2,i} - K_{1,máx}}{\sum_{i=1}^n K_{2,i}}} \quad (4)$$

$$K_1 = NT_{c,i} \cdot F_{rc,i} \quad (5)$$

$$K_2 = NT_{e,i}^+ \cdot F_{re,i} \quad (6)$$

Onde n é a quantidade de elementos individuais da estrutura, $K_{1,máx}$ é o maior valor da variável K_1 . $K_{2,i}$ é o valor da variável K_2 para o elemento individual i . K_1 é o produto da NT do componente i ($NT_{c,i}$) pelo Fator de relevância do componente i ($F_{rc,i}$). K_2 é o produto da NT do elemento i , que pode ser ajustada em função da redundância transversal ($NT_{e,i}^+$) pelo Fator de relevância do elemento i ($F_{re,i}$). Quanto ao F_{rc} , adotou-se para a transição, vão e apoio os seguintes valores: 5, 4 e 5, respectivamente. Para o F_{re} , atribuíram-se valores numa escala de 1 a 5, para todas as famílias de elementos cadastradas no SGO. Por fim, no cálculo das variáveis K_1 e K_2 , a NT dos elementos e dos



componentes da estrutura é transformada, de modo a priorizar os indivíduos em pior estado, ou seja, para que o maior produto ressalte as piores notas. Assim, em ambas as equações, a NT é transformada, por exemplo, de 5 para 0, de 4 para 1, de 3, para 2, de 2 para 4 e de 1 para 5.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a aplicação da proposição do Índice Funcional foram utilizados dados de cadastro de todas as estruturas do banco de dados do SGO. Já as aplicações das proposições dos Índices de Durabilidade e Estrutural foram realizadas em caráter teórico, por meio de planilhas eletrônicas e exemplos genéricos, uma vez que o SGO mantém o cadastro de estruturas em nível de família de elementos e, portanto, a ausência da individualidade dos elementos e danos impossibilitou a aplicação para todo o banco de dados de estruturas.

Dessa forma, neste capítulo apresentam-se os resultados e discussões acerca da aplicação de cálculo para o Índice Funcional de OAEs. O indicador combina características de cadastro das estruturas para representar, em um número, o seu grau de obsolescência funcional. A metodologia proposta foi operacionalizada em planilhas eletrônicas. Na Tabela 1, a seguir, apresentam-se as principais características consideradas para o cálculo do indicador referentes a três estruturas do banco de dados. Os valores entre parênteses referem-se aos fatores de criticidade para cada subcritério na análise pelo método AHP.

Tabela 1 – Características das OAEs e cálculo do Índice Funcional

Código SGO	130149	160100	060861
Tipologia da estrutura	2 vigas de concreto armado	2 vigas de concreto armado	6 vigas de concreto protendido
Trem-tipo	Classe 24 (4)	Classe 24 (4)	Classe 45 (1)
Ano de construção	1951	1950	Não informado
Extensão (m)	168,70	50,50	91,00
w (%)	56 (4)	42 (4)	1 (1)
Barreira New Jersey	Não (3)	Não (3)	Sim (1)
Gabarito vertical	Suficiente (1)	Suficiente (1)	Suficiente (1)
Drenagem de pista	Insuficiente (4)	Suficiente (1)	Insuficiente (4)
Necessidade de passeio	Sim (4)	Não (1)	Não (1)
Índice Funcional (IF)	8,19	4,06	0,29

De acordo com a Figura 8, a seguir, observam-se as diferenças elencadas na Tabela 1 para as três estruturas analisadas. O percentual de estrangulamento da rodovia foi maior nas estruturas com trem-tipo de projeto mais antigo e ausência de barreira New Jersey, sendo fatores que impactam consideravelmente no nível de serviço da rodovia no ponto onde se encontra a OAE. Dentre as estruturas analisadas, a que possui o Código SGO 130149 se destacou com um elevado IF, visto que além das demais características, foi indicada em seu cadastro a necessidade de passeio para pedestres e, de acordo com o Nível 1 do método AHP, esse critério possuiu o segundo maior peso na análise de importância.



OAE Código SGO 130149



OAE Código SGO 160100



OAE Código SGO 060861

Figura 8 – OAEs utilizadas no teste de aplicação da proposição do Índice Funcional (SGO, 2024)

CONCLUSÕES

A necessidade atual da gerência de estruturas no âmbito do DNIT em avaliar, separadamente, os parâmetros funcional, de durabilidade e estrutural, tem como objetivo criar ferramentas analíticas para dar suporte à tomada de decisão. No nível estratégico, a alta administração pode definir metas específicas para esses indicadores na criação de um plano plurianual de investimentos, cujo controle pode ser feito via indicadores de desempenho nos níveis tático e operacional da Autarquia. Metodologias empregadas em outras agências, sobretudo internacionais, além de uma metodologia desenvolvida por pesquisadores brasileiros foram estudadas com o objetivo de avaliar os parâmetros considerados e propor modificações para sua aplicação à realidade do DNIT. A disponibilidade e facilidade de obtenção dos dados também foi um critério utilizado para avaliar quais características seriam consideradas.

Assim, o Índice Funcional melhor traduz as necessidades de reabilitação das estruturas, elencando características que avaliam o grau de deficiência funcional, não necessariamente sendo indicada esse tipo de intervenção por avaliação da condição frente aos defeitos identificados. Nesse sentido age o Índice de Durabilidade, ponderando cada dano e seus impactos na durabilidade da estrutura, sendo um índice suficiente para gerir as necessidades de manutenção. O Índice Estrutural e a atual Nota Técnica dão importância para a redundância estrutural e insuficiências estruturais que geram riscos tangíveis de colapso. Uma estrutura com um problema estrutural grave e localizado poderá ter um alto IE, devido à sua relevância quanto à criticidade. Outros problemas localizados elevam com pouca significância o indicador, mantendo a prioridade em função do problema mais crítico.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSTROADS. Bridge Management Using Performance Models. Austroads, ISBN 978-1-925037-36-4. Sydney, Australia. 2013.
- BOLDO, P. Avaliação quantitativa de estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro. Dissertação de Mestrado. Publicação E.DM-01A/02. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 295p. 2002.
- BRASIL, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa (DPP). Coordenação do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias – Publicação 709. 2ª edição. Rio de Janeiro. 2004.
- CASTRO, E.K. Desenvolvimento de metodologia para manutenção de estruturas de concreto armado. Dissertação de Mestrado. Publicação E.DM-04A/94. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 185p. 1994.
- DARBAN, S.; GHASEMZADEH TEHRANI, H.; KARBALLAEZADEH, N.; MOSAVI, A. Application of Analytical Hierarchy Process for Structural Health Monitoring and Prioritizing Concrete Bridges in Iran. Applied Sciences, v.11, n.17, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11178060>.
- EUQUERES, E.K. Metodologia de inspeção de pontes de concreto armado. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 168p. 2011.
- FHWA, Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation. Office of Engineering Bridge Division. Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges. Report N° FHWA-PD-96-001. December, 1995. Washington, D.C.
- FHWA, Federal Highway Administration. Bridge Inspector's Reference Manual (BIRM). Report n° FHWA NHI 12-049. Virginia, USA. 2012. Arlington, Virginia
- FONSECA, R.P. A estrutura do Instituto Central de Ciências: Aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e propostas de manutenção. Dissertação de Mestrado. Publicação E.DM-06A/07. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 213p. 2007.
- LOPES, B.A.R. Sistema de manutenção predial para grandes estoques de edifícios: Estudo para inclusão do componente "Estrutura de Concreto". Dissertação de Mestrado. Publicação E.DM-11A/98. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 308p. 1998.
- MATOS, J.C.; CASAS, J.R. COST Action TU1406 – WG2 Technical Report: Performance goals for Roadway Bridges. ISBN: 978-3-900932-41-1. 2017.
- RASHIDI, M., SAMALI, B., SHARAFI, P. A new model for bridge management: Part A: condition assessment and priority ranking of bridges. Australian Journal of Civil Engineering. 2015.
- VERLY, R.C. Avaliação de metodologias de inspeção como instrumento de priorização de intervenções em obras de arte especiais. Dissertação de Mestrado. Publicação E.DM-015A/15. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 178p. 2015.