

PROPOSTA DE MODELO DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA OPERAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS

Gabriela Becker Domingues (Mestranda da Universidade Federal do Paraná);
gabrielabdomingues@gmail.com.
Mauro Lacerda Santos Filho (Professor PhD da Universidade Federal do Paraná)
Carlos Frederico Alice Parchen (Professor Doutor da Universidade Federal do Paraná)

Resumo: Pontes e viadutos são obras essenciais para o desenvolvimento do território, sendo a sua gestão objeto de estudo em diversos países. O presente trabalho propõe um modelo de análise da vulnerabilidade da operação destas obras, que indica quais elementos tem prioridade de intervenção, e permite simular cenários de deterioração, auxiliando na destinação de recursos para manutenção. Vulnerabilidade é a relação entre dano e sua consequência: quanto menor for o esforço necessário para provocar um dano e maior for a consequência para a obra, maior será a vulnerabilidade. A ferramenta foi desenvolvida a partir de metodologia de avaliação de pontes e viadutos da UFPR, e estabelece uma analogia à Teoria da Vulnerabilidade Estrutural. Exemplificando o uso do modelo, é apresentada a sua aplicação em uma ponte. A presente proposta fornece ao gestor uma ótica diferenciada, e com aprimoramento matemático e validação dos parâmetros adotados, mostra-se interessante para uso em sistemas de gestão.

Palavras-chave: Obras de arte especiais, gerenciamento, inspeção, avaliação.

PROPOSAL FOR A VULNERABILITY ANALYSIS MODEL OF BRIDGES AND VIADUCTS OPERATION

Abstract: Bridges and viaducts are essential works for the territory development, so that their management are studied in many countries. The present work proposes a vulnerability analysis model of bridges and viaducts operation, which indicates the elements with intervention priority, and allows the simulation of deterioration scenarios, helping in the resources allocation for maintenance. Vulnerability is the relationship between damage and its consequence: the less effort required to cause damage and the greater the consequence

for the operation, greater will be the vulnerability. The tool was developed from the bridges and viaducts evaluation methodology of UFPR, and establishes an analogy to Structural Vulnerability Theory. Exemplifying the model use, is presented its application on a bridge. The present proposal provides a different perspective to the manager, and with mathematical improvement and validation of the adopted parameters, may be interesting for use in management systems.

Keywords: Management, inspection, evaluation.

1. INTRODUÇÃO

Obras de arte especiais (OAEs) possuem papel primordial no desenvolvimento social e econômico do território, seja no âmbito das micro ou macro regiões. Este impacto positivo é acentuado no Brasil, onde os modais rodoviário e ferroviário, compostos por um grande número de pontes e viadutos, são responsáveis pelo transporte de aproximadamente 81,8% das cargas movimentadas no território (CNT, 2014).

A Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2017) divulgou em seu último relatório que de 105.814 km de rodovias analisadas, apenas 38,2% tem estado geral classificado como ótimo ou bom. Entre os aspectos avaliados estão as OAEs, presentes em 54.972 km, onde somente 25,7% possuem barreiras laterais e acostamento completos, 64,2% não apresentam um destes dispositivos, e em 10,1% não há nem defesa nem acostamento. A pesquisa também aponta que as obras sob gestão concedida apresentam melhores condições se comparadas às obras sob gestão pública.

Dado este cenário o Governo Brasileiro vem investindo no aprimoramento do seu Sistema de Gestão de OAEs (SGO). Em uma parceria entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Universidade Federal do Paraná (UFPR), através do Escritório Modelo de Engenharia Civil (EMEA), estão sendo estudadas melhorias para o SGO, além do incremento do banco de dados do sistema através da inspeção de aproximadamente 520 OAEs, localizadas nos estados do Paraná e Santa Catarina.

Um dos estudos em andamento consiste em uma metodologia de análise da vulnerabilidade da operação de OAEs, que objetiva investigar quais as consequências no desempenho de uma obra quando submetida a algum tipo de dano estrutural ou funcional. Deste modo é possível identificar quais reparos são mais eficientes para a melhoria global

da operação da ponte, permitindo uma racionalização dos investimentos para revitalização destas obras.

A proposta apresentada neste trabalho destaca-se por permitir a simulação de possíveis comportamentos futuros da obra. Outro ponto relevante é o fato de considerar não apenas os aspectos estruturais, mas também de durabilidade dos elementos, e operacionais, que permitem ao usuário uma experiência segura e confortável.

O modelo preliminar de análise da vulnerabilidade da operação de pontes e viadutos foi desenvolvido estabelecendo uma analogia à Teoria da Vulnerabilidade Estrutural (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002) e utilizando parâmetros provenientes do Modelo de Avaliação da Performance de OAEs da UFPR (EMEA, 2016a, 2016b). Este artigo apresenta uma breve introdução às fontes de desenvolvimento supracitadas, a metodologia adotada para desenvolvimento do modelo, a proposta de modelo, e a aplicação deste em uma ponte.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Modelo UFPR de avaliação da performance de obras de arte especiais

A Universidade Federal do Paraná desenvolveu um modelo de avaliação da performance de OAEs, objetivando apresentar uma metodologia capaz de analisar as condições estruturais e funcionais destas obras, resultando em um ranqueamento segundo a urgência de intervenção. O Modelo UFPR utiliza as informações coletadas nas inspeções de campo, as parametriza, e retrata através de um índice numérico o grau de deterioração da obra, para que esta informação seja usada como critério na determinação da urgência intervenção. As notas de cada obra são relativizadas para permitir a comparação entre diferentes estruturas, viabilizando o seu ranqueamento para priorização da destinação de recursos financeiros para reparo e recuperação.

A metodologia desenvolvida pela UFPR é alimentada por informações de cada um dos danos existentes na obra, caracterizados por cinco parâmetros que compõem o “valor do dano” (VD), e a somatória do valor do dano de todas as deficiências da OAE resulta no seu “índice de performance” (IP), como apresentado na equação 1:

$$IP = \sum VD = \sum B_i \times K_{1i} \times K_{2i} \times K_{3i} \times K_{4i} \quad (1)$$

Onde:

B_i = valor associado ao tipo de dano i (tabela 1);

K1i = fator que representa a importância do elemento estrutural afetado (tabela 2);
 K2i = fator que indica a intensidade do dano i no elemento (tabela 3);
 K3i = fator que retrata a ocorrência do dano i em outros elementos do mesmo tipo (tabela 4);
 K4i = fator que enfatiza a urgência da intervenção no dano i (tabela 5).

O índice de performance deve ser relativizado para que seja possível a comparação dos índices de diferentes OAEs. A relativização é obtida através da divisão pelo “valor do dano de referência”, dado pela consideração da ocorrência de todos os danos (B) que podem afetar os elementos (K1) que compõem a ponte em análise, multiplicados pelos valores máximos dos fatores de intensidade e extensão do dano (K2 e K3), e pelo valor mínimo para o fator de urgência de reparo (K4).

Tabela 1 – Valores de B para alguns dos tipos de danos considerados no modelo.

Dano	B
Fissura mapeada. Indícios (manchas) de fogo, umidade, ou eflorescência.	1,0
Desalinhamento ou deslocamento de elemento estrutural. Deficiência de concretagem; na junta de dilatação; no sistema de drenagem; na sinalização. Inexistência de passeio em área urbana. Barreira danificada ou inexistente.	2,0
Exposição das estacas da fundação. Fissura estrutural. Recalque ou deslizamento do aterro. Desnível no tabuleiro. Buraco no pavimento.	3,0
Corrosão da armadura. Recalque diferencial.	4,0
Deformação excessiva de elemento estrutural	5,0

FONTE: Adaptado de EMEA (2016a).

Tabela 2 – Valores de K1 para alguns dos tipos de elementos considerados no modelo.

Elemento	K1
Barreira; guarda rodas; guarda corpo; sinalização.	0,1
Encontro; aterro de acesso; laje de aproximação; junta de dilatação; sistema de drenagem; pavimento; calçada (passeio); operação.	0,2
Viga transversina.	0,3
Laje; viga travessa; pilar; aparelho de apoio; fundação; muro de contenção.	0,4
Viga principal.	0,6

FONTE: Adaptado de EMEA (2016a).

Tabela 3 – Valores de K2.

Porcentagem da área superficial do elemento afetada pelo dano	K2
Menos de 3% (dano insignificante)	0,0
De 3% a 10% (dano pequeno)	0,5
De 11% a 25% (dano médio)	1,0
De 26% a 75% (dano grande)	1,5
Mais de 75% (dano imenso)	2,0

FONTE: Adaptado de EMEA (2016a).

Tabela 4 – Valores de K3.

Repetição do dano em elementos do mesmo tipo	K3
Aparece em menos de 10% dos elementos	0,5
Aparece em 10% a 25% dos elementos	1,0
Aparece em 26% a 75% dos elementos	1,5
Aparece em mais de 75% dos elementos	2,0

FONTE: Adaptado de EMEA (2016a).

Tabela 5 – Valores de K4.

Urgência de intervenção no dano	K4
Intervenção não urgente	1,0
Dano a reparar em até 5 anos	2,5
Reparo imediato	4,0
Limitação de carga e interrupção do tráfego	5,0

FONTE: Adaptado de EMEA (2016a).

Este modelo atualmente está na fase de calibração, e para tal foi aplicado em aproximadamente 520 OAEs situadas nos estados do Paraná e Santa Catarina, através de parceria entre UFPR e DNIT.

2.2 Teoria da Vulnerabilidade de Sistemas Estruturais

A Teoria da Vulnerabilidade Estrutural (TVE) permite a identificação dos elementos mais vulneráveis de uma estrutura, através do estudo de cenários de falha. Uma estrutura, ou parte dela, é considerada vulnerável se um dano relativamente pequeno causar consequências desproporcionalmente grandes. Por exemplo, se a remoção de uma única viga provocar o colapso imediato de um edifício por completo, entende-se que este elemento apresenta significativa vulnerabilidade (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002). A singularidade da Teoria está no fato de que ela não aponta os eventos de deterioração com maior probabilidade de ocorrência, mas sim os que podem ter graves consequências.

A TVE parte da verificação da forma da estrutura, analisando de que modo os elementos estruturais são conectados uns aos outros, e segundo alguns critérios estes são agrupados em anéis e esferas estruturais. A identificação de cenários de falha inicia pelo processo de agrupamento, quando os anéis e esferas formam uma descrição hierárquica da estrutura, e pelo processo de descompactação, quando são pesquisados cenários de falha interessantes ao longo da hierarquia estabelecida (PINTO; BLOCKLEY; WOODMAN, 2002).

Escolhido um cenário de falha para estudo, deve-se calcular o seu “índice de vulnerabilidade” (I) através da razão entre sua “consequência” (C) e sua “demanda de dano relativa” (D_R), conforme a equação 2:

$$I = \frac{C}{D_R} \quad (2)$$

A consequência (C) que um cenário de falha tem em uma estrutura é mensurada considerando a qualidade de formação da estrutura sem dano (Q_{intacta}) e a qualidade de formação da estrutura após o dano ($Q_{\text{deteriorada}}$), como demonstra a equação 3:

$$C = \frac{Q_{\text{intacta}} - Q_{\text{deteriorada}}}{Q_{\text{intacta}}} \quad (3)$$

O esforço necessário para causar um evento de deterioração é diretamente proporcional à perda de rigidez do elemento afetado por tal evento, essa quantificação é a “demanda de dano” (D). A “máxima demanda de dano” ($D_{\text{máx}}$) ocorre quando todos os membros da estrutura são danificados, e a razão entre a demanda de dano de um cenário de falha e demanda de dano máxima para esse mesmo cenário, é a “demanda de dano relativa” (D_R), como mostra a equação 4:

$$D_R = \frac{D}{D_{\text{máx}}} \quad (4)$$

3. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

A presente proposta de análise da vulnerabilidade da operação de pontes e viadutos foi desenvolvida estabelecendo uma analogia à Teoria da Vulnerabilidade Estrutural, e utilizando como dados de entrada os parâmetros provenientes do Modelo UFPR. Para tal foram estudadas diferentes alternativas e neste trabalho é apresentado o método que avalia todos os elementos e sistemas que podem constituir uma OAE.

As etapas de desenvolvimento foram:

1. Identificação dos principais componentes de uma OAE e agrupamento destes, segundo suas similaridades, em “subsistemas de operação”;
2. Definição dos parâmetros do Modelo UFPR para caracterização e avaliação cada componente;
3. Criação de uma estrutura hipotética de representação dos subsistemas da OAE (para viabilizar a aplicação dos conceitos da TVE); e estudo das principais interações entre os subsistemas de operação pra definição da posição ocupada por cada um na estrutura hipotética;
4. Definição dos critérios de agrupamento para composição da estrutura hierárquica;
5. Definição do cálculo do modelo;
6. Simulação de cenários de falha para teste da proposta elaborada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Modelo de Análise da Vulnerabilidade da Operação de Pontes e Viadutos

O modelo de análise da vulnerabilidade da operação de pontes e viadutos, de modo geral, investiga todos os sistemas e elementos que constituem uma OAE, caracterizando-os segundo os principais problemas que podem apresentar, e considerando as interações existentes entre estes sistemas ao longo da vida útil da obra. O processo de análise tem cinco etapas básicas:

1. Caracterização dos subsistemas de operação através dos dados obtidos na inspeção de campo;

2. Cálculo do “Valor do Dano” para os tipos de deterioração verificados, e do “Índice de Performance” dos subsistemas;
3. Agrupamento dos subsistemas segundo os critérios estabelecidos, resultando no diagrama de descrição hierárquica da ponte;
4. Simulação de danos para investigação dos cenários de falha;
5. Cálculo da “Consequência Estrutural”, da “Demanda de Dano Relativa”, e do “Índice de Vulnerabilidade” para os cenários desejados.

4.1.1 Subsistemas de Operação

A análise da operacionalidade de uma ponte requer a observação de todos os fatores que possibilitam o desempenho adequado da mesma, envolvendo desde os elementos estruturais até os elementos e sistemas complementares. Assim, foram definidos doze grupos, nomeados “Subsistemas de Operação”: desempenho dos materiais, defeitos construtivos, desempenho estrutural, fundações e aterros, juntas de movimentação e aparelhos de apoio, drenagem, pavimento, segurança, conforto do usuário, uso/carregamento estrutural, características hidrológicas e geológicas, características climáticas.

Cada subsistema de operação é representado por quatro tipos de dano característicos. Na tabela 6 é possível observar os danos característicos para alguns dos subsistemas e os respectivos valores de K_1 e B . Para cada dano que caracteriza um subsistema, é calculado o seu “valor do dano” e o “índice de performance” do subsistema, conforme o Modelo UFPR (equação 1) e valores de K_1 e B da tabela 6. Os valores de K_2 , K_3 e K_4 são os mesmo do Modelo UFPR (tabelas 3, 4 e 5 respectivamente).

Para permitir uma analogia à TVE foi necessário determinar uma configuração gráfica que retratasse quais subsistemas intergem e/ou influenciam mais uns aos outros durante o funcionamento da obra. A estrutura adotada foi o octaedro, que possui doze arestas, comportando assim os doze subsistemas. Outra característica desta configuração geométrica determinante para sua adoção foi o fato de que todos os vértices são formados por quatro arestas, e assim é possível representar em todos os “nós” desta estrutura a interação de quatro subsistemas, tendo todos os subsistemas o mesmo número de interações principais com os demais. Estas condições permitem que no processo de agrupamento não haja favorecimento do agrupamento de um subsistema em detrimento do

outro, prevalecendo como critério preponderante de agrupamento as condições conservação de cada subsistema.

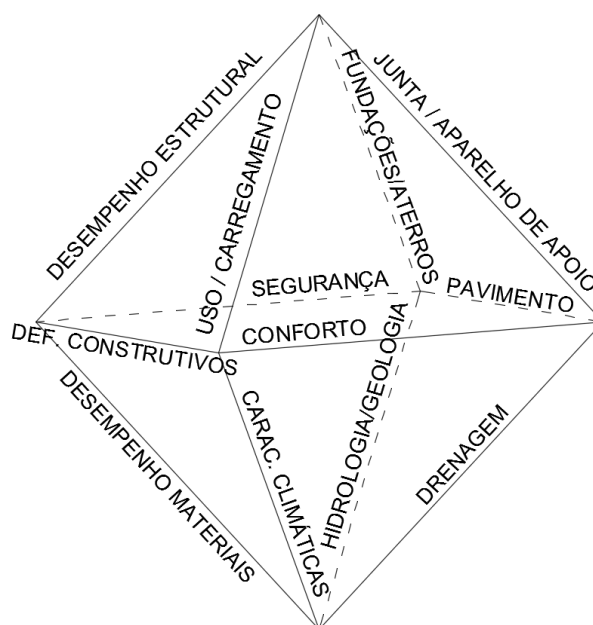
Tabela 6 – Subsistemas de operação e danos característicos.

Subsistema de operação	Dano	B
Desempenho dos materiais (K1 = 0,50)	Fissura mapeada	1,0
	Corrosão de armadura	3,5
	Mancha de umidade ou fogo	1,0
	Eflorescência	1,0
Defeitos construtivos (K1 = 0,40)	Deficiência de cobertura da armadura	2,0
	Deficiência de concretagem	2,0
	Desalinhamento de elemento estrutural	2,0
	Forma aderida ao concreto	1,0
Drenagem (K1 = 0,20)	Inexistência de dreno	2,0
	Entupimento de dreno	2,0
	Quantidade ou tamanho insuficiente	2,0
	Deficiência nas pingadeiras e buzinos	2,0
Segurança (K1 = 0,10)	Sinalização deficiente	2,0
	Barreira não padronizada	2,0
	Transição perigosa (sem acostamento)	2,0
	Guarda-corpo danificado	2,0
Conforto do usuário (K1 = 0,20)	Iluminação deficiente	1,0
	Ausência de passeio em área urbana	2,0
	Indício de choque de veículos	1,5
	Nível de vibração elevado	2,0

FONTE: Adaptado de EMEA (2016a).

Na figura 1 está apresentado o octaedro com a alocação dos doze subsistemas. As posições dos subsistemas foram definidas buscando unir em um mesmo nó os subsistemas que possuem maior interação entre si. Mesmo assim alguns subsistemas tiveram que ser conectados a outros com os quais não possuem ligação estreita, o que é aceitável dado que, de modo global, todos os elementos relacionam-se entre si para permitir uma adequada operação da ponte.

Figura 1 – Estrutura que representa as principais interações entre os subsistemas de operação.



FONTE: Os autores (2018).

4.1.2 Agrupamento dos subsistemas

O processo de agrupamento, para obtenção da descrição hierárquica da estrutura, é iniciado pelo subsistema com a melhor condição de conservação (menor índice de performance) e na sequência são acrescentados um a um os subsistemas restantes, priorizando sempre o que resultar no menor aumento do índice de performance do novo grupo formado. O agrupamento deve respeitar as interações principais existentes entre os subsistemas (conexões do octaedro). O índice de performance de cada novo grupo formado é dado pela soma dos índices de performance dos grupos que o formaram. O processo de agrupamento deve ser continuado até que todos os membros tenham sido adicionados.

4.1.3 Cenários de deterioração

Um evento de deterioração, para este modelo, é qualquer ação que danifica um subsistema, ou um componente deste, de modo que ele passa a operar sem o máximo desempenho possível. A simulação de danos na estrutura pode ser feita de duas maneiras: alterando as condições de um ou mais danos que constituem o subsistema, ou alterando diretamente o valor do índice de performance do subsistema.

4.1.4 Índice de vulnerabilidade

O índice de vulnerabilidade (IV), parâmetro que retrata a desproporcionalidade entre o dano que afetou a OAE e as suas consequências, será dado da mesma forma que na Teoria da Vulnerabilidade Estrutural: pela razão entre a consequência (C) e a demanda de dano relativa (DR) do cenário de falha em análise (equação 2). Dessa forma o índice de vulnerabilidade compara as consequências da deterioração de um elemento para a estrutura, com o esforço que foi necessário para causar esse dano, dada as condições atuais da estrutura. A consequência de um cenário de falha será dada pelo aumento do índice de performance geral que a OAE teve em decorrência do dano aplicado:

$$C = \frac{IP_{deteriorada} - IP_{atual}}{IP_{atual}} \quad (5)$$

Onde:

$IP_{deteriorada}$ = Índice de Performance da ponte com o dano do cenário de falha estudado aplicado;

IP_{atual} = Índice de Performance da ponte no momento da inspeção.

A demanda de dano relativa (DR) será dada pela razão entre a demanda de dano do evento de deterioração em estudo e a demanda de dano máxima possível para o elemento afetado (equação 6). A demanda de dano (D), ou seja, o esforço necessário para provocar um evento de deterioração, será considerada igual ao aumento do índice de performance específico do subsistema afetado diretamente pelo dano. A demanda de dano máxima ($D_{máx}$) é dada quando o subsistema foi completamente deteriorado, ou seja, teve o maior índice de performance específico possível, recebendo os maiores valores de K2, K3 e K4.

$$D_R = \frac{D}{D_{máx}} = \frac{IP_{subs. deteriorado} - IP_{subsistema}}{IP_{máx. subs. deteriorado} - IP_{subsistema}} \quad (6)$$

Onde:

$IP_{\text{subs.deteriorado}}$ = Índice de Performance do subsistema afetado pelo cenário de falha em estudo;

$IP_{\text{subsistema}}$ = Índice de Performance do subsistema segundo inspeção de campo;

$IP_{\text{máx.subs.deteriorado}}$ = Índice de Performance do subsistema com a máxima deterioração possível.

4.2 Exemplo de aplicação

O modelo foi aplicado em uma ponte com configuração de danos, proveniente da inspeção em campo, apresentada na tabela 7, e Índice de Performance Geral, resultante da soma dos valores de dano, igual a 17,16.

Tabela 7 – Configuração de danos dos subsistemas da ponte.

Subsistema	Dano	B	K1	K2	K3	K4	VD
Desempenho dos materiais	Manchas de fogo	1,0	0,5	0,5	1,5	1,0	0,4
	Corrosão da armadura	3,5	0,5	0,5	1,5	2,5	3,3
	Manchas de umidade	1,0	0,5	1,0	1,0	4,0	2,0
	Eflorescências	1,0	0,5	0,0	1,5	1,0	0,0
Defeitos Construtivos	Deficiência de cobertura da armadura	2,0	0,4	0,5	1,5	2,5	1,5
Drenagem	Deficiência nas pingadeiras e buzínates	2,0	0,2	2,0	2,0	2,5	4,0
Segurança	Barreira não padronizada	2,0	0,1	2,0	2,0	1,0	0,8
	Sinalização deficiente	2,0	0,1	1,0	2,0	1,0	0,4
Conforto do usuário	Ausência de passeio em área urbana	2,0	0,2	2,0	1,5	4,0	4,8

FONTE: Os autores (2018).

Para ilustrar a simulação de cenários de falha na OAE, foram aplicadas duas situações de deterioração da ponte, a primeira consiste em uma piora do sistema de segurança, e a segunda em uma alteração no uso e carregamento estrutural.

A simulação do cenário de falha que contempla o decaimento das condições de conservação do sistema de segurança será feita considerando que as sinalizações vertical e horizontal pioraram substancialmente, e que ambos os guarda-corpos foram rompidos devido a choques de veículos, conforme representado na tabela 8.

Tabela 8 – Nova configuração de danos no subsistema de segurança.

Subsistema	Dano	B	K1	K2	K3	K4	VD
Segurança	Barreira não padronizada	2,0	0,1	2,0	2,0	1,0	0,8
	Sinalização deficiente	2,0	0,1	1,0	2,0	1,0	0,4
	Sinalização deficiente	2,0	0,1	1,0	2,0	1,0	0,4
	Ausência de passeio em área urbana	2,0	0,2	2,0	1,5	4,0	4,8

FONTE: Os autores (2018).

Dados os novos valores de dano, o índice de performance da segurança passa a ser 4,80, e o índice de performance geral da OAE aumenta de 17,16 para 20,76.

Para o cenário de falha compreendido pela alteração no uso e carregamento estrutural foi considerada a modificação das características de tráfego de veículos na região, de modo que passou a existir trânsito de cargas elevadas e frequência alta de carga pesada, conforme a tabela 9.

Assim o índice de performance do uso e carregamento estrutural passa a ser 13,50, o Índice de Performance geral da OAE passa de 17,16 para 26,16.

Tabela 9 – Nova configuração de danos no subsistema de uso e carregamento estrutural.

Subsistema	Dano	B	K1	K2	K3	K4	VD
Uso / Carregamento Estrutural	Barreira não padronizada Trânsito de cargas elevadas	1,0	0,6	1,5	2,0	2,5	4,5
	Trem-tipo de projeto	3,0	0,6	0,0	0,5	1,0	0,0
	Frequência alta de carga pesada	3,0	0,6	1,0	2,0	2,5	9,0
	Limitação da capacidade de carga	5,0	0,6	0,0	0,5	1,0	0,0

FONTE: Os autores (2018).

O cenário de falha decorrente de alterações na segurança tem consequência igual a 0,210 (equação 7) e demanda de dano relativa de 0,310 (equação 8), considerando para cálculo da demanda de dano máxima o maior índice de performance possível para a segurança, que obtido considerando o pior comportamento possível dos critérios relacionados. Deste modo, para este cenário de falha o índice de vulnerabilidade é 0,677.

$$C = \frac{20,76 - 17,16}{17,16} = 0,210 \quad (7)$$

$$D_R = \frac{4,80 - 1,20}{12,80 - 1,20} = 0,310 \quad (8)$$

Para o cenário de falha com aumento no uso e carregamento estrutural a consequência é de 0,524; a demanda de dano relativa é igual a 0,094, e o índice de vulnerabilidade é de 5,574.

Comparando os dois cenários apresentados infere-se que o índice de vulnerabilidade do segundo é oito vezes maior que o do primeiro cenário, e desse modo observa-se que alterações no carregamento da estrutura, para a OAE em questão, são mais comprometedoras que alterações nos parâmetros de segurança, mesmo este já estando deteriorado. Assim tomando uma situação de gerenciamento de OAEs, em que esteja sendo feita uma análise para investimentos na ponte, tem-se que é prioritária a destinação de recursos para reforço estrutural caso se tenha uma perspectiva de que o tráfego de veículos pesados aumente no futuro, mesmo estando a OAE, atualmente, respondendo adequadamente ao fluxo de veículos existente.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo proposto teve um desenvolvimento preliminar, a fim de se investigar a aplicabilidade de uma analogia à Teoria da Vulnerabilidade Estrutural para análise do desempenho funcional de OAEs. Desse modo, o modelo deve ser primeiramente consolidado, aprimorando o desenvolvimento das considerações feitas, e então validado através da aplicação em um grande número de estruturas, para que se possa estudar o comportamento dos resultados obtidos e realizar os ajustes e modificações necessários.

A análise proposta permite a identificação não necessariamente dos eventos de deterioração com maior probabilidade de ocorrência, mas sim dos eventos que tem as consequências mais graves. Entretanto pode ser aplicada sobre os cenários de falha identificados uma análise das respectivas probabilidades de ocorrência.

O modelo permite simular o comportamento de uma OAE, dadas as suas condições atuais de conservação, quando for submetida a um tipo de dano geral, como, por exemplo, o aumento da agressividade industrial, ou a um dano localizado em algum elemento. Assim é possível fazer considerações tanto sobre ações previsíveis e esperadas, como a degradação natural dos elementos, quanto sobre ações imprevisíveis, tal como o choque de um veículo contra um pilar.

A aplicação de uma análise sob o ponto de vista da vulnerabilidade pode ser um importante parâmetro para tomada de decisão em ferramentas de gestão de OAEs. Ao engenheiro que possui conhecimentos específicos sobre todos os aspectos relacionados a este tipo de estrutura, permite que estes sejam usados para realizar análises amplas, considerando todos os fatores envolvidos. Ao gestor, que possui habilidades de gerenciamento, fornece dados mais concretos para embasar a tomada de decisão. Assim a aplicação do estudo da vulnerabilidade conforme proposto neste trabalho permite uma interação entre esses dois campos, da gestão e da engenharia, permitindo o desenvolvimento de ferramentas de gestão adequadas para tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, Jitendra; BLOCKLEY, David; WOODMAN, Norman. Vulnerability of 3-dimensional trusses. **Structural Safety**, [s.l.], v. 23, n. 3, p.203-220, jan. 2001.
- AGARWAL, Jitendra; BLOCKLEY, David; WOODMAN, Norman. Vulnerability of structural systems. **Structural Safety**, [s.l.], v. 25, n. 3, p.263-286, jul. 2003.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES (CNT) (Org.). Alerta nas rodovias. **CNT Transporte Atual**. Brasília, p. 22-31. nov. 2014.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT) (Org.). **Pesquisa CNT de rodovias 2017**: relatório gerencial. Brasília: SEST SENAT, 2017. 406 f.
- ENGLAND, Juan; AGARWAL, Jitendra; BLOCKLEY, David. The vulnerability of structures to unforeseen events. **Computers & Structures**, [s.l.], v. 86, n. 10, p.1042-1051, maio 2008.
- ESCRITÓRIO MODELO DE ENGENHARIA CIVIL (EMEA). Universidade Federal do Paraná (Org.). **Diretrizes para Inspeção de Obras de Arte Especiais**. Curitiba: 2016a.
- ESCRITÓRIO MODELO DE ENGENHARIA CIVIL (EMEA). Universidade Federal do Paraná (Org.). **Obras de Arte Especiais: Manual Técnico**. Curitiba: 2016b.
- PINTO, J.; BLOCKLEY, David; WOODMAN, Norman. The risk of vulnerable failure. **Structural Safety**, [s.l.], v. 24, n. 2-4, p.107-122, abr. 2002.