Aplicação do modelo matemático para ranqueamento de obras de arte especiais desenvolvido pelo Escritório Modelo de Engenharia Civil – EMEA/UFPR – Um estudo de caso

Cezar Falavigna¹ e Mauro Lacerda Santos Filho²

¹ Graduando de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, cezarfalavigna@gmail.com

² Professor PhD., Universidade Federal do Paraná, mauro.lacerda@ufpr.br

Resumo: O papel da engenharia civil não encerra quando uma obra é entregue, já que deve ser garantido que a estrutura suporte as solicitações durante sua vida útil. Para isso, algumas manutenções são necessárias a fim de garantir que a edificação consiga chegar ao limite desse período. Porém, no Brasil, principalmente em obras públicas, isso não acontece com a frequência devida, especialmente com Obras de Arte Especiais, ainda mais se somado as restrições orçamentárias impostas recentemente. Portanto, criar um modelo de ranqueamento, no qual, pode-se focar nas estruturas com as condições mais críticas, é de suma importância para o planejamento e gestão dessas obras. Esse artigo propõe a aplicação de um modelo matemático de avaliação desenvolvido no Escritório Modelo de Engenharia Civil – EMEA da Universidade Federal do Paraná.

Palavras-chave: Obras de Arte Especiais, Pontes, Viadutos, Ranqueamento, Modelo Matemático.

Abstract: In order to reach the life span established on the beginning of the project, a structure must go through maintenance. In Brazil, that isn't done very often, especially on buildings under the government jurisdiction. Some of those are bridges. If added budget restrictions, it is very important to create a way to identify the bridges in the worst conditions, so that the management responsible ones can plan which structures have priority on maintenance. To do so, a ranking model is needed to rate the bridges. This article propose an application of a mathematical evaluation model developed by the Civil Engineering Model Office from the Paraná State Federal University.

Keywords: Bridges, Ranking model, Mathematical model.

1. Introdução

A conservação de estruturas se faz parte essencial durante a utilização da obra. Todas as edificações quando dimensionadas, construídas e operadas conforme normas, possuem um período de vida útil. Em qualquer estrutura, para que esta consiga atingir esse tempo, deve-se passar por intervenções para readequação.

Quando essa etapa é negligenciada, os custos decorrentes dessa falta de manutenção sobem, ou seja, os gastos provenientes de manutenções preventivas são menos onerosos que as corretivas, conforme afirma Sitter [1], além disso o desempenho é estendido no tempo, segundo Lichtenstein [2].

Principalmente para a esfera pública, na qual existem restrições de orçamento, ou ainda, existem âmbitos ou itens prioritários, no caso de mal funcionamento de uma estrutura, isso pode acarretar em complicações financeiras, logísticas, temporais ou mesmo de conforto que afetam muitas pessoas e setores.

Um exemplo disso seria a inoperabilidade de uma obra de arte especial (OAE). Dessa situação já é possível prever problemas em entregas, circulação de mercadorias, aumento dos custos de transporte, emissão de gases poluentes, tempo de viagem, ou até mesmo, o isolamento de uma determinada região.

Por essa razão, o gerenciamento de pontes e viadutos é essencial para que a deterioração da estrutura não atinja o ponto de impossibilitar sua operação. Decorrente disso, um modelo de avaliação das obras precisa ser implementado afim de saber a situação de conservação na qual a estrutura se encontra.

2. Metodologia

O modelo matemático desenvolvido na Universidade Federal do Paraná (UFPR) se baseia em uma metodologia inicialmente utilizada na Áustria e Eslovênia, descritos no relatório COST 345 [3]. Porém, os seus índices foram atualizados para as condições brasileiras. A formulação é descrita, a seguir, pela equação 1:

$$R = \sum V_d = \sum B_i * K_{1i} * K_{2i} * K_{3i} * K_{4i} \quad (1)$$

V_d = Valor do dano;

B_i = Valor associado ao tipo de dano “i” sobre a segurança e/ou durabilidade;

K_{1i} = fator do elemento da estrutura, em função de sua importância no contexto da estrutura como um todo;

K_{2i} = fator indicativo da intensidade do tipo de dano “i”;

K_{3i} = fator relativo à extensão da propagação do tipo de dano i nos elementos inspecionados;

K_{4i} = fator enfatizante da urgência da intervenção para o dano “i”.

Relatado no “*Bulletin 243*” do CEB [4], os índices possuem um intervalo de variação. O primeiro a ser explicado será o valor associado ao tipo de dano. Esse valor está associado à manifestação que a obra apresenta e varia entre 1,00 e 5,00, conforme a severidade da deterioração. Quanto mais insegurança à estrutura a manifestação

patológica gera, maior será o valor do parâmetro, como descrito na tabela 1, a seguir. Essa tabela não ilustra todos os danos presentes no modelo, porém ilustra a variação entre os intervalos dos valores.

Tabela 1: Valores para o parâmetro B – manifestações patológicas

Nome	B
Fissura em linha vertical	3,00
Fissura em linha horizontal	3,00
Fissura próxima ao apoio com superestrutura	3,00
Fissura mapeada	3,00
Manchas de fogo	1,00
Fragmentação por fogo	2,00
Mancha de umidade	1,00
Eflorescências, com surgimento de manchas esbranquiçadas	1,00
Desgaste superficial	1,00
Corrosão da armadura (apenas mancha de corrosão)	2,00
Corrosão da armadura com deslocamento de concreto	3,00
Corrosão da armadura com deslocamento e perda de seção	4,00
Corrosão da armadura com deslocamento e rompimento da barra	5,00
Armadura exposta por deficiência de cobrimento, sem corrosão	2,00
Concreto segregado	2,00
Nicho de concretagem	2,00
Forma aderida à superfície do concreto	1,00
Desalinhamento	2,00
Deslocamento	2,00
Falta de prumo	2,00
Deslizamento gerando esforços imprevistos	3,00
Recalque do aterro de aproximação	3,00
Obstrução, sem causar esforços imprevistos	2,00
Abertura excessiva	2,00
Recapeamento irregular	2,00
Desnível	3,00
Inexistência de drenos	2,00
Entupimento de drenos	2,00
Deficiência nas pingadeiras e buzinos	2,00
Buraco	3,00
Desgaste	1,00
Choque de veículos	3,00
Guarda-corpo rompido ou inexistente	2,00
Ausência de passeio em área urbana	2,00
Transição perigosa (sem acostamento)	2,00
Barreira não padronizada	2,00
Vegetação incrustada	1,00
Corrosão em elementos metálicos	3,00
Corrosão em elementos metálicos com perda de seção	4,00

O segundo parâmetro é o K₁, referente ao elemento no qual a manifestação patológica se encontra. Assim como o B, algumas partes constituintes da obra de arte especial possuem pesos maiores do que outros. Esse valor varia de 0,10 até

0,60 ilustrado abaixo (Tabela 2). Essa mostra, parcialmente, os pesos dos elementos disponíveis no modelo.

Tabela 2: Valores para o parâmetro K1 – elemento estrutural

Nome	K1
Laje de concreto armado	0,40
Laje de concreto protendido	0,40
Ponte em laje de concreto armado	0,60
Ponte em laje de concreto protendido	0,60
Travessa de concreto armado	0,40
Travessa de concreto protendido	0,40
Viga de concreto armado	0,60
Viga de concreto protendido	0,60
Viga metálica	0,60
Viga caixão de concreto armado	0,60
Viga caixão de concreto protendido	0,60
Viga caixão metálica	0,60
Transversina portante de concreto armado	0,30
Transversina portante de concreto protendido	0,30
Transversina de ligação de concreto armado	0,20
Pilar em colunas de concreto armado	0,40
Pilar parede de concreto armado	0,40
Contraventamento de pilar de concreto armado	0,40
Aparelho de apoio de neoprene fretado	0,40
Aparelho de apoio de teflon	0,40
Aparelho de apoio de rolo metálico	0,40
Aparelho de apoio de pot bearing fixo	0,40
Aparelho de apoio de freyssinet	0,40
Articulação metálica	0,40
Dente Gerber de concreto armado	0,60
Dente Gerber metálico	0,60
Encontro – Parede frontal de concreto armado	0,10
Encontro – Parede lateral e vigas de concreto armado	0,20
Encontro – Laje de concreto armado	0,10
Encontro – Cortina de concreto armado	0,20
Muro de arrimo de concreto	0,40
Muro de terra armada	0,30
Talude revestido em concreto	0,40
Estaca de concreto armado	0,40
Estaca metálica	0,40
Bloco de concreto armado	0,40
Tubulão de concreto armado	0,40
Junta de dilatação elastomérica	0,20
Pavimento asfáltico	0,20
Pavimento de concreto	0,20
Calçada de concreto armado	0,20
Barreira	0,10
Defensa metálica	0,10
Guarda rodas	0,10
Guarda corpo de concreto armado	0,10

Nome	K1
Guarda corpo metálico	0,10
Operação	0,20
Drenagem	0,20
Sinalização	0,10
Reforço de viga – Armadura principal passiva	0,60
Reforço de viga – Cabo de proteção externo	0,60
Reforço de pilar – Encamisamento	0,40
Aterro de acesso	0,20
Laje de aproximação	0,20
Treliça de concreto armado	0,50

A seguir, o índice K2 refere-se à intensidade do dano, ou seja, se a manifestação abrange uma área grande ou pequena de um determinado elemento. Esses valores possuem um intervalo entre 0,50 ou 2,00, conforme ilustra o “*Bulletin 243*” do CEB. [4]

Tabela 3: Valores para o parâmetro K2 – intensidade da manifestação patológica

Tipo	Grau	Critério	K2
0	Insignificante	Dano irrelevante, em menos de 3% da área total do elemento	0,00
I	Pequeno	Dano pequeno, entre 3% e 10% da área total do elemento	0,50
II	Intermediário	Dano intermediário, confiando em uma área entre 10% a 25% total do elemento	1,00
III	Grande	Dano grande, de 25% a 75% da área total do elemento ou em muitos lugares de um elemento estrutural	1,50
IV	Imenso	Dano muito grande, na maior parte da área de um elemento, mais de 75% da área total do elemento	2,00

Os valores de K3 são associados à extensão de propagação dos danos em todos os elementos com a mesma caracterização. A variação desse parâmetro é de 0,5 a 2,00, conforme designado na tabela 4, a seguir:

Tabela 4: Valores para o parâmetro K3 – extensão da propagação do dano

Critério	K3
Dano aparece em menos de 10% dos elementos estruturais da OAE	0,50
Dano aparece entre 10% e 25% dos elementos estruturais da OAE	1,00
Dano aparece entre 25% e 75% dos elementos estruturais da OAE	1,50
Dano aparece entre 75% e 100% dos elementos estruturais da OAE	2,00

Por último, os valores representativos de K4 variam entre 1,00 e 5,00 e esse índice está associado à intervenção dos danos apresentados, a seguir, na tabela 5:

Tabela 5: Valores para o parâmetro K4 – urgência de intervenção no dano

Classificação	Critério	K4
Não urgente	Dano aparece em menos de 10% dos elementos estruturais da OAE	0,50
Dano a reparar	Dano aparece entre 10% e 25% dos elementos estruturais da OAE	1,00
Reparo imediato	Dano aparece entre 25% e 75% dos elementos estruturais da OAE	1,50
Limitação de carga	Dano aparece entre 75% e 100% dos elementos estruturais da OAE	2,00

No entanto, somente analisar as obras pelas manifestações que apresentam não uniformizaria a avaliação, já que obras com maior metragem podem, ou pelo menos, possuem mais elementos e área total para apresentar danos. Além disso, diferentes morfologias apresentam pesos diferentes para os elementos, o que não deixa homogênea a avaliação.

Deve-se então aplicar um modelo relativo para considerar a forma da estrutura. Para isso, o valor oriundo do somatório dos produtos (V_d) é dividido por um valor de referência ($V_{d,ref}$). Esse valor de referência é gerado pegando todos os danos que podem ocorrer na obra, multiplicados pelos valores máximo de intensidade e extensão ($K_2=K_3=2,00$) e pelo valor unitário de urgência ($K_4=1,00$). Assim é possível gerar o índice de performance, ilustrado pela equação 2 abaixo:

$$I_p = \frac{\sum V_d}{\sum V_{d,ref}} \quad (2)$$

Onde:

V_d = valor do dano;

$V_{d,ref}$ = Valor de referência;

I_p = índice relativo.

3. Caracterização da estrutura

A obra na qual foi aplicado o modelo, é uma ponte de 240,00 metros de extensão e 13,40 metros de largura. Ela possui um traçado curvo em um trecho e ortogonal sobre o leito do rio, além de greide plano, com gabarito de 30 metros entre pilares e 8 metros até o banzo inferior da viga. As lajes são em concreto armado, assim como os pilares. A estrutura contava com 24 pilares sendo que 16 em terra e oito no leito do rio. As dimensões entre um tipo e outro eram diferentes entre si, isso por conta do menor vão livre, nesse caso, 16 metros aproximadamente, para os em solo. Havia na obra 24 contraventamentos de pilares e 12 blocos em concreto armado.

Na região de transposição do rio, onde o vão era de 30 metros, as vigas foram reforçadas com um caixão metálico treliçado. Este ajuda a resistir a torção ocasionado pelo carregamento oriundo dos veículos circulando em somente uma

faixa de tráfego. Além disso, suas extremidades (encontros) possuíam contenções de cortinas atirantadas.

O tabuleiro possuía pavimento asfáltico que totalizava 8,20 metros, protegidos com barreiras New Jersey, que separavam as faixas de tráfego do passeio. Este possuía guarda-corpos eram metálicos. Na interface entre o aterro de acesso e a ponte existiam juntas elastoméricas, além de mais duas para dilatação no decorrer da estrutura. A OAE também possuía aparelhos de apoio em articulações metálicas e em neoprene fretado.

Essa descrição da morfologia é importante, pois como a nota da obra é dada em virtude de um índice relativo, o valor de referência vai englobar todos os elementos da estrutura, ou seja, o não cadastramento de algum item gera uma nota que não é acurada. A tabela 6 ilustra todos os elementos presentes na obra:

Tabela 6: Morfologia da obra analisada

Quantidade	Elemento
1	Sinalização
1	Operação
2	Aterro de acesso
1	Drenagem
4	Defensa metálica
12	Bloco de concreto armado
3	Laje de concreto armado
2	Viga de concreto armado
24	Contraventamento de pilar de concreto armado
24	Pilar em colunas de concreto armado
1	Viga metálica
24	Aparelho de apoio de neoprene fretado
8	Articulação metálica
2	Encontro – Parede Frontal de concreto armado
2	Muro de arrimo de concreto
2	Junta de dilatação elastomérica
1	Pavimento asfáltico
2	Calçada de concreto armado
2	Guarda corpo metálico
64	Estaca metálica
49	Transversina portante de concreto armado
2	Barreira

Para auxiliar na inspeção é desenhado um croqui dos perfis longitudinal, transversal e vista superior, no qual é inserido o croqui de fotos, já que cada manifestação cadastrada deve possuir uma foto associada. A seguir, é ilustrado uma foto do perfil longitudinal (Fig. 1) e os croquis da respectiva OAE (Fig. 2 e 3).

Figura 1: Foto do trecho sobre o rio da obra de arte especial analisada. Fonte: Acervo EMEA/UFPR.

Figura 2: Croqui do perfil longitudinal da obra de arte especial analisada. Fonte: Acervo EMEA/UFPR.

Figura 3: Perfil do croqui fotográfico da obra de arte especial analisada. Fonte: Acervo EMEA/UFPR.

respectiva manifestação. A seguir, é ilustrado como fica a descrição da manifestação (Fig. 5 a 7).

Elemento: Laje de Concreto Armado
Manifestação: Eflorescências, com surgimento de manchas esbranquiçadas
Nº do elemento: 1
Dimensão: Insignificante
Reparo: Dano à reparar
Tamanho: 0,7 m²
Observação:

Figura 5: Apresentação da manifestação patológica - eflorescências - no relatório.
Fonte: Acervo EMEA/UFPR

Elemento: Pilar em Colunas de Concreto Armado
Manifestação: Manchas de umidade
Nº do elemento: 16
Dimensão: Média
Reparo: Dano à reparar
Tamanho: 8 m²
Observação:

Figura 6: Apresentação da manifestação patológica – mancha de umidade – no relatório. Fonte: Acervo EMEA/UFPR

Elemento: Pilar em Colunas de Concreto Armado
Manifestação: Corrosão da armadura com deslocamento de concreto
Nº do elemento: 15
Dimensão: Pequena
Reparo: Dano à reparar
Tamanho: 0,15 m²
Observação:

Figura 7: Apresentação da manifestação patológica – corrosão – no relatório. Fonte: Acervo EMEA/UFPR.

A seguir, é ilustrado a figura 8, que indica a aplicação do modelo matemáticos nos elementos (parâmetros) e, em seguida, o índice relativo da OAE analisada:

Elemento	Manifestação	Nº	B	K1	K2	K3	K4	Ind.
Pilar em colunas de concreto armado	Desgaste superficial	4	1	0,4	1	0,5	2,5	0,5
Articulação metálica	Corrosão em elementos metálicos	15	3	0,4	0,5	1	2,5	1,5
Laje de concreto armado	Eflorescências com surgimento de manchas esbranquiçadas	1	1	0,4	0	1,5	2,5	0
Estaca metálica	Corrosão em elementos metálicos com perda de seção	26	4	0,4	2	0,5	4	6,4
Transversina portante de concreto armado	Armadura exposta por deficiência de cobrimento sem corrosão	4	2	0,3	0	0,5	2,5	0
Pilar em colunas de concreto armado	Manchas de umidade	16	1	0,4	1	0,5	2,5	0,5
Pilar em colunas de concreto armado	Corrosão da armadura com deslocamento de concreto	15	4	0,4	0,5	0,5	2,5	0,75
Contraventamento de pilar de concreto armado	Nicho e concretagem	32	3	0,4	1,5	0,5	1	0,6
Bloco de concreto armado	Corrosão da armadura com deslocamento e perda de seção	15	3	0,4	0,5	0,5	2,5	1
Pilar em colunas de concreto armado	Fissura em linha vertical	24	3	0,4	0,5	2	2,5	3
Pilar em colunas de concreto armado	Fissura em linha vertical	1	3	0,4	0,5	2	2,5	3
Pilar em colunas de concreto armado	Fissura em linha vertical	23	3	0,4	0,5	2	2,5	3
Pilar em colunas de concreto armado	Fissura em linha vertical	13	3	0,4	0,5	2	2,5	3
Pilar em colunas de concreto armado	Fissura em linha vertical	12	3	0,4	0,5	2	2,5	3
Pilar em colunas de concreto armado	Fissura em linha vertical	14	3	0,4	0,5	2	2,5	3
Pilar em colunas de concreto armado	Fissura em linha vertical	11	3	0,4	0,5	2	2,5	3
Pilar em colunas de concreto armado	Fissura em linha vertical	15	3	0,4	0,5	2	2,5	3
Pilar em colunas de concreto armado	Fissura em linha vertical	17	3	0,4	0,5	2	2,5	3
Pilar em colunas de concreto armado	Fissura em linhas vertical	18	3	0,4	0,5	2	2,5	3
Contraventamento de pilar de concreto armado	Fissura em linha vertical	2	3	0,4	0,5	1	2,5	1,5

Figura 8: Apresentação do relatório da aplicação do modelo matemático EMEA/UFPR sobre a estrutura. Fonte: EMEA/UFPR.

Com essas manifestações, o índice base da ponte (somatório dos valores de referência) ficou em 750, já o índice de performance é o somatório dos itens em negrito na figura anterior. Esse valor ficou igual a 15,75. Fazendo a divisão de um pelo outro, obtém-se o índice relativo que nesse caso ficou igual à 0,0210.

5. Conclusões

Aplicando-se o modelo desenvolvido na UFPR, percebe-se que esse gera informações mais detalhadas que o a inspeção proposta pelo DNIT 010/2004 PRO. Ao se agrupar os elementos em famílias (laje, vigamento principal, mesoestrutura, infraestrutura e pista/acesso) as informações específicas de cada elemento ficam perdidas, pois essas ficam macro avaliadas. A inspeção também gera como nota

para a OAE, a pior avaliação dos itens descritos na ficha, não possibilitando saber o real estado da estrutura.

O modelo do EMEA/UFPR não tem esses problemas, pois cada elemento é avaliado, sendo a nota gerada por parâmetros estabelecidos e não apenas pela subjetividade de quem inspeciona. Outra vantagem, é que, decorrente do índice relativo, as notas podem ser melhor diferenciadas. Ou seja, duas estruturas podem ter nota técnica igual na inspeção do DNIT (por exemplo, 4) porém no modelo do EMEA/UFPR será muito difícil as notas serem exatamente iguais, visto a inspeção e nota ser atribuída utilizando todos os elementos.

Com essa avaliação mais minuciosa, caso uma recuperação seja feita na obra, é possível gerar orçamentos bem mais precisos, já que os danos estão cadastrados por elemento estrutural e por meio de uma medida, assim o responsável consegue estimar com mais precisão o gasto que terá no reparo.

Com o avanço da tecnologia BIM, informações cada vez mais precisas são essenciais para os parâmetros que os programas envolvidos utilizam. Portanto, modelar uma estrutura locando exatamente onde se encontra cada manifestação, torna-se de grande valia ao arquétipo de informações, já que se pode assim otimizar custos e prazos para a manutenção. Nisso, podem ser feitos estudos do qual analisem os efeitos dos danos sobre várias frentes, como estrutural, de manutenção, de cronograma para os reparos, partindo sempre da ponte no pior estado, que é gerado pelo modelo de ranqueamento.

4. Agradecimentos

À Universidade Federal do Paraná, ao Setor de Tecnologia da UFPR, ao Departamento de Construção Civil – UFPR, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC), ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFPR pelo empréstimo do barco para a realização da inspeção, o prof. PhD. Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes por acompanhar e navegar o barco na inspeção e aplicação do modelo, ao Escritório Modelo de Engenharia Civil – EMEA/UFPR, e principalmente ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT pelo projeto de extensão e pesquisa que resultaram no desenvolvimento da ferramenta descrita nesse artigo.

5. Referências

- [1] SITTER, W.R. (1984). Costs for Service Life Optimization. *The “Law of Fives”*. CEB-RILEM Durability of Concrete Structures.
- [2] LICHTENSTEIN, Noberto B. (1985). Procedimento para formulação de diagnósticos de falhas e definição de conduta adequada à recuperação de edificações. Dissertação – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, p. 191. São Paulo, 1985.
- [3] EUROPEAN CO-OPERATION IN THE FIELD OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESEARCH. (2007) .COST 345: *Methods used in the european states and assess the condition of highway structures*. Disponível em:

<http://cost345.zag.si/Reports/COST_345_WG23.pdf>. Acesso em 21 ago. 2016

- [4] COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETÓN. (1998). *Bulletin 243: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures*. Suíça.
- [5] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 010/2004 – PRO: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido. Rio de Janeiro, 2004.