Utilização do método multicritério PROMETHEE para definição da ordem de manutenção de pontes

Machado, Eduarda Lauck¹; Santos, Adriana de Paula Lacerda²; Santos Filho, Mauro Lacerda³

¹ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), eduarda.lauck@gmail.com

² Doutora em Engenharia Civil, Professora Associada na Universidade Federal do Paraná (UFPR), adrianapls@ufpr.br

³ Doutor em Civil Engineering, Professor Titular na Universidade Federal do Paraná (UFPR), mauiolacerda1982@gmail.com

Resumo: As atividades de intervenção em pontes são normalmente muito caras e envolvem grandes investimentos que nem sempre estão disponíveis para os departamentos e agências de transporte, o que requer um processo de tomada de decisão estruturado para selecionar e priorizar projetos de manutenção dessas estruturas. Assim, este artigo tem como objetivo propor a priorização de manutenção em pontes, utilizando o método PROMETHEE. Para a avaliação desse método, são utilizados como critérios dados relativos às condições de segurança e de conservação de 5 pontes rodoviárias, obtidos dos relatórios das inspeções destas estruturas. Observou-se que o resultado do ranking final de priorização de manutenção mostrou ser coerente com uma avaliação apenas intuitiva do problema, demonstrando a eficácia do método no apoio à decisão, por meio do embasamento técnico.

Palavras-chave: Manutenção de Pontes, Apoio multicritério à decisão, PROMETHEE.

Abstract: Bridge intervention activities are usually very expensive and involve large investments that are not always available to transportation departments and agencies, which requires a structured decision-making process to select and prioritize maintenance projects for these structures. Thus, this article aims to propose the prioritization of maintenance on bridges, using the PROMETHEE method. For the evaluation of this method, data on the safety and conservation conditions of 5 road bridges obtained from inspection reports of these structures are used as criteria. It was observed that the result of the final ranking of maintenance prioritization was shown to be consistent with a simple intuitive evaluation of the problem, demonstrating the effectiveness of the method in decision support, by the technical basis.

Keywords: Bridge Maintenance, Multicriteria decision support, PROMETHEE.

1. Introdução

A manutenção das pontes tornou-se uma preocupação social e econômica importante, uma vez que os elementos de uma rede de infraestrutura, bem como as edificações, devem ser mantidos dentro de limites aceitáveis de segurança e facilidade de manutenção. Porém, as atividades de intervenção em pontes são geralmente muito caras e envolvem grandes investimentos que nem sempre estão disponíveis para os departamentos e agências de transporte, o que requer um processo de tomada de decisão estruturado para selecionar e priorizar projetos, a fim de implementar as ações que são necessárias para a manutenção das pontes [1].

No Brasil, a priorização da manutenção de pontes rodoviárias é feita com base na “nota técnica” da estrutura, de acordo com a Norma DNIT 010/2004-PRO [2]. Baseados nos dados levantados nas inspeções técnicas, cada elemento da ponte recebe uma nota, que varia de 1 a 5, de acordo com a classificação das suas condições, em que 1 indica uma obra em situação crítica e 5 uma obra sem problemas. A nota final da ponte, nota técnica, é a menor dentre as notas recebidas pelos seus elementos com função estrutural. A partir do levantamento dos dados relativos às condições de segurança e de conservação das pontes, obtidos dessas inspeções, são produzidos os relatórios de inspeção, que além da nota técnica, apresentam outras informações também importantes como o meio em que se encontra a estrutura (se é um meio agressivo ou não), se possui rotas alternativas, situação do histórico de manutenção, quais as suas condições de estabilidade e de conservação, volume de tráfego e o tipo de vibração da estrutura.

Segundo a referência [3], a regra de “Seleção de projetos com as piores condições” é uma forma comum de priorização de ponte para ações de reparo. Os autores destacam, contudo, que esta regra não necessariamente maximiza os benefícios ou reduz o custo do ciclo de vida, e que as técnicas de priorização para a escolha de pontes para intervenção vão desde decisões subjetivas baseadas em análise de engenharia até técnicas complexas de otimização.

A priorização de pontes para manutenção se caracteriza como um problema de decisão de múltiplos critérios, que apresenta objetivos que não podem ser combinados e são vários os métodos utilizados para realizar o estudo de alternativas e critérios, denominados métodos de apoio multicritério à decisão (AMD). A escolha do método AMD a ser utilizado depende do tipo de problemática em questão, que pode ser problemática de escolha, classificação, ordenação ou descrição. O problema de priorização de pontes envolve a problemática de ordenação, em que procura-se ordenar as alternativas (pontes) da melhor para a pior, de acordo com as preferências do decisor.

Na literatura é possível encontrar vários autores que buscam proporcionar alternativas para o problema de priorização de pontes utilizando métodos de apoio multicritério à decisão ([3], [4] e [5]).

Uma das ferramentas mais sofisticadas e utilizadas para problemas multicritério é o Método Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) [6]. A extensão PROMETHEE II, é aquela que permite um ranking completo de alternativas. Este método pertence à família dos métodos de ordenação, em que a ordem preferencial da variável de cada critério analisado é normalizada por

uma função de preferência. Assim, o decisor deve indicar a necessidade de maximizar ou minimizar os valores de cada critério dentro de uma função que determinará a preferência, e a mesma definirá a hierarquização das alternativas analisadas.

Nesse contexto, o método PROMETHEE II pode ser utilizado como uma proposta de ferramenta para o apoio à decisão na manutenção de pontes rodoviárias. Neste trabalho, para a utilização desse método, são considerados como critérios dados relativos às condições de segurança e de conservação de 5 pontes dos estados do Paraná e Santa Catarina, obtidos dos relatórios das inspeções destas estruturas.

2. Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)

O método PROMETHEE trata-se de um método de ordenação bastante simples na concepção e aplicação em comparação com os outros métodos de análise multicritério [7].

O algoritmo para obtenção do ranking de preferência com base no PROMETHEE II possui 6 etapas [8], apresentadas a seguir:

Etapa 1. Construção da matriz de decisão:

Sendo A o conjunto de alternativas, para cada alternativa $a_i \in A$, $i = 1, \dots, n$, $f_j(a_i)$ é uma avaliação dessa alternativa segundo o critério j , $j = 1, \dots, k$. O conjunto dessas avaliações podem ser representadas na matriz M (Eq.1):

$$M = \begin{bmatrix} f_1(a_1) & f_2(a_1) & \cdots & f_k(a_1) \\ f_1(a_2) & f_2(a_2) & \cdots & f_k(a_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(a_n) & f_2(a_n) & \cdots & f_k(a_n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Etapa 2. Especificação, para cada critério f_j , de uma função de preferência generalizada (P_j), tal que (Eq.2):

$$P_j: A \times A \rightarrow [0,1] \quad (2)$$

A função de preferência de um critério descreve a forma como a preferência do decisor varia com a diferença entre os níveis de desempenho de duas alternativas em relação a esse critério. Numa comparação entre duas alternativas quaisquer, a_r e a_s , pertencentes ao conjunto A , tem-se (Eq.3):

$$P_j(a_r, a_s) = P(x) = P[f(a_r) - f(a_s)] \quad (3)$$

que representa a intensidade com que a alternativa a_r é preferível a a_s , segundo o critério j .

- se $P(x) = 0$, não há preferência de a_r em relação a a_s ;
- se $P(x) \approx 0$, há fraca preferência de a_r em relação a a_s ;
- se $P(x) \approx 1$, há forte preferência de a_r em relação a a_s ; e
- se $P(x) = 1$, há total preferência de a_r em relação a a_s .

Quando o critério precisa ser maximizado, utiliza-se $x = f(a_r) - f(a_s)$ para definir a função de preferência. Para a minimização do critério, a função de preferência será $x = f(a_s) - f(a_r)$. A intensidade de preferência deve ser calculada para cada par de alternativas, considerando todos os critérios. As funções de preferência determinadas por [8] são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Funções de preferência do método PROMETHEE

Tipo	$P(x)$	$H(x)$	Parâmetros fixados
Linear	$P(x) = \begin{cases} 0 & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}$		—
U-Shape	$P(x) = \begin{cases} 0 & x \leq q \\ 1 & x > q \end{cases}$		q
V-Shape	$P(x) = \begin{cases} x/r & x \leq r \\ 1 & x > r \end{cases}$		r
Level	$P(x) = \begin{cases} 0 & x \leq q \\ 1/2 & q < x \leq r \\ 1 & x > r \end{cases}$		q, r
V-Shape I	$P(x) = \begin{cases} 0 & x \leq q \\ \frac{x-q}{r-q} & q < x \leq r \\ 1 & x > r \end{cases}$		q, r
Gaussian	$P(x) = 1 - e^{-x^2/2s^2}$		s

Cada uma dessas funções tem um significado, conforme descrito a seguir:

- na função de preferência Linear, há indiferença entre as alternativas, a_r e a_s , se $f(a_r) = f(a_s)$. Se as avaliações são diferentes, o avaliador tem preferência total pela alternativa com a melhor avaliação;
- na função de preferência *U-Shape*, as alternativas são indiferentes sob o ponto de vista do avaliador se não excedem o limite de indiferença q . Senão, há preferência total pela alternativa a_r ;
- na função de preferência *V-Shape*, r é o limite de preferência total, e se a diferença entre as alternativas for menor do que esse limite, então a preferência pela alternativa a_r aumenta linearmente com a diferença x . Se a diferença é maior que r , há preferência total pela alternativa a_r ;
- na função de preferência *Level*, o avaliador define o limite de indiferença q e o limite de preferência r tal que: se x é menor do que q , então existe indiferença entre as alternativas; se x está entre q e r , há uma fraca preferência (1/2) por a_r e se x é maior do que r , então a alternativa a_r é preferível à alternativa a_s ;
- na função de preferência *V-Shape I*, o avaliador considera que sua preferência aumenta linearmente da indiferença para a total preferência entre os limites q e r ;
- na função de preferência *Gaussian*, o avaliador define o parâmetro s , que indica o valor a partir do qual há mudança na concavidade na curva de preferência.

Etapa 3. Definição dos pesos α_j ($j = 1, 2, \dots, n$), que são as medidas de importância de cada critério:

Essa avaliação é feita pelos decisores ou especialistas. Caso os critérios tenham a mesma importância, os pesos podem ser todos iguais.

Etapa 4. Calcular o índice de preferência ponderada global, $\pi(a_r, a_s)$, para todos os pares de alternativas:

Este índice indica o percentual de preferência da alternativa a_r em relação à a_s , considerando os pesos atribuídos a cada critério, conforme (Eq. 4, Eq. 5 e Eq. 6):

$$\pi(a_r, a_s) = \sum_{j=1}^n \alpha_j P_j(a_r, a_s) \quad (4)$$

em que,

$$\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1, \text{ e} \quad (5)$$

$$0 \leq \pi(a_r, a_s) \leq 1 \forall a_r, a_s \in A \quad (6)$$

Etapa 5. Cálculo do fluxo de importância positivo, que representa a média de preferência de qualquer alternativa a_r sobre as demais alternativas do conjunto A (Eq.7 e Eq. 8):

$$\phi^+(a_r) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{x \in A} \pi(a_r, x) \quad (7)$$

onde,

$$\phi^+: A \rightarrow [0,1] \quad (8)$$

Etapa 6. Cálculo do fluxo de importância negativo, que representa a média de preferência de todas as alternativas sobre a alternativa a_r (Eq.9 e Eq.10):

$$\phi^-(a_r) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{x \in A} \pi(x, a_r) \quad (9)$$

onde:

$$\phi^-: A \rightarrow [0,1] \quad (10)$$

quanto menor $\phi^-(a_r)$, melhor a alternativa.

E finalmente, como saída do algoritmo, tem-se o ranking das alternativas.

O método consiste em hierarquizar as ações seguindo uma ordem decrescente. Essa classificação completa das alternativas é realizada pelo fluxo de importância líquido de preferência (Φ) calculado pela diferença entre os fluxos de importância positivo e negativo.

3. Método

A utilização do método PROMETHEE para priorizar a manutenção de pontes, inicia-se com a definição dos critérios importantes a serem considerados na priorização.

Os critérios selecionados são obtidos dos relatórios de inspeção, visto que, alguns dados da ficha cadastral das pontes, relacionados às condições de segurança e de conservação das pontes, foram identificados como relevantes configurando assim, critérios importantes para a priorização em questão. Estes critérios são: meio ambiente em que se encontra a estrutura; presença de rotas alternativas; situação no histórico de manutenção; condição de estabilidade; condição de conservação; vibração da estrutura; nota técnica e volume de tráfego.

Tais critérios são classificados da seguinte forma:

- meio ambiente em que se encontra a estrutura – sendo uma pior condição quando encontrada em meio agressivo, ou demanda preferência de manutenção;
- presença de rotas alternativas – em que uma situação mais favorável às obras de manutenção seria a existência de rotas alternativas com o menor acréscimo de distância possível;
- situação no histórico de manutenção – classificado como boa, regular ou ruim, e quanto pior a situação no histórico, maior preferência de manutenção;
- condição de estabilidade – classificado como boa, sofrível ou precária, sendo que, quanto pior a condição, maior preferência de manutenção;
- condição de conservação – pode ser boa, regular, sofrível ou ruim, sendo que, quanto pior a condição, maior preferência de manutenção;
- vibração da estrutura – classificada como excessiva ou não, em que pontes com vibração excessiva demandam preferência de manutenção;
- nota técnica – de 1 a 5, quanto pior a nota, maior a preferência de manutenção; e
- volume de tráfego – correspondente ao número de veículos que passam por determinado trecho da rodovia por dia, e quanto maior o volume, maior preferência de manutenção.

Para criar o ranking de priorização, foram escolhidas cinco pontes rodoviárias, dos estados do Paraná e Santa Catarina, inspecionadas entre os anos de 2015 e 2016.

Os dados referentes aos critérios de priorização, retirados dos relatórios de inspeção, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Dados das cinco pontes selecionadas

Ponte	Está em meio agressivo	Acréscimo de distância (km) - Rota alternativa	Histórico de manutenção	Condições de estabilidade	Condições de conservação	Vibração excessiva da estrutura	Nota técnica	Volume de tráfego
1	Não	0	Boa	Boa	Boa	Não	4	1.895,5
2	Não	41	Boa	Boa	Boa	Não	5	1.895,5
3	Não	27,3	Boa	Boa	Boa	Sim	4	4.841,0
4	Não	58,8	Regular	Sufrível	Regular	Não	3	15.405,5
5	Sim	0,7	Regular	Boa	Regular	Não	4	9.245,75

Fonte: Os autores.

Para aplicação do PROMETHEE foi necessário realizar um tratamento preliminar dos dados, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Tratamento dos dados para aplicação do PROMETHEE

Critério	Avaliação (Relatórios)	Escala	Objetivo
Meio agressivo	sim ou não	0 ou 1	minimizar
Rotas alternativas	acréscimo de distância (km)	-	minimizar
Histórico de manutenção	boa, regular ou ruim	1 a 3	maximizar
Condições de estabilidade	boa, sofrível ou precária	1 a 3	maximizar
Condições de conservação	boa, regular, sofrível ou ruim	1 a 4	maximizar
Vibração excessiva da estrutura	sim ou não	0 ou 1	minimizar
Nota técnica	1 a 5	-	minimizar
Volume de tráfego	nº de veículos	-	maximizar

Fonte: Os autores.

A função de preferência adotada para todos os critérios foi a função linear. Foi considerado ainda que os critérios têm a mesma importância, logo possuem pesos iguais.

O ranking pelo método PROMETHEE foi obtido por meio da implementação do problema no *software* gratuito *VisualPROMETHEE* (Fig. 1).

Ranking	Meio agressivo	Rota alterna...	Histórico de ...	Condição de ...	Condição de ...	Vibração exc...	Nota técnica	Volume de tr...
Unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences								
Statistics								
Evaluations								
Ponte 1	1	0,00	1	1	1	1	4	1895,50
Ponte 2	1	41,00	1	1	1	1	5	1895,50
Ponte 3	1	27,30	1	1	1	0	4	4841,00
Ponte 4	1	58,80	2	2	2	1	3	15405,50
Ponte 5	0	0,70	2	1	2	1	4	9245,75

Figura 1: Implementação do problema de priorização de pontes no Visual PROMETHEE. Fonte: Os autores.

4. Resultados e discussão

O *software VisualPROMETHEE* possui uma facilidade de uso e de obtenção de dados, o que mostra poder auxiliar o decisor durante um processo de tomada de decisão de um problema com vários critérios e alternativas.

Após a implementação do problema no *VisualPROMETHEE*, obteve-se o ranking de prioridade de manutenção apresentado na Fig. 2.

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Ponte 4	0,3750	0,5625	0,1875
1	Ponte 5	0,3750	0,5313	0,1563
3	Ponte 3	-0,0625	0,2813	0,3438
4	Ponte 1	-0,1875	0,1563	0,3438
5	Ponte 2	-0,5000	0,0313	0,5313

Figura 2: Ranking de prioridade das pontes. Fonte: Os autores.

Na Figura 2, tem-se o resultado tabelado, no qual é possível observar o ranking final para priorização sugerido pelo software, isto é, a ponte que melhor atende aos critérios de prioridade de manutenção é a de número 4 que apresentou um fluxo de importância líquido de preferência (Φ) = 0,375.

Na sequência de prioridade, tem-se a ponte 5, com o mesmo valor Φ da ponte 4 (Φ = 0,375). Mesmo apresentando o mesmo valor de fluxo de importância líquido de preferência, a ponte 4 ficou em primeiro no ranking por apresentar o maior fluxo positivo (Φ^+ = 0,5625). Continuando a ordem de prioridades tem-se as pontes 3 (Φ = -0,0625), 1 (Φ = -0,1875) e 2 (Φ = -0,5).

A ordem de prioridade das pontes para manutenção auxilia o engenheiro de pontes ou decisor a selecionar a ponte mais adequada para medidas de manutenção de

acordo com os critérios estabelecidos. Além disso, pode ajudar a reduzir as chances de uma falha catastrófica das pontes, uma vez que a manutenção pode ser realizada de forma prioritária. Assim, o método proporcionaria uma ferramenta importante para os engenheiros e departamentos de transporte para a tomada de decisões e também facilitar a alocação adequada de recursos financeiros.

O resultado do ranking final de priorização de manutenção mostrou ser coerente com uma avaliação apenas intuitiva do problema. Assim o método mostra-se eficaz no apoio à decisão, por meio de uma padronização com embasamento técnico, evitando que problemas complexos como a manutenção de pontes sejam solucionados de maneira aleatória.

5. Considerações finais

Neste trabalho foi proposta a priorização de manutenção de pontes utilizando o método de apoio à decisão PROMETHEE II, a partir da hierarquização de 5 pontes rodoviárias dos estados do Paraná e de Santa Catarina.

O objetivo do estudo realizado foi apresentar uma alternativa ao decisor, de maneira a possibilitar que o processo de decisão seja o mais claro possível, permitindo inclusive a visualização dos limites da decisão, o que pode, no futuro, inclusive, gerar a reavaliação dos critérios subjetivos, fazendo com que o decisor possa questionar a sua própria intuição.

A grande vantagem do método é possibilitar ao decisor avaliar vários critérios importantes e diferentes, durante um processo de tomada de decisão. Além dessa liberdade de análise, outra vantagem do Método PROMETHEE II é a utilização de um algoritmo de fácil compreensão e aplicação para o fim de priorização de manutenção de pontes.

Conclui-se, portanto, que a priorização da manutenção de pontes pode ser realizada utilizando critérios que podem ser obtidos facilmente das inspeções destas estruturas e podem também ser embasadas por meio de um método de apoio à decisão, como o PROMETHEE.

6. Agradecimentos

Esta pesquisa foi apoiada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Construção civil (PPGECC) na Universidade Federal do Paraná (UFPR).

7. Referências

- [1] Abu Dabous, Saleh; Alkass, Sabah. (2008) A multi-attribute ranking method for bridge management. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 17:3, 282-291. <http://dx.doi.org/10.1108/09699981011038079>

- [2] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). (2004) Norma DNIT 010/2004-PRO: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido - Procedimento. Rio de Janeiro, Brasil.
- [3] Rashidi, M.; Samali, B.; Sharafi, P. (2016) A new model for bridge management: Part B: decision support system for remediation planning. *Australian Journal of Civil Engineering*, 14:1, 46-53. <https://doi.org/10.1080/14488353.2015.1092642>.
- [4] Sasmal, S.; Ramanjaneyulu K.; Lakshmanan, N. (2007) Priority ranking towards condition assessment of existing reinforced concrete bridges. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 3:1, 75-89. <https://doi.org/10.1080/15732470500473549>.
- [5] Abu Dabous, S.; Alkass, S. (2008) Decision support method for multi-criteria selection of bridge rehabilitation strategy. *Construction Management and Economics*, 26:8, 883-893. <https://doi.org/10.1080/01446190802071190>.
- [6] Brans, J. P.; Vincke, P.; Mareschal, B. (1984) PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis. *Journal of Operational Research*, 477-490, North Holland, Amsterdam.
- [7] Gervásio, H.; Silva, L. S. (2012) A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures. *Expert Systems with Applications*, 39:8, 7121-7131. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.032>.
- [8] Brans, J. P.; Vincke, P.; Mareschal, B. (1986) How to Select and How to Rank Projects: the PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, 24:2, 228-238. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5).