

GESTÃO DA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE NA ÁREA URBANA: VALIDAÇÃO DE UM ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS

¹VITOR HUGO SALVIATTO, ¹HELIANA BARBOSA FONTENELE

¹Universidade Estadual de Londrina (UEL)

<vitor.salviatto@uel.br>, <heliana@uel.br>

DOI: 10.21439/conexoes.v19.3731

Resumo. Os métodos de avaliação da condição de pavimentos, na maioria, demandam bastante esforço e tempo, e negligenciam os fatores associados à degradação do pavimento. O objetivo deste estudo foi validar o Índice de Condição Atual do Pavimento, que foi desenvolvido para avaliar o estado da superfície de pavimentos flexíveis de vias urbanas. O índice foi aplicado em uma malha de pavimentos em quatro diferentes cenários e um teste de correlação foi feito nos resultados. Além disso, foram verificados os resultados de análises comparativas com outros índices (*o Pavement Condition Index*, a Matriz de Valores Fixos e o Valor de Serventia Atual) a partir da aplicação do teste de hipóteses de *Friedman*, do Erro Absoluto Médio, da Média Absoluta do Erro Relativo e da conferência entre as respectivas classificações e estratégias de intervenção indicadas. Finalmente, realizou-se uma análise de sensibilidade com o método da Análise de Parâmetros Variáveis Interdependentes, analisando-se os pesos do Índice de Condição Atual do Pavimento com os pesos dados por profissionais de infraestrutura de transportes. A partir dos resultados, conclui-se que o Índice de Condição Atual do Pavimento representa uma ferramenta válida, prática e confiável para ser aplicada na gestão da infraestrutura urbana.

Palavras-chave: defeitos; avaliação objetiva; múltiplos critérios; análise de sensibilidade; *VIP analysis*.

MANAGEMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN URBAN AREAS: VALIDATION OF AN INDEX FOR ASSESSING THE CONDITION OF URBAN FLEXIBLE PAVEMENTS

Abstract. Pavement condition assessment methods, for the most part, demand a lot of effort and time, and neglect the factors associated with pavement degradation. This study aimed to validate the Current Pavement Condition Index, which was developed to rate the surface of flexible pavements on urban roads. The index was applied to a pavement network in four different scenarios and a correlation test was performed between the results. In addition, the results of comparative analyzes with other indices (the Pavement Condition Index, the Fixed Value Matrix and the Current Service Value) were verified based on Friedman hypothesis test, the Mean Absolute Error, the Absolute Mean of the Relative Error and the conference between the respective classifications and the indicated intervention strategies. Finally, a sensitivity analysis was carried out using the Variable Interdependent Parameters Analysis methodology, analyzing the weights of the Current Pavement Condition Index with the weights given by transport infrastructure professionals. From the results, it is concluded that the Current Pavement Condition Index represents a valid, practical, and reliable tool to be applied in the management of urban infrastructure.

Keywords: distresses; objective rating; multiple criteria; sensitivity analysis; VIP analysis.



1 INTRODUÇÃO

Os limitados recursos disponíveis para administração da infraestrutura viária urbana, o desconhecimento do poder público sobre métodos racionais e eficientes e a ausência de um plano de capacitação específica na área, resultam na precarização da malha viária das cidades e municípios, pois a tomada de decisão é pautada, muitas vezes, apenas na experiência do gestor. Uma alternativa aos atuais modelos adotados nos municípios brasileiros, é o Sistema de Gerência de Pavimentos Urbanos (SGPU).

Nesse sistema a avaliação da condição de pavimentos é uma das etapas mais importantes, pois é a partir dela que poderão ser determinadas as estratégias de intervenção, a qualidade das operações realizadas e se o pavimento cumpre o seu objetivo. Além disso, é a que mais exige tempo e recursos financeiros (Bektas; Smadi; Nlenanya, 2015; Cafiso *et al.*, 2019; Farashah, 2012).

O SGPU deve ser alimentado por dados da condição do pavimento, que podem estar no formato de índices que, na maioria, associam os tipos de defeitos do pavimento, suas severidades e extensões. Entre os tipos de avaliações disponíveis, destacam-se aqui a subjetiva e a objetiva. Conforme Golroo e Tighe (2010), na avaliação subjetiva pode haver a ocorrência de erros sistemáticos afetando negativamente os resultados. Para reduzí-los, Pereira (2019) desenvolveu uma escala visual para servir de referência aos avaliadores.

Já a avaliação objetiva corresponde ao levantamento dos defeitos da superfície do pavimento. Um dos métodos mais completos é o *Pavement Condition Index (PCI)*, padronizado pela *American Society for Testing and Materials (ASTM, 2018)*. A grande quantidade de defeitos, a diversidade de combinações possíveis entre tipo, extensão e severidade e o cálculo baseado em gráficos e ábacos tornam o PCI um método que consome um tempo muito maior que outros métodos menos complexos. Pensando nisso, Zanchetta (2017) propôs um método para reduzir a subjetividade e elevar a produtividade das avaliações, as Matrizes de Valores Fixos (MVF), que considera apenas os defeitos: buraco, desgaste, remendo, trinca por fadiga e deformação permanente.

Assim, concorda-se com o afirmado por Abu-Samra, Zayed e Tabra (2017), que os modelos disponíveis para avaliar a condição dos pavimentos se limitam-se à rugosidade e aos defeitos superficiais e negligenciam os fatores que contribuem na degradação. Portanto, afirma-se aqui que a agilidade em atuar na condição do pavimento passa pela compreensão dos motivos que levaram o pavimento a se degradar e considerar os fatores envolvidos nesse processo pode auxiliar na eficácia das decisões tomadas.

Elmansouri, Alossta e Badi (2022) sugeriram que pesquisas futuras sobre índices de condição devem ser desenvolvidas com o uso de Multi-criteria *Decision-Making Models (MCDM)* considerando outras medidas de desempenho do pavimento. Percebe-se, portanto, a necessidade do desenvolvimento e adoção de técnicas para avaliar de forma confiável, prática, com baixo custo a condição por meio dos fatores responsáveis pela sua deterioração para que possam ser tomadas decisões mais ágeis e corretas pelos gestores.

A partir disso, Salviatto (2021) propôs o Índice de Condição Atual do Pavimento (ICAP), usando o *Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique (MACBETH)*, que considera os princípios da Metodologia de Apoio à Decisão Multicritério Construtivista (MCDA-C). Os critérios considerados são: i) Defeitos no Pavimento (DP); ii) Serventia Atual (SA); iii) Volume de Tráfego de Ônibus (VTO); iv) Declividade Longitudinal (DL) e v) Drenagem (DNG). Na Equação 01 está o modelo do ICAP.

$$ICAP = 0,35 \text{ DP} + 0,29 \text{ SA} + 0,21 \text{ VTO} + 0,12 \text{ DL} + 0,03 \text{ DNG} \quad (1)$$

Assim, o objetivo do trabalho foi validar o ICAP e, portanto, verificar a viabilidade da nova ferramenta de avaliação para pavimentos urbanos. O *VIP Analysis (Variable Interdependent Parameters Analysis)* foi utilizado para realizar a análise de sensibilidade no índice com vistas a completar o processo de validação. Análise similar já foi adotada no trabalho de Rodrigues (2018) e Sequinel (2019) que verificaram a viabilidade dos seus índices como ferramenta de avaliação de desempenho ambiental da manutenção.

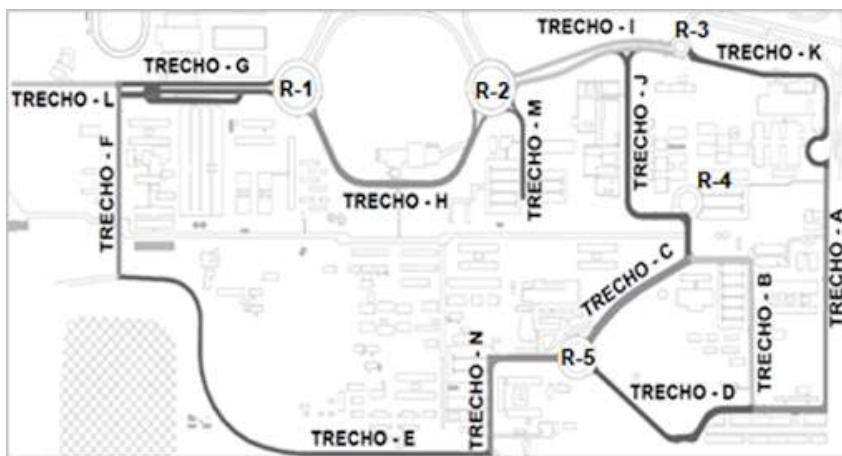
As análises de sensibilidade se justificam porque diante de vários critérios os tomadores de decisão podem mudar de opinião, pois há um aprendizado constante do problema durante as discussões. O *VIP Analysis* foi o mais indicado para a tarefa. Pois com as variações inseridas, ele fornece os valores mínimos e máximos das alternativas, sendo, respectivamente, o desempenho da alternativa na situação menos favorável e na mais favorável. Outro valor fornecido é o máximo arrependimento: quanto menor, melhor a alternativa. Além disso, com ele é possível verificar aspectos de dominância, que o tornam uma ferramenta eficaz na análise de um problema (Ventura; Dias; Clímaco, 2010).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira fase para validação do ICAP foi a aplicação do índice em campo para verificar as dificuldades intrínsecas ao processo de levantamento proposto e os aspectos passíveis de mudanças. O local selecionado foi um *campus* universitário, devido suas características de uma pequena cidade: a comunidade acadêmica é de mais de 21.000 pessoas e a rede viária tem aproximadamente 7,5 km de vias pavimentadas onde circulam diariamente pedestres, veículos não motorizados, automóveis, ônibus do transporte coletivo e alguns caminhões de propriedade da universidade.

A malha viária do *campus* foi dividida em 19 trechos (Figura 1), e estes subdivididos em Unidades Amostrais (UAs). As UAs possuíam a largura de uma faixa de rolamento e comprimentos variados, com área entre 135 m² e 315 m², segundo especificado na ASTM (2018). Ao todo, foram avaliadas 199 UAs com diversas características de tráfego, declividade, abaulamento e tipos de defeitos.

Figura 1: Divisão da malha viária do *campus* em trechos.



Fonte: Autores (2024)

Os dados para o ICAP foram obtidos conforme indicado por Salvietto (2021). Para os dados do critério VTO foram utilizadas duas formas de obtenção do volume de tráfego de ônibus: i) contagem *in loco* (VTO_{in_loco}) e ii) contagem nas páginas online das respectivas empresas (VTO_{online}). Para obter os dados dos critérios Serventia Atual (SA) e Defeitos no Pavimento (DP) foram realizadas avaliações subjetiva e objetiva.

A avaliação subjetiva baseou-se no procedimento do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2003), sendo adaptada aos objetivos do trabalho. Os avaliadores caminharam sobre cada UA e deram notas de 0 a 100 de acordo com sua percepção ao conforto/suavidade ao rolamento provido pelos pavimentos das UAs.

Além disso, os avaliadores foram divididos em dois painéis. Os avaliadores do primeiro painel, denominado Painel_{info_básica}, receberam as instruções básicas do procedimento, como considerar apenas a situação presente do pavimento, não interagir com os outros membros durante a avaliação e não considerar os aspectos de sinalização e de geometria da via. A média das notas atribuídas foi tomada como o SA_{info_básica} de cada UA.

Aos membros do segundo painel, denominado Painel_{Escala_visual}, foram apresentadas as informações básicas e a escala visual de Pereira (2019) para ser referência durante a avaliação. A média das notas atribuídas por eles gerou o SA_{Escala_visual} de cada UA.

A avaliação objetiva foi realizada conforme o método do PCI (ASTM, 2018). Os mesmos dados foram utilizados para determinar o índice de condição segundo as MVF (ICPMVF). Embora os métodos sejam distintos, é possível utilizá-los para determinar o ICPMVF desde que algumas adaptações sejam realizadas.

Assim, como no procedimento do ICPMVF não é mencionado se a extensão do defeito do tipo buraco é mensurada segundo as unidades ou área dos defeitos, o cálculo foi feito de forma similar ao PCI. Os resultados dos quatro cenários de obtenção do ICAP nas 199 UA (Quadro 1) foram correlacionados, para verificar se a forma de obter os critérios SA e VTO resultaria em valores discrepantes.

GESTÃO DA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE NA ÁREA URBANA: VALIDAÇÃO DE UM ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS

Quadro 1: Cenários de obtenção do ICAP

Cenário	Índice	Descrição
1	ICAP _{Escala_visual + Online}	SA obtido pelo Painel _{Escala_visual} e o VTO obtido por contagem <i>Online</i>
2	ICAP _{Info_básica + In_loco}	SA obtido pelo Painel _{Info_básica} e o VTO obtido por contagem <i>In loco</i>
3	ICAP _{Escala_visual + In_loco}	SA obtido pelo Painel _{Escala_visual} e o VTO obtido por contagem <i>In loco</i>
4	ICAP _{Info_básica + Online}	SA obtido pelo Painel _{Info_básica} e VTO obtido por contagem <i>Online</i>

Fonte: Autores (2024)

Inicialmente os resultados do ICAP do cenário mais representativo foram comparados com os resultados do PCI, do ICPMVF, do VSA obtido pelo Painel_{Info_básica} e do VSA obtido pelo Painel_{Escala_visual} por meio de uma análise gráfica, teste de correlação e das classificações indicadas por meio de cada método às UAs. A escala usada em todos os métodos foi a mesma usada na ASTM (2018), portanto não foram necessárias adequações.

Na sequência foram realizados testes para verificar se os resultados do ICAP eram estatisticamente equivalentes aos dos demais métodos. Em função da não normalidade dos dados (no teste de Shapiro-Wilk) e de terem sido aplicados às mesmas UAs foi utilizado o teste de Friedman. Cada UA foi considerada um bloco e os métodos considerados como os tratamentos.

Para o nível de significância $\alpha = 0,05$, foram testadas as hipóteses H_0 (não existe diferença significativa entre os métodos) e H_1 (existe diferença significativa entre pelo menos um dos métodos). Para um p -valor maior que α foi aceita H_0 , caso contrário rejeitada.

Para avaliar qual dos métodos não possuiu equivalência foi realizada a análise *post-hoc* com o teste de Nemenyi, cuja interpretação é equivalente à do teste de Friedman.

O próximo passo foi a análise das diferenças (erros) entre os resultados do ICAP e dos demais métodos com o *Mean Absolute Error* (MAE) e o *Mean Absolute Relative Error* (MARE). Na Equação 2 tem-se o cálculo do MAE, na qual VR representa o Valor Real e VA o valor aproximado. Na Equação 3 tem-se o cálculo do MARE. Em ambos, o PCI, o ICPMVF, o VSA_{Info_básica} e o VSA_{Escala_visual} foram os valores reais e o ICAP o valor aproximado. Depois foi feita a comparação das estratégias de intervenção indicadas por Shahin (2005). De início foram considerados os resultados das 199 UAs e, posteriormente, a pontuação de cada trecho (média aritmética das pontuações de suas UAs).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |VR - VA| \quad (2)$$

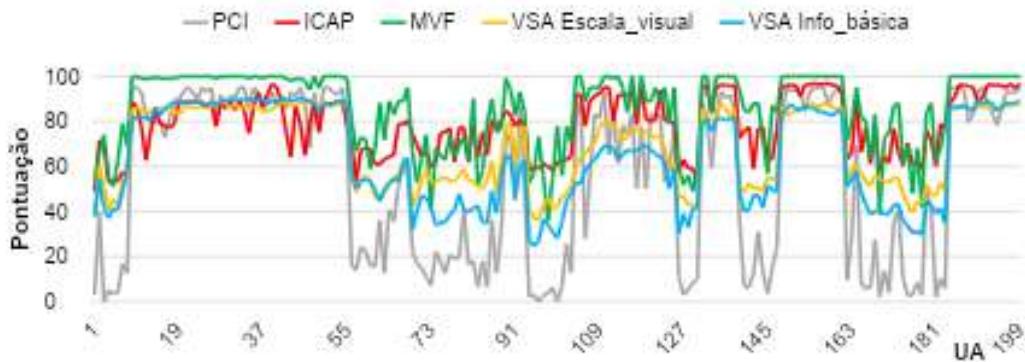
$$MARE = \frac{1}{n} \sum \frac{|VR - VA|}{VR} \times 100 \quad (3)$$

A segunda fase foi a análise de sensibilidade do modelo desenvolvido. Para isso, foi solicitado que cinco profissionais atuantes na área de infraestrutura de transportes atribuíssem de forma direta pesos aos critérios do ICAP. A escolha dos profissionais foi feita em função de possuírem experiência direta, tanto na esfera pública quanto privada, na área de manutenção de pavimentos. Assim, a opinião dos *experts* pôde ser tomada como uma referência para o processo de análise do ICAP. De acordo com Lemonakis, Kopelias e Karlaftis (2023), o desenvolvimento de índice de condição de pavimentos baseado no conhecimento e na experiência de um grupo de especialistas na área de manutenção permite a confiabilidade e a integridade dele, além de trazer valor agregado.

Sendo assim, em um formulário desenvolvido no *Google Forms* e enviado aos profissionais, foi realizada a seguinte solicitação:

“De acordo com sua opinião e experiência profissional, distribua, numa escala de 0 a 100 pontos, uma pontuação para cada um dos critérios do ICAP, tendo em vista que os pontos expressam o potencial de relação do critério com a condição do pavimento (0 ponto equivale a nenhuma relação e 100 pontos equivale a uma total relação).”

Figura 2: Comparação gráfica entre o ICAP, PCI, ICPMVF, VSA_{Escala_visual} e VSA_{Info_básica}.



Fonte: Autores (2024).

Foi dito que o somatório das pontuações dadas aos cinco critérios deveria dar 100 pontos. As médias das pontuações geraram então os pesos dos critérios.

Assim, foram definidas três alternativas no VIP Analysis: alternativa a_1 era o conjunto de pesos *MACBETH*, alternativa a_2 foi o conjunto de pesos dados pelos profissionais e alternativa a_3 foram os pesos do índice obtido com o método AHP por Salviatto *et al.* (2020).

Primeiramente, a análise de sensibilidade foi realizada sem ordenação dos critérios (Análise I). Em seguida, foi definida uma ordem de importância dos critérios com base nos pesos obtidos no *MACBETH* (Análise II). Na terceira análise os critérios foram ordenados pelos pesos atribuídos pelos profissionais (Análise III) e, por fim, foi realizada a análise com os critérios obtidos por meio do método AHP (Análise IV).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de correlação entre os resultados dos quatro cenários de obtenção do ICAP, o menor valor foi de 0,989 (entre os cenários 1 e 2), enquanto o maior valor foi de 0,998 (entre os cenários 1 e 3 e entre os cenários 2 e 4). Uma vez que apresentaram resultados semelhantes, foram utilizados nas análises posteriores apenas os resultados do cenário 1. Na Figura 2 estão as pontuações das 199 UAs com base em cada método.

Na comparação do ICAP com o PCI, nota-se que os métodos tendem a avaliar a condição dos pavimentos com notas próximas nas UAs classificadas como “Muito boa” ou “Excelente”, ou seja, com pontuações superiores a 71 pontos. Das 199 UAs avaliadas, o ICAP teve valor maior que o PCI em 154 UAs (77%). A correlação entre os índices foi de 0,89. Entretanto, os valores variaram com diferentes magnitudes. Enquanto o ICAP variou entre 97,29 e 47,94 pontos, o PCI variou entre 95,05 e 0 ponto.

Em relação ao ICPMVF, percebeu-se maior aproximação com o ICAP. Das 199 UAs avaliadas, apenas 6 receberam ICPMVF inferior a 50 pontos. A correlação entre os índices foi de 0,85. Entretanto, a amplitude entre as notas dos índices foi distinta, uma vez que as notas obtidas de ICPMVF variaram entre 100 e 36 pontos. Assim como visto na comparação com o PCI, o ICAP e o ICPMVF apresentaram notas próximas nas UAs de maior pontuação.

As pontuações das avaliações subjetivas e do ICAP tendem a aumentar e diminuir de forma semelhante e num mesmo intervalo, com uma correlação de 0,81 e 0,76 entre o ICAP e o VSA_{Escala_visual} e entre o ICAP e o VSA_{Info_básica}, respectivamente. Entretanto, as pontuações das avaliações subjetivas, em geral, foram mais rigorosas que as do ICAP. Em 174 UAs (87%) o ICAP foi maior que as pontuações atribuídas por meio do VSA_{Escala_visual} e em 166 UAs (83%) na comparação com o VSA_{Info_básica}. Como todas as UAs foram avaliadas por meio do ICAP com pontuações superiores a 47,94 pontos, a semelhança com as avaliações subjetivas, assim como na comparação com o PCI e com o MVF, foi observada nas UAs classificadas com as condições “Excelente” e “Muito boa”. Na Tabela 1 pode ser observado o número obtido de UAs em cada classificação dentre os métodos adotados.

GESTÃO DA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE NA ÁREA URBANA: VALIDAÇÃO DE UM ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS

Tabela 2: Número de UAs por classificação segundo cada índice.

Classificação	ICAP	PCI	MVF	VSA_{Escala_visual}	VSA_{Info_básica}
Excelente (86 – 100)	82	68	121	70	61
Muito boa (71 – 85)	58	32	36	34	24
Boa (56 – 70)	53	9	28	26	28
Regular (41 – 55)	6	10	12	65	52
Ruim (26 – 40)	0	13	2	4	33
Muito ruim (11 – 25)	0	32	0	0	1
Total	199	164	199	199	199

Fonte: Autores (2024).

Na Tabela 2, os resultados dos testes de Friedman e *post-hoc* de Nemenyi são apresentados. Devido a uma limitação do *software* utilizado (*Excel*), não são apresentados valores de *p*-valor menores que $2,2 \times 10^{-16}$. Entretanto, observa-se que o valor de *p*-valor foi menor que α . Assim, pelo menos um dos conjuntos de dados não é estatisticamente equivalente aos demais. Ainda, na comparação do ICAP com todos os demais métodos foram obtidos *p*-valores menores que 0,05. Assim, a hipótese nula, de que os resultados obtidos por meio do ICAP eram estatisticamente equivalentes aos demais, foi rejeitada.

Tabela 3: Resultado do teste de Friedman e *post-hoc* de Nemenyi entre índices.

Teste de Friedman	Resultado
Friedman qui-quadrado	453,8
Graus de liberdade	4
<i>p</i> -valor	$< 2,2 \times 10^{-16}$
Teste <i>post-hoc</i> de Nemenyi	
PCI	$< 2,2 \times 10^{-16}$
MVF	$3,9 \times 10^{-12}$
VSA _{Info_básica}	$1,7 \times 10^{-13}$
VSA _{Escala_visual}	$< 2,2 \times 10^{-16}$

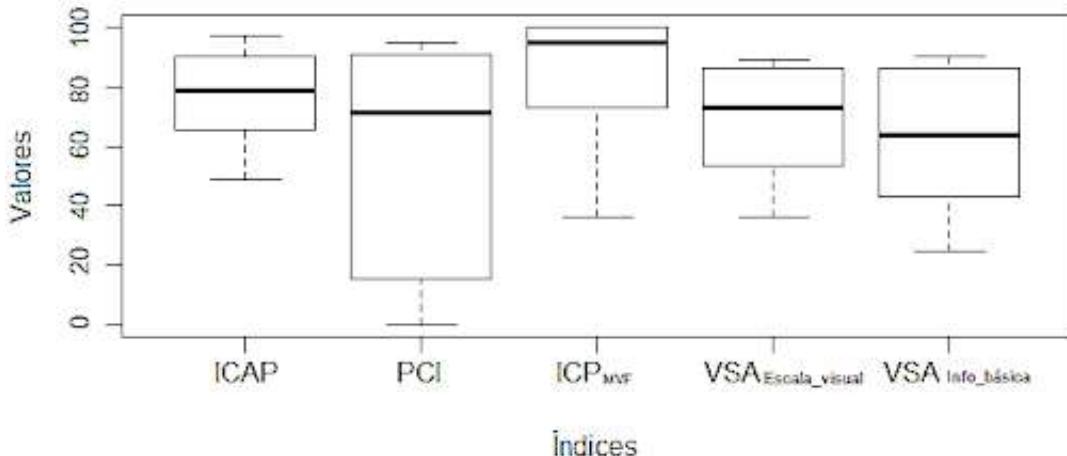
Fonte: Autores (2024).

Na Figura 3 apresenta-se um *boxplot* dos conjuntos de dados. É possível observar que a mediana do ICAP ficou localizada em uma faixa intermediária entre o MVF e os demais métodos. Assim, considerou-se que o ICAP gerou resultados mais “pessimistas” que o método MVF, pois, embora os métodos considerem os mesmos tipos de defeitos, o ICAP considera ainda outros parâmetros da via e que, em muitas UAs, esses parâmetros reduziram de forma significativa a pontuação da condição do pavimento. Entretanto o ICAP gerou resultados mais “otimistas” que os métodos do PCI e as avaliações subjetivas. O PCI considera mais tipos de defeitos que o ICAP e pesos diferentes para defeitos estruturais, graus de severidade e extensão dos defeitos. O motivo de tal “rigor” das classificações do PCI frente a de outros índices já foi discutido por Costa *et al.* (2022).

Em relação às avaliações subjetivas, os avaliadores tendem a formular as notas com base, principalmente, nos defeitos presentes/perceptíveis no pavimento e, muitos destes, não são considerados no método do ICAP. Como exemplo cita-se o trabalho de Schiavon e Manzoli (2017) e Gimenes, Fontenele e Junior (2024) que perceberam que a avaliação subjetiva foi menos crítica que a objetiva, devido alguns dos defeitos das vias não serem perceptíveis ao usuário (trincas), não refletindo na qualidade de viagem.

Uma vez que por meio do teste de Friedman não foi possível observar de qual dos métodos os resultados do ICAP mais se aproximaram, foram avaliados os erros entre os métodos (Tabela 3). Os resultados apresentados confirmam as observações realizadas na análise gráfica. Tanto em relação aos valores de MAE, como nos de MARE, foi obtida uma proximidade maior dos modelos do ICAP ao da MVF (diferença média de 10 pontos) do que em relação ao PCI e avaliações subjetivas. Embora o MVF resulte em um índice combinado de defeitos e o ICAP a um de múltiplos critérios, estes métodos consideram os mesmos tipos de defeitos. Além disso, o critério

Figura 3: Boxplot dos dados levantados em campo.



Fonte: Autores (2024).

com maior peso no ICAP é o de “Defeitos no Pavimento” (responsável por mais de um terço da pontuação da condição de uma UA).

Tabela 4: Valores de MAE e MARE entre o ICAP e demais métodos de avaliação.

	PCI	MVF	VSAEscala_visual	VSAInfo_básica
MAE	26	10	12	17
MARE (%)	297	12	20	35

Fonte: Autores (2024).

Na comparação com o PCI estão as maiores diferenças, na qual os resultados dos métodos diferenciaram, na média, em 26 pontos. Esta diferença é mais evidente na análise do MARE, na qual a porcentagem de erro entre os métodos foi, na média das UAs, de 297%, valor quase 25 vezes maior que o MARE obtido entre o ICAP e o MVF.

Já em relação às avaliações subjetivas, os resultados do ICAP aproximaram-se mais da avaliação realizada pelo VSA_{Escala_visual}, com uma diferença média de 12 pontos e MARE de 20%.

De acordo com a pontuação, foi indicado um tipo de intervenção para cada UA. Na Tabela 4 estão os números de UAs e trechos que receberam a mesma indicação de intervenção por meio do ICAP e dos demais métodos. Observa-se uma equivalência entre as atividades indicadas pelo ICAP e pelos demais métodos em pelo menos 50% das 199 UAs. Os melhores resultados foram na comparação com o MVF (81%).

Tabela 5: Número de estratégias de M&R iguais às indicadas para o ICAP.

	PCI		MVF		VSA _{Escala_visual}		VSA _{Info_básica}	
	UA	Trecho	UA	Trecho	UA	Trecho	UA	Trecho
Manutenção preventiva	97	9	130	12	101	11	81	8
Reabilitação	2	0	32	2	52	6	31	5
Reconstrução	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	99	9	162	14	153	17	112	13
Total (%)	50	47	81	74	77	89	56	68

Fonte: Autores (2024).

Como não foram indicadas atividades de reconstrução com o ICAP, não houve UAs equivalentes com os demais métodos nessa intervenção. Ainda, como as pontuações de ICAP nas UAs situaram-se nas faixas superiores de

GESTÃO DA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE NA ÁREA URBANA: VALIDAÇÃO DE UM ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS

condição, o maior número de UAs com intervenção equivalente foram de manutenções preventivas. Comparando com o PCI, por exemplo, das 99 UAs que apresentaram a sugestão de intervenção igual pelo ICAP, foram 97 UAs que precisam de manutenção preventiva. Tomando como referência as estratégias de intervenção indicadas a partir do ICAP, a menor porcentagem de concordância foi quando comparadas às do PCI, com os valores 50% das UAs e de 47% dos trechos. Na comparação com o MVF e o VSA_{Escala_visual} esse cenário melhora, tendo maiores percentuais de concordância para os trechos nos valores de 74% e 89%, respectivamente.

Na sequência, na análise de sensibilidade a partir do VIP Analysis foram comparados os pesos atribuídos aos critérios por meio dos julgamentos realizados no *M-MACBETH* (alternativa 1 – a_1), os pesos obtidos por meio da opinião de profissionais envolvidos com infraestrutura de transportes (alternativa 2 – a_2) e os pesos obtidos por meio de julgamentos realizados com base no método AHP (alternativa 3 – a_3). Na Tabela 5 estão os conjuntos de pesos dos critérios do ICAP inseridos no VIP Analysis.

Pode-se observar uma proximidade entre os pesos representativos dos profissionais (a_2) com os demais (a_1 e a_3). Com exceção do critério DNG, que na opinião dos especialistas foi o terceiro critério mais importante para o ICAP com 17% do índice, enquanto nos pesos atribuídos por meio do *M-MACBETH* e AHP esse critério foi o quinto mais importante, com 3% e 10%, respectivamente. Os demais critérios possuíram pesos próximos. A seguir apresentam-se os resultados das quatro análises realizadas. Na primeira análise não foram impostas restrições aos pesos dos critérios, assim o VIP Analysis teve liberdade total para ranquear as melhores alternativas (ordenação livre). Na Tabela 6 são apresentados os resultados da Análise de Sensibilidade I.

Tabela 6: Critérios e alternativas conforme foram estruturados no VIP Analysis.

Alternativa	A	DP	SA	VTO	DL	DNG
a_1	A	0,35	0,29	0,21	0,12	0,03
a_2	A	0,30	0,26	0,16	0,11	0,17
a_3	A	0,34	0,26	0,20	0,10	0,10

Fonte: Autores (2024).

Tabela 7: Análise das alternativas no VIP Analysis (valores mínimo, máximo, variação e comparação).

Alternativa	Valor mínimo	Valor máximo	Variação	Máx. Arrependimento	Comparação par a par				Dominada?
					a1	a2	a3	-	
a_1	0,03	0,35	0,32	0,14	-	0,05	0,02	-	Não
a_2	0,11	0,30	0,19	0,05	0,14	-	0,07	-	Não
a_3	0,10	0,34	0,24	0,07	0,07	0,04	-	-	Não

Fonte: Autores (2024).

Observa-se que a alternativa a_2 apresentou o menor valor de variação entre os valores mínimo e máximo. Assim, a_2 foi a mais robusta, ou seja, apresenta a menor variação de pontuação em caso de alteração nos pesos dos critérios. Essa alternativa também teve o melhor desempenho em relação ao menor valor mínimo, ou seja, apresenta o melhor desempenho na situação menos favorável. Quanto ao valor máximo, a_1 obteve o melhor desempenho, com o valor de 0,35.

Nesta análise, a alternativa a_2 também superou as demais na comparação dos valores de máximo arrependimento. O arrependimento de optar por a_2 ou a_3 em vez da alternativa a_1 seria de 0,14 e 0,07, respectivamente, enquanto a escolha de a_2 em detrimento à a_1 e a_3 seria de apenas 0,05 (máximo arrependimento) e 0,04, respectivamente. Uma vez que o arrependimento máximo de a_2 não foi menor ou igual a zero, não foi observada dominância de uma alternativa sobre as demais.

Na análise II, realizada com base na ordenação dos critérios do ICAP atribuídos no *M-MACBETH*, foi imposta no VIP Analysis a restrição: DP > SA > VTO > DL > DNG. Na Tabela 7 estão os resultados dessa análise. Nela, a_2 apresentou a menor variação entre os valores mínimo e máximo e, portanto, é a alternativa mais robusta. Em relação ao desempenho na situação menos favorável, as três alternativas obtiveram o resultado de 0,20. Quanto ao valor máximo, a_1 obteve um resultado ligeiramente melhor. Por meio destes parâmetros, não foi possível observar vantagem de uma alternativa sobre as demais.

Contudo, pôde-se observar o melhor desempenho de a_1 , uma vez que apresentou máximo arrependimento igual a zero sobre as outras duas alternativas, ou seja, não haveria arrependimento de se escolher a_1 em detrimento a a_2 .

GESTÃO DA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE NA ÁREA URBANA: VALIDAÇÃO DE UM ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS

Tabela 8: Resultados da Análise de Sensibilidade II.

Alternativa	Valor mínimo	Valor máximo	Variação	Máx. Arrependimento	Comparação par a par				Dominada?
					a1	a2	a3	-	
a_1	0,20	0,35	0,15	0,00	-	0,05	0,02	-	Não
a_2	0,20	0,30	0,10	0,05	0,00	-	0,00	-	Sim ($a_1; a_3$)
a_3	0,20	0,34	0,14	0,02	0,00	0,04	-	-	Sim (a_1)

Fonte: Autores (2024).

e a_3 . Desse modo, a_1 domina as demais alternativas e é tomada como a solução ótima. Ainda, pode-se observar que a_3 domina a_2 , visto que o arrependimento de se escolher a_3 ao invés de a_2 é de 0,00.

Na terceira análise foi imposta a restrição da ordem de pesos conforme a opinião dos profissionais: DP > SA > DNG > VTO > DL. Na Tabela 8 estão os resultados da análise.

Tabela 9: Resultados da Análise de Sensibilidade III.

Alternativa	Valor mínimo	Valor máximo	Variação	Máx. Arrependimento	Comparação par a par				Dominada?
					a1	a2	a3	-	
a_1	0,20	0,35	0,15	0,02	-	0,05	0,02	-	Não
a_2	0,20	0,30	0,10	0,05	0,02	-	0,01	-	Não
a_3	0,20	0,34	0,14	0,02	0,01	0,04	-	-	Não

Fonte: Autores (2024).

Nessa verificação, os valores mínimo e máximo são iguais aos da Análise II. Assim, a_2 é a alternativa mais robusta. Em relação ao valor máximo, a_1 tem o melhor resultado. Na análise dos arrependimentos, as alternativas a_1 e a_3 obtiveram os melhores resultados. Os arrependimentos máximos destas alternativas foram de 0,02. Porém, percebe-se uma leve vantagem de a_1 sobre a_3 , pois o arrependimento de se escolher a_1 em detrimento a a_3 é de 0,01, enquanto o arrependimento da escolha contrária seria de 0,02.

A alternativa a_2 apresentou o pior desempenho nesta análise, com um arrependimento máximo de 0,05 em relação a a_1 . Como os arrependimentos máximos foram maiores que 0,00, não houve dominância entre alternativas. Assim, a_1 e a_3 foram tomadas como as melhores soluções, mas não foram consideradas soluções ótimas.

Na última análise de sensibilidade foi imposta ao VIP Analysis a restrição: DP > SA > VTO > DL = DNG. Os critérios DL e DNG possuem pesos equivalentes. Tanto na análise dos valores máximos e mínimos, como na análise dos arrependimentos máximos, foram obtidos os mesmos valores que na Análise II (ordenação dos critérios com base no ICAP). Tal igualdade foi obtida, pois o VIP Analysis usou equações para impor as restrições.

Na Análise IV, para inserir a restrição de ordem de pesos no VIP Analysis, estabeleceu-se que DNG – DL = 0 para indicar que os pesos destes critérios eram iguais. Na Análise II, foi determinado que DNG – DL ≤ 0 para indicar que o peso do critério DNG era menor que o peso do critério DL. Assim, o software considera que ambas as equações são equivalentes e, consequentemente, não haverá variação nos resultados.

Portanto, assim como na Análise II, as três alternativas mostraram-se equivalentes em relação à robustez, valores mínimos e valores máximos. Entretanto, a alternativa a_1 dominou as demais quanto aos arrependimentos máximos e foi tomada como a solução ótima, uma vez que apresentou arrependimento máximo de 0,00.

Em suma, pôde-se observar que, em todas as análises, à exceção da análise com ordenação livre, os pesos segundo o M-MACBETH apresentaram-se como a melhor alternativa. Na análise com a ordenação livre dos critérios, a diferença entre as alternativas não foi significativa e as alternativas são consideradas equivalentes.

4 CONCLUSÕES

Os quatro cenários de aplicação do ICAP estavam quase perfeitamente correlacionados. Assim, conclui-se que a avaliação subjetiva para obter o critério SA pode ou não ser auxiliada pela escala visual e que a contagem do volume de ônibus pode ser feita in loco ou pelo itinerário online.

Os valores de ICAP apresentaram um padrão semelhante ao PCI, ao ICPMVF e às avaliações subjetivas, com a mesma tendência de aumento ou diminuição entre as UAs, porém de magnitudes diferentes. Dentre os métodos, o ICAP avaliou de forma mediana: não foi rigoroso como o PCI e avaliações subjetivas e nem otimista como o ICPMVF.

GESTÃO DA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE NA ÁREA URBANA: VALIDAÇÃO DE UM ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS

Quanto ao teste de hipóteses, não foram obtidos valores estatisticamente equivalentes. Isso ocorreu devido aos índices possuírem métodos distintos e considerarem diferentes critérios para avaliar a condição dos pavimentos. Entretanto, por meio da análise dos erros, verificou-se que a diferença média entre o ICAP e os demais índices não foi significativa na indicação das estratégias de intervenção.

Na análise de sensibilidade, os pesos do ICAP obtidos por meio do *M-MACBETH* apresentaram os melhores resultados em todas as análises, à exceção da análise com ordenação livre. Entretanto, nessa análise, a diferença para a alternativa com melhor desempenho não foi significativa e as alternativas foram consideradas equivalentes. Assim, conclui-se que são válidos os pesos atribuídos aos critérios do ICAP por meio do M-MACBETH, uma vez que apresentaram os melhores resultados na análise de sensibilidade e estão de acordo com a avaliação dos profissionais.

Desse modo, percebe-se que o ICAP representa um método prático e confiável de avaliação da condição de pavimentos e que pode vir a reduzir os gastos com avaliação, tendo em vista que as avaliações são compostas de métodos práticos, exigindo um menor número de avaliadores e tempo de execução. Além disso, devido à sua característica multicritério, é possível mensurar a influência de cada critério sobre a condição do pavimento.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro à pesquisa (processo nº 408409/2016-9), à CAPES, à Universidade Estadual de Londrina e aos avaliadores que colaboraram nos levantamentos de campo.

REFERÊNCIAS

- ABU-SAMRA, S.; ZAYED, T.; TABRA, W. Pavement condition rating using multiattribute utility theory. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, v. 143, n. 3, p. 4017011, 2017.
- BEKTAS, F.; SMADI, O.; NLENANYA, I. Pavement condition: New approach for iowa department of transportation. **Transportation Research Record**, v. 1, n. 2523, p. 40–46, 2015.
- CAFISO, S.; GRAZIANO, A. D.; GOULIAS, D.; D'AGOSTINO, C. Distress and profile data analysis for condition assessment in pavement management systems. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 12, n. 5, p. 527–536, 2019.
- COSTA, K. H. R.; SALVIATTO, V. H.; JUNIOR, C. A. P. da S.; FONTENELE, H. B. Análise da matriz de valores fixos para classificação da condição de pavimentos flexíveis urbanos. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 18, n. 2, p. 89–102, dez 2022.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **AVALIAÇÃO SUBJETIVA DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E SEMI-RÍGIDOS. NORMA DNIT 009/2003 – PRO**. 2003. Rio de Janeiro Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br>.
- ELMANSOURI, O.; ALOSSSTA, A.; BADI, I. Pavement condition assessment using pavement condition index and multi-criteria decision-making model. **Mechatronics and Intelligent Transportation Systems**, v. 1, n. 1, nov 2022.
- FARASHAH, M. K. **DEVELOPMENT PRACTICES FOR MUNICIPAL PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEMS APPLICATION**. Tese (Master of Applied Science in Civil engineering) — University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2012.
- GIMENES, L.; FONTENELE, H. B.; JUNIOR, C. A. P. da S. Uso de um sig-t como apoio à análise da condição de pavimentos asfálticos. **Revista de Ciência e Inovação**, v. 10, n. 1, p. 1–17, jan 2024.
- GOLROO, A.; TIGHE, S. L. Developing an overall combined condition index for pervious concrete pavements using a specific panel rating method. **Transportation Research Record**, v. 2153, n. 1, p. 40–48, 2010.
- LEMONAKIS, P.; KOPELIAS, P.; KARLAFTIS, P. Introduction of a new index to assess pavement functional condition. **Environment, Development and Sustainability**, 2023.
- PEREIRA, L. A. **ESCALA VISUAL: UMA FERRAMENTA PARA A AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS URBANOS**. Tese (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.
- RODRIGUES, R. R. **ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL DOS SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO RODOVIÁRIA**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Edificações e Saneamento)) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.
- SALVIATTO, V. H. **FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS BASEADA EM UMA ANÁLISE MULTICRITÉRIO**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.
- SALVIATTO, V. H.; LOURO, T. V.; NERI, T. B.; SOUZA, B. Z. de; WOJAHN, R. E.; TOMA, W.; MERLO, P.; FONTENELE, H. B. Índice de avaliação da condição de pavimentos flexíveis urbanos. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 2, p. 206–215, jun 2020.
- SCHIAVON, G. da S.; MANZOLI, A. Avaliação objetiva e subjetiva em superfície de pavimento flexível em trecho urbano – análise da distância entre estações de avaliação em subtrechos homogêneos. **Revista Científica Eletrônica Estácio**, v. 10, n. 10, p. 1–23, dez 2017.
- SEQUINEL, L. F. **Modelo para avaliação ambiental em obras de manutenção rodoviária baseado numa análise multicritério construtivista**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.
- SHAHIN, M. Y. **Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots**. 2. ed. New York: Springer US, 2005.
- TESTING, A. S. for; MATERIALS. **Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys**. West Conshohocken, 2018. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/D6433.htm>.

GESTÃO DA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE NA ÁREA URBANA: VALIDAÇÃO DE UM ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS

VENTURA, A.; DIAS, L. C.; CLÍMACO, J. N. Using action research on the process of decision support with vip analysis software. In: **Proceedings of the 2010 Conference on Bridging the Socio-Technical Gap in Decision Support Systems: Challenges for the Next Decade.** NLD: IOS Press, 2010.

ZANCHETTA, F. **Sistema de gerência de pavimentos urbanos:** avaliação de campo, modelo de desempenho e análise econômica. Tese (Tese (Doutorado em Ciências - Área de Infraestrutura de Transportes)) — Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2017.