



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

VITOR HUGO SALVIATTO

**FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS BASEADA EM UMA
ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Londrina
2021

VITOR HUGO SALVIATTO

**FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS BASEADA EM UMA
ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a Dr^a Heliana Barbosa Fontenele

Londrina
2021

VITOR HUGO SALVIATTO

**FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS BASEADA EM UMA
ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Heliana Barbosa
Fontenele
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Romualdo T. de Franca Junior
Universidade do Estado de Santa Catarina -
UDESC

Prof.^a Dr.^a Shirley Minnell Ferreira de Oliveira
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Londrina, 18 de março de 2021.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado a saúde, a força e a persistência necessários para concluir mais essa etapa da minha vida. Agradeço também a Nossa Senhora Aparecida por ter guiado e iluminado a minha mente nos momentos de dificuldade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela disponibilização da bolsa de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa (processo nº 408409/2016-9).

À Universidade Estadual de Londrina, ao Centro de Tecnologia e Urbanismo, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e ao Laboratório de Engenharia de Transportes (LET-CTU), pela infraestrutura e apoio institucional disponibilizados e a todos os professores pelos ensinamentos fundamentais à minha carreira.

À minha orientadora, professora Dra. Heliana Barbosa Fontenele, pela orientação neste trabalho, pela confiança, pelos ensinamentos, pelos incentivos e pelas conversas e conselhos que guiarão toda a minha carreira profissional.

Ao professor Dr. Carlos Alberto Prado da Silva Junior, pelas sugestões, pelo incentivo, e por todos os ensinamentos que contribuíram para o meu crescimento profissional.

Ao Departamento de Estatística da Universidade Estadual de Londrina, pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus irmãos Luis e Ana, à minha madrastra Adenilde, ao amor da minha vida Juliana e, em especial, ao meu pai Laercio e a memória de minha mãe Eliane, por me guiarem no caminho certo e por não medirem esforços para que eu pudesse receber uma boa educação e para que eu atingisse meus objetivos.

Aos amigos de mestrado e alunos de graduação, pela contribuição e apoio fundamentais no desenvolvimento desse trabalho.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”

Madre Teresa de Calcutá

SALVIATTO, Vitor Hugo. **Ferramenta de Avaliação da Condição de Pavimentos Flexíveis Urbanos Baseada em uma Análise Multicritério**. 2021. 119 f. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

RESUMO

A avaliação da condição dos pavimentos é uma das atividades mais importantes de um Sistema de Gerência de Pavimentos. Entretanto, muitos dos métodos de avaliação possuem procedimentos exaustivos e demandam grande quantidade de tempo e de avaliadores, além de não considerar os parâmetros responsáveis pela degradação do pavimento. Desse modo, este estudo teve como objetivo desenvolver um índice para avaliar, por meio de múltiplos critérios, a condição de pavimentos flexíveis urbanos. A Metodologia de Apoio a Decisão Multicritério Construtivista foi utilizada para elaborar o Índice de Condição Atual do Pavimento (ICAP). Primeiramente, foram hierarquizados os critérios, os níveis de desempenho e os níveis de referência no programa M-MACBETH. Em seguida, os componentes do ICAP foram julgados segundo sua atratividade por alunos de pós-graduação em engenharia civil para definir as funções de valor e os pesos dos critérios. Após desenvolvido, o índice foi aplicado na malha viária do *campus* da Universidade Estadual de Londrina. Devido aos diferentes métodos de obtenção dos critérios, foram definidos quatro cenários de coleta de dados e os resultados foram comparados por meio de teste de correlação. Os dados levantados foram também utilizados para calcular o *Pavement Condition Index*, o índice de condição baseado na Matriz de Valores Fixos e o Valor de Serventia Atual dos pavimentos. O ICAP foi comparado aos demais índices por meio das classificações de condição, do teste de hipóteses de Friedman, do Erro Absoluto Médio e Média Absoluta do Erro Relativo e das estratégias de intervenção. Por fim, foi realizada a análise de sensibilidade do ICAP por meio do método *VIP Analysis*. Os pesos obtidos por meio dos julgamentos no M-MACBETH foram comparados com os pesos dados por profissionais ligados à infraestrutura de transportes e com os pesos de um índice que considera os mesmos critérios que o ICAP, o Índice de Condição da Superfície de Pavimentos Flexíveis. O ICAP foi composto pelos critérios Defeitos no Pavimento, Serventia Atual, Volume de Tráfego de Ônibus, Declividade Longitudinal e Drenagem. Os diferentes cenários de levantamento dos dados dos critérios resultaram em índices com correlação entre 0,98 e 0,99. Em geral, foram obtidos valores de ICAP intermediários aos demais índices. Foram obtidos valores de p-valor menores que 0,05 no teste de hipótese, o que representa que o ICAP não apresentou resultados equivalentes com os demais índices, com diferença média de 16,25 pontos. Entretanto, a equivalência obtida na indicação das estratégias de intervenção foi de no mínimo 50% das unidades amostrais. Na análise de sensibilidade, o ICAP apresentou-se como a melhor alternativa em três das quatro análises realizadas. Além disso, foi observado uma similaridade nos pesos do ICAP e dos pesos atribuídos pelos profissionais. Desse modo, o ICAP apresentou-se como uma ferramenta prática, confiável e que pode representar redução nos gastos com avaliações de condição e contribuir, assim, para um sistema de gerência de pavimentos.

Palavras-chave: sistema de gerência de pavimentos; índice de condição de pavimentos; MACBETH; teste de Friedman; *VIP Analysis*.

SALVIATTO, Vitor Hugo. **Tool for Urban Flexible Pavement Condition Evaluation Based on a Multicriteria Analysis**. 2021. 119 p. Master Thesis (Masters in Civil Engineering) – Londrina State University, Londrina, 2021.

ABSTRACT

The assessment of the condition of the pavement is one of the most important activities of a Pavement Management System. However many of the evaluation methods have exhaustive procedures and require a great amount of time and evaluators, moreover they do not consider the parameters responsible for the pavement degradation. Thereby, this study had the goal to develop an index to assess through multiple criteria the condition of the urban flexible pavements. The Multicriteria Decision Aid Constructivist Methodology was used to elaborate the Current Pavement Condition Index (ICAP). First, the criteria, the performance levels and the reference levels were ranked in the M-MACBETH software. Then the components of the ICAP were judged according to their attractiveness by engineering post-graduation students to define the value functions and the weights. After developed, the index was applied to the Londrina State University campus road network. Due to different criteria obtaining methods, four data collection scenarios were defined, and the results were compared through correlation test. The gathered data were used to calculate the Pavement Condition Index, the condition index based on the Fixed-Values Matrix and the Present Serviceability Ratio of the pavements. The ICAP was compared to the other indexes through the condition classification, the Friedman test, Mean Absolute Error and Mean Absolute Relative Error, and intervention strategies. Lastly it was performed the ICAP sensitivity analysis through the VIP analysis method. The weights obtained through the M-MACBETH judgements were compared with the weights given by professionals linked to the transport infrastructures and with the weights of an index that considers the same criteria as the ICAP, the Surface Condition Index for Flexible Pavements. Pavement Distresses, Present Serviceability, Bus Traffic Volume, Longitudinal Slope and Drainage criteria, composed the ICAP. The different scenarios of the criteria data gathering resulted in correlation indexes between 0.98 and 0.99. In general, it was obtained intermediary ICAP values to the other indexes. It was obtained lower p-value values than 0.05 on the hypothesis test, which represents that the ICAP did not show equivalent results to the other indexes, with an average difference of 16.25 points. However, the equivalence obtained in the intervention strategy indication was at least 50% of the sample units. In the sensitivity analysis, ICAP presented itself as the best alternative in three of the four performed analysis. Beyond that, it was observed a similarity in ICAP weights, and the weights assigned by the professionals. This way ICAP presented itself as a practical, reliable tool, which may represent a reduction in expenses with condition assessment and thus contribute to a pavement management system.

Keywords: pavement management system; pavement condition index; MACBETH; friedman test; VIP Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Variação da serventia conforme aumento do tráfego/tempo e período recomendado para a manutenção25
Figura 2	Escala Visual Ajustada para avaliação da condição de pavimentos.....27
Figura 3	Matriz de Valores Fixos.....38
Figura 4	Comparação entre o CR, PCI, PSR e PQI43
Figura 5	Etapas de desenvolvimento do ICAP59
Figura 6	Exemplo de inserção de níveis de referência do critério "C"61
Figura 7	Matriz de julgamentos dos níveis de desempenho de um critério "X"63
Figura 8	Exemplo de escala para níveis quantitativos de desempenho64
Figura 9	Exemplo de escala para os níveis qualitativos de desempenho65
Figura 10	Exemplo de histograma representando os pesos finais dos critérios.....66
Figura 11	Divisão da malha viária do campus em trechos67
Figura 12	Trecho do formulário enviado aos profissionais73
Figura 13	Escala de pontuação do subcritério BUR.....80
Figura 14	Peso dos subcritérios de DP80
Figura 15	Valor de SA em função do VSA81
Figura 16	Valor de VTO em função do volume de ônibus no horário de pico82
Figura 17	Valor de DL em função da declividade longitudinal da via83
Figura 18	(i) Valor de AB em função do abaulamento da via; (ii) Valor de DLD em função da declividade longitudinal da via84
Figura 19	Peso dos subcritérios de DNG85
Figura 20	Peso dos critérios de ICAP86
Figura 21	ICAP das UAs nos cenários 1, 2, 3 e 487
Figura 22	Classificação da condição do pavimento dos trechos do campus de acordo com o ICAP no cenário 1.....89
Figura 23	Comparação gráfica entre o ICAP e o PCI.....91
Figura 24	Comparação gráfica entre o ICAP e o ICPMVF92
Figura 25	Comparação gráfica entre o ICAP, VSAEscala_visual e

	VSAInfo_básica.....	93
Figura 26	Boxplot dos dados levantados em campo por meio dos índices de condição.....	98
Figura 27	Critérios e alternativas estruturados no VIP Analysis.....	103
Figura 28	Resultados da análise de sensibilidade 1	104
Figura 29	Resultados da análise de sensibilidade 2	105
Figura 30	Resultados da análise de sensibilidade 3	107
Figura 31	Resultados da análise de sensibilidade 4	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classificação da serventia do pavimento de acordo com o VSA ...	24
Tabela 2	Manuais para a identificação de defeitos em pavimentos flexíveis	29
Tabela 3	Tipos de defeitos considerados no método do PCI.....	34
Tabela 4	Classificação da condição do pavimento de acordo com o PCI.....	35
Tabela 5	Estratégias a serem tomadas de acordo com o PCI.....	35
Tabela 6	Cenários de obtenção do ICAP.....	69
Tabela 7	Níveis de desempenho dos subcritérios de DP.....	77
Tabela 8	Níveis de desempenho do critério SA a partir do VSA.....	77
Tabela 9	Níveis de desempenho do critério VTO.....	78
Tabela 10	Níveis de desempenho do critério DL.....	78
Tabela 11	Níveis de desempenho do subcritério AB.....	79
Tabela 12	Níveis de desempenho do subcritério DLD.....	79
Tabela 13	Correlação entre os cenários de ICAP.....	88
Tabela 14	Número de UAs por classificação segundo os métodos do ICAP e do PCI.....	94
Tabela 15	Número de UAs por classificação segundo os métodos do ICAP e MVF.....	95
Tabela 16	Número de UAs por classificação segundo os métodos do ICAP e avaliações subjetivas.....	96
Tabela 17	Resultado do Teste de Friedman entre ICAP, PCI, ICPMVF e avaliações subjetivas.....	97
Tabela 18	P-valores obtidos no teste de post-hoc entre o ICAP e os demais índices de condição.....	97
Tabela 19	Resultados das análises do MAE e MARE entre o ICAP e os demais índices de condição.....	99
Tabela 20	Número de UAs equivalentes entre o ICAP e demais métodos quanto à estratégia de intervenção a ser adotada.....	100
Tabela 21	Pontuação dos trechos e estratégia de intervenção indicada.....	101
Tabela 22	Pesos atribuídos aos critérios pelos profissionais.....	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	American Association of State Highways Officials
AASHTO	American Association of State Highways and Transportation Officials
AHP	Analytic Hierarchy Process
ASTM	American Society for Testing and Materials
CR	Condition Rating
FVM	Função de Valor MACBETH
ICAP	Índice de Condição Atual do Pavimento
ICP	Índice de Condição de Pavimento
ICP _{MVF}	Índice de Condição de Pavimento baseado na Matriz de Valores Fixos
ICS-PF	Índice de Condição da Superfície de Pavimentos Flexíveis
M&R	Manutenção e Reabilitação
MACBETH	Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique
MAE	Erro Absoluto Médio (do inglês Mean Absolute Error)
MARE	Média Absoluta do Erro Relativo (do inglês Mean Absolute Relative Error)
MCDA	Metodologia de Apoio à Decisão Multicritério
MCDA-C	Metodologia de Apoio à Decisão Multicritério Construtivista
MVF	Matriz de Valores Fixos
PCI	Pavement Condition Index
SGP	Sistema de Gerência de Pavimentos
SGPU	Sistema de Gerência de Pavimentos Urbanos
SHRP	Strategic Highway Research Program
UA	Unidade Amostral
UEL	Universidade Estadual de Londrina
VIP	Variable Interdependent Parameters
VSA	Valor de Serventia Atual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3	JUSTIFICATIVA	15
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2	SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS	18
3	AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTO	22
3.1	AVALIAÇÃO SUBJETIVA	23
3.2	AVALIAÇÃO OBJETIVA	27
4	ÍNDICES DE CONDIÇÃO DE PAVIMENTO	32
4.1	ÍNDICES COMBINADOS DE DEFEITOS	32
4.1.1	Pavement Condition Index	33
4.1.2	Índice De Condição De Pavimentos Urbanos	36
4.1.3	Matriz De Valores Fixos	37
4.1.4	Índice De Condição De Pavimentos Urbanos De João Pessoa	39
4.1.5	Outros Índices Combinados De Defeitos	40
4.2	AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS POR MÚLTIPLOS CRITÉRIOS	41
4.2.1	Pavement Quality Index	41
4.2.2	Condition Rating	42
4.2.3	Índice Expedito De Condição De Pavimento	43
4.2.4	Índice De Condição Da Superfície De Pavimentos Flexíveis	45
5	ANÁLISE MULTICRITÉRIO	47
5.1	METODOLOGIA MCDA	48
5.2	METODOLOGIA MCDA-C	49
5.3	MÉTODO MACBETH	51
5.3.1	Fase De Estruturação	52
5.3.2	Fase De Avaliação	53
5.3.3	Fase De Recomendações	54

5.3.4	Usu Conjugado Do Macbeth E Vip Analysis.....	57
6	MÉTOD	59
6.1	FASE DE ESTRUTURAÇÃO.....	60
6.2	FASE DE AVALIAÇÃO.....	62
6.3	FASE DE TESTE.....	66
6.4	FASE DE VALIDAÇÃO.....	70
6.4.1	Comparação Gráfica Dos Índices E Das Classificações.....	70
6.4.2	Teste De Friedman.....	71
6.4.3	Análise Dos Erros.....	72
6.4.4	Comparação Das Estratégias De Intervenção.....	72
6.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	73
7	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	76
7.1	FASE DE ESTRUTURAÇÃO.....	76
7.2	FASE DE AVALIAÇÃO.....	79
7.3	FASE DE TESTE.....	86
7.4	FASE DE VALIDAÇÃO.....	90
7.4.1	Comparação Gráfica Dos Índices E Das Classificações.....	90
7.4.2	Teste De Friedman.....	96
7.4.3	Análise Dos Erros.....	99
7.4.4	Comparação Das Estratégias De Intervenção.....	100
7.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	102
7.5.1	Cenário 1: Ordenação Livre.....	103
7.5.2	Cenário 2: Critérios Ordenados De Acordo Com Os Pesos Da Alternativa 1.....	105
7.5.3	Cenário 3: Critérios Ordenados De Acordo Com Os Pesos Da Alternativa 2.....	106
7.5.4	Cenário 4: Critérios Ordenados De Acordo Com Os Pesos Da Alternativa 3.....	108
8	CONCLUSÕES	110
	REFERÊNCIAS	113

1 INTRODUÇÃO

A qualidade do setor de transportes e o desenvolvimento socioeconômico de uma nação estão diretamente relacionados. Em especial, as vias pavimentadas possuem fundamental importância para a economia, principalmente de países emergentes, uma vez que são o principal caminho para o movimento de produtos e passageiros. Mesmo diante de sua importância, o pavimento das vias brasileiras sofre com a falta de atividades adequadas de conservação e que sejam aplicadas no momento correto. Desse modo, o cenário atual da malha viária nacional é de pavimentos com baixa qualidade e alto custo.

Assim, faz-se necessário aprimorar os atuais modelos de gestão de pavimentos. Não muito comum no Brasil, os Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) visam aproveitar eficientemente os limitados recursos destinados à administração da infraestrutura viária, por meio de estratégias que garantam que o pavimento permaneça em boas condições por um maior tempo. Um SGP auxilia os gestores de pavimentos na tomada de decisão quanto às melhores atividades de manutenção e reabilitação (M&R) a serem aplicadas, como devem ser executadas, os locais a serem priorizados e quando deve-se agir.

Para ser eficiente, exige-se que um SGP seja constantemente alimentado por dados relativos às condições dos pavimentos. Isto torna as avaliações de condição uma das etapas mais importantes do gerenciamento dos pavimentos, uma vez que a partir dos dados obtidos é iniciado o processo de tomada de decisão. Os dados das avaliações podem ser dispostos em formato de índices que permitem conhecer o estado em que se encontram os pavimentos e classificá-los quanto à ordem de prioridade e atividades a serem adotadas. Muitos dos índices associam o tipo, a severidade e a extensão dos defeitos observados na via para fornecer um valor que represente a condição dos pavimentos.

Entretanto, determinar o estado de um pavimento somente pela caracterização dos defeitos existentes não fornece informações complementares a respeito dos atributos da via que podem estar relacionados com a manifestação e agravamento desses defeitos. A análise integrada dos diversos fatores envolvidos na degradação do pavimento pode indicar a causa e o quão vulnerável o pavimento está à degradação e, desse modo, auxiliar para que sejam adotadas atividades voltadas

diretamente para a correção da fonte do problema.

Uma ferramenta que avalie a condição atual do pavimento e os fatores que influenciam na sua deterioração pode auxiliar a administração pública como parte integrante de um SGP. A ferramenta deve ainda ser prática, tanto no seu método de aplicação em campo, como no seu procedimento de cálculo, a fim de que as decisões possam ser tomadas de forma ágil e com menor uso de recursos financeiros.

Além de ser prática, a ferramenta de avaliação da condição dos pavimentos deve fornecer dados confiáveis. O modelo multicritério deve ser composto por parâmetros ponderados de forma racional para que não sejam obtidas informações que retratem de forma errônea a real situação dos pavimentos.

Desse modo, a Metodologia de Apoio à Decisão Multicritério Construtivista (MCDA-C) foi empregada nesta pesquisa para desenvolver o Índice de Condição Atual do Pavimento (ICAP). A operacionalização do índice ocorreu por meio do *Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique* (MACBETH), método que se baseia nos princípios do MCDA-C para indicar aos decisores, por meio de julgamentos de diferença de atratividade, o impacto de cada cenário na avaliação da condição do pavimento e os pesos dos critérios que compõem a ferramenta desenvolvida. Uma vez que os pesos foram obtidos por meio de julgamentos subjetivos, seus valores foram ainda validados por meio de uma análise de sensibilidade a partir do uso do método *Variable Interdependent Parameters Analysis* (VIP Analysis).

De forma geral, o ICAP foi elaborado por meio da análise dos parâmetros que permitem um gerenciador de pavimentos visualizar a condição dos pavimentos de uma malha viária, decidir o plano de ataque a ser adotado e até mesmo priorizar as vias que receberão as intervenções. Sua aplicação exige um treinamento mínimo dos responsáveis pela sua utilização, uma vez que os dados de todos os critérios possuem métodos práticos de serem adquiridos. Além disso, obter em escritório o valor que representará a condição dos pavimentos e analisar os parâmetros que mais influenciaram na pontuação pode ser facilitado por meio do uso de planilhas e aplicativos, uma vez que para obter a pontuação de cada critério e, posteriormente, o ICAP de um pavimento, são utilizadas equações simples, conforme apresentadas neste trabalho.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um índice constituído por múltiplos critérios para avaliação da condição da superfície de pavimentos flexíveis urbanos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com o propósito de alcançar o objetivo geral, fazem-se necessários os seguintes objetivos específicos:

- Definir os fatores responsáveis pela degradação dos pavimentos flexíveis urbanos;
- Estruturar os critérios e níveis de desempenho;
- Determinar a diferença de atratividade entre os critérios e entre os níveis de desempenho;
- Testar e validar o ICAP;
- Analisar a sensibilidade do ICAP.

1.3 JUSTIFICATIVA

Devido aos limitados recursos disponíveis para a administração da infraestrutura viária, a falta de conhecimento do poder público para adotar técnicas eficientes e à ausência de um plano adequado de capacitação específica na área, a tomada de decisão a respeito das atividades de intervenção nos pavimentos é pautada, muitas vezes, apenas pela experiência do gestor, o que resulta na aplicação de atividades ineficientes e onerosas. Desse modo, a adoção de um SGP que contenha uma ferramenta prática, acessível, coerente, precisa e válida de avaliação da condição para auxiliar os gestores de pavimentos torna-se essencial.

Muitos dos métodos de avaliação da condição de pavimentos demandam grande quantidade de tempo e possuem processos exaustivos de coleta de dados. O *Pavement Condition Index* (PCI), por exemplo, método mundialmente utilizado e considerado um dos mais completos, pode levar quatro vezes mais tempo para ser realizado em comparação com uma avaliação subjetiva e, de acordo com o estado do

pavimento, essa diferença pode ser ainda mais acentuada. A dificuldade em mensurar cada um dos defeitos na via pode representar um acréscimo nos custos da avaliação por conta da contratação de um maior número de avaliadores ou a ampliação dos custos de manutenção, pois, no momento da escolha da atividade a ser adotada a condição do pavimento já pode ter sido agravada em relação ao período do levantamento dos dados.

Além disso, a agilidade em atuar na condição do pavimento passa pela compreensão dos motivos que levaram o pavimento a se degradar. Uma vez que o conhecimento da fonte do aparecimento dos defeitos é obtido de forma mais rápida, mais breve e eficiente será a resolução do problema. Desse modo, considerar os fatores envolvidos no processo de degradação pode auxiliar no conhecimento do estado atual do pavimento e na eficácia das decisões tomadas.

Percebe-se, portanto, a necessidade da elaboração de ferramentas que possibilitem conhecer a situação dos pavimentos de forma confiável, prática, com baixo custo e que considere os fatores responsáveis pela deterioração do pavimento, de forma a auxiliar os gestores na tomada de decisão.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho encontra-se dividido em 8 capítulos distribuídos da seguinte maneira:

Capítulo 1 – Seção introdutória onde são apresentados o contexto, os objetivos e a justificativa para a realização do trabalho.

Capítulo 2 – Apresentação dos principais conceitos relacionados aos Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP): sua definição, seus objetivos e componentes, as vantagens proporcionadas pela sua adoção, bem como exemplos de resultados obtidos após sua implementação.

Capítulo 3 – Neste capítulo é apresentada a importância das avaliações da condição de pavimentos, os principais tipos, vantagens e limitações, as normas que regem as avaliações e os manuais que auxiliam no levantamento de defeitos.

Capítulo 4 – Descrição dos principais índices utilizados para avaliar a condição de pavimentos. São abordados índices combinados de defeitos, índices desenvolvidos com o objetivo de simplificar as avaliações e índices que consideram os múltiplos fatores de degradação do pavimento.

Capítulo 5 – Apresentação da teoria da análise multicritério e suas principais metodologias, com destaque para a MCDA-C, na qual insere-se o método MACBETH. São descritos os conceitos relacionados ao método, bem como as fases que o constituem. Neste capítulo é também discorrido o método de análise de sensibilidade *VIP Analysis*.

Capítulo 6 – Descrição das fases e métodos que compõem o procedimento experimental necessário para o desenvolvimento do Índice de Condição Atual do Pavimento (ICAP).

Capítulo 7 – São apresentados os resultados obtidos em cada fase de desenvolvimento do ICAP.

Capítulo 8 – Dedicado a apresentação das conclusões obtidas nesta pesquisa.

2 SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS

Um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) é um conjunto de componentes que, interagindo entre si, tem o objetivo de tornar eficiente as ações tomadas pelos gestores de pavimentos. Em um SGP as atividades de planejamento, construção, manutenção, avaliação e pesquisa devem estar atreladas a um banco de dados constantemente alimentado para que a utilização dos recursos disponíveis seja otimizada (HAAS; HUDSON; ZANIESWSKI, 1994).

Um SGP é uma ferramenta utilizada, de acordo com Páez (2015), para reduzir os custos de manutenção e reabilitação necessários para que o pavimento apresente uma condição ótima de funcionamento. Essa redução pode ser obtida quando as intervenções são realizadas utilizando-se materiais e técnicas corretos e no momento certo. A intervenção no pavimento no período adequado pode acarretar em um custo quatro vezes menor quando comparado a uma intervenção tardia. Ainda segundo o autor, a adoção de um bom SGP pode resultar em economia não apenas para o poder público, mas também para os cidadãos devido à redução no tempo de viagem e na manutenção dos veículos.

Os atuais procedimentos adotados pelos poderes públicos para manutenção e reabilitação da malha viária pavimentada traduzem-se, segundo Zanchetta (2017), em operações ineficientes como tapa-buracos e recapeamentos, que resultam em pavimentos de baixa qualidade e com alto custo. Para Lima, Ramos e Fernandes Jr (2006), a gerência de pavimentos no Brasil é realizada com base na experiência dos engenheiros municipais devido à falta de recursos, desconhecimento ou preconceito em utilizar métodos diferentes dos tradicionais. Essa abordagem para gerenciar os pavimentos pode levar ao uso ineficiente dos recursos. Por outro lado, um SGP avalia estratégias alternativas baseada nos aspectos do pavimento e integra as diversas áreas envolvidas.

Os componentes de um SGP são os dados de inventário, avaliações da condição dos pavimentos, estabelecimento de critérios, modelos de previsão do desempenho, estratégias de manutenção e reabilitação, priorização de segmentos e a avaliação econômica de estratégias alternativas (FARASHAH; TIGHE, 2014). Todos esses componentes têm como objetivo responder as questões fundamentais para o gerenciamento dos pavimentos, que, para Haas, Hudson e Zanieswski (1994) são: quais atividades e quando devem ser realizadas para proporcionar maior vida útil ao

pavimento? Como serão executadas as manutenções? Quais trechos possuem prioridade de intervenção?

O grau de detalhamento das informações e a frequência da coleta de dados depende do nível de gerência do modelo para definição das prioridades. Entretanto, em qualquer SGP, o sistema de coleta de dados deve ser confiável, bem planejado, deve haver treinamento do pessoal envolvido e as informações obtidas devem possuir fácil acesso e serem regularmente atualizados (DNIT, 2011).

Geralmente, a tomada de decisão pode ocorrer em nível de rede ou em nível de projeto. A gerência em nível de rede caracteriza-se pela análise das informações da malha viária que podem ser utilizadas para a tomada de decisões administrativas, tais como a identificação dos trechos prioritários, o planejamento, a avaliação, a programação e o orçamento, realizados de forma que os recursos públicos alocados possuam o melhor retorno econômico. Neste nível de gerência, a quantidade prevalece sobre a qualidade das informações coletadas, pois, o que se busca nesse momento é o conhecimento da malha viária como um todo. No nível de rede as preocupações estão voltadas para o quê, como, onde e quando fazer (DNIT, 2011).

A gerência em nível de projeto envolve planos detalhados de trechos específicos da malha viária. As decisões são, além de administrativas, técnicas e econômicas. Os dados, como a estrutura das camadas do pavimento, as causas dos defeitos e as consequências do aparecimento desses defeitos devem ser realizadas de forma mais detalhada. Portanto, a gerência em nível de projeto caracteriza-se como o complemento da gerência em nível de rede (DNIT, 2011).

Alguns autores dividem um SGP em três níveis de operação, na qual o nível de rede é dividido em nível de programa e nível de seleção de projetos. O nível de programa contempla o planejamento e a alocação de recursos para se alcançar a otimização da rede. O nível de seleção de projetos envolve a priorização dos projetos concorrentes de acordo com os recursos disponíveis. O terceiro nível é o de projeto que envolve o detalhamento das atividades a serem executadas em projetos específicos (AMEKUDZI; ATTOH-OKINE, 1996).

Os princípios de um SGP, normalmente empregados no gerenciamento de rodovias, são válidos também para área urbana. Entretanto, os Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos (SGPU) precisam lidar com algumas características específicas dessa região. Algumas dessas características são citadas por Danieleski

(2004) e referem-se à:

- Grande concentração de interseções, área responsável por um grande número de frenagens e acelerações;
- Interferência de outros sistemas (água e esgoto, eletricidade, gás, telefonia) no sistema viário;
- Segregação do tráfego (faixa exclusiva para ônibus, por exemplo);
- Presença de árvores junto à borda do pavimento;
- Elevadas inclinações em áreas de topografia acidentada;
- Sistema de microdrenagem deve funcionar perfeitamente para que não ocorra o acúmulo de água no pavimento.

Para a implantação de um SGPU é necessário a colaboração da administração pública por meio do alinhamento dos interesses públicos com a política de governo. Além disso, os recursos financeiros e a mão de obra devem estar disponíveis para que um SGPU seja eficaz. Caso contrário, soluções ineficientes continuarão a ser adotadas.

Entretanto, os investimentos na maioria dos municípios brasileiros variam ao longo dos anos e é comum se ver uma maior quantidade de obras perto de eleições (ZANCHETTA, 2017). As atividades de manutenção e reabilitação são, segundo Pereira (2019), pautadas por um viés político, ou seja, questões técnicas, como a priorização de pavimentos conforme a necessidade, não estão sendo relevantes para a tomada de decisão.

Nas cidades brasileiras é comum que a manutenção dos pavimentos seja realizada sem planejamento. Além disso, o compartilhamento do espaço urbano entre o sistema viário e os demais sistemas acarreta em destruição do pavimento para manutenção desses últimos (OLIVEIRA *et al.*, 2012). As intervenções se baseiam em reclamações da população, em apelo da mídia e da vontade do poder público, além da ausência de trabalho integrado entre as áreas e de intervenções apenas em área com elevada deterioração (LIMA; RAMOS; FERNANDES JR, 2006). Entretanto, a falta de planejamento não é um problema exclusivo do Brasil. Na Itália, de acordo com Loprencipe, Pantuso e Di Mascio (2017), o principal problema na gestão dos pavimentos é o planejamento inadequado, onde as manutenções são realizadas

apenas quando o pavimento atinge um estado crítico.

Para implantar um SGPU, Páez (2015) cita uma série de sugestões para que sejam alcançados bons resultados. Entre elas estão a adoção de métodos simples e práticos de levantamento de dados, armazenamento e análise das informações de forma computadorizada, integração dos diversos departamentos importantes dentro do sistema e desenvolvimento constante do SGPU.

Ainda de acordo com Páez (2015), é necessário um treinamento contínuo dos profissionais envolvidos com a coleta das informações para que os dados indiquem o mais fielmente possível a condição dos pavimentos. No mesmo sentido, Oliveira, Silva Junior e Fontenele (2013) reforçam que os avaliadores devem possuir ótimo conhecimento a respeito do procedimento de coleta das informações, pois a fase de avaliação da condição é de grande importância em um SGPU. Em relação aos recursos humanos, Amekudzi e Attoh-Okine (1996) atentam que são a maior parcela de qualquer SGP, pois, embora a tecnologia possa ser utilizada para auxiliar a tomada de decisão, essas são ineficazes sem a manipulação humana.

Alguns dos benefícios gerados pela adoção de um sistema de gerenciamento dos pavimentos urbanos citados por Oliveira *et al.* (2012) foram a licitação de obras preventivas ao invés da adoção exclusiva de operações tapa-buracos e recapeamentos, o estímulo a integração dos setores que utilizam o sistema viário e o encorajamento no desenvolvimento de pesquisas na área de pavimentação. Segundo Hosten *et al.* (2013), após a implantação da gerência de pavimentos em uma cidade estadunidense, os engenheiros receberam maior auxílio no planejamento das atividades de manutenção a longo prazo e que os custos envolvidos foram reduzidos quando adotadas medidas preventivas. Ainda, Zanchetta (2017) concluiu após seus estudos envolvendo um SGPU no Distrito Federal, que as atividades adotadas por um sistema de gerência são duas vezes menos onerosas que as atualmente praticadas.

3 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS

A avaliação da condição de pavimentos se constitui como uma das principais atividades de um SGP, uma vez que nessa etapa é conhecido o real estado do pavimento, são determinados os tipos de intervenções, a qualidade dos serviços de manutenções já realizados e se o pavimento está cumprindo o objetivo para o qual foi construído (HAAS; HUDSON, 1978).

A importância da avaliação de condição é reforçada por Matos (2004). Segundo o autor, a coleta de dados a respeito da situação do pavimento traduz-se na fase mais importante de um SGP pois todas as etapas seguintes dependem dela. Ainda de acordo com Matos (2004), a avaliação de condição possui as seguintes funções: definir o estado de um pavimento ou de uma rede de pavimentos a fim de selecionar os segmentos prioritários; elaborar um estudo de desempenho dos pavimentos; determinar a eficácia das atividades de manutenção realizadas; detectar a variação de condição do pavimento entre duas avaliações; e definir os trechos homogêneos para projeto e selecionar as alternativas de manutenção.

Entretanto, ao mesmo tempo que avaliação da condição representa uma das etapas mais relevantes para um SGP, para Farashah (2012) e para Bektas, Smadi e Nlenanya (2015) ela também se caracteriza como uma das mais dispendiosas. Desse modo, os administradores de pavimento devem escolher qual o tipo de avaliação que mais se adequa aos objetivos e ao orçamento disponível.

A boa condição do pavimento pode ser verificada por meio de quatro perspectivas: um bom pavimento oferece conforto ao rolamento, suporta de forma satisfatória a carga ao qual está sujeito, é capaz de garantir segurança aos usuários e possui um bom aspecto visual (DANIELESKI, 2004).

As técnicas para o levantamento da condição do pavimento devem garantir resultados confiáveis, serem eficientes, tanto na coleta como no processamento dos dados e garantir segurança aos avaliadores (CHAMORRO *et al.*, 2009). Segundo Farashah (2012), três técnicas podem ser utilizadas para o levantamento dos dados: manual, automática ou semiautomática. No modo de avaliação manual os avaliadores caminham sobre a via e coletam as informações necessária para determinar a condição do pavimento. Esta avaliação exige que os avaliadores possuam experiência ou que seja comandada por alguém com ótima experiência. Segundo Osorio (2015), a avaliação manual possui a vantagem de

levantar as informações com maior precisão, entretanto, requerem maior quantidade de tempo e de recursos humanos.

Já os modelos automáticos e semiautomáticos utilizam tecnologias baseadas em imagens digitais e *softwares* desenvolvidos para detectar os defeitos nos pavimentos. Esses métodos de coleta de dados têm-se mostrado mais confiáveis, eficientes e seguros do que os métodos manuais (CHAMORRO *et al.*, 2009). Porém, Osorio (2015) revela que alguns defeitos ainda são difíceis de serem detectados com a tecnologia atual, sendo uma boa alternativa a associação das avaliações manual e automática.

Pode-se concluir que o tipo de avaliação e a técnica a ser utilizada dependem do objetivo para o qual ela está sendo realizada. A seguir, são apresentados os tipos de avaliações disponíveis para avaliar a condição da superfície de pavimentos flexíveis.

3.1 AVALIAÇÃO SUBJETIVA

A avaliação subjetiva foi desenvolvida no final dos anos 50 como resultado da *American Association of State Highways Officials (AASHO) Road Test*, atual *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*. A avaliação corresponde à medida da serventia do pavimento, ou seja, do conforto e segurança ao rolamento proporcionado por um trecho de pavimento, a qual é determinada de acordo com a percepção dos próprios usuários. Estes são capazes de identificar as principais deficiências do pavimento sem mesmo possuir conhecimento avançado na área (CAREY; IRICK, 1960).

Durante os testes da AASHO foi definido o *Present Serviceability Ratio (PSR)*, índice que representa a serventia do pavimento de acordo com a opinião de um grupo de avaliadores. Na ocasião, os componentes do grupo julgaram se a condição do pavimento era aceitável ou não e em seguida atribuíram uma nota de 0 (péssima serventia) a 5 (ótima serventia) para a suavidade ao rolamento percebida por eles (CAREY; IRICK, 1960).

No Brasil, o PSR corresponde ao Valor de Serventia Atual (VSA). O método para determinar o VSA de um trecho de pavimento é descrito na PRO 009/2003 – Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos (DNIT, 2003b). Segundo a norma, a avaliação deve ser composta por 5 integrantes

cientes do propósito da avaliação. Após trefegarem com um veículo pelo trecho avaliado a uma velocidade próxima à regulamentada para a via, cada avaliador indica subjetivamente uma nota de 0 a 5 para o conforto percebido. O VSA corresponde à média das notas dadas pelos avaliadores e para cada valor de VSA é definido um conceito que classifica a serventia do pavimento, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da serventia do pavimento de acordo com o VSA

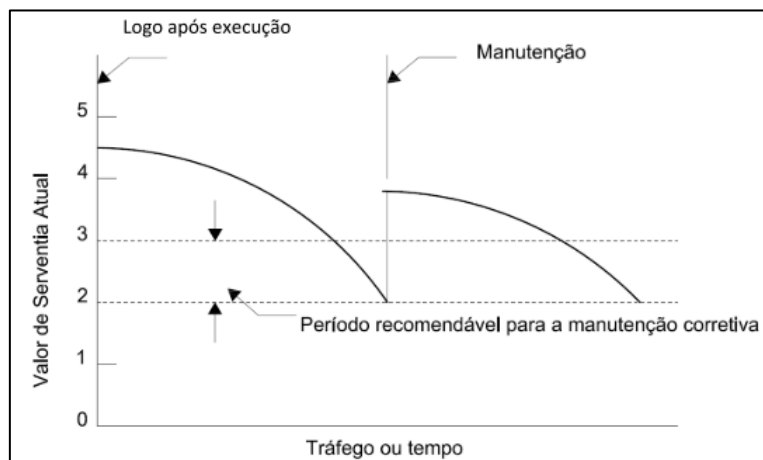
VSA	Conceito
0-1	Péssimo
1-2	Ruim
2-3	Regular
3-4	Bom
4-5	Ótimo

Fonte: DNIT (2003b)

Para realizar a avaliação, DNIT (2003b) estabelece algumas condições específicas. Os trechos avaliados devem possuir extensão máxima de 2000 metros e a avaliação deve ocorrer sob condições climáticas favoráveis. Ainda, no momento do julgamento, os avaliadores devem considerar apenas o estado atual da superfície do pavimento, ignorar os aspectos geométricos e a resistência à derrapagem, desconsiderar os desconfortos ocasionados por linhas férreas, acesso a pontes e bueiros e avaliar os trechos de forma independente.

O levantamento da serventia, juntamente com as condições de tráfego, deve ser realizado periodicamente, uma vez que a redução da serventia proporcionado aos usuários ao longo do tempo define o conceito de desempenho do pavimento (HAAS; HUDSON; ZANIESWSKI, 1994). A representação da variação da serventia do pavimento ao longo do tempo e do tráfego é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Variação da serventia conforme aumento do tráfego/tempo e período recomendado para a manutenção



Fonte: DNIT (2011)

Um VSA igual 5, ou seja, um pavimento em condições perfeitas de serventia, sem irregularidades, não é encontrado na prática. Nos estudos da AASHO, nos anos 60, foram obtidos valores de serventia igual a 4,2 para pavimentos flexíveis e 4,5 para pavimentos rígidos. Desse modo, quando bem construídos, os pavimentos possuem um VSA próximo de 5 e esse valor tende a diminuir conforme eleva-se o tempo de uso e o tráfego da via (DNIT, 2011).

A linha tracejada superior na Figura 1, de acordo com DNIT (2011), representa o limite de aceitabilidade, ou seja, o VSA mínimo para o qual os usuários aceitam as condições de rolamento e a linha tracejada inferior representa o limite de trafegabilidade que caracteriza a situação em que se torna necessário a reconstrução do pavimento. A AASHTO (1993) adota como limite de aceitabilidade um valor de serventia de 2,5 para vias com alto volume de tráfego e 2,0 para as demais vias. Antes de atingir esse valor devem ser executadas atividades de manutenção preventiva para que a vida útil do pavimento seja prolongada. Já nas pesquisas de Carey e Irick (1960 apud Danieleski, 2004), um valor de serventia igual a 3,0 foi tomado como o limite para pavimentos em condição aceitável, sendo este o valor utilizado normalmente como parâmetro de projeto. Para o limite de trafegabilidade, a AASHTO (1993) indica valores de serventia próximos de 1,0.

Devido ao baixo orçamento disponível pelos poderes públicos para a manutenção das vias pavimentadas, as avaliações subjetivas são consideradas como uma boa alternativa para um levantamento inicial da condição dos pavimentos

(PEREIRA, 2019). Na pesquisa de Shah *et al.* (2013a), vias da cidade de Noida na Índia foram avaliadas subjetivamente por um painel de avaliadores, que classificaram a condição de pavimentos segundo o conforto ao rolamento proporcionado pelos pavimentos. Após a análise dos resultados, os autores confirmaram que o levantamento de dados por avaliações subjetivas pode ser utilizado para o desenvolvimento de modelos que auxiliem na avaliação do desempenho de pavimentos. No trabalho de Pescador, Silva Junior e Fontenele (2018), diferentes métodos de avaliação da condição de pavimentos foram comparados. Os autores concluíram que a avaliação subjetiva pode ser utilizada pelos gestores de pavimentos pois, por meio dela, os pavimentos foram avaliados com notas próximas às obtidas por meio de outros métodos mais complexos.

Entretanto, devido ao seu aspecto subjetivo, vários fatores podem influenciar a avaliação realizada pelos julgadores, desde as instruções dadas pelo líder das avaliações até as condições climáticas no momento da avaliação. Dentre os fatores inclui-se a referência de condição de pavimento intrínseca a cada pessoa. Para os avaliadores acostumados com pavimentos em situação precária, um pavimento em condições medianas pode ser avaliado com condição ótima. Esse mesmo pavimento pode ser avaliado com condição péssima por um avaliador que vive em uma região cujo pavimento normalmente se apresenta em condição excelente.

Pode-se citar ainda a ocorrência de erros sistemáticos na construção das notas. Os erros que podem ocorrer, segundo Nair e Hudson (1986 apud Fontenele, 2001), são: erro de leniência (classificação muito alta ou muito baixa em relação à média dos avaliadores por qualquer que seja a razão); erro de tendência central (quando o avaliador, com receio de ser muito rigoroso ou leniente, classifica o objeto de estudo apenas com notas medianas); efeito halo: tendência do avaliador em avaliar um atributo com base na impressão geral do objeto avaliado; e erro de ancoragem (tendência do avaliador em utilizar as notas extremas da escala de classificação).

Na tentativa de reduzir a influência desses fatores, vários trabalhos têm voltado sua atenção para o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem os avaliadores durante as avaliações subjetivas e que torne os dados levantados confiáveis. Um exemplo dessas ferramentas são as escalas visuais, instrumentos compostos por uma série de imagens de pavimentos com as mais diversas situações e respectivas notas. Elas são utilizadas para servir como uma referência para os avaliadores e reduzir a dispersão entre as notas.

Entre as escalas visuais desenvolvidas ao longo do tempo, pode-se citar a escala elaborada por Pereira (2019). Primeiramente, por meio de avaliações subjetivas, o autor testou e validou a escala elaborada por Oliveira, Silva Junior e Fontenele (2013), denominada “Escala Visual Original”. Nesta ocasião, um painel de avaliadores recebeu apenas as informações básicas da avaliação e o outro painel de avaliadores recebeu, além das informações básicas, a escala visual. Após análise estatística das notas dadas pelos dois painéis de avaliadores, Pereira (2019) verificou que a escala visual necessitava de ajustes. A escala visual obtida pelo autor após os ajustes e denominada como “Escala Visual Ajustada” está representada na Figura 2.

Figura 2 – Escala Visual Ajustada para avaliação da condição de pavimentos



Fonte: Pereira (2019)

Posteriormente, foi realizada uma nova avaliação subjetiva, na qual um dos painéis recebeu a Escala Visual Ajustada. O autor verificou, por meio de teste de hipótese de Friedman, que houve diferença entre as notas dadas pelos dois painéis e que houve redução na dispersão das notas dadas pelo painel que utilizou a escala visual. Desse modo, Pereira (2019) concluiu que a escala visual desenvolvida pode ser utilizada para auxiliar as avaliações subjetivas de condição dos pavimentos.

3.2 AVALIAÇÃO OBJETIVA

A avaliação objetiva pode ser definida como o levantamento dos defeitos existentes na superfície do pavimento, na qual é atribuída para cada combinação de tipo, severidade e extensão, uma pontuação que possibilite classificar a condição do

pavimento. Segundo Bertollo (1997), o reconhecimento dos defeitos e de suas causas possui extrema importância para um SGP, pois, a partir dessas informações, serão definidas as atividades de M&R e o momento certo de intervenção.

Os defeitos na superfície do pavimento podem aparecer, segundo Soncim (2011), no início de operação da via devido a falhas de projeto ou na execução e também durante sua vida em serviço. Neste caso, o surgimento dos defeitos pode representar um sinal de deterioração da estrutura do pavimento devido aos esforços do tráfego, à influência das intempéries ou às intervenções realizadas no pavimento para instalação de outros sistemas de infraestrutura.

O levantamento pode ser realizado por meio de caminhada sobre o pavimento ou dentro de um veículo em movimento. Segundo Fontenele (2001) e Soncim (2011), embora o método de caminhada resulte na coleta de dados mais precisos sobre o estado do pavimento, exigem mais tempo para que toda a malha viária seja avaliada. Desse modo, quando se utiliza esse tipo de levantamento de defeitos, normalmente apenas uma amostra da rede é avaliada. Em relação ao levantamento com uso de um veículo, os autores afirmam que é possível cobrir a totalidade ou a maior parte da rede, embora os dados não sejam tão confiáveis quanto os levantados por meio de caminhada.

Para realizar o levantamento de defeitos na superfície dos pavimentos, geralmente são seguidos três passos:

- Reconhecimento do tipo de defeito: é necessário definir quais tipos de defeitos serão considerados e verificar a ocorrência ou não no pavimento avaliado;
- Mensuração da extensão dos defeitos: deve-se registrar a extensão dos defeitos encontrados. A extensão normalmente é registrada em unidades de área, comprimento ou quantidade;
- Registro da severidade do defeito: é necessário apontar o estágio de deterioração do defeito: para definir a severidade dos defeitos são utilizados, normalmente, os conceitos “Alta”, “Média” ou “Baixa”.

As avaliações de defeitos possuíam como principal problema ao longo do tempo o desenvolvimento de técnicas simples, rápidas e que pudessem ser aplicadas por qualquer pessoa com um mínimo de capacitação (PÁEZ, 2015). Além disso, as

avaliações objetivas exigem que os tipos de defeitos, níveis de severidade e extensão possuam definições claras, além de uma explicação compreensiva do método de levantamento de cada defeito. De forma a auxiliar as avaliações objetivas, alguns manuais, catálogos, normas e métodos de levantamento de defeitos foram desenvolvidos ao longo do tempo (SONCIM, 2011). Alguns desses materiais são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Manuais para a identificação de defeitos em pavimentos flexíveis

Manual	Descrição
Pavement Condition Index – PCI (HEADQUARTERS, DEPARTMENT OF THE ARMY, 1982)	<ul style="list-style-type: none"> • 19 tipos de defeitos para pavimentos asfálticos e apresenta os procedimentos para identificá-los e medi-los (ZANCHETTA, 2017). A versão mais atual, a ASTM (2018), considera 20 tipos de defeitos.
Strategic Highway Research Program (SHRP, 1993)	<ul style="list-style-type: none"> • 15 tipos de defeitos, nome, descrição, fotos, níveis de severidade e extensão e como medi-los (ZANCHETTA, 2017).
Manual para identificação de defeitos de revestimento asfáltico de pavimentos – MID (DOMINGUES, 1993)	<ul style="list-style-type: none"> • 24 tipos de defeitos para os quais faz uma descrição do mecanismo de ocorrência, localização, classe, níveis de severidade e métodos de medição (PÁEZ, 2015).
PRO 006/2003 – Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. (DNIT, 2003a)	<ul style="list-style-type: none"> • 8 tipos de defeitos ocorrentes em pavimentos flexíveis e semi-rígidos, alguns defeitos possuem várias classificações, apresenta os procedimentos para medi-los.

Fonte: o próprio autor

Para desenvolver um método de avaliação da condição de vias urbanas, Zanchetta (2017) utilizou o manual SHRP como base para a identificação das

severidades dos tipos de defeitos avaliados. O autor optou pelo SHRP por este manual considerar um número menor de defeitos e por suas pesquisas estarem atualmente ativas. O SHRP também foi utilizado por Bertollo (1997) para avaliar modelos de desempenho e análises de priorização. Segundo o autor, este manual foi escolhido devido a suas pesquisas serem acompanhadas por uma série de países ao longo do tempo.

Com o objetivo de avaliar o impacto do tráfego do transporte coletivo por ônibus em pavimentos flexíveis urbanos, Palma (2019) realizou avaliações de condição subjetiva e objetiva na malha viária do *campus* da Universidade Estadual de Londrina (UEL). A avaliação objetiva foi realizada conforme o método do PCI e foram comparados os tipos de defeitos encontrados nas seções de pavimentos afetadas e não afetadas pelo transporte coletivo. Os defeitos do tipo intemperismo, trincas longitudinal e transversal, trinca por fadiga, remendo, buraco e desintegração foram os mais frequentes na malha viária do *campus*, enquanto que os defeitos do tipo corrugação, trinca por propagação de juntas, agregado polido e passagem de ferrovia não foram encontrados. Dentre os defeitos mais comuns, as seções de pavimento afetadas pelo tráfego de ônibus possuíam maiores extensões de trincas longitudinais e transversais, trincas por fadiga, remendos e buracos. Assim, concluiu-se que o impacto dos transportes coletivos é um fator determinante na condição do pavimento da região de estudo.

O *campus* da UEL foi utilizado também nas pesquisas de Merlo *et al.* (2019). Na ocasião, os autores avaliaram a evolução dos defeitos no pavimento entre os anos de 2015 e 2017 por meio dos manuais do PCI e da *Federal Highway Administration* (FHWA, 2014), um aperfeiçoamento do manual do SHRP (1993). Foi observado que os defeitos do tipo trinca por fadiga, trincas longitudinal e transversal e remendo apareceram em todos os trechos avaliados em 2015. Os autores citam que em algumas seções de pavimento que recebem a ação do transporte coletivo por ônibus foram observados defeitos do tipo remendo, intemperismo, desintegração e trilha de roda com severidades consideráveis. Já nas avaliações de 2017 foram observados em maior porcentagem os defeitos do tipo trinca por fadiga, trincas longitudinal e transversal, desintegração, remendo e buraco. Trilhas de roda foram constatadas em alguns pontos próximos às regiões de parada dos ônibus. Os autores concluíram que a recorrência e severidade dos defeitos nas regiões sob ação dos ônibus foram agravados durante os anos analisados.

Para obter um Índice de Condição de Pavimentos, Danieleski (2004) optou por seguir o procedimento estabelecido pelo PCI pois, de acordo com a autora, trata-se do método mais completo e apropriado. Algumas considerações foram feitas por Danieleski (2004) aos métodos existentes para levantamento dos defeitos. Primeiramente, o autor cita que há uma grande variedade de defeitos considerados pelos métodos e que estes divergem na definição de defeitos que possuem a mesma morfologia e gênese. Ainda, alguns defeitos considerados nos manuais não são frequentes na área urbana, como trincas na borda do pavimento, desnível entre a pista e o acostamento e o defeito cruzamento de linha férrea. Pelo contrário, defeitos específicos de áreas urbanas não são abordados pelos manuais.

Por fim, embora Danieleski (2004) tenha utilizado o PCI em seu trabalho, o autor critica o método citando que as elevações e recalques são considerados como um tipo único de defeito, embora possuam morfologia, gênese e atividades distintas para sua correção.

4 ÍNDICES DE CONDIÇÃO DE PAVIMENTO

Índices são ferramentas que agregam informações de diversos critérios em uma informação geral do conteúdo analisado. A agregação representa umas de suas principais vantagens, uma vez que os índices podem indicar problemas que os critérios isolados não são capazes. Essa importante ferramenta é utilizada para comparar diversas alternativas e auxiliar na tomada de decisão. Desse modo, dentro de um SGP um índice pode ser utilizado para determinar as melhores atividades de intervenção no pavimento e indicar os trechos que devem ser priorizados. Em muitos SGPUs, segundo Albuquerque (2017), os índices de condição são a única ferramenta sobre a qual os administradores de pavimento se baseiam para determinar as atividades de intervenção.

Os índices de condição representam a agregação das informações coletadas durante as avaliações de condição. Assim, os índices normalmente agrupam as informações obtidas em avaliações subjetivas (índices PSR ou VSA, por exemplo) ou por meio das avaliações objetivas (índices combinados de defeitos).

A seguir, são apresentados alguns dos índices combinados de defeitos, propostas de simplificação das avaliações e índices que associam os defeitos, a serventia e os fatores da via que influenciam na condição dos pavimentos flexíveis.

4.1 ÍNDICES COMBINADOS DE DEFEITOS

Durante as avaliações objetivas são levantados diversos tipos de defeitos com os mais diferentes níveis de severidade e extensão, o que gera um vasto número de combinações diferentes. Para que o grande número de combinações não indique de forma equivocada o estado do pavimento, as informações levantadas devem ser agrupadas em formatos de índices que indiquem à condição do pavimento um valor dentro de uma escala definida (SONCIM, 2011). Para Haas, Hudson e Zaniewski (1994), os índices que combinam o tipo, a extensão e a severidades dos defeitos são importantes para a tomada de decisão quanto aos trechos que devem ser priorizados e o tipo de intervenção a ser adotada.

A seguir são descritos alguns dos índices combinados de defeitos mais utilizados para avaliar a condição de pavimentos, bem como índices desenvolvidos com o objetivo de simplificar as avaliações.

4.1.1 Pavement Condition Index

O *Pavement Condition Index* (PCI) foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (CERL/ U.S.Army) em 1976 para classificar a condição de pavimentos de aeródromos. Posteriormente, o método foi expandido para a avaliação de estradas, ruas e estacionamentos constituídos por pavimentos flexíveis e rígidos (SHAHIN; KOHN, 1979). As diretrizes para execução do PCI foram descritas inicialmente por Shahin e Kohn (1979) e publicadas posteriormente na *Headquarters, Department of the Army* (1982). No ano de 1999 a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) padronizou o método e a publicou na norma D6433-99 *Standard Practice for Roads and parking Lots Pavement Condition Index Surveys* (ASTM, 1999). Desde então, várias versões do método foram divulgadas, sendo a mais recente apresentada na ASTM (2018). A descrição do método do PCI a seguir foi baseada nesta última versão.

Antes de iniciar o levantamento dos defeitos, o método indica que o trecho de pavimento avaliado deve ser dividido em Unidades Amostrais (UA) com 225 ± 90 m² (135 m² a 315 m²). Essa divisão é necessária para que cada UA possua características semelhantes ao longo de sua extensão. Após essa divisão, a avaliação pode ser realizada em todo o trecho do pavimento (todas as UAs) ou por amostragem (apenas uma parcela das UAs é avaliada). Independentemente do número de UAs avaliadas, o procedimento é o mesmo.

O pavimento pode ser avaliado segundo o método do PCI com notas variando de 0 (pior condição) a 100 (melhor condição). O fator que determina a nota obtida pelo pavimento são as combinações de tipo, severidade e extensão dos defeitos presentes em cada UA. Desse modo, essas informações devem ser levantadas pelos avaliadores que, por meio de caminhamento sobre as unidades, medem a extensão dos defeitos e suas respectivas severidades e registram em um formulário específico. Ao todo são considerados 20 tipos de defeitos, os quais estão listados na Tabela 3. Na ASTM (2018) são definidos os tipos de defeitos, as causas de suas origens, os níveis de severidade e o método de mensuração.

Tabela 3 – Tipos de defeitos considerados no método do PCI

Tipos de defeitos	
1. Trincas por fadiga	11. Remendo e uso de remendo recortado
2. Exsudação	12. Agregado polido
3. Trincas em bloco	13. Buracos
4. Saliências e deformações	14. Passagem de ferrovia
5. Corrugação	15. Afundamento de trilha de roda
6. Depressão	16. Deformação plástica do revestimento
7. Trincas na borda	17. Trincas parabólicas
8. Trincas por propagação de juntas	18. Empolamento
9. Desnível entre a pista e o acostamento	19. Desintegração
10. Trincas longitudinais e transversais	20. Intemperismo

Fonte: adaptado de ASTM (2018)

A partir dos dados coletados são calculados os valores-dedução (VD). O VD representa quanto uma determinada combinação de tipo, severidade e extensão impacta na condição do pavimento. Para cada tipo de defeito é indicado um gráfico na qual são dadas curvas representativas de cada nível de severidade. Desse modo, a partir da densidade do defeito (relação entre a extensão do defeito e a área da UA) e do nível de severidade é obtido um VD. Este pode variar entre 0 (a presença do defeito não impacta a condição do pavimento) e 100 (a presença do defeito impacta extremamente a condição do pavimento).

O somatório dos defeitos cujo VD é maior que 2 remete ao valor de “q”. A ASTM (2018) fornece um gráfico único para todos os defeitos, na qual o eixo das abcissas equivale ao valor-dedução total (VDT, representa a soma de todos os VDs), as curvas equivalem ao valor de “q” e o eixo das ordenadas equivale ao valor-dedução corrigido (VDC). O VDC é subtraído de 100 para se encontrar o PCI da UA avaliada.

Uma correção do valor do PCI em função dos defeitos que possuem mais de uma severidade em uma mesma UA foi adicionada ao método a partir da versão apresentada na ASTM (2011). Nesses casos, a extensão do defeito com menor severidade deve ser somada a extensão do mesmo tipo de defeito com maior severidade. Desse modo, um novo VD é obtido e, conseqüentemente, um novo valor de PCI. Para uma UA que contenha um defeito com os três níveis de severidade são calculados cinco valores de PCI, de modo que o maior dentre os PCIs obtidos é o

valor que representa a condição do pavimento.

A partir da determinação do PCI a condição do pavimento é classificada de acordo com a escala apresentada na Tabela 4, na qual a ASTM (2018) indicou uma determinada cor para representar cada classificação.

Tabela 4 – Classificação da condição do pavimento de acordo com o PCI

PCI	Condição
86 – 100	Excelente
71 – 85	Muito boa
56 – 70	Boa
41 – 55	Regular
26 – 40	Ruim
11 – 25	Muito ruim
0 – 10	Péssima

Fonte: adaptado de ASTM (2018)

De acordo com a pontuação atribuída a condição do pavimento, Shahin (2005) sugere ações para melhorar a condição do pavimento ou prevenir sua deterioração. Na Tabela 5 são apresentadas as estratégias a serem tomadas de acordo com o PCI do pavimento.

Tabela 5 – Estratégias a serem tomadas de acordo com o PCI

PCI	Estratégia
86 - 100	Manutenção preventiva
71 – 85	
56 – 70	Reabilitação
41 – 55	
26 – 40	Reconstrução
11 – 25	
0 – 10	

Fonte: adaptado de Shahin (2005)

Como pode-se notar, Shahin (2005) divide as estratégias em três tipos. Para os pavimentos que apresentam PCI maiores que 70 é recomendado que se execute apenas uma manutenção preventiva para desacelerar a deterioração– e prolongar a vida útil do pavimento, como, por exemplo, a selagem de trincas. Para pavimentos com PCI entre 41 e 70 pontos, é indicado atividades de reabilitação, como a execução de remendos profundos e recapeamentos. Por fim, para os pavimentos com PCI igual a 40 ou menos, é sugerido a reconstrução do pavimento.

Embora proporcione resultados confiáveis, o processo de registrar os tipos, as severidades e as dimensões dos defeitos presentes no pavimento faz com que o método do PCI demande quantidade de tempo superior aos demais métodos de avaliação. Ainda, as combinações de defeitos com mais de uma severidade introduzidas a partir da ASTM (2011) tornaram o cálculo do PCI mais complexo.

Na tentativa de simplificar as avaliações de condição de pavimento, alguns autores desenvolveram índices que consideram apenas os defeitos mais recorrentes nas vias urbanas e que possuem métodos mais simples em comparação ao método do PCI. Estes índices são apresentados a seguir.

4.1.2 Índice de Condição de Pavimentos Urbanos

Com o objetivo de desenvolver um índice efetivo e de simples aplicação, Páez (2015) desenvolveu o Índice de Condição de Pavimentos Urbanos (ICPU). O índice é obtido a partir do somatório das pontuações relativas ao tipo, severidade e extensão dos defeitos observados no pavimento, no qual para cada um desses critérios foram definidos pesos para representá-los.

Os pesos dos tipos de defeitos foram obtidos por meio da opinião de especialistas em infraestrutura de transportes de acordo com o método de apoio à tomada de decisão *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Foi enviado aos especialistas um questionário com a relação dos quinze tipos de defeitos descritos pelo manual SHRP, no qual deveriam comparar par a par a importância de cada defeito na deterioração (perda de serventia) de um pavimento urbano. A ponderação dos níveis de severidade dos defeitos (baixa, média e alta) foi baseada nos ábacos de valor-dedução do PCI. O autor cita que por meio de um *software* matemático os pesos de cada nível de severidade foram obtidos relacionando a área abaixo da curva de severidade de cada defeito. Finalmente, os pesos relativos à extensão dos defeitos

foram obtidos mediante análise estatística dos dados coletados na malha viária do Distrito Federal. Os dados obtidos por meio de avaliação subjetiva foram relacionados com os dados de defeitos.

O modelo para representar o ICPU é demonstrado na Equação 1, em que *PD* representa o peso por tipo de defeito, *FS* o fator de ponderação relativo à severidade do defeito e *FE* o fator de ponderação relativo a extensão do defeito.

$$ICPU = 100 - \sum((PD_i) \cdot (FS_i) \cdot (FE_i)) \quad (1)$$

A partir do modelo obtido, Páez (2015) analisou várias configurações do índice. A primeira configuração foi composta pelos quinze defeitos. Na segunda configuração, apenas os dez defeitos mais frequentes na malha viária do Distrito Federal estavam presentes. Para isso, o peso dos defeitos removidos foi redistribuído entre os defeitos permanentes. Na terceira configuração o ICPU foi representado pelos cinco tipos de defeitos mais representativos: Trinca por Fadiga, Remendo, Buraco, Deformação Permanente e Desgaste. Novamente o peso dos defeitos excluídos foi redistribuído entre os defeitos restantes.

Os valores obtidos na aplicação em campo do ICPU de quinze, dez e cinco defeitos foram confrontados com os valores obtidos por uma avaliação subjetiva. O índice que considera quinze defeitos obteve a maior aproximação, com um erro relativo de 0,67%, seguido pela configuração com cinco defeitos (2,4%) e com dez defeitos (4,1%).

4.1.3 Matriz de Valores Fixos

A avaliação da condição do pavimento pelo método da Matriz de Valores Fixos (MVF) foi proposta por Zanchetta (2017) com o intuito de reduzir a subjetividade e elevar a produtividade das avaliações. Neste método são considerados apenas os cinco tipos de defeitos mais presentes nas vias urbanas de São Carlos/SP indicados no trabalho de Zanchetta (2005): buraco, desgaste, remendo, trinca por fadiga e deformação permanente. Segundo o autor, a redução no número de defeitos analisados proporciona maior agilidade na coleta de dados, redução nos custos por demandar menor número de avaliadores e maior consistência dos resultados. Nota-se que os defeitos mais frequentes levantados pelo autor em São Carlos/SP são

exatamente os mesmos levantados por Páez (2015) no Distrito Federal. O autor cita, ainda, que para obter o Índice de Condição de Pavimento (ICP) com base no método proposto, as avaliações foram realizadas por caminhamento e que todo o trecho foi avaliado.

O método da MVF atribui um valor fixo para cada combinação de dois fatores: extensão e severidade dos defeitos observados no pavimento. Ambos os fatores podem ser classificados como baixo (B), médio (M) ou alto (A), conforme a matriz apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Matriz de Valores Fixos

		Severidade		
		B	M	A
Extensão	B	1	5	11
	M	5	11	15
	A	11	15	20

Fonte: Zanchetta (2017)

A extensão é definida como a área do defeito em relação a área total da UA. Defeitos que possuem área menor que 10% da área da UA são classificados como de baixa extensão. Caso a relação entre as áreas esteja entre 11% e 40%, a extensão do defeito é considerada média e quando a relação entre as áreas é maior que 40%, a extensão é considerada alta. A classificação da severidade é definida de acordo com manual SHRP (1993).

Para cada tipo de defeito são encontrados os pontos de dedução (PD) de acordo com a MVF, limitado por um valor máximo de 20 pontos por defeito. Assim, mesmo que um determinado defeito apresente mais de 20 PD, o valor de 20 será computado para esse defeito. Como o método considera cinco tipos de defeitos, a soma total dos PD possui um valor máximo de 100 pontos. Assim, o somatório dos PD de todos os defeitos é subtraído de 100 para encontrar o Índice de Condição de Pavimento (ICP).

Para validar o método proposto, Zanchetta (2017) comparou, por meio de análise de correlação, os resultados obtidos pelo ICP de cinco defeitos com os

resultados obtidos pelo PCI, com um ICP obtido por meio de um método objetivo com base nos defeitos descritos em SHRP (1993) e com avaliações subjetivas de 20 segmentos de pavimentos. Foram obtidos valores de correlação maiores que 0,74 na comparação do ICP de cinco defeitos com os demais índices. Desse modo, o autor concluiu que um índice que considera menos defeitos indica de forma mais precisa a diferença de condição entre os pavimentos e, dessa forma, indica com mais confiabilidade as vias que devem ser priorizadas no recebimento de atividades de M&R. Ainda, com menos defeitos a serem avaliados, o método proporciona uma avaliação mais rápida, com maior potencial de reprodutibilidade e resultados mais consistentes, uma vez que um grande número de defeitos a serem avaliados pode confundir os avaliadores.

4.1.4 Índice de Condição de Pavimentos Urbanos de João Pessoa

Outro índice desenvolvido para avaliar pavimentos urbanos e que considera menos tipos de defeitos é o Índice de Condição de Pavimento Urbano de João Pessoa (ICPU_{JP}), proposto por Albuquerque (2017) para auxiliar na avaliação dos pavimentos da capital paraibana. Para desenvolver o índice, os autores realizaram primeiramente uma avaliação subjetiva conforme DNIT (2003b) e uma avaliação objetiva baseada no manual SHRP em 113 amostras de pavimentos.

A partir dos dados coletados foi utilizado o método de regressão linear múltipla tomando-se o VSA como variável dependente e os defeitos como variáveis independentes para se chegar a um modelo para representar a condição dos pavimentos. Em seguida, foram excluídos do modelo os defeitos que não possuíam significância, de modo que, dos 16 tipos de defeitos inicialmente analisados, apenas seis foram selecionados para compor o índice: trinca por fadiga (TF), remendo (RM), buraco (PN), deformação permanente (DP), desgaste (DE) e agregado polido (AP). O modelo do ICPU_{JP} é apresentado na Equação 2.

$$ICPU_{JP} = 5 - 0,016TF - 0,030RM - 0,266PN - 0,049DP - 0,021DE - 0,160AG \quad (2)$$

Com os dados obtidos nas avaliações que geraram o modelo, pôde ser calculado o ICPU_{JP} para as amostras de pavimento. Os resultados do índice,

juntamente com os resultados obtidos na aplicação do ICPU (PÁEZ, 2015), do *Urban Index Condition Pavement - UPCI* (OSORIO, 2015), do *Distress Manifestation Index Network Level - DMI_{NL}* (CHAMORRO *et al.*, 2010) e do PCI (SHAHIN; KOHN, 1979) foram comparadas com os valores do VSA. A comparação foi feita por meio de análise da correlação, do Erro Absoluto Médio (MAE), da raiz quadrada média do erro (RMSE) e Média Absoluta do Erro relativo (MARE).

Em relação a correlação, foi obtido entre o ICPU_{JP} e o VSA o valor de 0,93. Entretanto, Albuquerque (2017) alerta que concluir que há relação linear apenas por meio da correlação não é correto, pois dois índices podem apresentar notas discrepantes em amostras diferentes de pavimento e mesmo assim possuir alta correlação, desde que, quando a nota de um índice subir entre duas UAs, a nota do outro índice também se eleve em uma mesma proporção.

Os resultados do ICPU_{JP} obtiveram valor de MAE igual a 0,50. Em relação a análise do MARE, foi obtido um valor de 16,23%. O autor comparou este valor ao obtido por Shah *et al.* (2013b), na qual os autores obtiveram valor de MARE de 13,79% entre o PSR obtido e o PSR estimado por meio de regressão linear. O autor destaca a importância do desenvolvimento de um índice que classifique a condição do pavimento de acordo com as características da região de estudo.

4.1.5 Outros índices combinados de defeitos

O *Pavement Condition Rating* (PCR) é, de acordo com Saraf (1998), o método de avaliação de pavimentos utilizado pelo *Ohio Department of Transportation* (ODOT). O PCR baseia-se na identificação visual e medição dos defeitos presentes no pavimento. O somatório das combinações de peso, severidade e extensão de cada tipo de defeito é subtraído de 100 para obter o PCR. Devido a alterações no tráfego e nas técnicas de manutenção, Saraf (1998) sugeriu que os defeitos considerados e seus respectivos pesos não eram mais os ideais. Assim, o autor reavaliou os pesos dos defeitos e eliminou àqueles com rara frequência de registros.

O *Distress Manifestation Index* (DMI) foi desenvolvido pelo Ministério de Transportes de Ontario (MTO) para avaliar a condição geral da superfície de pavimentos. Os defeitos são levantados segundo manuais de classificação de condição do MTO. O *Distress Manifestation Index for Network Level* (DMI_{NL}) foi uma proposta de alteração do DMI realizada por Chamorro *et al.* (2010). As principais

mudanças realizadas foram a redução do tipo de defeitos avaliados e do número de níveis de severidade, além da definição e do ajuste da extensão dos defeitos. Ainda, suas modificações foram realizadas de modo a ser adequado à aplicação de tecnologias na coleta de dados. A condição de um pavimento possui inicialmente um DMI_{NL} de 10 e tem sua pontuação reduzida assim que são identificados os defeitos.

Para avaliar o pavimento de vias urbanas italianas, Loprencipe, Pantuso e Di Mascio (2017) propuseram um manual simplificado de identificação de defeitos para obter o PCI. A partir do manual proposto pela ASTM (2016), foram retirados 10 tipos de defeitos que possuem baixa frequência de ocorrência e acrescentados defeitos que não são considerados pelo manual, como, por exemplo, a existência de bueiros e raízes de árvores. Para isso, foi necessário elaborar curvas de valores de dedução para os novos defeitos. Por meio de análise estatística, os valores obtidos pelo PCI proposto foram comparados com os do PCI original. Os autores concluíram que o método proposto avalia a condição dos pavimentos com notas semelhantes ao método indicado pela ASTM.

4.2 AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS POR MÚLTIPLOS CRITÉRIOS

Os índices combinados de defeitos possuem diferentes métodos de avaliação da condição do pavimento e consideram diferentes quantidades de tipos de defeitos. Porém, todos eles possuem como único critério os defeitos presentes na superfície do pavimento. Alguns autores indicam a importância de serem adotados diferentes parâmetros para avaliar a condição dos pavimentos. Os métodos apresentados a seguir avaliam a condição de pavimentos flexíveis por múltiplos critérios e serviram de base para o desenvolvimento do índice proposto neste trabalho.

4.2.1 *Pavement Quality Index*

O *Pavement Quality Index* (PQI) foi proposto por Reza, Boriboonsomsin e Bazlamit (2006) e trata-se de uma ferramenta utilizada para avaliar o pavimento por meio da combinação do levantamento dos defeitos e da rugosidade proporcionada pelo pavimento. O PQI é obtido por meio da Equação 3.

$$PQI = PCR - a (IRI)^b \quad (3)$$

O PCR da equação corresponde ao *Pavement Condition Rating*, método utilizado pelo *Ohio Department of Transportation* (ODOT) para avaliar os pavimentos. Já o IRI corresponde ao *International Roughness Index*, índice mundialmente utilizado para avaliar o nível de irregularidade de uma seção de pavimento. Os valores dos coeficientes *a* e *b* foram obtidos por meio de condições de contorno que limitasse os valores de PQI dentro de um intervalo de 0 a 100. Para desenvolver o índice foi utilizado um banco de dados do ODOT que continha os valores de PCR e IRI levantados entre os anos de 1998 a 2003. Os autores destacam que há uma tendência das agências administradoras de pavimento a enfatizar, além dos defeitos, a rugosidade do pavimento.

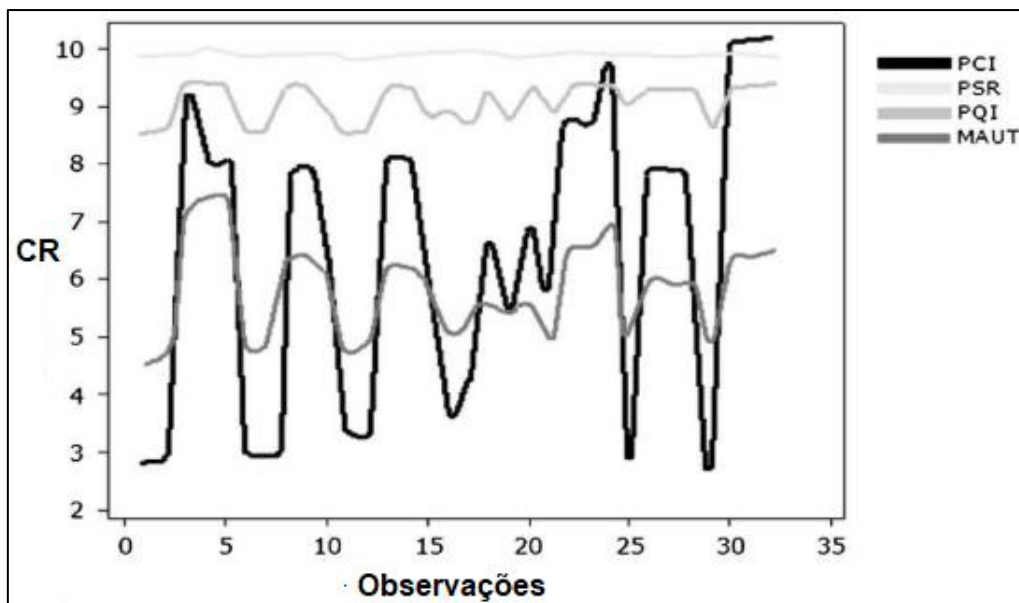
4.2.2 Condition Rating

Para classificar a condição de pavimentos flexíveis, Abu-Samra, Zayed e Tabra (2017) desenvolveram o *Condition Rating* (CR). Os autores citam que os modelos disponíveis para avaliar a condição dos pavimentos se limitam a levantar apenas a rugosidade e os defeitos superficiais e negligenciam os fatores que contribuem para sua degradação. Assim, o CR contempla em seu método 11 fatores relacionados as características operacionais, físicas e climáticas da via, como, por exemplo, a idade do pavimento, profundidade da camada de superfície, temperatura ambiente e volume de tráfego.

Na primeira fase, os autores identificaram na literatura os fatores que afetam a condição do pavimento e desenvolveram um sistema de pontuação para cada critério. Por meio do método AHP, os fatores foram ponderados de acordo com a opinião de especialistas. Por fim, o método *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT) foi utilizado para modelar o CR.

Para validar o modelo desenvolvido foi realizado uma comparação dos resultados obtidos por meio do CR com os resultados obtidos por meio do PCI, PSR e PQI na avaliação da condição de 32 trechos de pavimentos flexíveis. Foram calculadas a porcentagem média de invalidez (AIP), porcentagem média de validade (AVP), RMSE e MAE. Para tornar possível a comparação, todos os índices foram ajustados para uma escala de 0 a 10. O modelo MAUT proposto apresentou resultados com um padrão semelhante ao PCI, porém, dentro de um intervalo menor de variação, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Comparação entre o CR, PCI, PSR e PQI



Fonte: adaptado de Abu-Samra, Zayed e Tabra (2017)

Uma vez que o CR apresentou resultados semelhantes ao PCI, com um valor de MAE de 0,3727, os autores classificaram como válido o método proposto para avaliar a condição de pavimentos. Entretanto, Abu-Samra, Zayed e Tabra (2017) alertam que o modelo desenvolvido deve ser apenas utilizado para avaliar a condição de pavimentos constituídos pelas camadas de base e superfície.

4.2.3 Índice Expedito de Condição de Pavimento

De modo a desenvolver um índice que avaliasse de forma mais prática a condição de pavimentos flexíveis e que agregasse os fatores responsáveis pela degradação do pavimento, Salviatto, Silva Junior e Fontenele (2019) desenvolveram o Índice Expedito de Condição de Pavimento (IECP).

O IECP é composto pelos critérios Quantidade de Tipos de Defeitos (QTD), Qualidade de Viagem (QV) e Volume Diário Médio de tráfego (VDM). O critério QTD refere-se ao número de tipos diferentes de defeitos observados no pavimento, de modo que apenas cinco tipos foram considerados: buraco, desgaste, remendo, trinca por fadiga e trilha de roda. Assim, um trecho de pavimento pode possuir de 0 a 5 tipos de defeitos de acordo com inspeção visual realizada por um grupo de avaliadores. O objetivo dos autores nesse critério foi simplificar o levantamento dos defeitos, de modo

que, além de considerar menos defeitos, não é necessário observar a severidade e a extensão dos defeitos.

O critério QV corresponde ao conforto ao rolamento e suavidade proporcionados pelo pavimento e obtido por meio de uma avaliação subjetiva. Cada intervalo de VSA corresponde a uma classificação, de modo que a pior situação é representada pela classificação “Muito ruim” (VSA entre 0 e 20) e a melhor situação representada pela classificação “Muito bom” (VSA entre 80 e 100).

Por fim, o VDM corresponde ao volume de ônibus que circula diariamente por um trecho de pavimento, uma vez que esse é o veículo pesado de maior representatividade no meio urbano. Para avaliar o VDM do pavimento foram criadas classificações para o volume de tráfego de ônibus registrado em cada trecho, de modo que o VDM pode ser classificado como “Inexistente” (ausência de ônibus na via) até “Muito pesado” (mais de 700 ônibus por dia). De forma a facilitar a avaliação desse critério, o levantamento do número de ônibus que circula pelas vias foi realizado pelo itinerário *online* das empresas responsáveis por quase a totalidade dos transportes coletivos no município de Londrina/PR.

O método AHP foi utilizado pelos autores para ponderar os critérios do IECP. O julgamento par a par do nível de importância de cada critério para indicar a condição do pavimento foi realizada por alunos de pós-graduação em Engenharia Civil com ênfase em Transportes. Ao final dessa etapa, por meio do modelo aditivo de agregação, foi obtido o modelo para representar o IECP, conforme demonstrado na Equação 4.

$$IECP = 0,48 QV + 0,33 QTD + 0,19 VDM \quad (4)$$

O índice foi aplicado em campo e os resultados obtidos foram comparados aos resultados obtidos por meio do método do PCI. A comparação foi realizada por meio da verificação da correlação e do valor de MARE. Foi obtida uma forte correlação entre os índices, entretanto, o valor de MARE variou de 29% quando considerados apenas os trechos classificados como “Excelente”, “Muito boa” e “Boa” pelo PCI à 149% quando consideradas todos os trechos. Assim, os autores concluíram que o IECP avalia a condição do pavimento de forma mais “otimista” do que o PCI.

4.2.4 Índice de Condição da Superfície de Pavimentos Flexíveis

O Índice de Condição da Superfície de Pavimentos Flexíveis (ICS-PF) é outro exemplo de índice desenvolvido com o objetivo de avaliar a condição de pavimentos de forma mais prática e por meio da agregação de diversos fatores. Elaborado por Salviatto *et al.* (2020), o ICS-PF agrega os critérios Serventia Atual (SA), Defeitos no Pavimento (DP), Declividade Longitudinal (DL), Volume de Tráfego de Ônibus (VTO) e Drenagem (DNG).

Para obter a pontuação do critério SA, os autores avaliaram subjetivamente a condição do pavimento com o auxílio da escala visual proposta por Pereira (2019). Diferentemente de Salviatto, Silva Junior e Fontenele (2019), o VSA do pavimento foi tomado como o valor representativo de SA.

A consideração dos defeitos e do volume de tráfego na via também foram modificados em relação ao método proposto por Salviatto, Silva Junior e Fontenele (2019). Embora tenha sido considerado os mesmos cinco tipos de defeitos, a avaliação foi baseada unicamente na existência ou não do defeito no pavimento, de modo que a existência implica em pontuação mínima para o critério DP (zero) e a não existência implica na pontuação máxima (100). Além disso, os defeitos foram tomados como subcritérios de DP. Desse modo, cada defeito possuiu um peso de acordo com sua importância na condição de pavimentos flexíveis. Em relação ao critério VTO, os autores consideraram o volume de ônibus que trafegava apenas no horário de pico da via e pode ser classificado como “Baixo” (até 25 ônibus no horário de pico), “Médio” (de 26 a 30 ônibus) ou “Ruim” (acima de 30 veículos). O volume de ônibus foi levantado por meio de contagem *in loco* e por meio do itinerário *online* da empresa que possui quase a totalidade dos ônibus que circulam pela região avaliada.

O critério DL considera a diferença de cotas entre o ponto inicial e final do trecho e seu comprimento. Os autores citam que quanto maior a declividade da via maiores são os esforços empregados pelos veículos no pavimento. Para mensurar a diferença de cotas entre os pontos iniciais e finais os autores utilizaram o *software Google Earth*.

Por fim, o critério DNG está relacionado às declividades longitudinal e transversal da via que são responsáveis por uma melhor ou pior drenagem das águas superficiais. Cada uma das declividades foi considerada como um subcritério e assim possuem um determinado peso dentro do critério DNG. Para medir a declividade

transversal (abaulamento) da via foi utilizado o aplicativo de smartphone *Inclinometer*.

Para cada critério e subcritério foram definidos intervalos de pontuações, de modo que o pavimento pode obter pontuações de 0 a 100 em cada critério. Além disso, nessa pesquisa o AHP também foi utilizado para ponderar os critérios e subcritérios do ICS-PF, de modo que o julgamento dos critérios foram realizados pelos próprios autores. Os pesos dos critérios e subcritérios obtidos estão representados nas Equações 5, 6 e 7, onde *PAN* representa o defeito Panela (Buraco), *TF* o defeito Trinca por Fadiga, *TR* o defeito Trilha de Roda, *DES* o defeito Desgaste, *REM* o defeito Remendo, *AB* o abaulamento da via e *DLD* a Declividade Longitudinal relacionado à Drenagem.

$$\text{ICS - PF} = 0,34 \text{ DP} + 0,26 \text{ SA} + 0,20 \text{ VTO} + 0,10 \text{ DL} + 0,10 \text{ DNG} \quad (5)$$

$$\text{DP} = 0,37 \text{ PAN} + 0,24 \text{ TF} + 0,15 \text{ TR} + 0,14 \text{ DES} + 0,10 \text{ REM} \quad (6)$$

$$\text{DNG} = 0,51 \text{ AB} + 0,49 \text{ DLD} \quad (7)$$

O ICS-PF foi aplicado em 13 UAs da área urbana do município de Londrina/PR e os resultados foram comparados, por meio de análise de correlação, com os resultados obtidos por meio do método MVF de Zanchetta (2017). Foi obtido correlação entre os índices de 0,19 quando consideradas todas as UAs e de 0,58 quando desconsideradas as UAs com VTO acima de 30 ônibus no horário de pico. Concluiu-se, portanto, que o ICS-PF deve ser aprimorado para que possa avaliar com maior confiança a condição de pavimentos com qualquer nível de tráfego de ônibus. Além disso, os autores constataram que o método proposto pode representar redução no tempo de avaliação e que a contagem de ônibus pelo método *online* apresenta-se como um método viável, uma vez que os resultados obtidos por esse tipo de contagem e pela contagem *in loco* estavam fortemente correlacionados.

5 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

A tomada de decisão está presente em muitas situações do cotidiano. A decisão pode ser tomada com base em um único critério ou por meio da análise de múltiplos fatores envolvidos no problema. Em um SGP, decisões como a priorização das vias, a seleção da melhor atividade de M&R, a época correta para intervir no pavimento e a escolha do método de avaliação de condição são baseadas em diversos critérios.

No desenvolvimento de um índice de condição, a determinação dos pesos dos critérios que o constituem é uma das etapas mais importantes. A incorreta ponderação dos critérios pode acarretar em uma ferramenta que não retrata a condição real do pavimento. Os pesos podem ser obtidos por meio de uma regressão linear baseada em um histórico de dados ou podem ser definidos com base na experiência de profissionais e dos agentes envolvidos com o problema. Neste último caso, faz-se necessário a utilização de métodos de apoio multicritério para auxiliar os profissionais e agentes na tomada de decisão.

A classificação dos métodos pode ser feita segundo a teoria em que se baseiam, na qual destacam-se duas escolas de pensamento: a Escola Americana e a Escola Francesa (MAGALHÃES *et al.*, 2016).

A Escola Americana fundamenta-se, conforme Machado, Ensslin e Ensslin (2015), na agregação dos vários critérios envolvidos em um único critério que sintetize o problema, de forma a caracterizar uma análise multicritério de decisão (MCDA). Exemplos de métodos da Escola Americana são o *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT) e o *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Já a Escola Francesa, segundo Chaves *et al.* (2010), defende a não agregação dos critérios em um critério de síntese e baseia-se na relação de superação de forma a gerar uma abordagem construtivista do problema (MCDA-C). Exemplos de métodos da Escola Francesa são o *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE) e o *Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique* (MACBETH). Entretanto, segundo Rangel e Gomes (2010), alguns autores citam que o método MACBETH possui elementos técnicos das duas escolas. A seguir são abordadas as metodologias MCDA e MCDA-C.

5.1 METODOLOGIA MCDA

A abordagem MCDA consiste em um conjunto de técnicas para auxiliar os tomadores de decisão na escolha da melhor alternativa com base em múltiplos critérios. Essa metodologia restringe o apoio a decisão a uma etapa de estruturação e uma etapa de avaliação. Ao fim destas etapas, uma solução ótima é selecionada dentre as possíveis alternativas (ROY, 1993). Dentre os métodos da MCDA mais utilizadas podem ser citadas o MAUT e o AHP.

No método MAUT o decisor avalia as consequências de cada alternativa de acordo com cada critério. O modelo de preferências é construído por meio das funções de utilidade. A utilidade pode ser definida como uma medida da satisfação decorrente do consumo de um bem ou serviço. Desse modo, o decisor associa um valor para a recompensa que determinada alternativa irá proporcionar (MIRANDA; ALMEIDA, 2004; VILLELA, 2009; ABU-SAMRA; ZAYED; TABRA, 2017). Esta técnica foi utilizada por Miranda e Almeida (2004) para auxiliar a avaliação dos programas de pós-graduação pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) segundo os dados de diversos critérios coletados entre os anos de 1998 a 2000. Os autores concluíram que o método possibilitou comparar os vários programas sob os diversos critérios. O MAUT também foi utilizado por Abu-Samra, Zayed e Tabra (2017) para desenvolver o *Condition Rating* (CR) que avalia a condição de pavimentos flexíveis segundo 11 critérios divididos em três categorias.

O método AHP foi elaborado por Thomas L. Saaty na década de 1970 (SAATY, 1987). A ideia principal desse método é decompor o problema principal em níveis hierárquicos de prioridades e comparar par a par seus diversos componentes de modo a facilitar a tomada de decisão e tornar mais ágil a identificação dos pontos relevantes na problemática analisada. A aplicação do AHP pode ser vista em inúmeros trabalhos nacionais e internacionais relacionados à gerência de pavimentos. O método foi utilizado por Cafiso *et al.* (2002) em uma das etapas da implementação do programa de gerência de pavimentos HDM-4 (*Highway Development and Management*). Segundo os autores, a aplicação do AHP mostrou-se satisfatória pois sua estrutura analítica se adapta melhor com as características de análise de um SGP, uma vez que a gerência de pavimentos é pautada em vários critérios. Um exemplo de uso do AHP em um índice combinado de defeitos é o trabalho de Páez (2015), na qual especialistas compararam par a par os tipos de defeitos dos pavimentos por meio do

método AHP. Já Tawalare e Raju (2016) desenvolveram um índice de desempenho cujos critérios foram ponderados por um grupo de especialistas segundo o método AHP. Para auxiliar na priorização de pavimentos, Lima, Ramos e Fernandes Jr (2018) desenvolveram um método multicritério na qual os critérios foram ponderados pelo método AHP. Os autores citam que a aplicação da técnica de avaliação multicritério garantiu a boa estruturação da base do método proposto. Por fim, os índices de condição apresentados por Salviatto, Silva Junior e Fontenele (2019) e Salviatto *et al.* (2020) também tiveram seus múltiplos critérios ponderados pelo método AHP.

5.2 METODOLOGIA MCDA-C

A metodologia MCDA-C surgiu como uma derivação do MCDA e, desse modo, possui o mesmo objetivo. Entretanto, o termo construtivista foi adicionado pois neste método a decisão final é construída pelos vários indivíduos envolvidos sem o conhecimento de início da decisão final (SEQUINEL, 2019).

A diferença entre as duas correntes, para Rodrigues (2014), está na atitude. Segundo o autor, os métodos do MCDA procuram um modelo matemático que indique a melhor solução para o decisor independentemente de os avaliadores concordarem ou não com a solução proposta. Já os métodos do MCDA-C procuram desenvolver um modelo que auxilia os avaliadores a moldarem seus próprios valores em um processo interativo e construtivista. Desse modo, é permitido aos envolvidos obter uma solução que represente seus valores.

A metodologia MCDA-C possui três convicções básicas no processo decisório: características subjetivas (relacionado aos valores próprios dos envolvidos) e objetivas (ações na tomada decisão) estão interligadas; os envolvidos participam do processo de ensino-aprendizagem no momento que interagem de forma ativa na construção do problema e dessa forma passam a interpretar melhor o seu juízo de valor; visão construtivista que permite a elaboração de um modelo que retrate os valores dos envolvidos (RODRIGUES, 2014).

Os indivíduos envolvidos na problemática são denominados como atores e podem ser divididos em funções de acordo com suas responsabilidades. Para Longaray e Ensslin (2013) os atores podem ser divididos nas seguintes funções:

- Decisor: responsável por controlar a resolução do problema e validar a decisão tomada;
- Intervenientes: podem influenciar as decisões tomadas pelo decisor;
- Agidos: são os envolvidos que serão atingidos pelas decisões tomadas sem poder interferir nelas;
- Facilitador: auxilia na construção do modelo, podendo contribuir com recomendações ao decisor.

A MCDA-C tem como principal capacidade desenvolver no decisor o conhecimento que lhe permite compreender as consequências de suas decisões. O desenvolvimento desse conhecimento dá-se por meio de três grupos de atividades distintas, porém, correlacionadas: estruturação, avaliação e recomendações. Na etapa de estruturação são identificados, organizados e ordenados os componentes importantes para a resolução do problema. A avaliação é utilizada como uma ferramenta para aumentar o entendimento dos decisores quanto às suas preferências. Por fim, a função da etapa de recomendação é expandir o entendimento das consequências de suas possíveis decisões (ENSSLIN *et al.*, 2010).

Dentre os vários métodos do MCDA-C pode-se citar o ELECTRE. Este método trata-se de um algoritmo de decisão para problemas que envolvem a análise multicritério. No ELECTRE o conjunto de alternativas é reduzido de acordo com o critério de dominância de uma alternativa sobre a outra. O método pode ser dividido em método de estruturação (ELECTRE I), método de decisão (ELECTRE II) e ELECTRE III que leva em consideração as incertezas relacionadas aos atributos por meio de valores difusos ou *fuzzy* (PERDIGÃO *et al.*, 2012). O método foi utilizado por Miranda e Almeida (2004) juntamente com o MAUT para avaliar os cursos de pós-graduação da CAPES. Para comparar a segurança proporcionada por dez seções de uma rodovia na ilha de Sardenha na Itália, Fancello, Carta e Fadda (2014) utilizaram o ELECTRE III com o objetivo de desenvolver um método capaz de indicar as seções prioritárias no recebimento de intervenções por meio da análise de múltiplos critérios.

Além do ELECTRE, outro método que utiliza os princípios do MCDA-C é o MACBETH, abordado a seguir com maiores detalhes.

5.3 MÉTODO MACBETH

O *Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique* ou simplesmente MACBETH, é um método de análise multicritério construtivista (MCDA-C) que apoia a tomada de decisões. Foi idealizado inicialmente por Carlos Bana e Costa e Jean Claude Vansnick no início da década de 90 e por Jean-Marie De Corte que se tornou integrante do grupo alguns anos depois (BANA E COSTA; DE CORTE; VANSNICK, 2003). A função do método, de acordo com Ensslin *et al.* (2010), é transformar as escalas ordinais em cardinais por meio do julgamento da diferença de atratividade entre duas alternativas. Ainda de acordo com o autor, trata-se do método mais empregado devido a sua fundamentação teórica, representatividade e reconhecimento prático.

A diferença entre o MACBETH e os demais métodos de auxílio a tomada de decisão multicritério está justamente em requerer apenas julgamentos qualitativos entre os critérios para auxiliar o decisor a quantificar a diferença de atratividade entre as alternativas. Esse tipo de julgamento motiva a discussão e a aprendizagem dos envolvidos, de forma que a alternativa escolhida reflita os juízos de valores do grupo (VILLELA, 2009). Além disso, Magalhães *et al.* (2016) citam que o método proporciona conhecer não só a melhor alternativa, mas também quanto uma alternativa é melhor do que as outras.

O método está apoiado, segundo Bana e Costa, De Corte e Vansnick (2003), em uma abordagem humanística, interativa e construtivista. A característica humanística do MACBETH está justamente em sua função: auxiliar os tomadores de decisão a discutir e refletir a respeito das melhores alternativas em função de seus valores e preferências. A característica interativa está relacionada a ideia de que a reflexão e o aprendizado podem ser melhor desenvolvidos quando se utiliza procedimentos simples, como a quantificação do nível de atratividade por meio de julgamentos qualitativos. Por fim, a característica construtivista é o que faz do MACBETH um método MCDA-C, ou seja, por meio das convicções e do aprendizado de cada avaliador durante o processo é que são tomadas as decisões.

Como os demais métodos que utilizam os princípios do MCDA-C, o MACBETH pode ser dividido nas fases de Estruturação, Avaliação e Recomendações, cujas características são descritas a seguir.

5.3.1 Fase de Estruturação

A fase de estruturação corresponde a etapa de entendimento do contexto no qual o problema está inserido e a identificação das situações que exigirão uma tomada de decisão, que deve ser realizada por meio do levantamento minucioso de informações que permitam entender o problema e optar pela alternativa mais apropriada (VILLELA, 2009).

Em um primeiro momento, um problema se apresenta de forma desorganizada, tanto quanto o seu nível de complexidade. Assim, cabe aos decisores escolher uma ferramenta que permita visualizar a importância de cada componente (VILLELA, 2009). Desse modo, os componentes do problema devem ser organizados, segundo Longaray e Ensslin (2013), em níveis hierárquicos, no qual os níveis mais importantes serão decompostos em níveis com maior detalhamento.

Os componentes envolvidos no contexto decisório são formados pelos Pontos de Vista Fundamentais (PVF) e Pontos de Vista Elementares (PVE). Um PVF trata-se de um aspecto essencial de interesse no problema e, portanto, possui um fim em si mesmo, ou seja, reflete um valor fundamental (BANA E COSTA; FERREIRA; CORRÊA, 2000). Assim, os PVF são tomados como os critérios que constituem o problema decisório.

Cada PVF pode ser formado por diversos PVE. Assim um PVE trata-se de um ponto de vista que não foi considerado fundamental e é utilizado como um meio para se atingir um fim (VILLELA, 2009). Portanto, um PVE equivale aos subcritérios de um determinado PVF. Segundo Schmidt (1995) os pontos de vista fundamentais e elementares levantados devem ser analisados e discutidos entre os decisores com perguntas do tipo por quê e para que o ponto de vista é importante. Por meio da integração entre diferentes indivíduos com diferentes níveis de conhecimentos e valores é que devem ser definidos os pontos de vista que farão parte do sistema decisório.

Um critério envolvido no problema deve ser isolável (possível de analisá-lo independentemente dos outros critérios), inteligível (claro, não ambíguo) e operacional. Esta última característica pode ser obtida por meio da atribuição de um conjunto ordenado de níveis de desempenho possíveis de serem atingidos por uma determinada alternativa (BANA E COSTA, 1992 apud BANA E COSTA; FERREIRA; CORRÊA, 2000).

Devem-se ainda ser definidos, dentre os níveis de desempenho, dois níveis de referência: um Neutro e um Bom. O nível Neutro corresponde ao desempenho mínimo aceitável em um determinado critério e o nível Bom representa o nível que atende de forma satisfatória o cenário ideal de cada critério (LONGARAY; ENSSLIN, 2013). Segundo Bana e Costa, Ferreira e Corrêa (2000), a identificação de níveis de referência contribui para uma maior clareza no entendimento dos critérios e auxilia no julgamento do nível de atratividade entre os níveis de desempenho.

5.3.2 Fase de Avaliação

Na fase de avaliação são construídas as escalas de preferência local dos critérios (preferência entre os níveis de desempenho), determinadas as relações de preferência entre os critérios de um mesmo nível hierárquico e, por fim, identificado o desempenho de uma determinada alternativa à nível global por meio da agregação aditiva dos critérios (LONGARAY; ENSSLIN, 2013).

As escalas de preferência são obtidas por meio da conversão de informações ordinais (qualitativas) em cardinais. A transição é realizada por meio da comparação par a par da diferença de atratividade entre os níveis de desempenho de um critério e posteriormente entre os critérios. O seguinte questionamento deve ser feito aos julgadores: se X é mais atrativo que Y, qual a diferença de atratividade que você sente entre X e Y? Muito fraca, fraca, moderada, forte, muito forte ou extrema? Caso os avaliadores estejam confusos quanto ao valor semântico correto que corresponde à diferença de atratividade, o questionamento pode ser respondido com mais de uma resposta (BANA E COSTA; DE CORTE; VANSNICK, 2003).

Para auxiliar no processo de transição da informação ordinal para cardinal, os idealizadores do método desenvolveram o M-MACBETH. Conforme Machado, Ensslin e Ensslin (2015), por meio de programação linear os julgamentos da diferença de atratividade entre os níveis de desempenho são traduzidos pelo M-MACBETH em funções de valor que definirão a pontuação de cada alternativa. Além disso, de acordo com Chaves *et al.* (2010), o *software* considera ainda a dificuldade que os avaliadores têm de se manterem coerentes em todo o processo de julgamento intra e intercritérios, principalmente quando o problema envolve grande quantidade de critérios. Desse modo, o M-MACBETH avalia cada julgamento realizado em busca de incoerências a serem corrigidas e ainda sugere, quando preciso, opções para evitá-las.

Após a obtenção das funções de valor e os pesos dos critérios, uma pontuação global é calculada para cada alternativa por meio da soma ponderada das pontuações locais de cada alternativa. A pontuação global refere-se à atratividade da alternativa, a qual deve ser comparada com a pontuação das demais alternativas para ser tomada a decisão (VILLELA, 2009).

5.3.3 Fase de Recomendações

A fase de recomendações tem como objetivo apoiar o decisor no entendimento do modelo desenvolvido ao longo de todo o processo decisório, ou seja, na análise das possíveis alternativas e suas respectivas consequências (LONGARAY; ENSSLIN, 2013). Em alguns casos, de acordo com Ensslin *et al.* (2010), esse entendimento exige que sejam simulados diferentes cenários nos quais os parâmetros sofram variações e sejam observadas as consequências dessas variações. Neste caso, na etapa de Recomendações é feita uma análise de sensibilidade do modelo.

A análise de sensibilidade possibilita compreender quais os impactos que uma eventual modificação nos pesos dos critérios causaria na avaliação global do modelo (RODRIGUES, 2018). Além disso, a análise permite conhecer os pontos passíveis de serem melhorados de forma a elevar a confiabilidade do modelo (VILLELA, 2009).

O M-MACBETH realiza dois tipos de análise de sensibilidade. No primeiro tipo, as pontuações parciais são variadas e analisa-se a modificação causada na ordenação das alternativas decorrentes dessa variação. No segundo tipo, é analisada a alteração na ordenação global das alternativas após variação nos pesos dos critérios, mantendo-se a proporção entre os demais critérios. O segundo tipo trata-se do método mais clássico de análise de sensibilidade (VILLELA, 2009). Entretanto, a análise de sensibilidade pelo M-MACBETH não é capaz de analisar simultaneamente elementos de diferentes PVF (RODRIGUES, 2018). Desse modo, para os problemas na qual os critérios analisados possuem diferentes subcritérios com seus respectivos pesos, é necessário selecionar uma outra alternativa para analisar a sensibilidade do modelo.

O método *Variable Interdependent Parameters Analysis* (VIP Analysis) foi proposto por Dias e Clímaco (2000) e trata-se de um método no qual a análise das alternativas é estruturada com base no modelo aditivo de agregação (RODRIGUES,

2018). De acordo com Chaves *et al.* (2010), o *VIP Analysis* é bastante indicado para auxiliar na resolução de problemas nas quais os tomadores de decisão não se sentem cômodos para atribuir um valor exato para os pesos dos critérios.

Além do incômodo em quantificar suas preferências, Dias e Clímaco (2000) apontam que os tomadores de decisão podem mudar de opinião, uma vez que durante o processo há o aprendizado do problema por parte dos decisores. Desse modo, não há uma certeza quanto aos valores atribuídos aos parâmetros do problema e então surge a necessidade de realizar uma análise de sensibilidade. Entretanto, os autores citam que as análises nos moldes que eram realizadas apresentavam algumas desvantagens, como a demanda de esforço para indicar um peso inicial para cada parâmetro, a obtenção de respostas de forma prematura e a variação do peso de um critério por vez sem considerar os efeitos que a modificação de vários critérios simultaneamente poderiam gerar.

Assim, Dias e Clímaco (2000) estruturaram o *VIP Analysis* por meio de uma abordagem diferente e que faz uso de parâmetros variáveis interdependentes sujeitos a restrições. Segundo Almeida Filho, Cavalcante e Almeida (2005), no *VIP Analysis* não é necessário que os decisores indiquem pesos iniciais exatos para os parâmetros que compõem o problema. Os decisores devem apenas ter o conhecimento da ordem de importância relativa entre os critérios, a qual será indicada no programa por meio de restrições e que gerará intervalos de valores nos quais os pesos dos parâmetros podem variar. Ainda, Campos e Almeida (2006) citam que outra vantagem do método é o uso da técnica de compensação, na qual um critério com baixo peso pode ser compensado pelos critérios com altos pesos no processo de agregação.

Para auxiliar na escolha da melhor alternativa, são propostos no *VIP Analysis* quatro tipos de abordagens. Para Dias e Clímaco (2000), se forem utilizadas alguma das quatro abordagens isoladamente, a análise pode ser falha. Entretanto, os autores acreditam que durante o processo decisório diferentes abordagens devem ser utilizadas. Desse modo, os decisores devem escolher qual das abordagens se adapta melhor ao contexto decisório (ALMEIDA FILHO; CAVALCANTE; ALMEIDA, 2005). As quatro abordagens, de acordo com Dias e Clímaco (2000), Almeida Filho, Cavalcante e Almeida (2005), Brito, Almeida Filho e Almeida (2005) e Ventura (2012), são:

- Baseada na otimalidade: esta abordagem busca encontrar a melhor solução (solução ótima) com base no melhor valor na função de

agregação aditiva. No caso de não haver tal solução, é possível conhecer as alternativas que são dominadas para que sejam eliminadas do processo decisório, diminuindo assim o número de alternativas a serem analisadas. No *VIP Analysis* é calculada a maior perda de oportunidade (arrependimento máximo) na escolha de uma alternativa em relação a outra. Quando o arrependimento máximo é igual ou menor que zero, toma-se a alternativa como solução ótima. Caso seja menor ou igual ao valor de tolerância adotado, toma-se a alternativa como solução quase ótima com tolerância;

- Baseada na comparação par a par: nesta abordagem são verificadas as relações binárias entre as alternativas na busca pelo conjunto dos pesos que melhor favorece cada alternativa. Por meio da comparação par a par é identificada a dominância de uma alternativa sobre a outra. Se a diferença máxima entre elas é menor ou igual a zero diz-se que uma alternativa é dominante. Caso a diferença seja maior que zero e menor que o valor de tolerância diz-se que uma alternativa é quase dominante;
- Baseada nos intervalos de variação: busca-se conhecer quais alternativas são mais afetadas quando são alterados os pesos dos critérios, identificando conclusões robustas ao possibilitar a eliminação das alternativas absolutamente dominadas (nas quais o seu valor máximo é inferior ao valor mínimo das demais alternativas);
- Baseada nas regras pessimistas de agregação de valor: abordagem análoga à baseada na otimalidade. Nessa abordagem, são calculadas as maiores diferenças possíveis entre os valores de cada alternativa na função aditiva na busca pelo menor arrependimento máximo.

A proposta do *VIP Analysis* não é indicar resultados, mas sim conclusões que permitam aos decisores optar pela melhor alternativa com menores riscos. Essas conclusões podem ainda ser consideradas robustas, uma vez o desempenho das alternativas pode ser modificado por meio da variação dos pesos dos parâmetros. O resultado da função da agregação é visto como o conjunto de três tipos de conclusões (DIAS; CLÍMACO, 2000; VENTURA, 2012; CHAVES *et al.*, 2010):

- Conclusão absoluta robusta: ocorre quando uma situação é satisfeita por

uma alternativa independentemente das outras alternativas, como, por exemplo, uma alternativa que nunca possui um desempenho inferior a um limite pré-estabelecido;

- Conclusão (relativa) unária robusta: refere-se a uma situação que para ser atendida por uma alternativa específica depende do desempenho das demais alternativas, como, por exemplo, concluir que uma das alternativas é a melhor de todas;
- Conclusão (relativa) binária robusta: refere-se à relação entre duas alternativas, como, por exemplo, dizer que a alternativa “A” é melhor que a alternativa “B”.

5.3.4 Uso conjugado do MACBETH e VIP Analysis

Na literatura são encontrados trabalhos em que os métodos MACBETH e *VIP Analysis* foram utilizados em conjunto para auxiliar na resolução de problemas que envolviam a tomada de decisão. Neste contexto, destacam-se os trabalhos de Chaves *et al.* (2010), Gomes Júnior *et al.* (2011), Rodrigues (2018) e Sequinel (2019).

Com o objetivo de demonstrar as vantagens no uso conjugado dos métodos MACBETH e *VIP Analysis*, Chaves *et al.* (2010) apresentaram um exemplo na qual um personagem deveria escolher uma carreira profissional para seguir com base nos critérios Salário, Qualidade de Vida, Satisfação Pessoal, Respeito Profissional, Mercado de Trabalho e Crescimento Profissional. Inicialmente, o método MACBETH foi utilizado para construir a matriz de decisão na qual os decisores compararam par a par as alternativas. Em seguida, foram obtidas as conclusões a respeito das alternativas por meio do *VIP Analysis*. Os autores concluíram que o uso conjugado dos métodos mostrou-se uma ideia bastante interessante, uma vez que os julgamentos intercritérios do MACBETH auxiliou o *VIP Analysis* a elencar uma lista das melhores alternativas.

O MACBETH e o *VIP Analysis* foram as ferramentas utilizadas por Gomes Júnior *et al.* (2011) para selecionar alternativas capazes de proporcionar um desenvolvimento sustentável para um grupo de agricultores. Para isso, os autores estruturaram o problema no software M-MACBETH, no qual foi obtida a matriz de decisão. Em seguida, os decisores quantificaram suas preferências no *VIP Analysis*. Os autores citam que a combinação dos métodos foi muito coerente com as premissas

consideradas e permitiu a inclusão de questões culturais no problema avaliado.

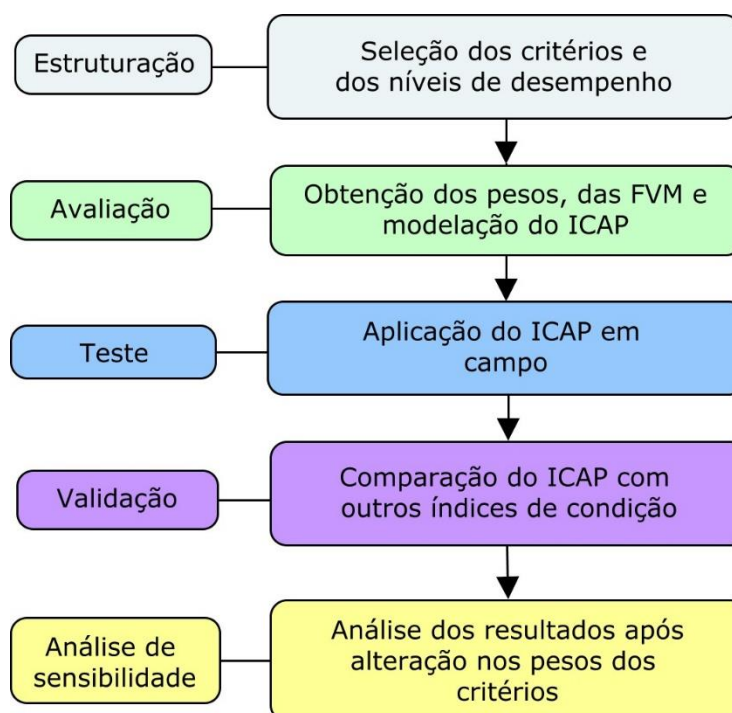
O Índice de Desempenho Ambiental da Manutenção Rodoviária – IDA-MR de Rodrigues (2018) e o Índice de Performance Ambiental da Manutenção Rodoviária – IPA-MR de Sequinel (2019) foram desenvolvidos para avaliar o desempenho ambiental de obras de manutenção em rodovias. Os critérios para compor o IDA-MR e o IPA-MR foram sugeridos por especialistas em gestão ambiental de rodovias dos setores público e privado, respectivamente. O IDA-MR é composto por 59 indicadores divididos em 7 áreas, enquanto o IPA-MR é composto por 16 indicadores divididos em 6 áreas de interesse. Em ambos os trabalhos, os especialistas juntamente com alunos de pós-graduação e outros profissionais técnicos foram os atores no processo decisório de ponderação dos indicadores, segundo o método MACBETH. Para tanto, ambos os autores utilizaram o *software* M-MACBETH. Após a obtenção dos modelos para calcular o IDA-MR e o IPA-MR, os autores utilizaram o *VIP Analysis* para realizar a análise de sensibilidade, no qual foram avaliados diferentes cenários e os respectivos valores máximos, mínimos e arrependimentos. Estes resultados foram comparados com os resultados obtidos por modelos cujo os pesos foram atribuídos por especialistas em obras rodoviárias.

A avaliação por meio de uma escala semântica no M-MACBETH, de acordo com Rodrigues (2018), pode ser demorada dependendo da quantidade de dados a serem julgados e proporcionar mais dificuldade para os avaliadores no momento do julgamento do que uma escala numérica. Porém, os decisores se adaptaram ao método no momento dos julgamentos. Além disso, Rodrigues (2018) e Sequinel (2019) concluíram que as funções de valor geradas pelo programa se mostram simples e intuitivas.

6 MÉTODO

Neste capítulo é abordado o método utilizado no desenvolvimento do Índice de Condição Atual do Pavimento (ICAP). O método baseou-se na metodologia MACBETH e foi constituído por cinco fases: estruturação, avaliação, teste, validação e análise de sensibilidade, conforme sintetizado na Figura 5. Na fase de estruturação é abordado o processo de seleção dos critérios e níveis de desempenho para compor o índice e sua idealização dentro do *software* M-MACBETH. Na fase de avaliação é descrito o julgamento do nível de atratividade entre os componentes do ICAP, a obtenção das Funções de Valor Macbeth (FVM) e dos pesos dos critérios. Na fase de teste é apresentada e discutida a aplicação do índice em campo. A validação refere-se à comparação, por meio de análises estatísticas, dos resultados obtidos na aplicação do ICAP com outros métodos de avaliação. Por fim, na fase de análise de sensibilidade é descrito a estratégia utilizada para avaliar as consequências da alteração dos pesos dos critérios.

Figura 5 – Etapas de desenvolvimento do ICAP



Fonte: o próprio autor

6.1 FASE DE ESTRUTURAÇÃO

A fase de estruturação compreendeu o levantamento e a organização dos elementos para compor o índice. Nesta seção são abordados a investigação dos critérios para indicar a condição de pavimentos flexíveis urbanos e dos níveis de desempenho que um pavimento pode apresentar, a operacionalização do modelo no programa M-MACBETH e a escolha dos níveis de referência.

A escolha dos critérios para formar o ICAP foi baseada no potencial para indicar a condição dos pavimentos e na facilidade de obtenção dos dados. Desse modo, optou-se por selecionar os critérios e níveis de desempenho adotados por Salviatto *et al.* (2020). Nesta ocasião, os autores definiram os componentes do índice por meio de um *brainstorming*. Essa técnica consiste em propor uma solução para um problema por meio da discussão e da exposição das ideias dos participantes. A ideia de um *brainstorming* é que o problema seja visto de diversas perspectivas para que se chegue a uma solução ideal. Desse modo, o grupo de participantes foi composto por 7 alunos de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina com diferentes formações profissionais: 5 engenheiros civis, 1 arquiteto e 1 geólogo.

Visto que a escolha dos critérios e dos níveis de desempenho foi baseada na discussão entre indivíduos de diferentes níveis de conhecimento e valores, pode-se dizer que o método utilizado pelos autores seguiu os princípios do MCDA-C. Portanto, justifica-se a utilização dos componentes adotados por Salviatto *et al.* (2020).

A próxima etapa foi a estruturação dos elementos dentro do programa M-MACBETH. O primeiro passo foi a definição do problema decisório a ser discutido que, neste caso, trata-se do desenvolvimento de um índice de condição de pavimentos. Em seguida, foram inseridos os critérios e os níveis de desempenho. Ressalta-se que o M-MACBETH não permite que seja realizada a análise conjunta de níveis hierárquicos diferentes, ou seja, não é possível estruturar em um mesmo arquivo os critérios e subcritérios. Assim, os critérios que continham subcritérios foram estruturados em arquivos diferentes. Nestes novos arquivos, apenas por motivo de execução do programa, os critérios passaram a ser o problema decisório e os subcritérios passaram a representar os critérios com seus respectivos níveis de desempenho.

A última etapa da fase de estruturação foi a escolha dos níveis de referência. No programa, um nível de desempenho é selecionado como “bom” (satisfatório) e tem pontuação ancorada em 100 e outro nível é selecionado como “neutro” (limite aceitável mínimo) e tem pontuação ancorada em 0. Níveis acima do nível “bom” recebem pontuação superior a 100 e níveis inferiores ao “neutro” recebem pontuações negativas.

Como o próprio nome diz, o limite aceitável mínimo é neutro, ou seja, ele não é satisfatório e nem insatisfatório. Como os níveis de desempenho selecionados para elaborar o ICAP não apresentavam essa condição neutra e nem situação melhor que a considerada satisfatória, em todos os critérios o melhor cenário possível foi tomado como nível “bom” e o cenário mais crítico foi tomado como nível “neutro”. Desse modo, o índice final possuiu uma escala de 0 a 100. Na Figura 6 é apresentado um exemplo de inserção de níveis de desempenho quantitativos para um critério “C” e seus níveis tomados como “bom” (célula verde) e “neutro” (célula azul).

Figura 6 – Exemplo de inserção de níveis de referência do critério "C"

Propriedades de Critério "C"

Nome: Critério "C" Nome abreviado: C

Comentários:

Base de comparação:

as opções

as opções + 2 referências

níveis qualitativos de performance:

níveis quantitativos de performance:

critério

Níveis de performance:

-	+	Nível quantitativo
1		50
2		100
3		150
4		200

Indicador: _____

Abreviado: _____ Unidade: _____

Fonte: o próprio autor

Para avançar para a fase de julgamento de atratividade, o programa exige que todos os fatores estejam agrupados em um mesmo arquivo. Desse modo, os

critérios que foram estruturados em arquivos diferentes foram reunidos em apenas um arquivo. Além disso, o comando para realizar o julgamento apenas é liberado quando todos os critérios apresentam os seus níveis de referência estruturados. Como cada subcritério apresenta níveis de referência distintos, foi necessário elaborar um conjunto de níveis de desempenho para representar os critérios que foram estruturados em arquivos distintos.

Assim, para esses fatores foram criados os seguintes níveis quantitativos: 100, 75, 50, 25 e 0, que representam a pontuação que eventualmente poderia ser atingida pelo pavimento neste critério. De modo a seguir a lógica adotada para selecionar os níveis de referência, a pontuação 100 foi adotada como o nível “bom” e a pontuação 0 como o nível “neutro”.

6.2 FASE DE AVALIAÇÃO

A fase de avaliação compreendeu o julgamento do nível de atratividade e a modelagem do ICAP. Essa fase contemplou a ordenação dos elementos na matriz de julgamentos, avaliação par a par por meio de valores semânticos, transformação das informações ordinais em cardinais, obtenção das Funções de Valor MACBETH (FVM), dos pesos e, por fim, a estruturação do índice. Todos os julgamentos nessa fase foram realizados por alunos de pós-graduação em Engenharia Civil na linha de pesquisa em Transportes, sendo 4 engenheiros civis, 1 arquiteto e 1 geólogo. Ressalta-se que 4 dos 6 avaliadores estavam também presentes na etapa de definição dos critérios no trabalho de Salviatto *et al.* (2020).

A ordenação dos elementos refere-se à hierarquização dos critérios e dos níveis de desempenho a ser comparados na matriz de julgamentos. O elemento mais atrativo para se atingir o objetivo foi posicionado na primeira coluna à esquerda na matriz de julgamentos. Na sequência foram inseridas as demais opções em ordem decrescente de atratividade. Desse modo, a alternativa menos atrativa foi posicionada na primeira coluna à direita. Na Figura 7 está representada a matriz de julgamentos de um critério “X”, na qual os níveis estão posicionados em ordem decrescente de atratividade. Neste exemplo a ordenação já foi validada pelos julgadores e testada pelo M-MACBETH (julgamentos consistentes).

Figura 7 – Matriz de julgamentos dos níveis de desempenho de um critério "X"

	Nível 1 (mais atrativo)	Nível 2	Nível 3	Nível 4 (menos atrativo)	
Nível 1 (mais atrativo)	nula	positiva	positiva	positiva	extrema
Nível 2		nula	positiva	positiva	mt. forte
Nível 3			nula	positiva	forte
Nível 4 (menos atrativo)				nula	moderada
					fraca
					mt. fraca
					nula

Julgamentos consistentes

Fonte: o próprio autor

Assim, para cada critério foi discutido entre os julgadores qual seria a ordenação correta dos níveis de desempenho até que se chegou a uma configuração final. Após isso, a ordenação foi validada e assim pode-se iniciar o julgamento de atratividade par a par.

O mesmo processo de ordenação foi realizado na comparação entre critérios. Entretanto, o nível de atratividade dos critérios em um primeiro momento não é tão claro quanto a dos níveis de desempenho. Desse modo, os critérios foram ordenados segundo os pesos finais obtidos no trabalho de Salviatto *et al.* (2020).

A ordenação das informações é realizada para que se possa definir quais opções são mais atrativas. Para definir quanto uma opção é mais atrativa que outra, foi necessário transformar as informações ordinais em cardinais. Esta transformação foi realizada por meio do julgamento semântico par a par entre as opções avaliadas.

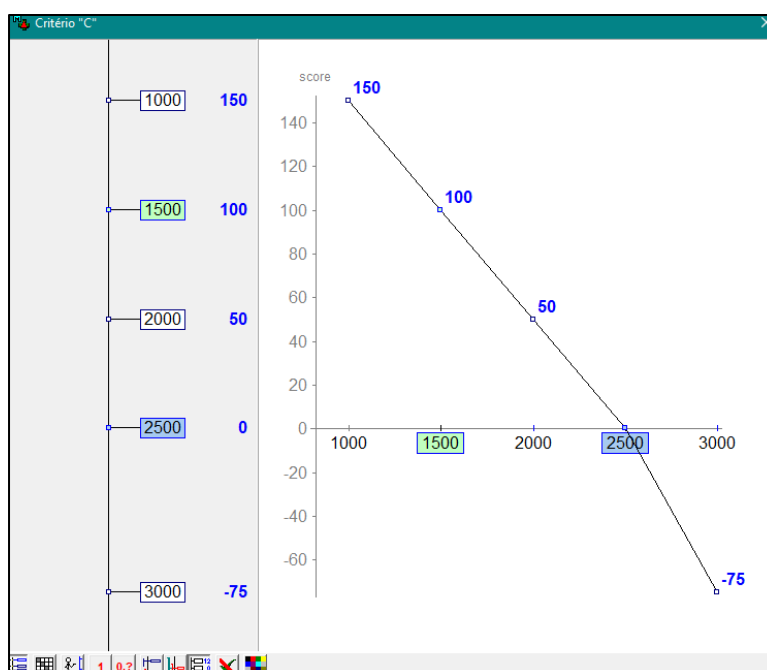
Desse modo, para realizar o julgamento de diferença de atratividade, os julgadores deveriam responder à seguinte pergunta: “Sendo a opção A mais atrativa que a opção B, qual a diferença de atratividade entre A e B: muito fraca, fraca, moderada, forte, muito forte ou extrema? “. Em cada análise, os julgadores discutiram entre si o melhor ou os melhores itens da escala semântica, já que cada comparação poderia ser respondida com apenas uma alternativa da escala semântica (diferença de atratividade muito fraca, por exemplo) ou várias (diferença de atratividade muito fraca, fraca e moderada, por exemplo).

Uma vez que as opções avaliadas estavam ordenadas por ordem de atratividade foi necessário realizar as comparações apenas acima da diagonal principal. Primeiramente foi comparada a opção mais atrativa com as demais opções. Em seguida, a segunda opção mais atrativa com as demais opções e assim por diante, até que todas as células acima da diagonal principal estivessem preenchidas. A cada

juízo realizado o programa avaliou a consistência dos julgamentos. Quando estes se mostraram inconsistentes com os julgamentos realizados anteriormente, o programa exibiu um alerta e sugeriu opções de valores semânticos para que o juízo fosse consistente. Nesses casos, os avaliadores discutiram novamente a melhor opção entre às sugeridas pelo programa para avaliar a diferença de atratividade entre o par de opções.

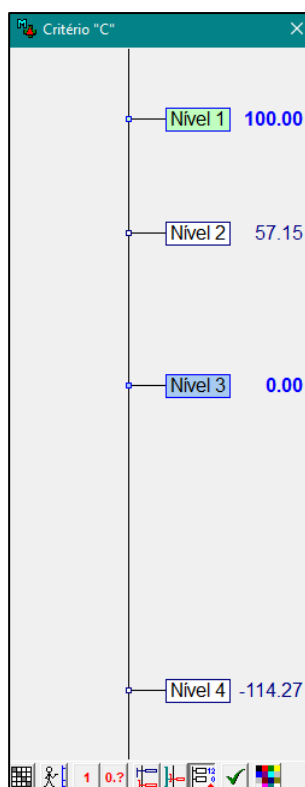
Finalizados os julgamentos entre todos os níveis de desempenho, foram geradas as FVM parciais. Para critérios com níveis de desempenho do tipo quantitativo, a FVM foi representada por um gráfico cartesiano. Na Figura 8 é representado o gráfico de um critério “C”. Cada nível de desempenho (eixo x) é associado a uma pontuação (eixo y) conforme a reta da equação correspondente ao intervalo que se encontra o nível de desempenho. Por meio das FVM é possível obter a pontuação de níveis intermediários aos criados.

Figura 8 – Exemplo de escala para níveis quantitativos de desempenho



Fonte: o próprio autor

Para níveis de desempenho do tipo qualitativo a escala apresenta-se no formato de termômetro (Figura 9). Entretanto, nesse tipo de escala somente é possível obter as pontuações dos níveis adotados para o critério, não sendo possível desse modo, obter resultados intermediários.

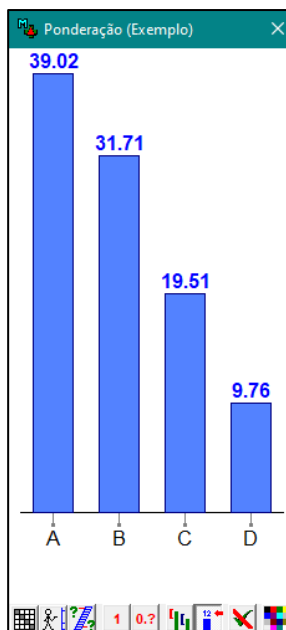
Figura 9 – Exemplo de escala para os níveis qualitativos de desempenho

Fonte: o próprio autor

Nos casos em que os julgadores concluíram que as pontuações definidas para cada nível de desempenho não representavam a diferença de atratividade entre eles, a escala foi modificada dentro dos limites delimitados pelo programa, de modo que não fossem descaracterizados os julgamentos realizados anteriormente. Assim, ao final desta etapa, foram obtidas as FVM definitivas.

No caso dos critérios, após a finalização dos julgamentos, foram gerados os pesos em forma de histograma, conforme o exemplo com quatro critérios (A, B, C e D) apresentado na Figura 10. O histograma foi analisado pelos julgadores e, assim como para a escala dos níveis de desempenho, foi modificada de acordo com a preferência dos avaliadores e com o intervalo imposto pelo programa.

Figura 10 – Exemplo de histograma representando os pesos finais dos critérios



Fonte: o próprio autor

A última etapa da fase de avaliação foi a modelação do ICAP. O método escolhido foi o modelo aditivo de agregação. Este método visa agregar n critérios em um critério único, conforme representado pela Equação 8, onde p_i representa os pesos dos critérios c_i .

$$ICAP = p_1c_1 + p_2c_2 + \dots + p_nc_n \quad (8)$$

6.3 FASE DE TESTE

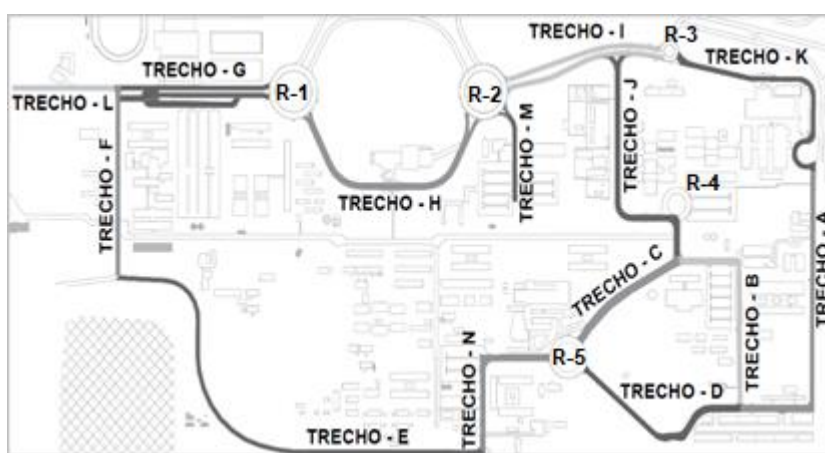
A fase de teste correspondeu a aplicação do ICAP em campo. Além de fornecer os dados necessários para a realização das próximas fases, a aplicação do índice teve como objetivo observar as dificuldades na obtenção dos dados e os possíveis pontos a serem modificados.

A aplicação do índice ocorreu no *campus* da Universidade Estadual de Londrina (UEL). A UEL conta com uma malha viária de aproximadamente 7,5 km de extensão onde circulam diariamente bicicletas, automóveis, ônibus e caminhões de manutenção da universidade. Com uma comunidade universitária de mais de 21000, a escolha desse local para aplicação do ICAP ocorreu por conta do considerável fluxo

diário de pessoas e veículos e que resulta em pavimentos de diversos níveis de qualidade, assim como a área urbana de qualquer cidade.

Devido as diferentes configurações quanto ao número de faixas de rolamento, largura e presença de áreas de estacionamento e para facilitar a avaliação e registro de dados, a malha viária do *campus* foi dividida em 19 trechos delimitados pelos pontos de interseção, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Divisão da malha viária do campus em trechos



Fonte: o próprio autor

Os trechos foram divididos em seções e estas em áreas menores denominadas Unidades Amostras (UAs). Cada UA possuía a largura de uma faixa de rolamento da via e comprimentos variáveis, de modo que apresentassem área de 135 m² a 315 m², conforme especificado na ASTM (2018). Ao todo foram avaliadas 199 UAs com diferentes estruturas físicas, idades de intervenção, declividades, tipos de defeitos e tráfego.

A informação necessária para obter a pontuação dos critérios Serventia Atual (SA) e Defeitos no Pavimento (DP) foram obtidas por meio de avaliação subjetiva e objetiva, respectivamente. A avaliação subjetiva da condição dos pavimentos foi baseada na norma 009/2003-PRO (DNIT, 2003b). Para atender aos objetivos da pesquisa, algumas adaptações no método indicado na norma foram realizadas, como a realização da avaliação por meio de caminhada, indicação de notas entre 0 e 100 pontos e a utilização de uma escala visual.

A avaliação foi realizada por 9 graduandos e 3 mestrandos em engenharia civil da Universidade Estadual de Londrina. Os avaliadores foram divididos em dois

painéis de seis avaliadores. O primeiro painel, denominado Painel_{Info_básica}, recebeu as instruções básicas a respeito da execução da avaliação subjetiva, como, por exemplo, considerar apenas a situação presente do pavimento, não basear sua avaliação nas notas dadas as UAs avaliadas anteriormente, não interagir com os demais integrantes do painel, não considerar os aspectos relacionados ao projeto geométrico e de sinalização da via e que não há nota certa ou errada. O segundo painel, denominado Painel_{Escala_visual}, recebeu, além das instruções básicas de procedimento da avaliação subjetiva, a escala visual desenvolvida por Pereira (2019). Aos avaliadores desse painel foram passadas instruções de uso da escala visual, explicação das características de cada intervalo de pontuações e realizado o esclarecimento de eventuais dúvidas.

Cada integrante dos painéis observou os defeitos e irregularidades existentes no pavimento e avaliou o desconforto que estes poderiam causar aos usuários durante a viagem sobre tal via. Ao final de cada UA os avaliadores registraram suas notas em um formulário individual. A avaliação foi realizada simultaneamente pelos dois painéis e aos fins de semana.

Após o término da avaliação subjetiva foi realizada a avaliação objetiva conforme o método do *Pavement Condition Index* (PCI), cujo procedimento é descrito na ASTM (2018). O PCI foi escolhido por possuir um método mais completo e exigir um maior nível de informações que os demais métodos de avaliação objetiva.

Previamente à aplicação do PCI, os avaliadores receberam a norma que descreve o procedimento de execução do método e um manual com instruções sobre identificação de defeitos no pavimento. O tipo, a severidade e a extensão dos defeitos encontrados em cada UA foram levantados por meio de caminhada sobre a malha viária da universidade e os dados foram registrados em planilhas específicas.

Os dados levantados na avaliação objetiva foram utilizados para calcular, além do PCI, o índice de condição de pavimento baseado na Matriz de Valores Fixos (ICP_{MVF}), cujo procedimento é descrito em Zanchetta (2017). Embora o ICP_{MVF} possua procedimentos distintos, é possível obter as informações para o seu cálculo nos dados levantados por meio do PCI. Por exemplo, as áreas dos defeitos e das UAs foram utilizadas para classificar a extensão do defeito pelo ICP_{MVF} e o nível de severidade foi considerado equivalente entre os métodos.

Quanto aos tipos de defeitos, o ICP_{MVF} considera cinco tipos: buraco, remendo, trinca por fadiga, deformação permanente e desgaste. Ressalta-se que o

método do PCI não considera um defeito denominado Desgaste. A definição de Zanchetta (2017) para este defeito com nível de severidade baixo equivale à definição do defeito Intemperismo na ASTM (2018). Para as severidades média e alta, a definição corresponde ao defeito Desintegração. Este defeito foi considerado como equivalente ao defeito Desgaste por apresentar definição mais próxima do que o defeito “Intemperismo”. Saliencia-se também que a extensão do defeito Buraco no ICP_{MVF} foi determinada de forma semelhante ao PCI, ou seja, por meio da relação quantidade de buracos e área da UA, uma vez que em Zanchetta (2017) não é esclarecido a forma de determinação da extensão desse tipo de defeito.

A obtenção dos dados dos demais critérios foram realizadas conforme os métodos indicados por Salviatto *et al.* (2020). Assim, as informações para obter o VTO da via foram levantadas por meio de dois procedimentos: contagem *in loco* e itinerário *online* da empresa responsável pela grande maioria dos ônibus que circulam pelo *campus*. As cotas e os comprimentos das UAs para obter o DL das vias foram obtidos por meio do *software* Google Earth. Por fim, o abaulamento da via para indicar o DNG foi mensurado por meio do *app Inclinometer*.

Uma vez que foram testados dois métodos para obter os dados necessários para o cálculo dos critérios SA e VTO, cada UA teve sua condição avaliada em quatro cenário distintos, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Cenários de obtenção do ICAP

Cenário	Índice	Descrição
1	$ICAP_{Escala\ visual + Online}$	<ul style="list-style-type: none"> • SA atribuído pelo Painel_{Escala_visual} • VTO obtido por contagem <i>Online</i>
2	$ICAP_{Info\ básica + In\ loco}$	<ul style="list-style-type: none"> • SA pelo Painel_{Info_básica} • VTO por contagem <i>In loco</i>
3	$ICAP_{Escala\ visual + In\ loco}$	<ul style="list-style-type: none"> • SA pelo Painel_{Escala_visual} • VTO por contagem <i>In loco</i>
4	$ICAP_{Info\ básica + Online}$	<ul style="list-style-type: none"> • SA pelo Painel_{Info_básica} • VTO por contagem <i>Online</i>

Fonte: o próprio autor

Para observar se os diferentes métodos de obtenção dos critérios SA e VTO resultaram em modificações significativas no índice de condição das UAs, foram realizados testes de correlação de *Pearson* entre os ICAPs obtidos nas 199 UAs nos quatro cenários.

Para ilustrar os resultados da avaliação da condição dos pavimentos do *campus*, a escala do ICAP foi dividida em classificações conforme a escala do PCI. Assim, foi elaborado um mapa na qual as UAs foram representadas com a cor da classificação correspondente à sua condição, conforme paleta de cores indicada na (ASTM, 2018).

6.4 FASE DE VALIDAÇÃO

De posse dos resultados obtidos na fase de teste, foi realizada a comparação dos resultados obtidos na aplicação do ICAP com os resultados obtidos por meio do PCI, ICP_{MVF} e avaliações subjetivas, na qual a avaliação do $Painel_{Escala_visual}$ resultou no VSA_{Escala_visual} e a avaliação do $Painel_{Info_básica}$ resultou no $VSA_{Info_básica}$. Uma vez que foi utilizada a mesma escala de pontuação (0 a 100 pontos) em todos os métodos, não foi necessário realizar a adequação das escalas. A comparação foi realizada por meio de análise gráfica e das classificações atribuídas às UAs, do teste de hipóteses de Friedman, da análise dos erros e, por fim, das estratégias indicadas de intervenção no pavimento.

6.4.1 Comparação gráfica dos índices e das classificações

A primeira etapa da fase de validação foi a comparação dos resultados obtidos pelo ICAP com os demais índices por meio de análise gráfica. Para isso, foram elaborados gráficos com as notas indicadas pelos índices às 199 UAs avaliadas.

Ainda nesta etapa, foram comparadas as classificações atribuídas pelos índices à condição dos pavimentos. Para realizar a comparação das classificações, a escala de todos os índices analisados foi dividida conforme a escala do PCI, que apresenta intervalos de pontuação para cada classificação da condição dos pavimentos.

6.4.2 Teste de Friedman

Em seguida, foi realizado um teste de hipóteses para verificar se os índices poderiam ser considerados como estatisticamente equivalentes. Em função da não normalidade dos dados e dos índices terem sido aplicados nas mesmas UAs (amostras dependentes ou pareadas), foi utilizado o teste de Friedman.

O teste de Friedman é utilizado na comparação de três ou mais grupos de dados. O teste considera os possíveis elementos heterogêneos entre as UAs, como, por exemplo, as diferenças de condição dos pavimentos, de declividade e de volume de tráfego de ônibus. Desse modo, cada UA da malha viária do *campus* foi tomada como um bloco (parcelas homogêneas dentro de uma região heterogênea) e os índices foram tomados como os tratamentos (condições impostas a cada um dos blocos).

Por meio do teste de Friedman foi verificado a igualdade da mediana dos índices comparados. Assim, para um nível de significância de 0,05 ($\alpha = 5\%$) foram analisadas as seguintes hipóteses:

H₀: Não existe diferença significativa entre os índices;

H₁: Existe diferença significativa em pelo menos um dos índices;

A aceitação ou não da hipótese nula foi verificada por meio do p-valor. Nos casos em que o p-valor foi maior que o valor de α , a hipótese nula de que não existe diferença significativa entre os índices foi aceita. Já nos casos em que o p-valor foi menor que α , aceitou-se a hipótese alternativa de que existe diferença significativa em pelo menos um dos índices analisados.

Uma vez que foram avaliados mais de três grupos, foi necessário verificar qual dos índices era significamente diferente dos demais. Para isso, foi realizada uma análise *post-hoc* por meio do teste de Nemenyi. Este procedimento foi utilizado por se tratar de um teste aplicado após testes não paramétricos com três ou mais grupos. A interpretação dos resultados obtidos por meio do teste de Nemenyi é equivalente à do teste de Friedman, ou seja, para um p-valor maior que α aceita-se a hipótese nula de que não há diferença entre as medianas dos índices e rejeita-se esta hipótese nos casos em que o p-valor é menor que α .

6.4.3 Análise dos erros

Uma vez que o teste de hipótese apenas indicou se as variações do ICAP eram estatisticamente homogêneas aos demais índices sem indicar a ordem de proximidades, a terceira etapa da validação foi a análise do Erro Absoluto Médio (MAE) e da Média Absoluta do Erro Relativo (MARE), de forma a verificar para qual índice o ICAP apresentou a menor diferença. O MAE corresponde à diferença absoluta entre o valor real (VR) e o valor aproximado (VA) para n observações, conforme Equação 9.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |VR - VA| \quad (9)$$

A Média Absoluta do Erro Relativo (MARE) pode ser obtida por meio da Equação 10. Em ambas as análises, o PCI, o ICP_{MVF} , o VSA_{Escala_visual} e o $VSA_{Info_básica}$ foram tomados como o VR e o ICAP como o VA.

$$MARE = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{VR - VA}{VR} \right) * 100 \quad (10)$$

Considerou-se que quanto menor os valores de MAE e MARE, mais próximos estavam os valores dos índices. Com isso, pretendeu-se verificar se era possível obter os mesmos valores dos demais índices por meio de um método mais prático e que se baseia em múltiplos aspectos da via para avaliar a condição atual de pavimentos flexíveis urbanos.

6.4.4 Comparação das estratégias de intervenção

As estratégias de intervenção a serem adotadas no pavimento, de acordo com as pontuações obtidas por meio de cada método, foi a última comparação realizada entre os resultados do ICAP e dos demais índices de condição.

Primeiramente, foram comparadas as estratégias de intervenção indicadas por cada método a cada UA. Em seguida, foram comparadas as estratégias apontadas pelos métodos a cada trecho avaliado. Uma vez que cada trecho é composto por várias UAs, foi tomada como pontuação representativa de cada trecho a média das

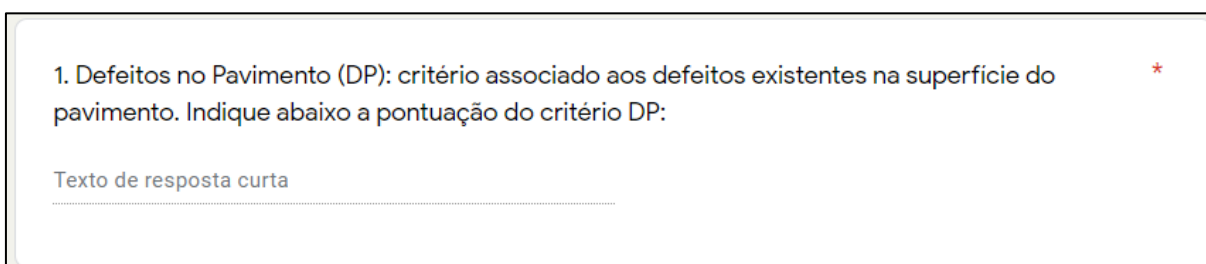
pontuações das UAs que as compõem. Assim, cada pontuação foi associada a uma estratégia de intervenção. Para isso, foi adotada a classificação indicada por Shahin (2005).

6.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Uma vez que a obtenção dos pesos dos critérios e subcritérios foi realizada por meio de julgamentos subjetivos do grupo de avaliadores, foi necessário realizar a análise de sensibilidade do modelo desenvolvido, ou seja, verificar o comportamento do ICAP frente às alterações nos pesos dos critérios.

Para isso, foi solicitada a opinião de cinco profissionais envolvidos com infraestrutura de transportes. Por meio de um formulário desenvolvido no *Google Forms*, foi feita a seguinte solicitação aos profissionais: “De acordo com sua opinião e experiência, 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 da relação do critério com a condição do pavimento (0 ponto equivale a nenhuma influência e 100 pontos equivale a total influência)”. Foi informado também que o somatório dos pontos atribuídos aos critérios deveria resultar em 100 pontos. Em seguida, foram apresentados os critérios e uma breve explicação da influência dos critérios na condição da superfície do pavimento. Na Figura 12 é apresentado o trecho do formulário no qual os profissionais deveriam atribuir uma pontuação para o critério “Defeitos no Pavimento”. A média das pontuações atribuídas pelos profissionais foi tomada como o peso de cada critério.

Figura 12 – Trecho do formulário enviado aos profissionais



1. Defeitos no Pavimento (DP): critério associado aos defeitos existentes na superfície do pavimento. Indique abaixo a pontuação do critério DP: *

Texto de resposta curta

.....

Fonte: o próprio autor

Os pesos obtidos por meio dos julgamentos no M-MACBETH foram comparados com os pesos segundo a opinião dos especialistas e com os pesos do ICS-PF, os quais foram obtidos por meio do método AHP. A comparação entre os pesos dos índices foi possível pois ambos possuem os mesmos critérios. Assim, foram definidas 3 alternativas para realizar a análise de sensibilidade no VIP *Analysis*:

- Alternativa 1 (a1): ICAP composto pelos pesos definidos nessa pesquisa por meio do método MACBETH;
- Alternativa 2 (a2): ICAP composto pelos pesos obtidos por meio da consulta aos profissionais envolvidos com infraestrutura de transportes;
- Alternativa 3 (a3): ICS-PF composto pelos pesos definidos na pesquisa de Salviatto *et al.* (2020) por meio do método AHP.

Quanto à ordenação dos critérios, há duas possibilidades de estudo no VIP *Analysis*. Na primeira possibilidade, não é definida uma ordenação para os critérios, ou seja, o software tem liberdade total para analisar o desempenho das alternativas quanto ao valor mínimo, valor máximo e arrependimento. Na segunda possibilidade é adotada uma ordenação para os critérios. Nessa situação, o *software* calcula os valores mínimos e arrependimento máximo com base na restrição na ordem dos critérios. Assim, foram definidas quatro análises:

- Análise 1: ordenação livre dos critérios;
- Análise 2: critérios ordenados de acordo com os pesos da alternativa 1;
- Análise 3: critérios ordenados de acordo com os pesos da alternativa 2;
- Análise 4: critérios ordenados de acordo com os pesos da alternativa 3.

Em cada análise foram observados os valores mínimos e máximos e os valores de arrependimento. O valor mínimo refere-se ao resultado apresentado pela alternativa na situação menos favorável (uso de pesos menos favoráveis para uma determinada alternativa). A alternativa que apresentou o maior valor mínimo foi tomada como a melhor alternativa. Em seguida, esse valor foi comparado com o valor máximo, que representa o resultado apresentado por uma alternativa na situação mais favorável. Uma determinada alternativa foi considerada mais robusta quando

apresentou a menor amplitude entre os valores mínimo e máximo. Já o arrependimento máximo, obtido na comparação par a par entre as alternativas, representa a diferença entre o desempenho de determinada alternativa e o desempenho das demais na situação menos favorável, de modo que, quanto menor o arrependimento máximo, melhor o desempenho da alternativa. Um arrependimento máximo igual ou menor que zero na comparação da alternativa A e B representa que a alternativa A dominou a alternativa B. Nestes casos, a alternativa A foi tomada como a melhor solução.

7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir do procedimento metodológico adotado, bem como sua análise. São abordados os resultados quanto à: estruturação do ICAP, avaliação do nível de atratividade dos critérios e dos níveis de desempenho, obtenção das funções de valor e do modelo do índice. São apresentados ainda os resultados da aplicação do ICAP em campo e da comparação com outros índices de condição de pavimento, bem como a análise de sensibilidade do modelo desenvolvido.

7.1 FASE DE ESTRUTURAÇÃO

Os critérios e subcritérios definidos por Salviatto *et al.* (2019), com suas respectivas definições, abreviaturas, níveis de desempenho e métodos de obtenção foram selecionados para compor o ICAP. A seguir, são descritos os critérios e os níveis de referência adotados como “Bom” (representados na cor verde) e “Neutro” (representados na cor azul).

O critério Defeitos no Pavimento (DP) está associado aos defeitos existentes na superfície no pavimento. De modo a abranger o objetivo geral desta pesquisa de adotar critérios que tornassem mais prática a avaliação da condição do pavimento, foram considerados cinco tipos de defeitos: Buraco (BUR), Trinca por Fadiga (TF), Trilha de Roda (TR), Desgaste (DES) e Remendo (REM). Cada um dos defeitos é considerado como um subcritério de DP. Assim, cada um possui um peso e está associado a uma pontuação dentro do critério. O parâmetro que vai determinar a pontuação associada aos subcritérios é a existência dos defeitos no pavimento. Pode variar entre um valor mínimo (quando a UA possui o defeito) ou um valor máximo (quando a UA não possui o defeito). Como este critério possui apenas dois níveis de desempenho qualitativos, o nível “Não possui o defeito” foi adotado como o nível “Bom” e “Possui o defeito” como o nível “Neutro”, conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Níveis de desempenho dos subcritérios de DP

Níveis de desempenho
Não possui o defeito
Possui o defeito

Fonte: o próprio autor

O critério Serventia Atual (SA) refere-se ao nível de conforto e suavidade ao rolamento proporcionado pelo pavimento. O SA está relacionado com o Valor de Serventia Atual (VSA) do pavimento obtido nas avaliações subjetivas e cada VSA corresponde a um determinado valor de SA. Para definir os níveis de desempenho deste critério no M-MACBETH, foram adotados os valores limítrofes da escala de classificação do PCI, conforme representado na Tabela 8. Note que o VSA igual a 100 foi tomada como o nível “Bom” e o VSA igual a 0 como o nível “Neutro”.

Tabela 8 – Níveis de desempenho do critério SA a partir do VSA

VSA
100
85
70
55
40
25
10
0

Fonte: o próprio autor

O Volume de Tráfego de Ônibus (VTO) refere-se à quantidade de ônibus que transitam pelo pavimento. Os níveis de desempenho do critério VTO estão baseados no volume de veículos coletivos no horário de pico. Assim, o VTO é encontrado a partir de três níveis de desempenho, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Níveis de desempenho do critério VTO

Volume de Ônibus no horário de pico
0
25
30

Fonte: o próprio autor

O critério Declividade Longitudinal (DL) refere-se a relação entre a diferença de cotas topográficas e o comprimento entre os pontos inicial e final do trecho de pavimento avaliado. Os níveis de desempenho para determinar o DL do pavimento são representados na Tabela 10.

Tabela 10 – Níveis de desempenho do critério DL

Declividade longitudinal do pavimento (%)
0
3
6
9
12

Fonte: o próprio autor

O critério Drenagem (DNG) está relacionado com as declividades transversal (abaulamento) e longitudinal da via que vão proporcionar um melhor ou pior escoamento da água na superfície do pavimento, uma vez que a água que atinge o pavimento não é devidamente escoada torna-se fonte de degradação do pavimento. Desse modo, o critério DNG possui dois subcritérios: Abaulamento (AB) e Declividade Longitudinal relacionado à Drenagem (DLD). Os níveis de desempenho para o subcritério AB são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Níveis de desempenho do subcritério AB

Abaulamento da via (%)
2,0
2,5
1,5
3,0
1,0
0,0

Fonte: o próprio autor

Em relação ao subcritério DLD, os mesmos valores obtidos para o critério DL são utilizados neste subcritério. Entretanto, como a declividade possui influência distinta no pavimento, entre o critério DL e o critério DNG, foram definidos níveis de desempenho distintos para DLD e são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Níveis de desempenho do subcritério DLD

Declividade longitudinal da via (%)
2,0
0,0

Fonte: o próprio autor

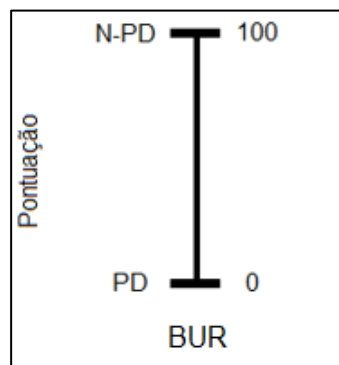
7.2 FASE DE AVALIAÇÃO

Após a estruturação dos critérios, subcritérios e níveis de desempenho e a escolha dos níveis de referência “Bom” e “Neutro” no programa M-MACBETH, passou-se a etapa de julgamento par a par a fim de obter os gráficos com as Funções de Valor MACBETH (FVM) dos níveis de desempenho e os pesos dos critérios e subcritérios.

A pontuação do pavimento no critério Defeitos no Pavimento (DP) está associada às pontuações obtidas em cada subcritério, ou seja, aos defeitos existentes no pavimento. Os níveis de desempenho dos defeitos são do tipo qualitativo: possui ou não possui o defeito. Desse modo, o gráfico de termômetro representou a pontuação dos subcritérios, no qual não existem pontuações intermediárias, apenas as pontuações dos níveis de desempenho definidos. Como cada subcritério possui apenas dois níveis de desempenho qualitativos, o nível “Não possui o defeito (N-PD)”

equivale a maior pontuação (100) e o nível “Possui o Defeito (PD)” à menor pontuação (0). Assim, qualquer que fosse o item semântico utilizado para definir a diferença de atratividade entre os dois níveis, a pontuação final seria a mesma. Na Figura 13 é apresentado o gráfico em forma de termômetro do subcritério Buraco (BUR) que é semelhante aos outros subcritérios.

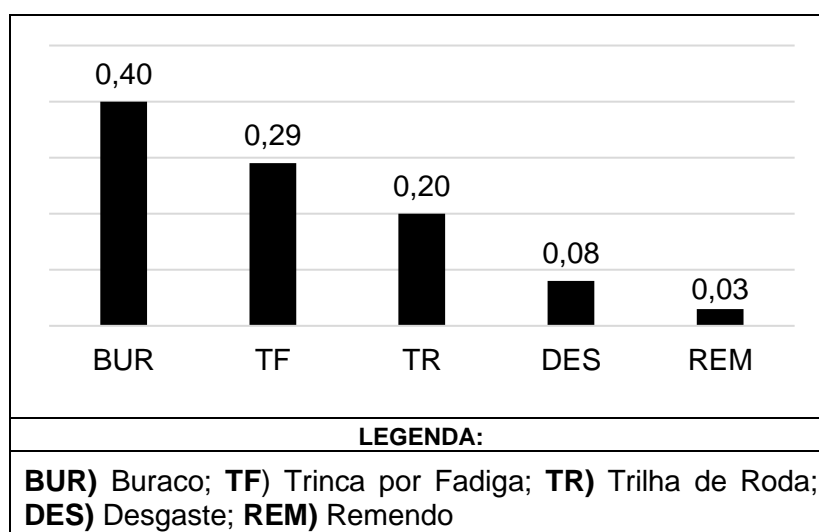
Figura 13 – Escala de pontuação do subcritério BUR



Fonte: o próprio autor

O julgamento entre o nível de atratividade dos subcritérios de DP resultou nos pesos dos defeitos, conforme apresentado no gráfico da Figura 14. Nota-se que, para os julgadores, o defeito BUR é o que possui mais influência na condição do pavimento, com quase metade da pontuação do critério DP. Por outro lado, para os avaliadores, o defeito REM é o que menos influencia na condição do pavimento.

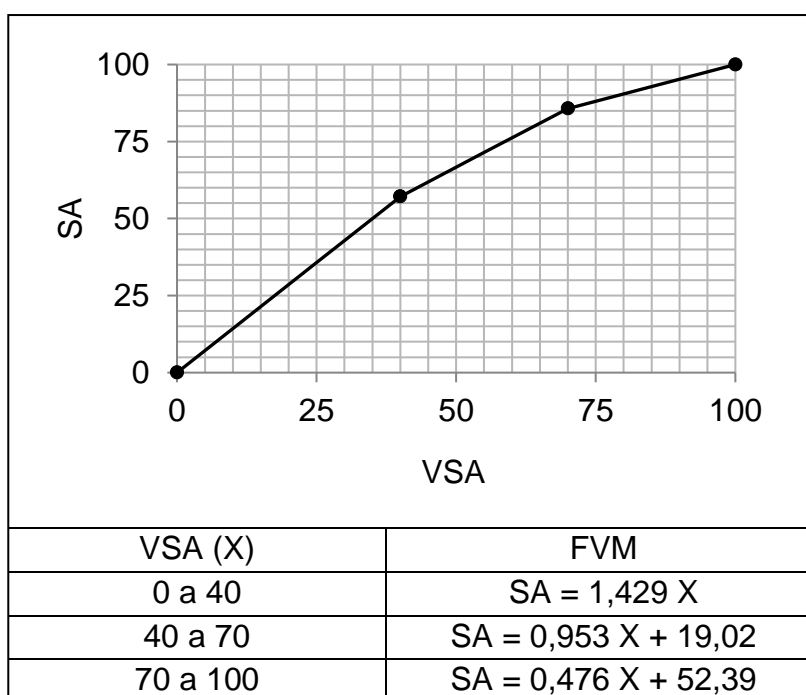
Figura 14 – Peso dos subcritérios de DP



Fonte: o próprio autor

Os níveis de desempenho do critério Serventia Atual (SA) dados de acordo com o VSA do pavimento foram julgados par a par de acordo com o nível de atratividade, de forma a gerar as FVM. Uma que vez que se trata de níveis do tipo quantitativo, a escala de pontuação do critério SA é dada na forma de gráfico cartesiano. Cada valor de VSA corresponde a uma pontuação ao SA, conforme ilustrado na Figura 15. Junto com a escala de pontuação são apresentados as FVM que determinam o valor de SA em função do VSA.

Figura 15 – Valor de SA em função do VSA



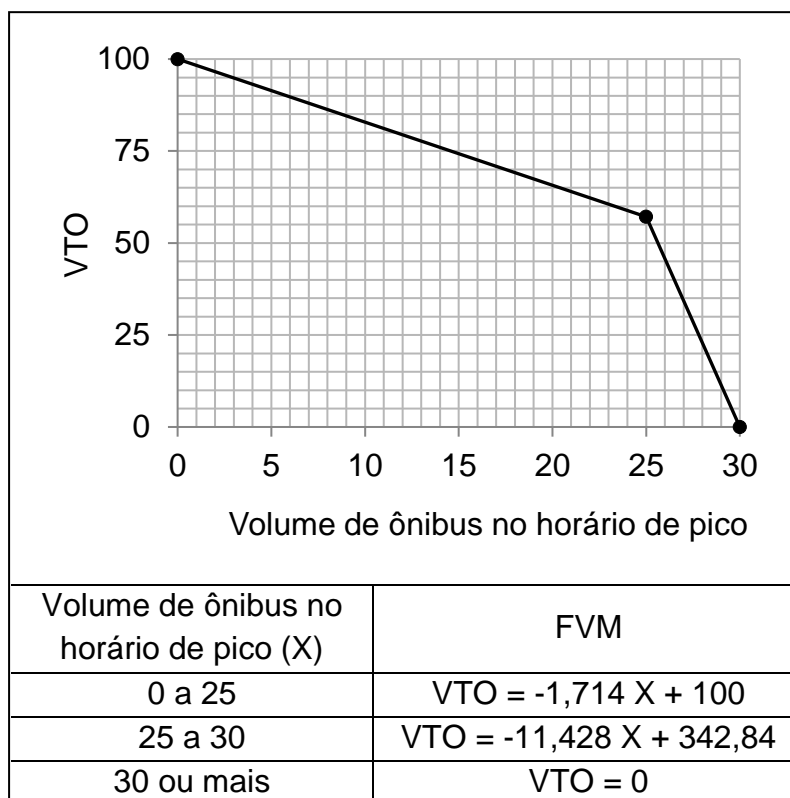
Fonte: o próprio autor

Como pode-se observar na escala de pontuações do critério SA, a maior variação de pontuação se encontra no intervalo de VSA compreendido entre 0 e 40 pontos. Segundo o julgamento dos avaliadores, quanto pior for o conforto e a suavidade ao rolamento proporcionado pelo pavimento, mais essa característica vai influenciar na condição do pavimento. Nota-se que, para valores acima de 40 pontos e, principalmente acima de 70 pontos, a FVM apresenta menor inclinação e, conseqüentemente, menor variação de pontuação.

O critério Volume de Tráfego de Ônibus (VTO) associa o número de ônibus que transitam pela via durante o horário de pico. Assim, foram julgados os níveis de desempenho que representam os intervalos de volume de ônibus, o que resultou na

escala de pontuação do critério VTO. Na Figura 16 estão representados a escala do critério VTO juntamente com as FVM de cada intervalo.

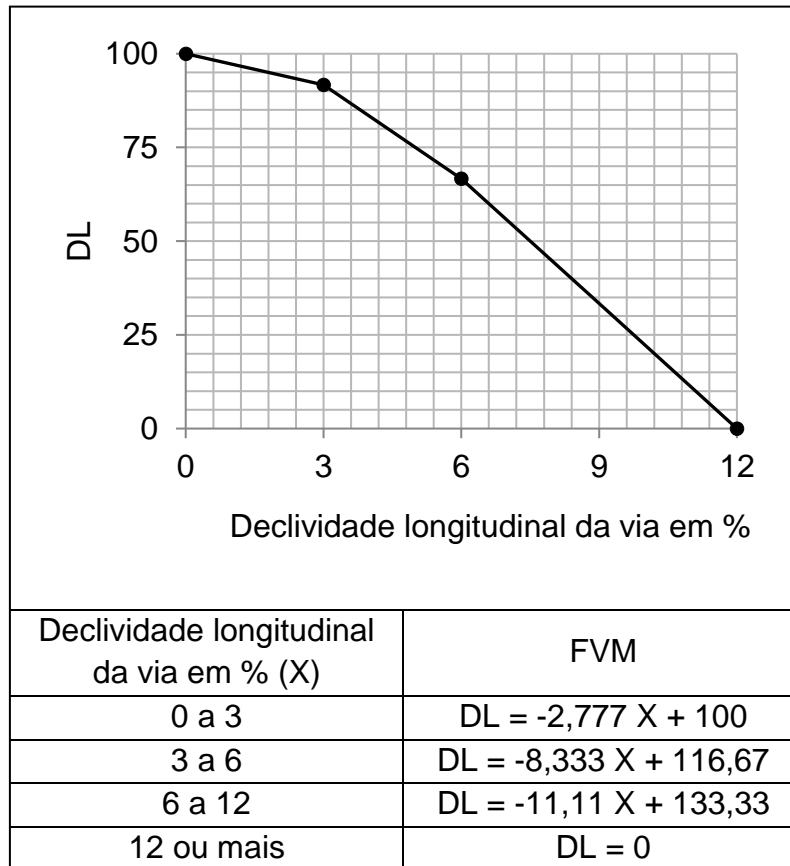
Figura 16 – Valor de VTO em função do volume de ônibus no horário de pico



Fonte: o próprio autor

A maior variação de pontuação se dá no intervalo com maior número de ônibus no horário de pico, de 25 a 30. Segundo os avaliadores, esses números de ônibus na via influenciam mais na condição do pavimento que um volume abaixo de 25 ônibus no horário de pico. Além disso, foi adotado que, para um volume maior que 30 ônibus, independentemente do valor, corresponde a pontuação 0 para VTO. Isto foi definido para que o critério não possuísse valores negativos e, conseqüentemente, para que o critério possuísse uma escala de valores de 0 a 100 pontos.

O próximo critério a ter os níveis de desempenho julgados foi o Declividade Longitudinal (DL). Este critério é composto por níveis quantitativos de desempenho e, desse modo, sua escala de pontuação é dada em forma de gráfico cartesiano, no qual correlaciona a declividade da via com uma pontuação. A escala de pontuação e as FVM para cada intervalo de declividade longitudinal são apresentadas na Figura 17.

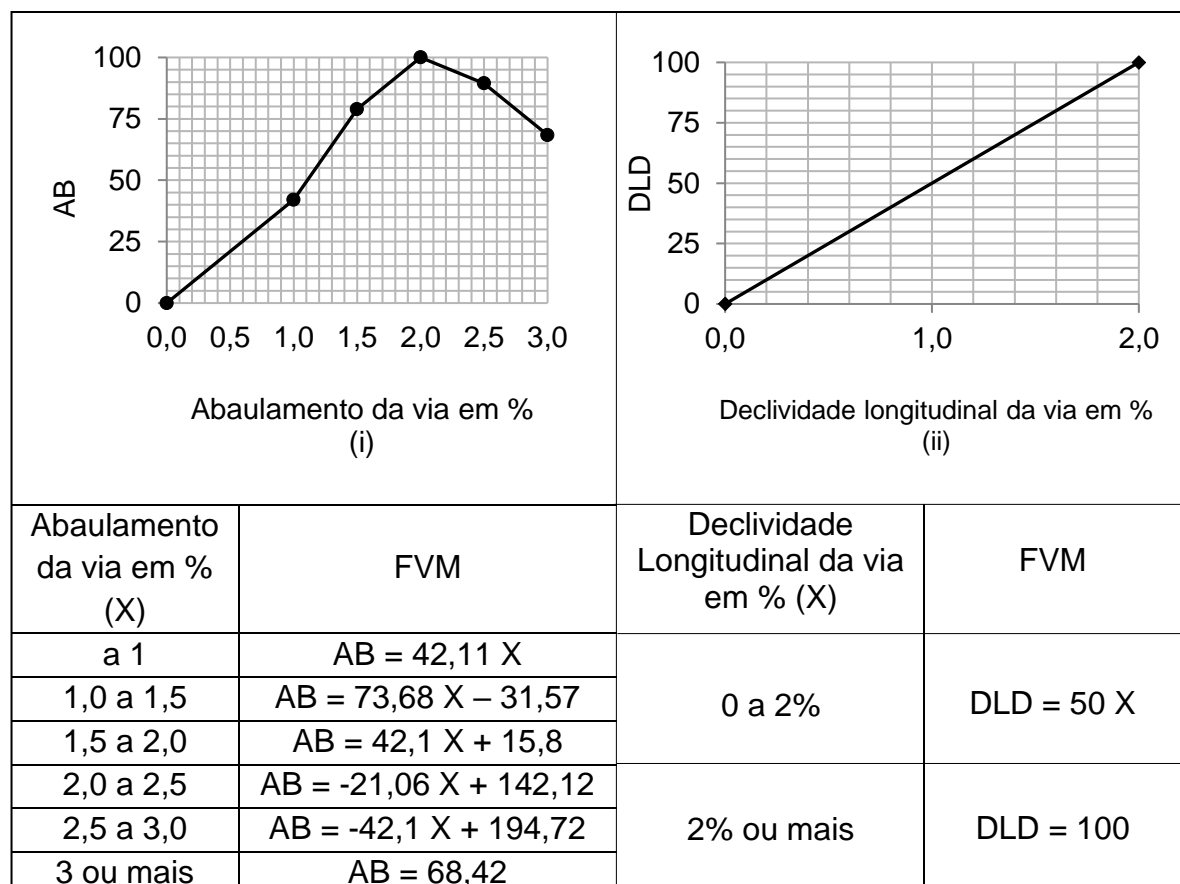
Figura 17 – Valor de DL em função da declividade longitudinal da via

Fonte: o próprio autor

De acordo com a comparação par a par dos níveis de desempenho de DL realizada pelos julgadores, as declividades longitudinais da via acima de 6% são as que possuem a maior influência sobre a condição do pavimento, uma vez a pontuação de DL decai com maior magnitude em relação as declividades menores que 6%. Além disso, vias com declividades maiores que 12% recebem a nota 0 no critério DL, independentemente do valor, para que a escala de pontuação de DL não possua valores inferiores a 0.

Por último foram julgados os níveis de desempenho do critério Drenagem (DNG). A pontuação deste critério é dependente da pontuação de seus dois subcritérios: Abaulamento (AB) e Declividade Longitudinal relacionado à Drenagem (DLD). Os dois subcritérios possuem diferentes níveis de desempenho e, portanto, escalas de pontuações distintas. As escalas dos subcritérios de DNG estão representadas na Figura 18 juntamente com as FVM de cada intervalo de níveis de desempenho.

Figura 18 – (i) Valor de AB em função do abaulamento da via; (ii) Valor de DLD em função da declividade longitudinal da via



Fonte: o próprio autor

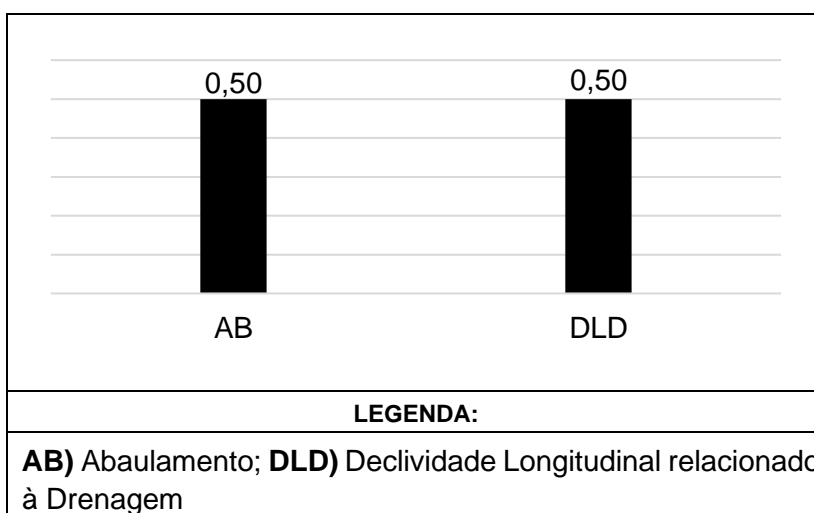
Pode-se observar que a pontuação do subcritério AB aumenta conforme aumenta o abaulamento da via. Entretanto, para valores maiores que 2% a pontuação começa a decair. Os julgadores consideraram que um abaulamento de 2% é o ideal para garantir a drenagem da água das faixas de rolamento para as sarjetas e que inclinações menores não garantem uma eficiente drenagem da água. Para inclinações maiores que 2%, embora garanta a drenagem da água, podem provocar outros problemas no pavimento, como o carregamento dos agregados que não estão totalmente fixos no pavimento. Por esse motivo, valores de abaulamento acima de 2% possuem, em geral, pontuação melhor que abaixo de 2%. Além disso, foi considerado uma porcentagem máxima de abaulamento da via de 3%. Para valores acima disso, considera-se a mesma pontuação que para abaulamento de 3% (68,42 pontos).

Em relação ao subcritério DLD, foram definidos apenas dois níveis de desempenho. Desse modo, a FVM de DLD é representado por uma reta, onde nos

extremos estão localizados os níveis de referência “Bom” (2% ou mais) e “Neutro” (até 2%). Pelo mesmo motivo da comparação do nível de atratividade dos subcritérios de DP, qualquer item semântico selecionado resultaria nas mesmas pontuações para os níveis de desempenho.

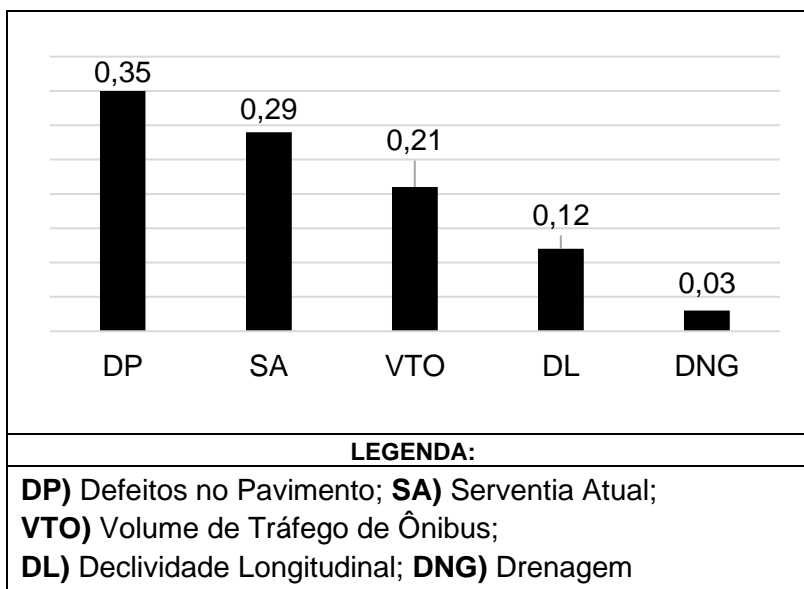
O julgamento entre o nível de atratividade dos subcritérios DNG resultou nos pesos de cada subcritério, conforme apresentado no gráfico de barras da Figura 19. Nota-se que, para os julgadores, o abaulamento e a declividade longitudinal da via possuem a mesma influência na condição do pavimento.

Figura 19 – Peso dos subcritérios de DNG



Fonte: o próprio autor

Após o término do julgamento dos níveis de desempenho e dos subcritérios, passou-se ao julgamento da diferença de atratividade entre os critérios. Os pesos são apresentados no gráfico de barras da Figura 20.

Figura 20 – Peso dos critérios de ICAP

Fonte: o próprio autor

O critério DP é, segundo os julgadores, o critério com maior peso na indicação da condição de pavimentos flexíveis, de modo que este critério representa mais de um terço do ICAP do pavimento. Por outro lado, o critério DNG possui o menor peso, apenas 3% do índice. Ainda, os critérios DP e SA juntos representam quase 65% do índice.

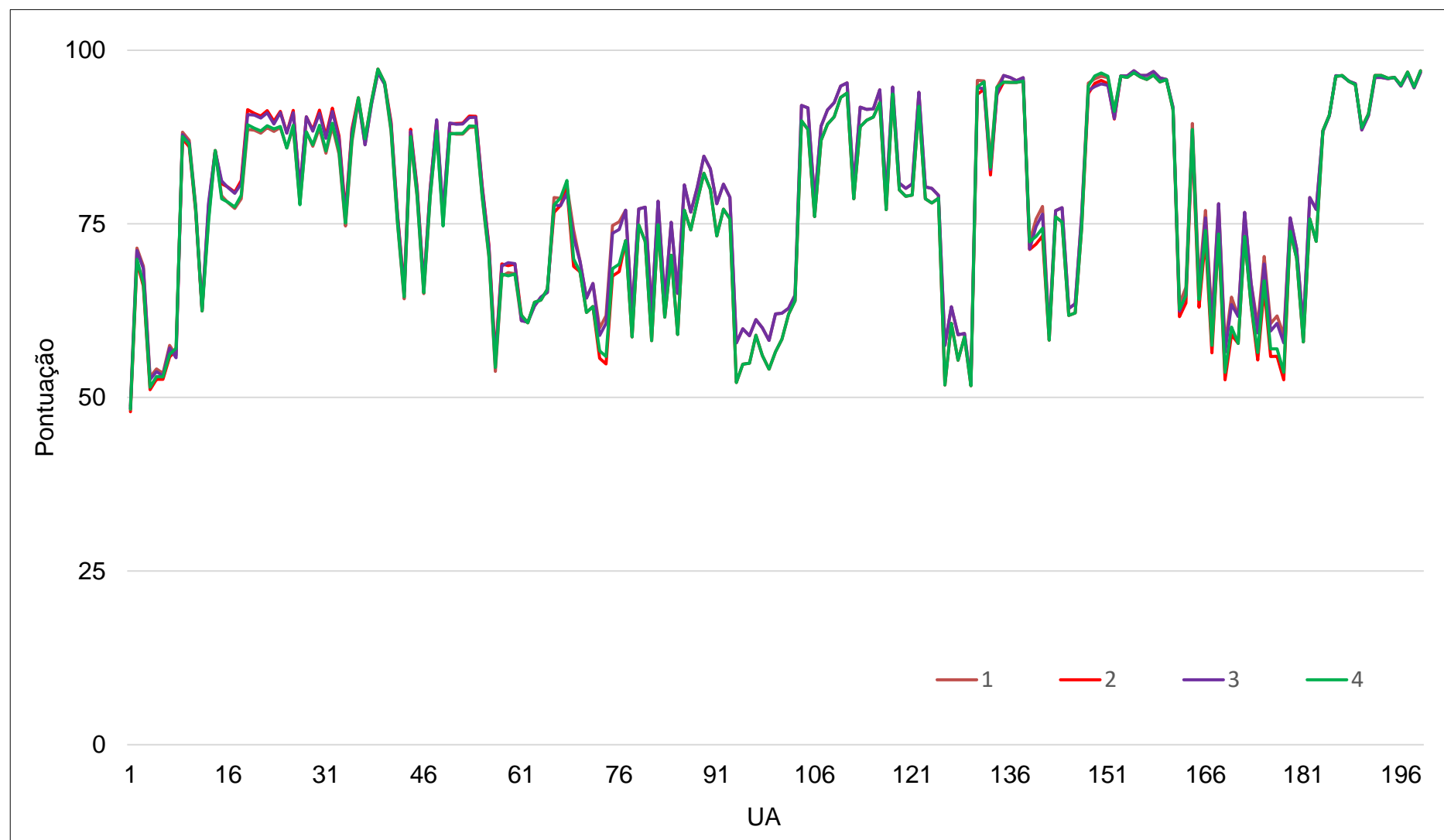
A representação matemática do ICAP foi obtida por meio do modelo aditivo de agregação está representada na Equação 11.

$$ICAP = 0,35 DP + 0,29 SA + 0,21 VTO + 0,12 DL + 0,03 DNG \quad (11)$$

7.3 FASE DE TESTE

Após a obtenção do modelo para representar o ICAP, passou-se à fase de teste. O índice foi aplicado às 199 UAs e os valores obtidos nos quatro cenários são apresentados em forma de gráfico de linhas, no qual cada UA está relacionada com uma pontuação de 0 a 100, conforme Figura 21.

Figura 21 – ICAP das UAs nos cenários 1, 2, 3 e 4



Fonte: o próprio autor

Pode-se observar que a condição do pavimento das UAs foi avaliada com notas semelhantes nos quatro cenários. Com exceção da UA 1, todas as UAs foram avaliadas com pontuação acima de 50.

O teste de correlação de Pearson revelou que os resultados dos índices estão quase perfeitamente correlacionados (valores de r próximos de 1), conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Correlação entre os cenários de ICAP

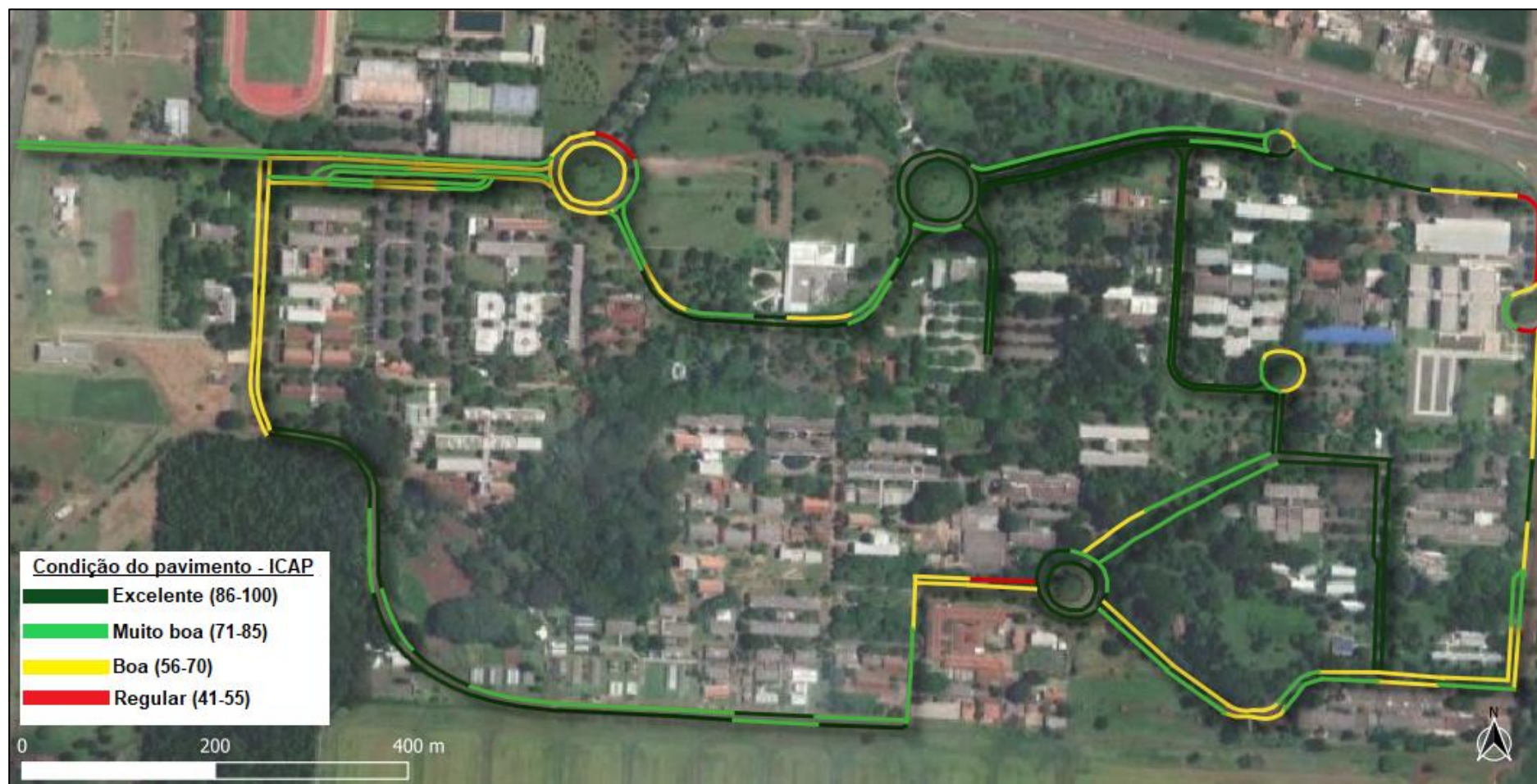
Cenários	1 e 2	1 e 3	1 e 4	2 e 3	2 e 4	3 e 4
r	0,989	0,998	0,994	0,994	0,998	0,995

Fonte: o próprio autor

Portanto, os diferentes métodos de avaliação do critério SA e os diferentes métodos de contagem do critério VTO não resultam em mudanças significativas nos resultados do índice. A viabilidade no uso dos dados do itinerário *online* confirma a conclusão obtida por Salviatto *et al.* (2020) quanto ao uso deste método para o levantamento do volume de tráfego de ônibus nas vias.

Na Figura 22 é apresentado o mapa do *campus* com a classificação da condição de cada trecho tomando-se como referência o valor do ICAP no cenário 1, uma vez que os quatro cenários apresentaram resultados similares. No mapa foi utilizado a paleta de cores sugerida na ASTM (2018). Pode-se verificar no mapa que a condição dos pavimentos das UAs foi classificada, de acordo com os intervalos indicados pelo método do PCI, em condição Regular (5 UAs, 3% do total), Boa (55 UAs, 28% do total), Muito boa (57, 29% do total) e Excelente (82 UAs, 41% do total de UAs avaliadas).

Figura 22 – Classificação da condição do pavimento dos trechos do campus de acordo com o ICAP no cenário 1



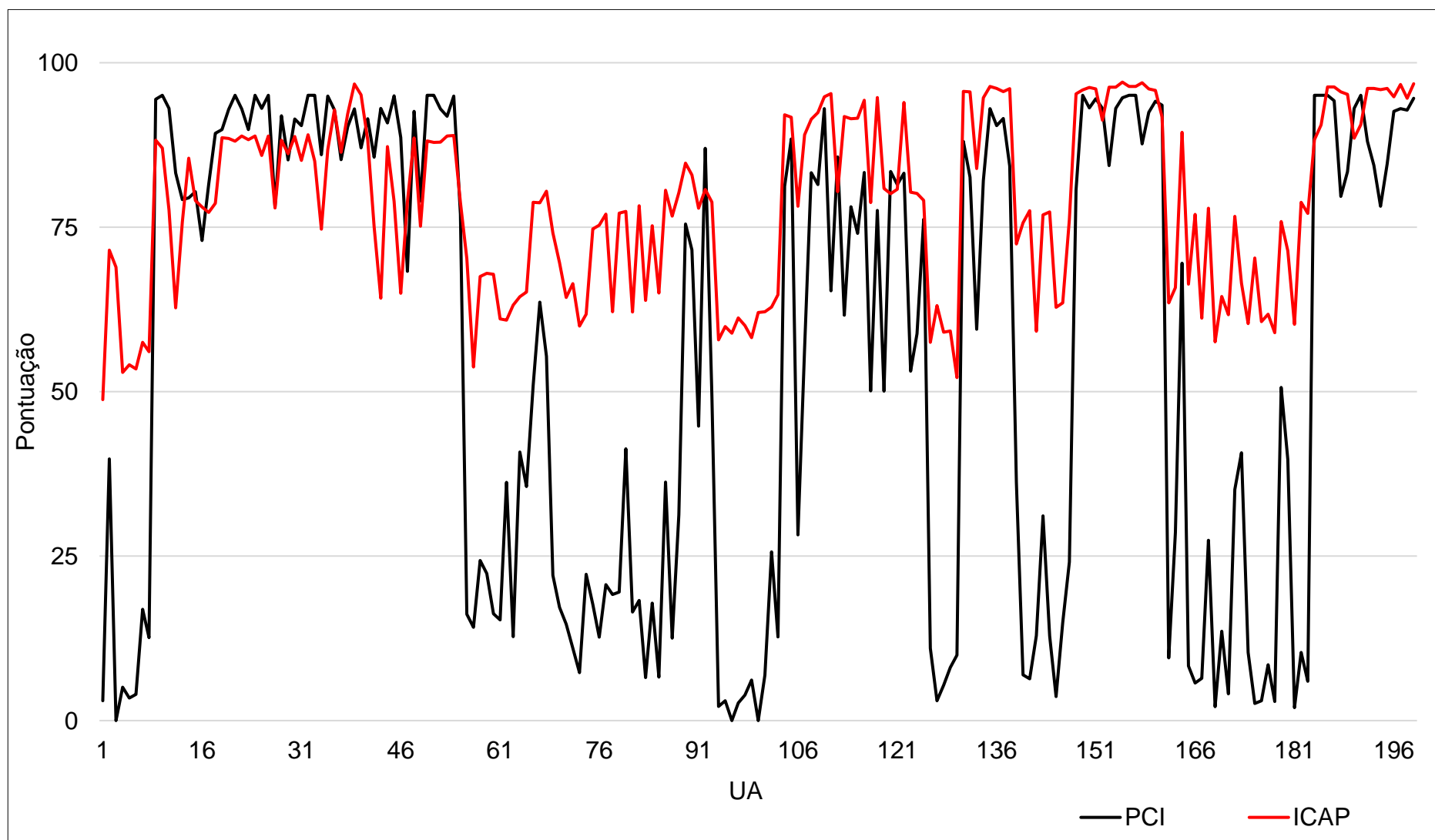
Fonte: o próprio autor

7.4 FASE DE VALIDAÇÃO

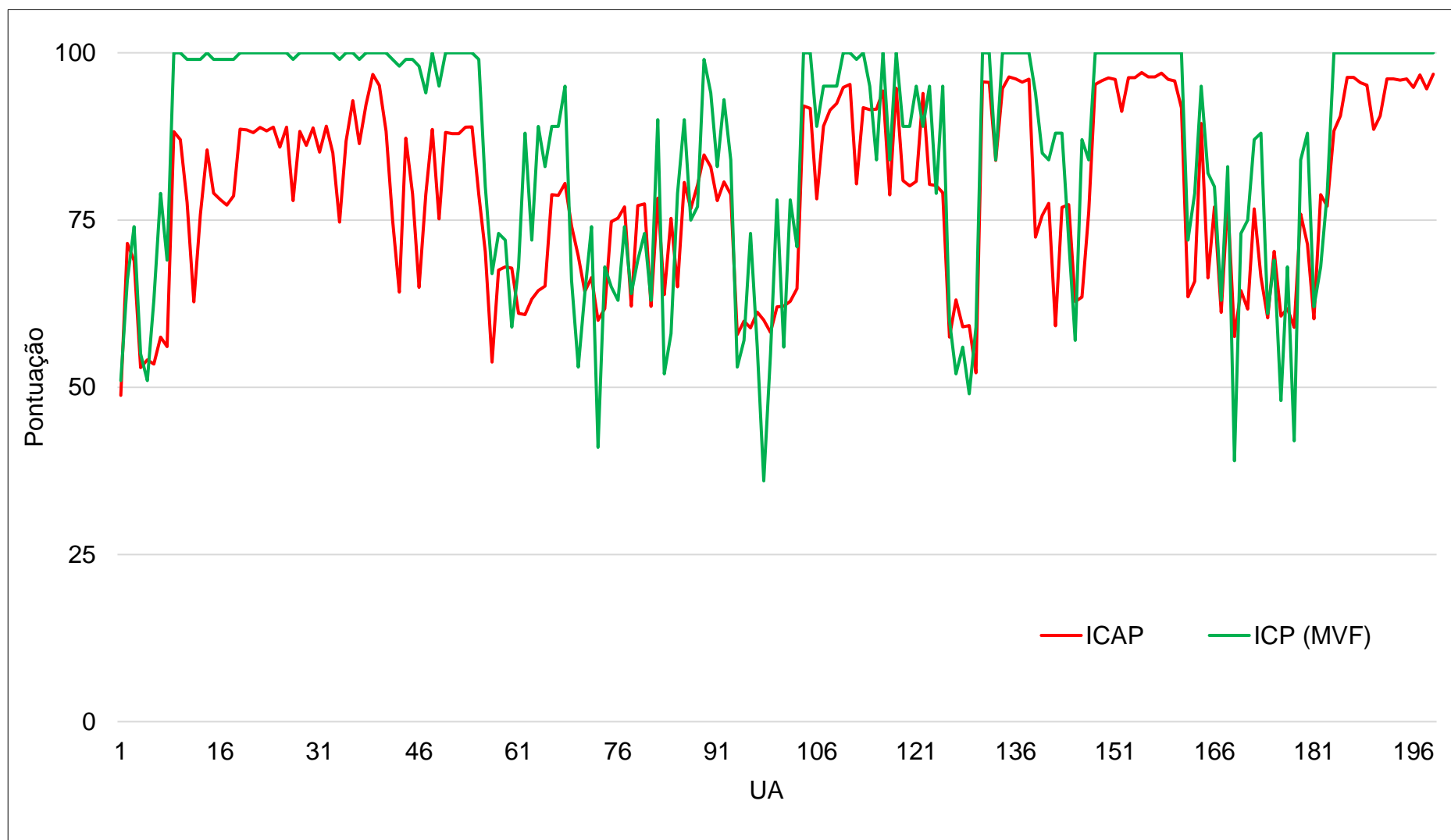
A partir dos dados obtidos na aplicação do ICAP em campo, foram realizadas análises comparativas com os dados levantados por meio da aplicação do PCI, do ICP_{MVf} e das avaliações subjetivas. A comparação foi realizada por meio de quatro análises. Na primeira análise os índices foram comparados por meio da visualização gráfica dos dados obtidos em campo e das classificações atribuídas à condição das UAs. Em seguida, foi realizado um teste de hipóteses para verificar a equivalência dos métodos. Posteriormente, foram analisados os erros existentes entre os índices a fim de verificar de qual dos métodos o ICAP mais se aproximou. Por fim, foram comparadas as estratégias de intervenção nos pavimentos indicadas pelos métodos. Uma vez que o ICAP apresentou resultados semelhantes nos quatro cenários, foram utilizados apenas os resultados do ICAP no cenário 1, na qual o critério SA foi obtido por meio da avaliação subjetiva do Painel_{Escala_visual} e o critério VTO foi obtido por meio de contagem *online*.

7.4.1 Comparação gráfica dos índices e das classificações

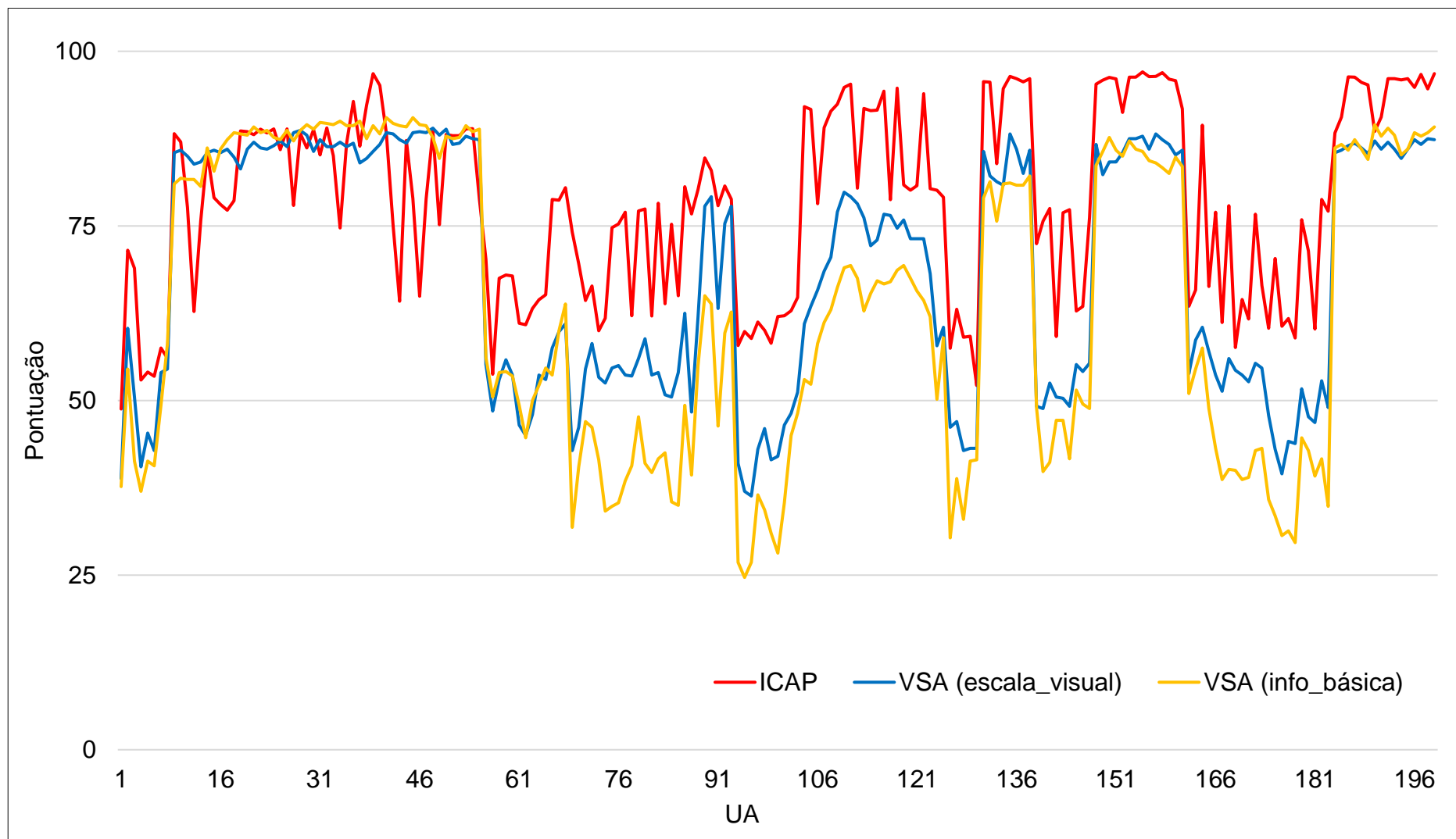
Com a intenção de facilitar a visualização dos resultados, cada comparação do ICAP com os demais índices está representada em um gráfico distinto. Desse modo, na Figura 23 é apresentada a comparação do ICAP com o PCI e nas Figuras 24 e 25 a comparação com o ICP_{MVf} e com as avaliações subjetivas, respectivamente.

Figura 23 – Comparação gráfica entre o ICAP e o PCI

Fonte: o próprio autor

Figura 24 – Comparação gráfica entre o ICAP e o ICP_{MVF}

Fonte: o próprio autor

Figura 25 – Comparação gráfica entre o ICAP, VSA_{Escala_visual} e VSA_{Info_básica}.

Fonte: o próprio autor

Pode-se observar que o ICAP e o PCI tendem, em geral, a apresentar valores próximos para UAs classificadas como condição “Muito boa” (71 a 85 pontos) e “Excelente” (86 a 100 pontos). Conforme as notas, de acordo com o PCI, diminuem de UA para outra, as notas do ICAP tendem a não acompanhar essa redução, de modo que sua nota mínima foi de 47,94 pontos para a UA 1.

Na Tabela 14 são apresentados os números de UAs classificadas com cada conceito por meio do ICAP e do PCI. As cores utilizadas seguem o padrão sugerido na (ASTM, 2018).

Tabela 14 – Número de UAs por classificação segundo os métodos do ICAP e do PCI

Classificação	ICAP	PCI
Excelente (86 – 100)	82	68
Muito boa (71 – 85)	58	32
Boa (56 – 70)	53	9
Regular (41 – 55)	6	10
Ruim (26 – 40)	0	13
Muito ruim (11 – 25)	0	32
Péssima (0 – 10)	0	35
Total	199	

Fonte: o próprio autor

Pode-se observar que, por meio do ICAP, quase a totalidade das UAs foram avaliadas com pontuação entre 100 e 70 pontos, enquanto que, por meio do PCI, 35 UAs foram avaliadas com a classificação “Péssima” (0 a 10 pontos), 32 UAs com a classificação “Muito Ruim” (11 a 25 pontos), 13 UAs com a classificação “Ruim” (26 a 40 pontos) e 10 UAs com a classificação “Regular” (41 a 55 pontos). Ou seja, 45% das UAs foram avaliadas com notas abaixo de 55 pontos. Das 199 UAs avaliadas, o ICAP apresentou valor superior ao PCI em 154 UAs (77%). Entretanto, essa diferença não foi homogênea em todas as UAs. Na UA 29, por exemplo, o ICAP foi maior que o PCI em apenas 0,29 pontos, enquanto que na UA 166 o ICAP foi maior em 71,25 pontos. Além disso, o ICAP ser superior ao PCI em uma determinada UA não significa que a condição do pavimento foi classificada com uma condição satisfatória por meio do ICAP e com uma condição insatisfatória por meio do PCI. Em muitas UAs, as notas

dadas por meio de ambos os métodos ficaram na mesma faixa de classificação.

A correlação r entre o ICAP e o PCI foi de 0,89 (forte correlação). Isso significa que, conforme o valor de PCI aumenta, o valor do ICAP também aumenta. Entretanto, os índices variam com diferentes magnitudes. Enquanto as notas dadas pelo PCI variaram entre 95,05 e 0 pontos, as notas dadas pelo ICAP variaram entre 97,29 e 47,94 pontos. Resultado semelhante foi obtido por Abu-Samra, Zayed e Tabra (2017). Nesta ocasião, os valores do gráfico de comparação do CR e do PCI (Figura 4) aumentam e diminuem ao mesmo tempo, entretanto, com diferentes magnitudes.

Em relação à comparação gráfica entre o ICAP e o ICP_{MVF} , pode-se observar uma aproximação dos índices quando comparado com o PCI. Na Tabela 15 são apresentados o número de UAs por classificação segundo os métodos do ICAP e da MVF.

Tabela 15 – Número de UAs por classificação segundo os métodos do ICAP e MVF

Classificação	ICAP	MVF
Excelente (86 – 100)	82	121
Muito boa (71 – 85)	58	36
Boa (56 – 70)	53	28
Regular (41 – 55)	6	12
Ruim (26 – 40)	0	2
Muito ruim (11 – 25)	0	0
Péssima (0 – 10)	0	0
Total	199	

Fonte: o próprio autor

Por meio do ICP_{MVF} , 14 UAs receberam menos de 56 pontos, ou seja, quase a totalidade das UAs foram avaliadas com a condição “Boa” (14%), “Muito boa” (18%) ou “Excelente” (61%). Das 199 UAs avaliadas, o ICAP apresentou nota superior ao ICP_{MVF} em 25 UAs (13%). A correlação r entre os índices foi de 0,85 (forte correlação). Entretanto, assim como em relação ao PCI, os índices variaram com diferentes magnitudes. As notas dadas pelo ICP_{MVF} variaram entre 36 e 100 pontos.

Quanto às avaliações subjetivas, pode-se observar que as pontuações indicadas pelos índices para as UAs tendem aumentar e diminuir em um mesmo intervalo, com uma correlação de 0,81 entre o ICAP e o VSA_{Escala_visual} e 0,76 entre o

ICAP e o $VSA_{Info_básica}$. Entretanto, as notas indicadas por meio das avaliações subjetivas foram, na maioria das UAs, mais rigorosas que as notas indicadas por meio do ICAP. Este foi maior que o VSA_{Escala_visual} em 174 UAs (87%), enquanto que, em comparação com o $VSA_{Info_básica}$, o ICAP foi superior em 166 UAs (83%). A amplitude das notas também variou entre os métodos. As notas indicadas pelo $Painel_{Escala_visual}$ variaram de 36,33 a 89,00 pontos e as notas indicadas pelo $Painel_{Info_básica}$ variaram de 24,67 a 90,50 pontos. Na Tabela 16 são apresentadas as classificações atribuídas à condição das UAs segundo os métodos do ICAP e das avaliações subjetivas.

Tabela 16 – Número de UAs por classificação segundo os métodos do ICAP e avaliações subjetivas

Classificação	ICAP	VSA_{Escala_visual}	$VSA_{Info_básica}$
Excelente (86 – 100)	82	70	61
Muito boa (71 – 85)	58	34	24
Boa (56 – 70)	53	26	28
Regular (41 – 55)	6	65	52
Ruim (26 – 40)	0	4	33
Muito ruim (11 – 25)	0	0	1
Péssima (0 – 10)	0	0	0
Total		199	

Fonte: o próprio autor

A condição de 65 e 52 UAs foram avaliadas com a condição Regular por meio das avaliações do $Painel_{Escala_visual}$ e do $Painel_{Info_básica}$, respectivamente, enquanto apenas 6 UAs foram avaliadas com essa classificação pelo ICAP. O $Painel_{Info_básica}$ ainda classificou 33 UAs com o conceito Ruim. Assim como na comparação com os demais índices, a pontuação do ICAP obteve maior semelhança com a pontuação das avaliações subjetivas nas UAs avaliadas com os melhores conceitos.

7.4.2 Teste de Friedman

A fim de verificar se os resultados indicados pelo ICAP para a condição dos pavimentos eram estatisticamente equivalentes aos resultados indicados pelo PCI,

ICP_{MVF} e avaliações subjetivas, foi realizado um teste de hipóteses de Friedman. O resultado do teste é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultado do Teste de Friedman entre ICAP, PCI, ICP_{MVF} e avaliações subjetivas

Informação	Resultado
Friedman qui-quadrado	453,8
Graus de liberdade	4
p-valor	<2,2E-16

Fonte: o próprio autor

Como pode ser observado, o p-valor obtido foi menor que 2,2E-16, ou seja, menor que o nível de significância de 0,05. Desse modo, aceitou-se a hipótese alternativa de que pelo menos um dos índices analisados não é estatisticamente equivalente aos demais. Para verificar qual dos índices diferenciou dos demais, foi realizado um teste de post-hoc. Os resultados do teste são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – P-valores obtidos no teste de post-hoc entre o ICAP e os demais índices de condição

	PCI	ICP _{MVF}	VSA _{Escala_visual}	VSA _{Info_básica}
ICAP	<2,2E-16	3,9E-12	1,7E-13	<2,2E-16

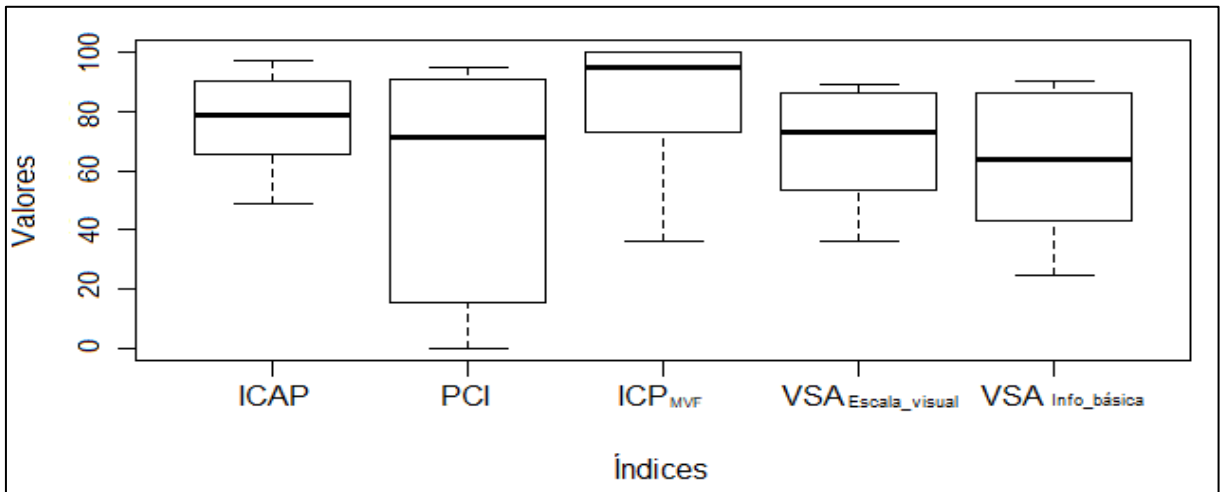
Fonte: o próprio autor

Por meio dos resultados apresentados, foi observado que na comparação do ICAP com os demais índices foram obtidos p-valores menores que 0,05. Desse modo, a hipótese nula não foi aceita e pode-se afirmar que os resultados obtidos na classificação da condição dos pavimentos pelo ICAP não são equivalentes aos resultados obtidos pelo PCI, ICP_{MVF} e avaliações subjetivas.

O teste de Friedman avalia a equivalência das medianas dos índices, uma vez que este valor representa de forma melhor os dados que não seguem uma distribuição normal. Assim, foi elaborado um boxplot dos dados para comparar a mediana de cada índice. Na Figura 26 é apresentado o boxplot dos índices, no qual

as linhas mais espessas dentro das caixas representam a mediana dos dados de cada índice.

Figura 26 – Boxplot dos dados levantados em campo por meio dos índices de condição



Fonte: o próprio autor

Pode-se observar que o ICP_{MVF} apresentou o maior valor para a mediana (95,00 pontos), enquanto o VSA obtido pelo Painel_{Info_básica} apresentou a menor mediana (63,83 pontos). A mediana do ICAP possuiu valor de 78,84, valor maior que as medianas do PCI (71,54) e das avaliações subjetivas (mediana do VSA obtido pelo Painel_{Escala_visual} igual a 73,16) e menor que a mediana do ICP_{MVF}. Assim, pode-se afirmar que, em geral, o ICAP não resulta em classificações tão pessimistas quanto as do PCI e das avaliações subjetivas. Isto está associado ao fato de que o PCI considera mais tipos de defeitos que o ICAP, além de atribuir pesos diferentes para os defeitos estruturais, para os graus de severidade e para as extensões dos defeitos. Nas avaliações subjetivas, a atenção maior dos avaliadores também é para os defeitos presentes na via e que podem comprometer o conforto dos usuários. Muitos desses defeitos não estão presentes no método do ICAP.

Em relação ao ICP_{MVF}, pode-se afirmar que o ICAP é, em geral, mais severo. Isso por conta de que ambos os métodos, mesmo que de forma diferentes, avaliam os mesmos tipos de defeitos. Diferente do ICP_{MVF}, o ICAP considera ainda outros parâmetros da via e, em muitas UAs, esses parâmetros reduziram significativamente a pontuação da condição do pavimento.

7.4.3 Análise dos erros

Após o teste de hipótese, o ICAP foi comparado com o PCI, com o ICP_{MVF} e com as avaliações subjetivas por meio da análise do Erro Absoluto Médio (MAE) e da Média Absoluta do Erro Relativo (MARE). Na Tabela 19 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 19 – Resultados das análises do MAE e MARE entre o ICAP e os demais índices de condição

Informação	Índices			
	PCI	ICP _{MVF}	VSA _{Escala_visual}	VSA _{Info_básica}
MAE	26	10	12	17
MARE (%)	297	12	20	35

Fonte: o próprio autor

Pode-se constatar por meio dos resultados que a maior diferença entre as pontuações da condição dos pavimentos ocorreu entre o ICAP e o PCI. Em relação ao valor de MAE, o ICAP indicou pontuações para os pavimentos com uma diferença, em média, de 26 pontos, para mais ou para menos, em comparação com o PCI. Já em relação ao MARE, o ICAP e o PCI indicaram pontuações com diferença, em média, de 279%.

Os menores erros foram observados na comparação do ICAP com o ICP_{MVF}. O ICAP apresentou MAE de 10 pontos e MARE de 12% em comparação com o ICP_{MVF}, ou seja, o valor de MARE obtido nessa comparação foi 23 vezes menor que o obtido na comparação com o PCI. A maior aproximação com o ICP_{MVF} pode ser explicada por conta de ambos os índices serem métodos mais práticos e que consideram menos defeitos na avaliação do que o método do PCI. Embora o método das MVF apresente um índice combinado de defeitos e o ICAP um índice que agrega múltiplos critérios, o fator de maior peso neste último é o Defeitos no Pavimento (responsável por mais de um terço da pontuação indicada pelo ICAP) e que avalia a existência dos mesmos defeitos do método para se obter o ICP_{MVF}.

Em relação às avaliações subjetivas, foi observado uma proximidade maior dos resultados do ICAP com a avaliação subjetiva realizada pelo Painel_{Escala_visual}, com MAE de 12 pontos e MARE de 20%. Na comparação com a avaliação subjetiva

realizada pelo Painel_{Info_básica}, os valores de erros obtidos foram menores que na comparação com o PCI e maiores que na comparação com o ICP_{MVF}.

7.4.4 Comparação das estratégias de intervenção

De acordo com a pontuação obtida foi indicada uma atividade de intervenção para cada UA: manutenção preventiva, atividade de reabilitação do pavimento ou a reconstrução. Na Tabela 20 são apresentados os números de UAs que receberam a mesma indicação de intervenção a partir da pontuação obtida pelo ICAP e pelos demais índices de condição.

Tabela 20 – Número de UAs equivalentes entre o ICAP e demais métodos quanto à estratégia de intervenção a ser adotada

	PCI	ICP _{MVF}	VSA _{Escala_visual}	VSA _{Info_básica}
Manutenção preventiva	97	130	101	81
Reabilitação	2	32	52	31
Reconstrução	0	0	0	0
Total	99	162	153	112
Total (%)	50%	81%	77%	56%

Fonte: o próprio autor

Pode-se perceber por meio dos resultados que foi obtida uma equivalência entre a intervenção indicada por meio do ICAP e a dos demais em pelo menos 50% das 199 UAs (99 UAs), na qual a maior porcentagem foi obtida na comparação do ICAP com o ICP_{MVF} (81% das UAs, ou seja, 162 UAs) e a menor na comparação com o PCI.

Por meio do ICAP não foram obtidas UAs cuja intervenção indicada foi a reconstrução. Assim, não foram obtidas UAs equivalentes na comparação com os demais métodos, embora todos estes tenham indicado a reconstrução como atividade de intervenção para pelo menos uma das UAs.

Uma vez que as pontuações obtidas por meio do ICAP situaram-se nas faixas superiores de condição, os maiores números de atividades equivalentes entre os métodos foram para as manutenções preventivas, na qual, na comparação com o PCI, essa atividade representou quase 98% das atividades equivalentes com o ICAP

(97 das 99 UAs equivalentes).

A comparação das estratégias de intervenção a serem adotadas por meio das pontuações indicadas pelos métodos foi também realizada tomando como base os trechos de pavimentos avaliados. Assim, para representar a condição do pavimento de cada trecho foi tomada a pontuação média das UAs que os compõem. Na Tabela 21 são apresentadas as pontuações de cada trecho a partir de cada método e coloridos com a estratégia de intervenção a ser adotada.

Tabela 21 – Pontuação dos trechos e estratégia de intervenção indicada

Trecho	ICAP	PCI	ICP _{MVF}	VSA _{Escala_visual}	VSA _{Info_básica}
A	69,00	20,93	76,33	55,14	44,79
B	93,80	88,82	100,00	86,08	86,83
C	73,17	17,73	85,17	50,08	44,33
D	67,54	13,60	66,90	46,63	36,42
E	88,20	71,97	94,65	72,81	64,31
F	80,89	59,91	88,33	72,56	58,75
G	71,80	23,18	70,64	54,15	42,71
H	81,45	88,76	98,73	87,86	88,67
I	85,00	88,42	99,69	86,32	87,79
J	95,55	91,88	100,00	86,06	84,94
K	65,11	33,40	73,36	58,47	54,95
L	80,89	59,91	88,33	72,56	58,75
M	95,73	93,25	100,00	87,21	88,42
N	64,31	24,63	64,29	48,67	42,02
R1	64,20	23,40	75,10	51,23	51,92
R2	88,42	90,99	99,80	86,12	89,27
R3	74,67	80,63	99,33	84,50	82,83
R4	67,49	14,23	76,00	54,89	49,94
R5	94,24	83,93	98,00	84,06	80,25

Fonte: o próprio autor

Na comparação com o PCI, foi indicada a mesma intervenção em 9 dos 19 trechos avaliados por meio do ICAP, sendo todas UAs que receberam a indicação de manutenção preventiva como estratégia de intervenção. Na comparação com o ICP_{MVF} e com o VSA_{Info_básica} o número de indicações equivalentes foi de 14 e 13 UAs,

respectivamente, sendo que houve UAs na quais foram sugeridas atividades de manutenção preventiva e reabilitação. Diferente da comparação realizada com as UAs, na comparação levando-se em conta os trechos o maior número de indicações equivalente foi com o VSA_{Escala_visual} , na qual 17 das 19 UAs receberam a mesma indicação de intervenção, entre manutenção preventiva e reabilitação.

7.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para analisar a sensibilidade do ICAP frente a alteração nos pesos dos critérios, foi utilizado o *software* *VIP Analysis*. Assim, os pesos obtidos por meio de julgamentos realizados no M-MACBETH foram comparados aos pesos dos critérios atribuídos pelos profissionais envolvidos com infraestrutura de transportes e aos pesos que compõem o ICS-PF, índice desenvolvido por Salviatto *et al.* (2020) e baseado no método AHP para obtenção dos pesos dos critérios.

Na Tabela 22 são apresentados os pesos atribuídos pelos cinco profissionais para os critérios DP (Defeitos no Pavimento), SA (Serventia Atual), VTO (Volume de Tráfego de Ônibus), DL (Declividade Longitudinal) e DNG (Drenagem), bem como a média dos pesos que foi tomado como o peso representativo dos critérios de acordo com os profissionais especialistas.

Tabela 22 – Pesos atribuídos aos critérios pelos profissionais

Profissional	Critérios					Total
	DP	SA	VTO	DL	DNG	
1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	1,00
2	0,40	0,30	0,15	0,05	0,10	1,00
3	0,30	0,30	0,10	0,15	0,15	1,00
4	0,40	0,30	0,05	0,05	0,20	1,00
5	0,20	0,20	0,30	0,10	0,20	1,00
Média	0,30	0,26	0,16	0,11	0,17	1,00

Fonte: o próprio autor

A partir dos valores apresentados, pode-se perceber que os pesos dados e a ordem de pesos entre os critérios variaram entre os especialistas. Para o avaliador 1 todos os critérios avaliados possuem o mesmo nível de importância na avaliação da condição de pavimentos flexíveis. Já a ordem de importância dos critérios para o avaliador 2 foi semelhante aos pesos do ICAP e do ICS-PF, com exceção dos critérios

DL e DNG. Para o avaliador 2, a importância do critério DNG é maior que a importância do critério DL. De acordo com a opinião do avaliador 4 o critério DNG representa o terceiro mais importante, à frente dos critérios VTO e DL, enquanto para os avaliadores 3 e 4, o critério VTO possui o menor peso. Na opinião do avaliador 5, o critério VTO é o mais importante para se avaliar a condição dos pavimentos.

Diante desta diversidade nas respostas dos avaliadores, tomou-se a média dos pesos dados pelos avaliadores em cada um dos critérios como o peso representativo da avaliação dos especialistas. Em relação aos demais índices, a ordem dos critérios definida pelos profissionais foi semelhante, com exceção do critério DNG que ocupou a terceira posição com 17% do índice, enquanto no ICAP e no ICS-PF esse critério possuiu a menor importância, 3% e 10%, respectivamente.

Desse modo, foram lançadas as alternativas e os critérios com seus respectivos pesos no *VIP Analysis*, de modo que os pesos obtidos no M-MACBETH representaram a alternativa 1 (a1), a média dos pesos atribuídos pelos profissionais a alternativa 2 (a2) e os relativos aos pesos do ICS-PF a alternativa 3 (a3). Na Figura 27 é apresentada a estruturação das alternativas no *VIP Analysis*.

Figura 27 – Critérios e alternativas estruturados no *VIP Analysis*

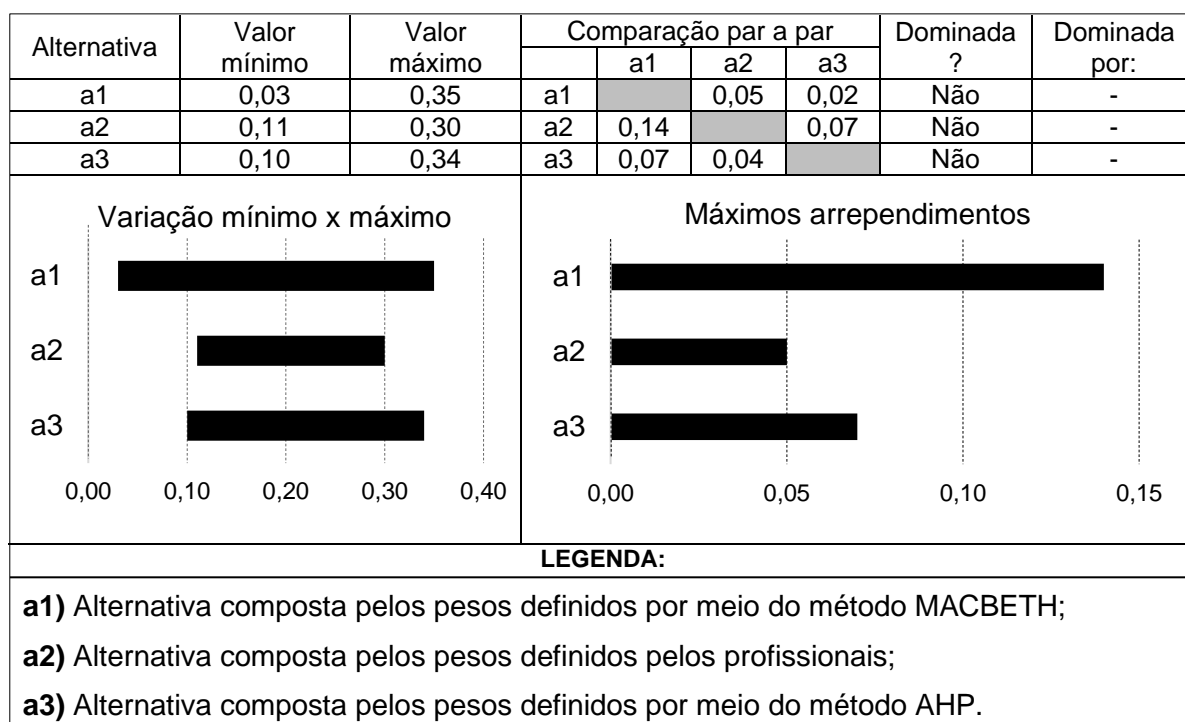
Criteria:	DP	SA	VTO	DL	DNG
Importance:					
a1	0.35	0.29	0.21	0.12	0.03
a2	0.30	0.26	0.16	0.11	0.17
a3	0.34	0.26	0.20	0.10	0.10

Fonte: o próprio autor

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas quatro análises realizadas: ordenação livre dos critérios, critérios ordenados de acordo com os pesos da alternativa 1, alternativa 2 e alternativa 3.

7.5.1 Análise 1: ordenação livre

Nesta primeira análise não foi imposta uma restrição na ordenação dos critérios, de modo que o *VIP Analysis* teve liberdade total para ranquear as melhores alternativas. Os resultados são apresentados na Figura 28.

Figura 28 – Resultados da análise de sensibilidade 1

Fonte: o próprio autor

Como pode-se observar, a alternativa que apresentou a menor variação entre os valores mínimos e máximos foi a alternativa a2, cuja variação foi de 0,19, enquanto as alternativas a1 e a3 apresentaram variação de 0,32 e 0,24, respectivamente. Desse modo, a alternativa a2 apresentou-se, nesta análise, como a opção mais robusta, ou seja, que apresenta a menor variação nos resultados quando alterados os pesos dos critérios. Quanto ao valor mínimo, a alternativa a2 apresentou-se como a melhor solução, uma vez que apresentou o maior valor mínimo entre as opções avaliadas, 0,11 pontos. Isso demonstra que a alternativa a2 tem o melhor desempenho entre as alternativas na situação mais desfavorável, ou seja, quando toda a pontuação está concentrada no critério de menor peso. Entretanto, em relação ao valor máximo, a alternativa a1 apresenta o melhor desempenho, com 0,35 pontos.

Em relação ao arrependimento, novamente a alternativa a2 apresenta-se como a melhor solução, pois apresentou arrependimento de 0,07, menor valor entre as opções analisadas e a alternativa a1 apresentou o pior desempenho, com um arrependimento máximo de 0,14 no caso de se escolher a alternativa a1 ao invés da alternativa a2. Entretanto, nenhuma das alternativas apresentou dominância sobre as demais, uma vez que todos os valores de arrependimentos são maiores que zero.

Assim, nessa primeira análise, as alternativas a2 e a3 possuíram uma maior equivalência, com uma vantagem para a alternativa a2 quanto ao melhor desempenho. Já a alternativa a1 apresentou as maiores diferenças. Entretanto, as diferenças apresentadas não foram significativas a ponto de ser dominada.

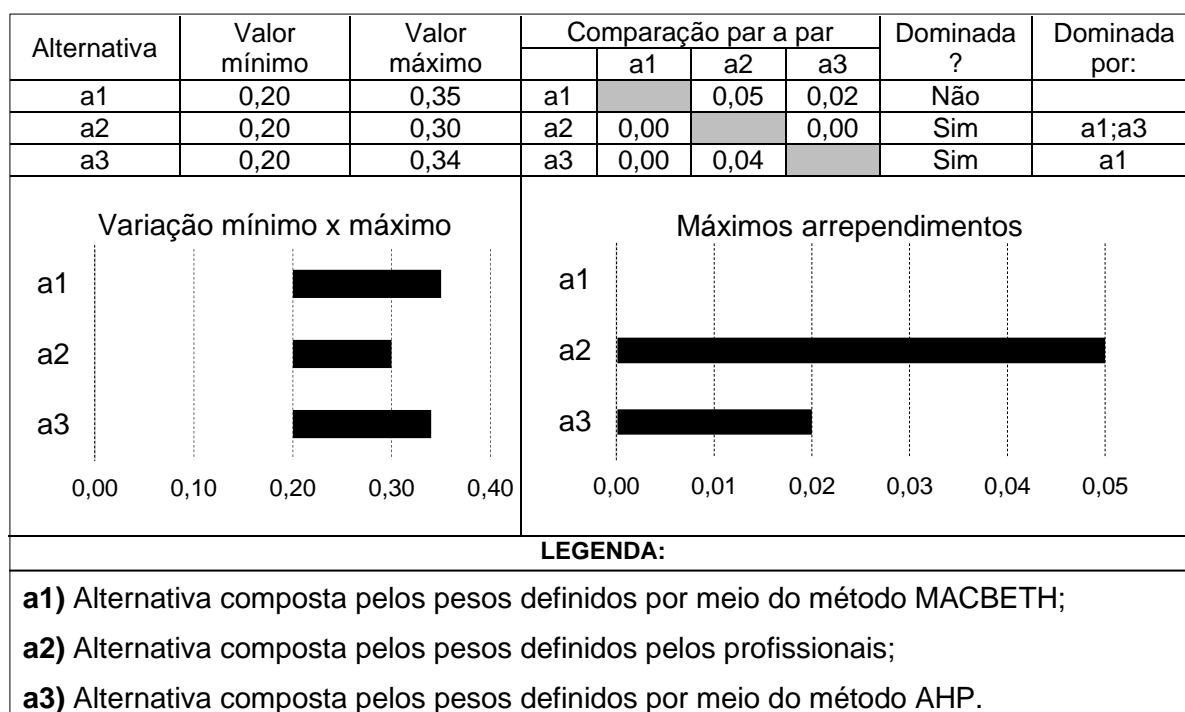
7.5.2 Análise 2: critérios ordenados de acordo com os pesos da alternativa 1

Esta análise foi realizada com base na ordenação dos pesos obtidos por meio dos julgamentos realizados no M-MACBETH. Desse modo, foi introduzido no *VIP Analysis* a seguinte restrição:

$$DP > SA > VTO > DL > DNG$$

Na Figura 29 são apresentados os resultados da análise na qual foi respeitado a ordenação segundo o MACBETH.

Figura 29 – Resultados da análise de sensibilidade 2



Fonte: o próprio autor

Assim como na análise 1, a alternativa que apresentou a menor variação entre os valores máximo e mínimo foi a a2, com uma variação de 0,10. Dessa forma,

a2 representa a alternativa mais robusta entre todas. Entretanto, como pode ser observado no gráfico de variação mínimo x máximo presente na Figura 29, as variações das três alternativas não apresentaram grandes diferenças, na qual a variação da alternativa a1 foi de 0,15 e da alternativa a3 foi de 0,14. Desse modo, estas alternativas mostraram-se ser equivalentes à a1. Quanto ao maior valor mínimo, todas as alternativas apresentaram o mesmo valor. Isso demonstra que, nesta análise, todas as alternativas apresentariam a mesma pontuação na pior situação. Deste modo, não é possível concluir qual das alternativas é tomada como a melhor apenas por esse parâmetro. Já em relação ao valor máximo, a alternativa a1 apresenta-se como a melhor solução, pois, na melhor situação, apresenta pontuação de 0,35, enquanto as alternativas a2 e a3 apresentam 0,30 e 0,34 pontos, respectivamente.

Na comparação par a par, pode-se observar que não há arrependimento (arrependimento igual a 0,00) em se escolher a alternativa a1 em detrimento às demais. Dessa forma, essa alternativa domina as demais e é tomada como a solução ótima. Já a alternativa a2 apresenta o maior arrependimento máximo quando é selecionada em detrimento à alternativa a1 e um arrependimento quase equivalente quando é preferida em detrimento à alternativa a3. Assim, quanto ao arrependimento, a alternativa a1 apresentou-se como a melhor solução.

Portanto, nesta análise que considerou a ordem de importância dos critérios de acordo com a ordem de pesos do ICAP, a alternativa a1 é equivalente a alternativa a2 em relação à maior robustez e superior às demais alternativas nas demais análises. Ainda, com exceção da robustez, a alternativa a2 apresentou-se como a terceira melhor solução em todas os parâmetros de análise.

7.5.3 Análise 3: critérios ordenados de acordo com os pesos da alternativa 2

Esta análise foi realizada com base na ordenação dos pesos gerados em função da avaliação dos profissionais. Desse modo, foi introduzido no *VIP Analysis* a seguinte restrição:

$$DP > SA > DNG > VTO > DL$$

Na Figura 30 são apresentados os resultados da análise na qual foi respeitado a ordenação segundo os profissionais.

Figura 30 – Resultados da análise de sensibilidade 3

Alternativa	Valor mínimo	Valor máximo	Comparação par a par			Dominada ?	Dominada por:
			a1	a2	a3		
a1	0,20	0,35	a1	0,05	0,02	Não	
a2	0,20	0,30	a2	0,02	0,01	Não	
a3	0,20	0,34	a3	0,01	0,04	Não	

Variação mínimo x máximo

Alternativa	Valor mínimo	Valor máximo	Variação
a1	0,20	0,35	0,15
a2	0,20	0,30	0,10
a3	0,20	0,34	0,14

Máximos arrependimentos

Alternativa	Máximo arrependimento
a1	0,02
a2	0,05
a3	0,02

LEGENDA:

a1) Alternativa composta pelos pesos definidos por meio do método MACBETH;
a2) Alternativa composta pelos pesos definidos pelos profissionais;
a3) Alternativa composta pelos pesos definidos por meio do método AHP.

Fonte: o próprio autor

De acordo com os resultados apresentados, pode-se perceber que os valores de máximo e mínimo e a variação entre estes valores foi similar, para todas as alternativas, aos valores obtidos na análise 2. Desse modo, a alternativa a2 apresentou-se como a mais robusta, com variação entre os valores máximo e mínimo de 0,10, enquanto a variação das alternativas a1 e a2 foram de 0,15 e 0,14, respectivamente. Do mesmo modo que na análise 2, a diferença de variação entre as alternativas não apresentou grandes diferenças. Outras similaridades com a análise 2 foram os valores mínimo e máximo. Foi observado um valor mínimo de 0,20 para todas as alternativas e um maior valor máximo de 0,35 para a alternativa a1, enquanto as alternativas a2 e a3 apresentaram valor máximo de 0,30 e 0,34, respectivamente.

Em relação ao arrependimento, as alternativas a1 e a3 apresentaram os menores valores máximos, 0,02. Já a alternativa a2 apresentou o maior valor de arrependimento. Caso fosse escolhida a alternativa a2 em detrimento à alternativa a1, o arrependimento seria de 0,05. Já na comparação entre a1 e a3, pôde-se observar uma ligeira vantagem de a1 em ser selecionada como a solução ótima, pois o arrependimento seria maior em se escolher a3 em detrimento à a1 (arrependimento de 0,02) do que escolher a1 em detrimento à a3 (arrependimento de 0,01).

Nesta análise, portanto, as alternativas a1 e a3 apresentaram-se como as melhores soluções, uma vez que obtiveram os menores arrependimentos máximos. Entretanto, como nenhum dos valores apresentados na comparação par a par foram menores ou iguais a zero, não houve dominância de uma alternativa pela outra.

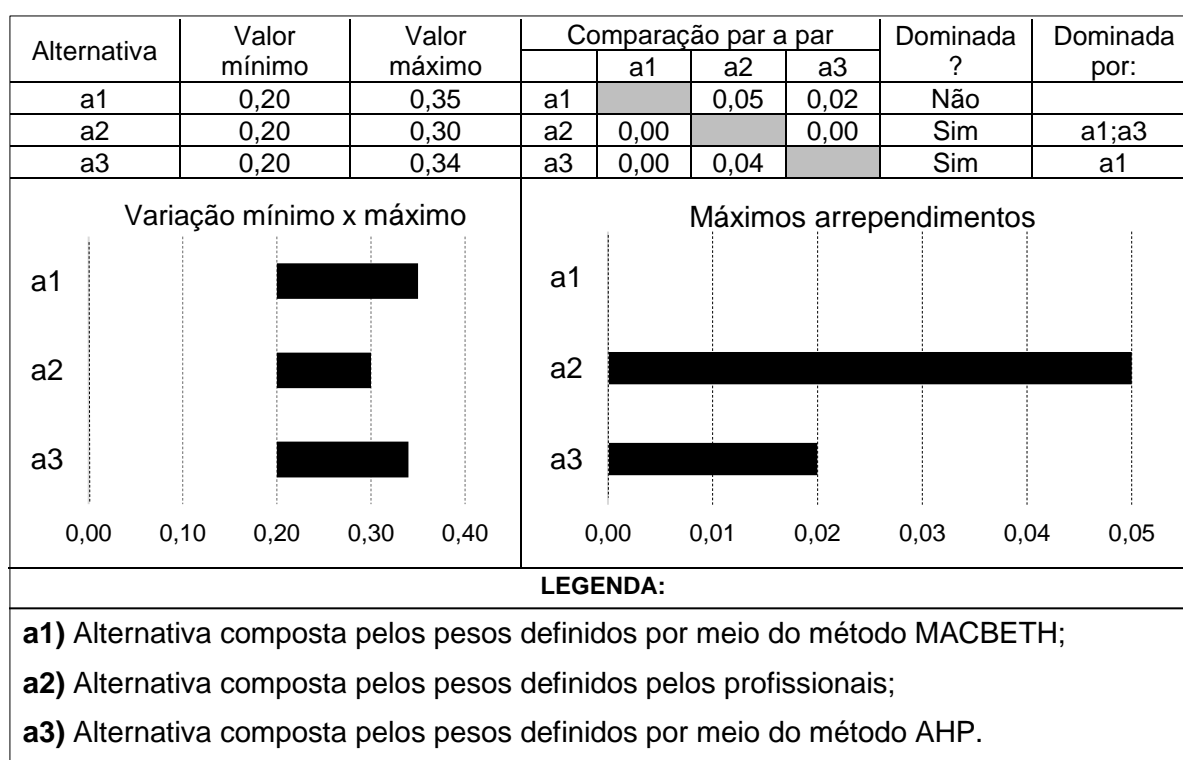
7.5.4 Análise 4: critérios ordenados de acordo com os pesos da alternativa 3

Nesta análise foi adotada a ordenação dos critérios obtida segundo os julgamentos realizados na elaboração do ICS-PF. Esta ordenação é semelhante à ordenação dos critérios do ICAP, com exceção de que os critérios DL e DNG possuem pesos equivalentes. Desse modo, foi introduzido no VIP *Analysis* a seguinte restrição:

$$DP > SA > VTO > DL = DNG$$

Na Figura 31 são apresentados os resultados da análise na qual foi respeitado a ordenação dos critérios segundo o ICS-PF.

Figura 31 – Resultados da análise de sensibilidade 4



Fonte: o próprio autor

Como pode-se observar, os resultados obtidos na análise no qual foi seguido a ordenação dos pesos do critério do ICS-PF são equivalentes aos resultados obtidos na análise no qual seguiu-se a ordenação dos pesos dos critérios do ICAP. Isso ocorreu porque no momento da inserção das restrições no *VIP Analysis*, os critérios são comparados par a par e é determinado que a diferença entre os pesos dos critérios pode ser menor ou igual a zero. No caso da análise 2, foi determinado que o peso do critério DNG subtraído do peso do critério DL deveria ser menor ou igual a zero ($DNG - DL \leq 0$). Assim, o *VIP Analysis* entende que o peso do critério DL é maior ou igual ao peso do critério DNG, como estipulado pela ordenação segundo o MACBETH. Já na análise 4, os pesos dos critérios DL e DNG são iguais. Desse modo, a restrição imposta no *software* foi de que o peso do critério DNG subtraído do peso do critério DL é igual a zero ($DNG - DL = 0$). Isso implica que os pesos dos critérios são iguais e a análise 4 não difere da análise 2.

Desse modo, como na análise 2, a alternativa que apresentou a menor variação entre os valores máximo e mínimo foi a a2, com uma variação de 0,10. Dessa forma, a2 representa a alternativa mais robusta entre todas. Quanto ao maior valor mínimo, todas as alternativas apresentaram o mesmo valor de 0,20. Isso demonstra que, nesta análise, todas as alternativas apresentariam a mesma pontuação na pior situação. Em relação ao valor máximo, a alternativa a1 apresenta-se como a melhor solução, pois, na melhor situação, apresenta pontuação de 0,35, enquanto as alternativas a2 e a3 apresentam 0,30 e 0,34 pontos, respectivamente.

Na comparação par a par, pode-se observar não há arrependimento em se escolher a alternativa a1 em detrimento das alternativas a2 e a3. Dessa forma, essa alternativa domina as demais e é tomada como a solução ótima. A alternativa a2 apresenta o maior arrependimento máximo quando é selecionada em detrimento à alternativa a1 e um arrependimento quase equivalente quando é preferida em detrimento à alternativa a3.

Portanto, assim como na análise 2, nesta verificação que considerou a ordem de importância dos critérios de acordo com os julgamentos realizados no M-MACBETH, a alternativa a1 mostrou-se equivalente a alternativa a2 em relação à maior robustez e superior às demais alternativas nas demais análises.

8 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento de um índice para avaliar a condição de pavimentos flexíveis urbanos. O índice gerado por meio da análise de multicritérios é a proposta de um instrumento para classificar a condição das vias de uma forma prática e acessível a todos os municípios. Esse objetivo foi alcançado com a elaboração do Índice de Condição Atual do Pavimento (ICAP), ferramenta fundamentada nos princípios do MCDA-C e cujo método de pesquisa contemplou as fases de estruturação, avaliação, teste, validação e análise de sensibilidade.

Os critérios, níveis de desempenho e métodos de obtenção dos dados definidos por Salviatto *et al.* (2020) e selecionados para compor o ICAP durante a fase de estruturação possibilitam obter um valor coerente para a condição do pavimento de forma mais ágil. Destaca-se o critério Defeitos no Pavimento (DP), no qual são levantados apenas cinco tipos de defeitos e sem a necessidade de quantificar suas severidades e extensões. Isto permite que os avaliadores possam obter os dados necessários para o cálculo do ICAP sem a necessidade de adentrar as áreas das faixas de rolamento, uma vez que a existência dos defeitos pode ser visualizada das áreas laterais da via. Estes locais podem também ser utilizados para a realização da avaliação subjetiva para obter o critério Serventia Atual (SA). Já os critérios Volume de Tráfego de Ônibus (VTO) e Declividade Longitudinal (DL) podem ser obtidos em escritório por meio de itinerários *online* de linhas de ônibus ou *in loco* e aplicativos de mapas, respectivamente. Faz-se exceção ao subcritério Abaulamento (AB) do critério Drenagem (DNG), o qual exige que os avaliadores entrem na faixa de rolamento para medir a declividade transversal da via por meio de aplicativo de smartphone, mesmo que esta entrada seja rápida.

A avaliação do nível de atratividade dos critérios e dos níveis de desempenho por meio do julgamento de avaliadores com diferentes formações profissionais permitiu que diferentes convicções e experiências fossem agregados ao resultado final. Porém, devido à ordenação dos critérios nas matrizes de julgamentos ter sido baseada nos pesos obtidos por Salviatto *et al.* (2020) e da maioria dos julgadores ter participado do desenvolvimento do ICAP e do ICS-PF, a ordem de pesos dos critérios não sofreu alterações e os pesos não sofreram mudanças significativas. A principal variação foi na pontuação atribuída aos níveis de

desempenho devido as diferentes metodologias utilizadas nessa etapa.

As funções de valores dos critérios quantitativos e escala de pontuação dos critérios qualitativos obtidas após os julgamentos no M-MACBETH tornaram simples a conversão das informações levantadas em campo para a pontuação obtida pela condição do pavimento em cada critério e, posteriormente, no seu valor de ICAP. No caso dos critérios quantitativos, essa pontuação pode ser obtida graficamente ou por meio das equações associadas aos gráficos. Esta última opção é preferível, uma vez que o seu uso extingue qualquer imprecisão que possa ocorrer na utilização dos gráficos.

Na fase de teste, os ICAPs dos quatro cenários de análise obtiveram correlação quase perfeita entre si. Isto demonstra que os índices são semelhantes e que, a avaliação subjetiva para a obtenção da pontuação do critério SA pode ser auxiliada por uma escala visual de referência ou não. Ainda, a contagem do volume de ônibus pode ser realizada *in loco* ou pelo itinerário *online*.

Na comparação dos resultados obtidos pelo ICAP com os demais índices na fase de validação, pôde-se observar que os valores de ICAP nas 199 UAs apresentaram um padrão semelhante com o PCI, ICP_{MVF} e avaliações subjetivas, ou seja, quando o valor do ICAP aumentou de uma UA para outra, os valores dos demais índices seguiu a mesma tendência. A mesma similaridade foi constatada quando os valores de ICAP diminuíram de uma UA para outra. Este fato pode ser comprovado pela correlação forte obtida entre os índices. Entretanto, a magnitude com que os valores aumentaram e diminuíram não foi a mesma entre os índices. O PCI possuiu uma maior amplitude do que o ICAP na escala de 0 a 100, mostrando-se ser um método mais complexo e exigente. A amplitude do ICP_{MVF} também foi maior, entretanto, apresentou-se como um método menos severo que o ICAP. Em relação às avaliações subjetivas, o ICAP revelou ser um método mais otimista. Entre os dois painéis, o ICAP apresentou valores mais próximos dos valores do VSA_{Escala_visual} .

Pôde-se concluir por meio do teste de hipóteses que o ICAP indicou valores estatisticamente diferentes dos valores dos demais métodos para a condição dos pavimentos avaliados. Isso ocorreu por conta de os índices utilizarem métodos diferentes e considerarem distintos critérios de avaliação. Entretanto, a análise dos erros mostrou que a diferença média do ICAP com os demais índices foi de 16,25 pontos, na qual a maior diferença foi observada na comparação com o PCI (média de 26 pontos) e a menor diferença na comparação com o ICP_{MVF} (média de 10 pontos).

Essa diferença não se mostrou ser bastante significativa na indicação da estratégia de intervenção por meio dos índices, já que na comparação do ICAP com os demais métodos, mais de 50% das UAs e trechos de pavimentos avaliados receberam a mesma indicação de intervenção, chegando a 81% na comparação com o ICP_{MVf} , quando tomadas as UAs como referência e 89% na comparação com o VSA_{Escala_visual} , quando tomadas os trechos como parâmetro.

Observou-se uma proximidade entre os pesos obtidos por meio dos julgamentos realizados no M-MACBETH, por meio da média dos valores atribuídos pelos profissionais ligados à infraestrutura de transportes e por meio do método AHP (método utilizado na elaboração do ICS-PF). Em ambos os índices os critérios DP e SA são os mais importantes na avaliação da condição dos pavimentos flexíveis. Com exceção do critério DNG, que para os profissionais é mais importante que os critérios VTO e DL, os pesos atribuídos a estes últimos foram próximos. Já em relação aos resultados da análise de sensibilidade, 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. 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.

Sendo assim, conclui-se que o ICAP representa uma ferramenta prática e confiável para a avaliação da condição da superfície de pavimentos flexíveis urbanos. Sua utilização pode proporcionar uma maior segurança para os avaliadores e representar uma redução no gasto dos recursos financeiros destinados à manutenção dos pavimentos públicos, uma vez que os dados necessários para o seu cálculo são obtidos por meio de métodos práticos, que exigem um menor número de avaliadores e tempo de execução quando comparado à métodos tradicionais como o PCI, por exemplo. Embora este fato não seja observado na comparação com as avaliações subjetivas, estas últimas não apresentam a vantagem de indicar os parâmetros da via que podem estar influenciando negativamente na condição do pavimento, assim como o ICAP. Por fim, os benefícios no uso do ICAP como forma de avaliação da condição de pavimentos flexíveis podem ser ampliados com o desenvolvimento de planilhas e aplicativos que auxiliem na armazenagem dos dados e no cálculo do índice.

REFERÊNCIAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Design of Pavement Structures**. Washington, D.C., 1993.

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. 1–15, 2017. DOI:<https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000011>.

ALBUQUERQUE, T. P. **Índice de condição baseado em defeitos superficiais para gerência de pavimentos urbanos**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

ALMEIDA FILHO, A. T.; CAVALCANTE, C. A.; ALMEIDA, A. T. Seleção de ferramenta computacional de apoio a decisão pelo método VIP Analysis. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP, 25, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre, 2005. p. 2988-2995.

AMEKUDZI, A. A.; ATTOH-OKINE, N. O. Institutional issues in implementation of pavement management systems by local agencies. **Transportation Research Record**, n. 1524, p. 10–15, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198196152400102>.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D6433-99 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys**, 1999.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D6433-11 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys**, 2011.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D6433-16 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys**, 2016.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D6433-18 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys**, 2018.

BANA E COSTA, C. A.; DE CORTE, J. M.; VANSNICK, J. C. Macbeth. **International Journal of Information Technology and Decision Making**, v. 11, n. 2, p. 359–387, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219622012400068>.

BANA e COSTA, C. A.; FERREIRA, J. A. A.; CORRÊA, E. C. Metodologia multicritério de apoio à avaliação de propostas em concursos públicos, *In*: ANTUNES, C.H. **Casos de aplicação da investigação operacional**. McGraw-Hill, 2000. p. 337-363.

BEKTAS, F.; SMADI, O.; NLENANYA, I. Pavement Condition: New Approach for Iowa Department of Transportation. **Transportation Research Record**, n. 2523, p. pp 40–46, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3141/2523-05>.

BERTOLLO, S. A. M. **Considerações Sobre a Gerência de Pavimentos Urbanos em Nível de Rede**. 1997. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 1997.

BRITO, A. J.; ALMEIDA FILHO, A. T.; ALMEIDA, A. T. Seleção de contratos de manutenção com informações imprecisas. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP, 25, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre, 2005. p. 2980-2987.

CAFISO, S; DI GRAZIANO, A.; KERALI, H. R, ODOKI, J. B. Multicriteria analysis method for pavement maintenance management. **Transportation Research Record**, n. 1816, p. 73–84, 2002. DOI: <https://doi.org/10.3141/1816-09>.

CAMPOS, V. R.; ALMEIDA, A. T. Modelo multicritério de decisão para localização de nova jaguaribara com VIP Analysis. **Pesquisa Operacional**, v. 26, n. 1, p. 91-107, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-74382006000100005>.

CAREY, W.N; IRICK, P.E. The Pavement Serviceability – Performance Concept. **Highway Research Board**, n. 250, p. 40-58, 1960.

CHAMORRO, A., TIGHE, S. L., LI, N., & KAZMIEROWSKI, T. J. Development of Distress Guidelines and Condition Rating to Improve Network Management in Ontario, Canada. **Transportation Research Record**, v. 1, n. 2093, p. 128–135, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3141/2093-15>.

CHAMORRO, A.; TIGHE, S. L.; NINGYUAN, L.; KAZMIEROWSKI, T. Validation and implementation of Ontario, Canada, network-level distress guidelines and condition rating. **Transportation Research Record**, n. 2153, p. 49–57, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3141/2153-06>.

CHAVES, M. C. C.; RAMOS, T. G.; BARROS, T. D.; MELLO, J. C. C. B. Uso integrado de dois métodos de apoio à decisão multicritério: VIP ANALYSIS e MACBETH. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v. 2, n. 2, p. 89-99, 2010.

DANIELESKI, M. L. **Proposta de Metodologia para Avaliação Superficial de Pavimentos Urbanos: Aplicação à Rede Viária de Porto Alegre**. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

DIAS, L.; CLÍMACO, J. Additive Aggregation with Variable Interdependent Parameters: The VIP Analysis Software. **Journal of Operational Research Society**, n. 51, p. 1070-1082, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601012>.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento DNIT 006/2003 – PRO**. Rio de Janeiro: IPT, 2003a.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Procedimentos DNIT 009/2003 – PRO**. Rio de Janeiro: IPT, 2003b.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Gerência de Pavimentos**. Pub. IPR-745. Rio de Janeiro, 2011.

DOMINGUES, F. A. A., MID – **Manual para identificação de defeitos de revestimentos asfálticos de pavimentos**. São Paulo, 1993.

ENSSLIN, L.; GIFFHORN, E.; ENSSLIN, S. D.; PETRI, S. M.; VIANNA, W. B. Avaliação do desempenho de empresas terceirizadas com o uso da metodologia multicritério de apoio à decisão - construtivista. **Pesquisa Operacional**, v. 30, n. 1, p. 125-152, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-74382010000100007>.

FANCELLO, G.; CARTA, M.; FADDA, P. A decision support system based on Electre III for safety analysis in a suburban road network. **Transportation Research Procedia**, v. 3, p. 175–184, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.103>.

FARASHAH, M. K. **Development Practices for Municipal Pavement Management Systems Application**. 2012. Thesis (Master of Applied Science in Civil Engineering). University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canadá, 2012

FARASHAH, M. K.; TIGHE, S. L. Development practices for Municipal Pavement Management Systems Application. *In*: CONFERENCE OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA, 2014, Montreal, Quebec. **Anais [...]**. p. 1–20.

FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (Revised)**. Report N° FHWA-HRT-13-092. U.S. Department of Transportation, Georgetown Pike McLean, 2014.

FONTENELE, H. B. **Estudo para adaptação de um método de classificação de estradas não pavimentadas às condições do município de São Carlos/SP**. 2001. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2001.

GOMES JUNIOR, S. F.; CHAVES, M. C. C.; PEREIRA, E. R.; MELLO, J. C. C. B.; LIMA, G. B. A. Integração de métodos multicritério na busca da sustentabilidade agrícola para a produção de tomates no município de São Jose de UBA-RJ. **Pesquisa Operacional**, v. 1, n. 31, p. 157-171, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-74382011000100010>.

HAAS, R.; HUDSON, W. R. **Pavement Management Systems**. New Yor: McGraw-hill, 1978.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. **Modern Pavement Management**. Krieger Publishing Company. Malaba. Florida, 1994.

HEADQUARTERS, DEPARTMENT OF THE ARMY. **Pavement maintenance management**. Technical Manual n° 5-623. Washington, 1982.

HOSTEN, A. M.; BRYCE, J.; PRIDDY, L. P.; FLINTSCH, G. W.; IZEPPI, E. L.; NELSON, W. O. **Improving Network Condition with Preventive Maintenance: A Pavement Management System Case Study in Christiansburg, Virginia**. *In*: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 92ND ANNUAL MEETING. Washington - DC, 2013.

LIMA, J. P.; RAMOS, R. A. R.; FERNANDES JR, J. L. A Prática de Gestão de Pavimentos em Cidades Médias Brasileiras. *In: 2º CONGRESSO LUSO BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL - PLURIS*, 2, 2006, Braga - Portugal. **Anais [...]**.

LIMA, J. P.; RAMOS, R. A. R.; FERNANDES JR, J. L. Priorização De Pavimentos Com O Uso Da Metodologia De Análise Multicritério E SIG. **Engevista**, v. 10, n. 2, p. 132–144, 2008. DOI: <https://doi.org/10.22409/engevista.v10i2.220>.

LONGARAY, A. A.; ENSSLIN, L. Uso da MCDA-C na avaliação de desempenho das Atividades de Trade Marketing de uma indústria do setor farmacêutico brasileiro. *In: ENADI - ENCONTRO NACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO DA INFORMAÇÃO DA ANPAD*, 4, 2013, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. p. 1-16.

LOPRENCIPE, G.; PANTUSO, A.; DI MASCIO, P. Sustainable Pavement Management System in Urban Areas Considering the Vehicle Operating Costs. **Sustainability**, v. 9, p. 1-16, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9030453>.

MACHADO, T. P. S. de O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Desenvolvimento de produtos usando a abordagem MCDA-C. **Production**, v. 25, p. 542-559, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-6513.625AO>.

MAGALHÃES, L. B.; CASTRONEVES, T.; CHAVES, M. C. DE C.; GOMES, SIMÕES, C. F.; PEREIRA, E. R. Estudo de apoio à decisão: a escolha do “Camisa 10” ideal baseado no método MACBETH. **Revista Brasileira de Futsal e Futebol**, v. 8, n. 29, p. 113–128, 2016.

MATOS, F. C. de. **Gerência da Manutenção da superfície de Rolamento de Vias Urbanas utilizando SIG**. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MERLO, P.; PALMA, L. C. R.; SILVA JUNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Avaliação das deteriorações em pavimentos flexíveis submetidos ao tráfego do transporte coletivo por ônibus. **Revista CIATEC-UPF**, v.11, n. 2, p. 45-56, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5335/ciatec.v11i2.8553>.

MIRANDA, C. M. G.; ALMEIDA, A. T. Visão multicritério da avaliação de programas de pós-graduação pela CAPES: o caso da área Engenharia III baseado nos métodos ELECTRE II e MAUT. **Gestão & Produção**, v. 11, n. 1, p. 51-64, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2004000100005>.

OLIVEIRA, J. J.; FERNANDES JR., J. L.; LOPES, S. B.; PEREIRA, C. R. Implantação de Um Sistema Dinâmico de Gerência de Pavimentos Urbanos (SDGPU) em Cidade de Médio Porte. *In: PLURIS - PLANEJAMENTO URBANO REGIONAL INTEGRADO E SUSTENTÁVEL*, 2012, Brasília - DF. **Anais [...]**.

OLIVEIRA, F. M.; SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Desenvolvimento de escala visual para avaliação da condição da superfície de vias urbanas. **Conexões: Ciência e Tecnologia**, v. 7, p. 31-47, 2013. DOI: <https://doi.org/10.21439/conexoes.v7i1.569>.

OSORIO, A. **Development of Performance Models of Urban Pavements for Network Analysis**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de Waterloo, Waterloo, Canadá, 2015.

PAEZ, E. M. A. **Índice de Condição do Pavimento (ICP) para Aplicação em Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos**. 2015. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2015.

PALMA, L. C. R. **Impacto do Transporte Público por Ônibus na Condição da Superfície dos Pavimentos Flexíveis em Vias Urbanas**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

PERDIGÃO, J. G. L.; FULGÊNCIO, E. V.; SOUSA, S. A. C.; MAGALHÃES NETO, J. B.; DORNELAS, J. S. Processo decisório: um estudo comparativo da tomada de decisão em organizações de segmentos distintos. *In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, SEGeT, 9, 2012, Resende. Anais [...]*. p. 1-17.

PEREIRA, L. A. **Escala Visual: Uma Ferramenta para a Avaliação da Condição da Superfície de Pavimentos Urbanos**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

PESCADOR JUNIOR, A. C.; DA SILVA JUNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Comparação De Métodos De Avaliação Da Condição De Pavimentos Flexíveis Com O Auxílio De Um Sig-T. **Revista CIATEC-UPF**, v. 10, n. 1, p. 95–103, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5335/ciatec.v10i1.7297>.

RANGEL, L. A. D; GOMES, L. F. A. M. O apoio multicritério à decisão na avaliação de candidatos. **Revista Produção**, v. 20, n. 1, p. 92-101, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132010005000016>.

REZA, F.; BORIBOONSOMSIN, K.; BAZLAMIT, S. Development of a Pavement Quality Index for the State of Ohio. *In: 85TH ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD*, 2006, Washington D.C.

RODRIGUES, E. C. C. **Metodologia para investigação da percepção das inovações na usabilidade do sistema metroviário – uma abordagem antropotecnológica**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

RODRIGUES, R. R. **Índice para avaliação de desempenho ambiental dos serviços da manutenção rodoviária**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2018.

ROY, B. Decision science or decision-aid science?. **European Journal of Operational Research**, v. 66, n. 2, p. 184–203, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90312-B](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90312-B).

SAATY, R. W. The Analytical Hierarchy Process - What and Why it is Used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3, p. 161–176, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).

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**. p. 1–10, 2020. Disponível em: <https://revistas2.uepg.br/index.php/ret/article/view/14895>.

SALVIATTO, V.; SILVA JUNIOR, C. P.; FONTENELE, H. B. Avaliação da condição de pavimentos flexíveis urbanos baseada no conforto, defeitos e volume de tráfego. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES - ANPET, 2019, Balneário Camboriú. **Anais [...]**. p. 12.

SARAF, C. L. **Pavement Condition Rating System Review of PCR Methodology**. Ohio Department of Transportation, Columbus. 1998.

SCHMIDT, A. M. A. **Processo de apoio à tomada de decisão – Abordagens: AHP e MACBETH**. 1995. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

SEQUINEL, L. F. **Modelo para Avaliação Ambiental em Obras de Manutenção Rodoviária baseado numa Análise Multicritério Construtivista**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2019.

SHAH, Y. U.; JAIN, S.S.; TIWARI, D.; JAIN, M.K. Modeling the pavement serviceability index for urban roads in Noida. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 6, n. 1, p. 66–72, 2013a.

SHAH, Y. U.; JAIN, S. S.; TIWARI, D.; JAIN, M. K. Analysis of flexible pavement serviceability using ANN for urban roads. *In*: Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements - Proceedings of the 2013 Airfield and Highway Pavement Conference, 2013b. **Anais [...]**. p. 478–489.

SHAHIN, M. Y. **Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots**. 2. ed. New York: Springer, 2005.

SHAHIN, M. Y.; KOHN, D. S. **Development of a pavement condition rating procedure for roads, streets and parking lot**. CERL-TR-M-268, U. S. Army, 1979, vol. 1 e 2.

SHRP - STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement performance Studies**. National Academy of Science. Washington, D.C, 1993.

SONCIM, S. P. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos com base em dados da rede de rodovias do Estado da Bahia**. 2011. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2011.

TAWALARE, A.; RAJU, K. V. Pavement Performance Index for Indian rural roads. **Perspectives in Science**, v. 8, p. 447–451, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.101>.

VENTURA, A. A. V. **Aplicação do método Action Research ao processo de apoio à decisão com o uso do sistema VIP Analysis**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.

VILELLA, F. R. **Análise multicritério para a definição do índice de qualidade de fornecimento de energia elétrica por uma distribuidora**. 2009. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2009.

ZANCHETTA, F. **Aquisição de Dados sobre a Condição dos Pavimentos visando a Implementação de Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos**. 2005. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, 2005.

ZANCHETTA, F. **Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos: Avaliação de Campo, Modelo de Desempenho e Análise Econômica**. 2017. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2017.