AMANDA HELENA MARCANDALI DA SILVA

**PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE
MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS**

São Paulo
2017

AMANDA HELENA MARCANDALI DA SILVA

**PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE
MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS**

Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. Liedi Légi Bariani Bernucci

São Paulo
2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Silva, Amanda Helena Marcandali da

Proposta de procedimento para análise de alternativas de manutenção em sistemas de gerência de pavimentos / A. H. M. Silva -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

205 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Rodovias {gerenciamento} 2.Análises de riscos 3.Parceria público privada 4.Tomada de decisão 5.Pavimentação I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

*À minha família, com a convicção de que,
sem a qual nada faria sentido.*

Agradecimentos

À minha família, incrível, única, inquebrável. Impossível agradecer o bastante a vocês. As palavras reduzem à dimensões normais, aquilo que é infinito em mim! Para onde minha inquietude me levar, sei para quem voltar.

À minha orientadora e amiga, Liedi Bernucci, de sabedoria e generosidade extremas, me ensina e orienta para muito além do doutorado e da carreira, me orienta para a vida.

Ao professor Carlos Yukio Suzuki, sempre com disposição para ensinar e que me ajudou a construir minha carreira acadêmica.

Ao Octavio Campos, que tanto contribuiu na construção deste trabalho desde o exame de qualificação.

Ao André Felipe Vale, com o qual eu tive a oportunidade de trabalhar em uma parceria muito construtiva entre Dynatest, OHL e Arteris.

Ao Professor Rodrigo Miró, sempre disposto a ajudar e que em parceria com a Abertis, plantou a semente que deu origem ao tema proposto neste trabalho.

Aos muitos amigos que me ajudaram nesse longo período e que tenho alegria de pensar que os levo para a vida toda: Ana Luisa Aranha, Cesar Peña, Carlos Magno Cardozo Candeias, Danielle Halax, Diomaria Santos, Fabio Meyer, Jordi Camprubí, José Mario Chaves, Máisa Pires, Patrícia Santana, Rosangela dos Santos Motta, Rosely Costa Rufo, Santi Ferri.

À Arteris e à Abertis, que me propiciaram uma visão mais ampla sobre a concessão de rodovias e sobre os riscos do negócio nos mais distintos níveis e que ao requererem a implantação de um SGP me deram a oportunidade de desenvolver um programa in-house, cujos princípios fundamentam este trabalho.

Resumo

Este trabalho apresenta um procedimento para a análise e seleção de estratégias de manutenção de pavimentos em malhas de redes de rodovias, sendo proposto um modelo de sistema de gerência de pavimentos que inclui análises de riscos. O trabalho propõe a análise concomitante de diversas rodovias que sejam gerenciadas por uma mesma instituição, de modo a identificar os efeitos das estratégias individuais de manutenção sobre os custos totais para administração da malha. Para tanto são integrados elementos das análises em nível de projeto, com elementos adicionais, contendo informações especialmente relacionadas a riscos, de diversas naturezas e que possam ter impacto nas análises pelo sistema. Os conceitos fundamentais dos sistemas de gerência de pavimentos, tanto para aplicação em nível de rede, como para o nível de projeto, são utilizados no procedimento proposto de modo que grande parte dos dados requeridos é comum aos distintos níveis. O principal objetivo da integração entre os níveis de projeto e de rede é aumentar a confiabilidade dos resultados. Assim, a estrutura se inicia pelo nível de projeto, o qual contempla informações detalhadas acerca das condições dos pavimentos. Nesta etapa, os segmentos homogêneos são detalhadamente delimitados, e a utilização de variáveis obtidas por correlações é indicada. Tais elementos permitem que as intervenções sejam propostas de modo mais assertivo no curto prazo. Para a conexão entre os níveis de projeto e de rede, são selecionadas variáveis de desempenho advindas de medidas diretas sobre as condições dos pavimentos. É mais conveniente a utilização de variáveis que estejam alinhadas com requerimentos contratuais ou indicadores de desempenho. No nível de rede, a segmentação homogênea está orientada para fornecer resultados não detalhados, mais genéricos e de maior amplitude, que estatisticamente incluem variações de desempenho, comuns às projeções de médio e longo prazo. Para o procedimento, são elaborados cenários de análises, alinhados com políticas, objetivos, restrições, entre outros aspectos que possam influenciar a seleção de estratégias para intervenções em pavimentos. A ampliação dos elementos considerados nas análises, que resulta no nível proposto nesta tese, inclui estudos específicos sobre riscos. Os diversos riscos envolvidos na administração de rodovias vêm sendo explorados em maior profundidade em virtude da crescente participação

da iniciativa privada em contratos de concessão. Os riscos são, portanto, considerados nos distintos níveis das organizações, a partir dos quais são eleitos aqueles que estejam relacionados e exerçam maiores impactos na gestão dos pavimentos. O estudo de caso conduzido para apresentar o procedimento contempla a análise de três rodovias concessionadas, considerando suas características específicas como condições dos pavimentos e requisitos contratuais. A partir do estudo de caso é possível pontuar aspectos relevantes nas análises em nível de rede, contribuindo para a construção de sistemas altamente orientados.

Palavras-chave: Rodovias (gerenciamento). Análises de riscos. Tomada de decisão. Parceria público-privada. Pavimentação

Abstract

This thesis presents a procedure for the performing analysis and selection of strategies for the maintenance of road pavements in highways networks, by proposing a model of pavement management system that includes risk analysis. The work proposes the concomitant analysis of several highways that are managed by the same institution, in order to identify the effects of the individual maintenance strategies on the total costs for the administration of the network. For this purpose, the elements from project-level and network-level analysis are integrated with additional elements, especially those related to risk information, diverse in nature and with the capacity of impact on the system's analysis. The fundamental concepts of pavement management systems for both network-level and project-level are applied in the proposed procedure as the majority of the required data is common in both levels. The main purpose of the integration between the levels is to increase the reliability of the results. Thus, the structure begins at project-level, which includes detailed information about the condition of the pavements. In this step, the homogeneous segments are well delimited and the use of correlation obtained variables is indicated. These elements allow the proposed interventions to be more assertive on a short-term period. The indicators selected for the connection between project-level and network-level come from direct measurements on the conditions of the pavements. It is more convenient to use variables that are in line with contractual requirements or performance indicators. At the network level, homogeneous segmentation is oriented to provide not detailed results but to consider the larger scale. That includes, from statistically point of view, performance variations, common on projections for the medium and long-term. For the procedure, analysis scenarios are elaborated, in line with policies, objectives, constraints, and other aspects that may influence the selection of strategies for pavements interventions. The expansion of the elements considered in the analysis, which results in the proposed level, includes specific studies on risks. The various risks involved in the management of roads have been deeply explored due to the increasing participation of private partners in concession contracts. Therefore, the risks are considered in the different levels of the organizations. From those risks, the ones that are related and imply in a greater impact in the management of pavements are elected. The case study conducted to present the procedure includes the analysis of three

highways under concession of a PPP (Private Public Partnership), considering its specific characteristics and pavements conditions, and contractual requirements. From the case study it is possible to draw attention to important aspects of the analysis at a macro network-level, contributing to the construction of highly oriented systems.

Key words: Highways (management). Risk analysis. Decision-making. Public-private partnership. Pavements.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Relação entre índice de serventia e vida útil dos pavimentos, em função das atividades de manutenção (adaptado de Benevides, 2006 apud Haas e Hudson, 1978).....	18
Figura 2 - Principais atividades de cada nível de análise (modificado a partir de Haas et al, 1997)	29
Figura 3 - Níveis de análise em função das informações requeridas (modificado a partir de Hass et al, 1997)	31
Figura 4 - Estrutura proposta para análise em nível (Modificado a partir de Flintsch et al, 2009)	34
Figura 5 - Incertezas na previsão de desempenho (modificado a partir de Amador e Mrawira, 2008)	47
Figura 6 - Project Delivery Methods para infraestrutura - Perspectiva internacional (Modificado a partir de FHWA, 2007)	52
Figura 7 - Alocação de risco em projetos de PPP's, para ambos os parceiros, público e privado	59
Figura 8 - Ciclo para projetos de PPP's	60
Figura 9 - Comparação com setor público para determinação de Value for Money..	62
Figura 10 - Mercado resultante da relação entre o número de participantes em leilões e o custo de entrada de projetos de PPP.....	63
Figura 11 - Relação do período de concessão em relação aos investimentos	64
Figura 12 - Principais riscos durante as fases de um projeto	66
Figura 13 - Processo iterativo na análise de riscos	76
Figura 14 - Categorização de riscos.....	78
Figura 15 - Procedimento bootstrapping para determinar a convergência em simulações de Monte Carlo (modificado a partir de Lea, 2013)	79
Figura 16 - Representação esquemática de repetição aleatória para determinação do objeto	80
Figura 17 - Estrutura hierárquica genérica de problemas de decisão	83
Figura 18 - Representação esquemática das atividades preventivas e corretivas	86
Figura 19 - Representação de uma rede de rodovias na França, administradas por uma mesma instituição	88
Figura 20 - Período recomendável para a manutenção dos pavimentos (Bernucci et al, 2007)	91
Figura 21 - Falling Weight Deflectometer (Preussler, 2007 apud Dynatest, 1995)....	94
Figura 22 - Zona de tensões e correlação com as propriedades das camadas (modificado a partir de Donovan e Tutumluer, 2009)	95
Figura 23 - Bacias de deflexão em diferentes níveis de aplicação de carga (modificado a partir de Donovan e Tutumluer, 2009)	97
Figura 24 - Deflexão máxima para duas bacias de deformação diferentes (Lopes, 2012 apud Horak, 1987)	98
Figura 25 - Deterioração identificada a partir de medidas de deflexão (modificado a partir de Donovan e Tutumluer, 2009)	104
Figura 26 - Limites recomendados pela OECD em função do volume de tráfego (modificado a partir de Ballesteros e Vassallo, 2012)	108
Figura 27 - Relação entre os custos de usuários e os custos de manutenção dos pavimentos. (Modificado a partir de Ballesteros e Vassallo, 2012)	109
Figura 28 - Período recomendável para a manutenção dos pavimentos (Bernucci et al, 2007)	111

Figura 29 - Representação gráfica dos dados utilizados para a definição do incremento obtido por uma intervenção corretiva	113
Figura 30 - Representação esquemática de soluções aplicadas a conjuntos de variáveis de nível de projeto e de nível de rede	121
Figura 31 - Medidas de deflexão máxima obtidas ao longo de uma rodovia com características heterogêneas inerentes à elevada extensão	123
Figura 32 - Modelos de desempenho desenvolvidos a partir dos valores médios das deflexões heterogêneas (não segmentadas) de uma rodovia	123
Figura 33 - Número de modelos associados a cada nível de classificação de cada critério de segmentação	124
Figura 34 - Período de confiabilidade dos modelos	125
Figura 35 - Padrão de deterioração para pavimentos sujeitos a diferentes processos de manutenção	126
Figura 36 - Elementos de conexão entre os cenários, nos anos de análise	136
Figura 37 - Resultados obtidos a partir das variáveis adotadas	136
Figura 38 - Elementos integrantes em cada nível de análise	139
Figura 39 - Matriz de riscos para identificação dos responsáveis por cada risco	145
Figura 40 - Exemplo de simulação de riscos	148
Figura 41 - Relação de importância entre as variáveis	151
Figura 42 - Variáveis analíticas definidas a partir dos cenários e variáveis analíticas vinculativas	152
Figura 43 - Resultado da simulação pelo Método de Monte Carlo	153
Figura 44 - Procedimento para análise em nível de rede macro	157
Figura 45 - Mapa de riscos para as rodovias analisadas	161
Figura 46 - Equalização do número de variáveis em dois cenários distintos	165
Figura 47 - Procedimento de segmentação homogênea	167
Figura 48 - Classes de desempenho para segmentação homogênea na etapa de análise em nível de rede	168
Figura 49 - Comparação entre método de dimensionamento e modelo de desempenho	171
Figura 50 - Comparação de modelos de desempenho com características similares	173
Figura 51 - Modelos de desempenho desenvolvidos para o parâmetro de deflexão	174
Figura 52 - Modelos de desempenho desenvolvidos para o parâmetro de IRI	175
Figura 53 - Interação entre os diversos níveis da instituição em relação aos riscos	180
Figura 54 – Procedimento de análise qualitativa de riscos	182
Figura 55 - Variáveis analíticas derivadas das variáveis de desempenho	184
Figura 56 – Resultado de variável analítica composta	185
Figura 57 - Resultados da simulação pelo método de Monte Carlo	187

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Baseado na publicação da FHWA, 2007.....	53
Tabela 2 - Matriz típica para alocação de risco	77
Tabela 3 - Representação esquemática para a tolerância de defeitos em pavimentos asfálticos (Modificado a partir de Zimmerman, 2010)	87
Tabela 4 - Processo de segmentação pelo método do mínimo denominador comum	89
Tabela 5 - Parâmetros para interpretação de bacia de deflexões (Kumlai et al., 2014)	107
Tabela 6 - Composição de matrizes com o número de conjunto de classes.....	130
Tabela 7 - Combinação entre as condições dos pavimentos para proposta de soluções.....	131
Tabela 8 - Comparação de matrizes de soluções baseadas em políticas de atuação	132
Tabela 9 - Variação nas características de contrato em função de distintas políticas contratuais de atuação	133
Tabela 10 - Construção de cenários com base em políticas de atuação, condições do pavimento e gatilhos de intervenção	134
Tabela 11 - Associação da condição do pavimento aos parâmetros de desempenho	135
Tabela 12 - Variáveis analíticas obtidas das variáveis de desempenho	141
Tabela 13 - Variáveis obtidas da correlação de variáveis de desempenho.....	142
Tabela 14 - Classificação dos riscos e mecanismos de manejo	146
Tabela 15 - Características gerais das rodovias avaliadas no estudo de caso	159
Tabela 16 - Requisitos contratuais e de gestão interna para as rodovias avaliadas	163
Tabela 17 - Soluções propostas para aplicação em matrizes de soluções	173
Tabela 18 - Sequência para simulações anuais.....	176
Tabela 19 - Classificação das condições dos pavimentos	178
Tabela 20 - Combinações entre os gatilhos de intervenções e as políticas de atuação	179
Tabela 21 - Limites para a simulação de dados aleatórios para análise de probabilidades.....	186
Tabela 22 - Relação entre os resultados de probabilidades e as variáveis de desempenho para indicação da variável analítica.....	188
Tabela 23 - Variáveis avaliadas por meio da ferramenta AHP	189
Tabela 24 – Resultado da análise pelo método AHP	190

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO – American Association of State Highway Officials

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

AHP – Analytic Hierarchy Process

ASTM – American Society for Testing and Materials

BCI – Base Curvature Index

BDI – Base Damage Index

BOO – Build-Own-Operate

BOOT – Build-Own-Operate-Transfer

BOT – Build-Operate-Transfer

BTO – Build-Transfer-Operate

CBR – California Bearing Ratio

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CM@R – Construction Manager @ Risk

CPM – Critical Path Method

DB – Design-Build

DBB – Design-Bid-Build

DBF – Design-Build-Finance

DBFO – Design-Build-Finance-Operate

DBFOM – Design-Build-Finance-Operate-Maintain

DBOM – Design-Build-Operate-Maintain

DER – Departamento de Estradas de Rodagem

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

EAP – Estrutura Analítica de Projetos

FHWA – Federal Highway Administration

FTA – Fault Tree Analysis

FWD – Falling Weight Deflectometer

HCM – Highway Cost Model

HDM – Highway Development and Management

IAM – Institute of Asset Management

IRI – International Roughness Index

LTPP – Long term Pavement Performance

MEPDG – Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide

NCHRP – National Cooperative Highway Research Program

PERT – Program Evaluation and Review Technique

PSC – Public sector comparator

PPP – Parceria Público Privada

PSI – Present Serviceability Index

RWD – Rolling Wheel Deflectometer

SCI – Surface Curvature Index

SCI – Structural Condition Index

SGP – Sistema de Gerência de Pavimentos

SN – Structural Number

SNC – Structural Number Combined

S_{Neff} – número estrutural efetivo

S_{Nreq} – número estrutural requerido

VAD – Variáveis Analíticas Diretas

VAI – Variáveis Analíticas Indiretas

VfM – Value for Money

WB – World Bank

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivos.....	23
1.3	Organização da tese.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1	Gerência de pavimentos	27
2.1.1	Nível de projeto nos sistemas de gerência de pavimentos.....	35
2.1.2	Nível de rede nos sistemas de gerência de pavimentos.....	37
2.1.3	Dados das condições dos pavimentos.....	38
2.1.4	Modelos de desempenho de pavimentos	43
2.2	Administração de rodovias	49
2.3	Viabilidade de implementação de PPP	58
2.4	Riscos e custos associados	65
2.5	Análise de Riscos	75
2.6	Critérios para processo de tomada de decisão	81
3	MODELO DE ANÁLISE DE SISTEMAS DE REDE VIÁRIA PROPOSTO	85
3.1	Nível de projeto.....	88
3.1.1	Deflexão de pavimentos	92
3.1.2	Parâmetros das bacias de deflexão	98
3.1.3	IRI e Área Trincada.....	107
3.1.4	Modelos de desempenho em nível de projeto	110
3.1.5	Elemento de conexão com o próximo nível – rede	113
3.2	Nível de rede	114
3.2.1	Variáveis de desempenho	118
3.2.2	Modelos de desempenho em nível de rede	122
3.2.3	Análise de cenários em nível de rede	127

3.2.4	Elemento de conexão com o próximo nível – rede macro.....	136
3.3	Nível de rede macro	137
3.3.1	Variáveis analíticas	140
3.3.2	Análise de riscos	144
3.3.3	Método de Monte Carlo	147
3.3.4	Analytic Hierarchy Process – AHP – Processo Analítico Hierárquico	149
4	ESTUDO DE CASO	155
4.1	Características gerais de contrato de PPP	159
4.2	Estruturação de banco de dados	161
4.3	Definição de variáveis de desempenho.....	164
4.4	Modelos de desempenho.....	169
4.5	Definição de cenários	175
4.6	Matriz de riscos	179
4.7	Definição de variáveis analíticas.....	183
4.8	Análise probabilística de riscos	185
4.9	Tomada de decisão.....	188
4.10	Análise de sensibilidade.....	190
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	193
5.1	Conclusões	193
5.2	Recomendações	199
	Referências Bibliográficas	200

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

As malhas viárias representam reconhecidamente um patrimônio valioso para o Estado. São volumosos os investimentos destinados à construção e à manutenção das vias, gerando os impactos sobre o escoamento de bens, capaz de garantir competitividade na comercialização entre distintas regiões. Somada às questões de economia do Estado, devem-se manter adequadas as condições de segurança dos usuários. Portanto, gerir uma rede viária representa orientar e coordenar um complexo sistema de aplicação de recursos técnicos e financeiros. Alam (2015) relaciona os incrementos em redes de transporte à redução da pobreza por meio da redução dos custos de transportes, criação de empregos, expansão da capacidade de produção, melhoria no acesso a mercados e serviços básicos como educação e saúde, e redução dos preços de bens e serviços.

A construção de novas vias é tão imprescindível quanto a manutenção e a restauração de vias existentes; os custos entretanto, diferem-se consideravelmente, sendo que em função do estado de deterioração, a restauração pode apresentar custos superiores à construção original, tendo em vista custos adicionais com interrupção no tráfego e suas inerentes decorrências. Para cada real gasto com manutenção preventiva, quatros reais são poupados em atividades corretivas, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Relação entre índice de serventia e vida útil dos pavimentos, em função das atividades de manutenção (adaptado de Benevides, 2006 apud Haas e Hudson, 1978)

Sob os mesmos princípios de evolução, com aumento não linear da deterioração, os custos para manutenção das vias dependem principalmente da periodicidade com que é realizada. Os custos da manutenção ou da falta de manutenção são necessariamente transferidos aos usuários, mesmo que indiretamente, uma vez que são igualmente importantes nesta equação, os custos operacionais (aqui compreendidos como custos dos usuários, e não para a operação rodoviária) e a eficiência do transporte de cargas e de pessoas.

Gerir extensas malhas viárias significa priorizar investimentos de modo assertivo, com a disponibilização de recursos que podem advir de fontes diversas, tais como parcerias público-privadas ou administração pública (Queiroz et al, 2008). Neste contexto, os sistemas de gestão de pavimentos representam uma importante ferramenta, cujo desenvolvimento mais acentuado remete às décadas mais recentes, propiciado pelos desenvolvimentos computacionais, que permitiram a configuração de avaliações mais amplas e diversificadas de condições e soluções.

Os sistemas de gerência de pavimentos vêm recebendo uma distinção não precisa sobre as avaliações em nível de rede e em nível de projeto. As duas classificações são apontadas por diversos autores na literatura, mas a definição clara de cada uma varia frequentemente conforme o entendimento e aplicação da ferramenta. Entretanto, é evidente a compreensão de que se trata de níveis complementares e dependentes, com o mesmo objetivo final, apesar do tratamento diferenciado de dados e da aplicação dos resultados.

As análises em nível de rede procuram priorizar atuações de intervenção nos pavimentos, em geral com base em árvores de decisão, nas quais as soluções mais generalizadas são aplicadas conforme a avaliação dos itens postulados ou de interesse. Nas análises em nível de projeto, as soluções corretivas ou preventivas são definidas com base nas características regularmente requeridas nos projetos de dimensionamento de pavimentos, com maior nível de detalhamento e conseqüentemente, demandando maior precisão nos dados de caracterização das condições das vias. Os condicionantes orçamentários advindos das análises em nível de rede são assim distribuídos detalhadamente em nível de projeto.

Ambos os níveis de análises estão vinculados a modelos de desempenho, elementares para a previsão de comportamento e durabilidade das soluções consideradas ou empregadas. Os modelos para previsão representam um dos aspectos mais complexos e importantes dentro dos sistemas de gerência de pavimentos.

Sistema de gerência de pavimentos é, resumidamente, uma complexa interação entre um banco de dados de caracterização das condições das vias, um grupo de modelos de previsão de desempenho confiável e realista e, um padrão de análises de matrizes de decisão em função dos aspectos de maior relevância ao longo do período avaliado. A determinação das variáveis de interesse para as análises em nível de rede é normalmente baseada no tipo de priorização almejada. Destacam-se os critérios mais utilizados: tráfego, classificação funcional, questões de segurança e fatores econômicos como custos operacionais de usuários e custos administrativos, além das condições funcionais e estruturais dos pavimentos. A determinação também deve considerar a natureza da gestão; a administração pública tem características consistentemente diferenciadas da administração privada.

A participação de instituições privadas na gestão das rodovias, iniciada com os diversos programas de concessão pelo mundo, incorpora o conceito de negócio na gestão de rodovias e representa importante incremento nos patamares de qualidade dos serviços relacionados a transportes, requerendo de modo mais evidente a racionalização das decisões relativas aos investimentos de longo prazo. Embora a iniciativa privada seja, em princípio, reconhecidamente mais eficiente na gestão de recursos, alguns países demonstram a mesma preocupação na gestão pública das rodovias, incluindo análises de ciclos de vida e conceitos estratégicos de longo prazo. As necessidades destes, entre diversos grupos, alavancam a evolução dos sistemas de gerência de pavimentos. O principal elemento de avaliação, seja para a administração pública ou administração privada, é a viabilidade do investimento diante das necessidades de infraestrutura, considerando o projeto inserido em um contexto de análise.

As Parcerias Público Privadas – PPP's vêm despertando mais interesse em diversos setores da sociedade, cativando os setores públicos com a promessa de incrementos singulares na qualidade dos serviços prestados, por meio de habilidades desenvolvidas para a gestão dos ativos concessionados. Contudo, diversos fatores são extremamente relevantes para garantir o sucesso de qualquer projeto, sendo crucial prever com a maior assertividade possível, o comportamento do maior número de variáveis que compõe o projeto. Os riscos figuram como elemento especialmente exigente, cujas análises podem impactar na viabilidade total da administração de rodovias. A distribuição adequada de recursos depende da capacidade técnica para a gestão de longo prazo dos ativos, considerando desempenho, riscos e custos. Tais considerações podem se restringir a uma rodovia, ou podem incluir um conjunto ou uma rede de rodovias.

As análises em nível de rede buscam comparar as necessidades de atuação numa determinada extensão de vias, com vistas aos critérios de durabilidade, essencialmente, garantindo condições de segurança e trafegabilidade, hierarquizando as soluções em função das mencionadas variáveis de interesse. Considerando-se no entanto, redes ou malhas compostas por várias rodovias, sujeitas a diferenciações importantes entre si, observa-se a necessidade da inclusão de um nível adicional na avaliação e priorização dos investimentos nas intervenções dos pavimentos.

Haas et al. (1994) sugere que as atividades de orçamento e de programação estejam incluídas nas análises em nível de rede, enquanto as atividades de dimensionamento de construção e de manutenção estejam incluídas nas análises em nível de projeto. Contudo, não se menciona a análise combinada de mais de uma rodovia nestes conceitos.

Um conjunto de rodovias sob gestão de um mesmo grupo, público ou privado, também pode ser avaliado por um sistema de gerência de pavimentos, fundamentado nos modelos de previsão de desempenho individuais de cada via, para a priorização de investimentos entre as vias, e não somente dentro de cada via. A diferenciação de **entre** e **dentro** é fundamental para a delimitação dos níveis de avaliação.

A avaliação em nível de rede **dentro** de uma ou mais rodovias hierarquiza as condições das vias em função de critérios de durabilidade e desempenho. O resultado é a distribuição dos recursos para atender as demandas corretivas ou preventivas necessárias para a manutenção de um determinado nível de qualidade previamente estipulado. A avaliação em nível de rede **entre** as rodovias de um grupo se baseia nos resultados apontados pelo nível *dentro*, contudo os fatores econômicos têm maior relevância, podendo-se destacar como exemplo, demandas de tráfego, taxa interna de retorno, tarifa de pedágio, penalizações e bonificações, dentre outros.

O **nível de rede referente a uma macro análise, ou simplesmente macro**, termo cunhado neste trabalho e que se propõe nesta tese, procura considerar os aspectos técnicos de desempenho dos pavimentos, em conjunto com os fatores adicionais de cada rodovia, para priorizar investimentos diferenciados entre as rodovias de uma mesma rede ou conjunto. Estes estudos são especialmente voltados para análises de viabilidade de parcerias público-privadas (PPP), uma vez que usualmente na administração pública trabalha-se com os custos totais dos ciclos de vida de toda a malha. Muito embora o estudo seja direcionado às concessões privadas e às PPP é igualmente possível adotar análises neste nível proposto para rodovias submetidas à administração pública, sem alterações conceituais relevantes.

Os parâmetros de desempenho das rodovias podem ser distintos, tanto por demanda contratual, quanto por demandas técnicas como tráfego e estrutura. O atendimento aos parâmetros de desempenho previamente definidos é um fator elementar para a priorização em nível de rede macro, tendo em vista que o descumprimento implica na ocorrência de fatores adicionais como custos operacionais dos usuários, custos de acidentes, custos por multas contratuais, dentre outros.

Desta forma, a priorização de investimentos entre rodovias no nível de rede macro, considera os critérios econômicos, preservando as características funcionais das vias, determinadas previamente em nível de rede e em nível de projeto. A combinação dos fatores para a avaliação em nível de rede macro se apoia nas análises mais detalhadas das necessidades das vias. As análises conduzidas no nível de rede macro, no entanto, não esgotam as análises econômicas necessárias para a gestão

de rodovias, mas procura inserir esses aspectos nas decisões relativas à manutenção dos pavimentos.

Análises com um sistema macro pode contribuir para a identificação de pontos fortes ou fracos na rede viária e, desta forma, permitir a adoção de tratamentos diferenciados em níveis estratégicos. O sistema pode ser auxiliar no reconhecimento de condições distintas entre rodovias que podem requer a fixação de limites de qualidade distintos.

O reconhecimento das diferenças entre as rodovias é a principal justificativa para a delimitação de um nível adicional de análise na gerência de pavimentos. A distribuição de recursos entre as rodovias em função de condições de desempenho, classificação funcional e relevância econômica de cada uma é fundamental para a gestão otimizada de pavimentos de várias vias.

O equilíbrio na distribuição dos recursos deve considerar, por exemplo, que enquanto uma rodovia é preterida, outra deve justificar sua priorização por algum critério, preservados os limites aceitáveis de desempenho para ambas, até que ocorra o equilíbrio nos investimentos.

As análises propostas neste nível de gestão procuram subsidiar tecnicamente as decisões acerca dos investimentos, definindo critérios para priorização sem prejuízos para os usuários. A gestão eficiente de recursos se baseia nas premissas de melhoria de atuação e ampliação de benefícios à sociedade.

1.2 Objetivos

O objetivo central deste trabalho é apresentar um procedimento para a análise de pavimentos de modo a definir estratégias de manutenção de sistema de gerência, empregando um nível adicional de análise que estuda de forma combinada as condições em nível de projeto e de rede, aplicadas para um conjunto de pavimentos de um sistema ou malha viária. O nível de rede macro, termo a ser empregado nesta tese, agrega informações adicionais às análises que podem afetar a seleção de estratégias de intervenções. Destacam-se entre as informações adicionais os

aspectos relativos ao tráfego, bem como aspectos relativos à qualidade dos pavimentos.

O procedimento apresentado consiste na conjugação de elementos dos níveis de projeto e de rede, consagrados e amplamente utilizados por gestores de rodovias. Tais elementos são utilizados em formatos específicos para atingir o objetivo de análise em nível de rede macro.

Neste trabalho, são considerados aspectos adicionais para integrar as análises de modo a tornar os resultados mais eficientes e alinhados com um conjunto de ações necessárias à manutenção de rodovias, uma vez que a gestão dos pavimentos está inserida em um vasto sistema de tomadas de decisão.

Assim, faz parte dos objetivos principais deste trabalho explorar os mecanismos para administração de rodovias, reconhecendo a presença crescente da iniciativa privada, especialmente por meio de Parcerias Público Privadas – PPP's. A participação privada na administração de rodovias, vêm requerendo análises aprofundadas e sistematicamente orientadas para a gestão de riscos.

A identificação e devidas ponderações sobre os riscos relacionados às estratégias de intervenções de manutenção em pavimentos representam os elementos adicionais de análise no proposto nível de rede macro, destacando-se a análise de riscos entre os objetivos principais deste trabalho.

1.3 Organização da tese

Esta Tese de Doutorado está organizada em cinco capítulos para a apresentação de um procedimento para análise de pavimentos em nível de rede macro. No primeiro capítulo é apresentada uma introdução ao tema, com informações sobre o cenário atual da administração de rodovias, como motivação para o desenvolvimento do trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os conceitos relacionados aos sistemas de gerência de pavimentos, incluindo aspectos mais relevantes que integram os procedimentos para gestão em nível de rede e em nível de projeto. Também neste capítulo são apresentadas informações relacionadas à administração de rodovias, considerados os aspectos relacionados às diferentes partes, como sociedade, governos e instituições privadas. Ainda neste capítulo são abordados elementos relativos à gestão de riscos e ao processo de tomada de decisão em cenários multicritérios.

O terceiro capítulo apresenta o procedimento para a condução de análises no nível proposto de rede macro. São apresentadas considerações sobre o tratamento dos dados utilizados nas análises, bem como é apresentada a estruturação do sistema de análise e ainda dos conceitos relativos ao tratamento de riscos.

No quarto capítulo é apresentado um estudo de caso, com o objetivo de ilustrar a construção do procedimento para análise em nível de rede macro. O caso apresentado inclui aspectos relacionados aos riscos enfrentados pela perspectiva da iniciativa privada na concessão da administração de rodovias em contratos de PPP's.

O último capítulo discute os resultados assim como apresenta as conclusões finais do trabalho acerca da validade do modelo proposto assim como são tecidas recomendações para trabalhos futuros e para a implementação de sistemas de gerência de manutenção de pavimento em nível de rede macro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este trabalho apresenta uma proposta para a análise de dados acerca das condições dos pavimentos para auxiliar na tomada de decisões em um sentido amplo, considerando informações relativas aos recursos disponíveis para a manutenção de redes, às alterações nas condições de contorno e aos impactos das estratégias adotadas.

A abordagem apresentada neste documento contempla os níveis de rede e de projeto, adicionando uma análise conjunta dos dados. Os níveis de projeto e de rede estão apresentados como distinções de análises dentro de sistemas de gerência de pavimentos e são definidos, em princípio, individualmente, uma vez que cada nível requer especificidades próprias, sendo fundamental pontuar as diferenças e os requisitos e estabelecer limites, prévios à análise proposta em nível de rede macro.

Apesar dos elementos individuais de cada nível, todos os aspectos apresentados são fundamentais para a adequada interação entre os níveis, e portanto, para a análise em nível de rede macro. O conceito é mais claramente evidenciado pela necessidade de informações para abastecer o nível de rede macro.

No nível de projeto, as informações são detalhadas tanto quanto possível, em relação às condições dos pavimentos, enquanto em nível de rede, são estabelecidos parâmetros de desempenho e priorização de atuação. Em nível de rede macro, as informações relativas à custos e riscos definem estratégias para as atividades relacionadas nos demais níveis.

As análises conduzidas em nível de rede macro permitem a consideração de riscos significativos na gestão dos pavimentos, os quais regularmente não estão incorporados no escopo dos sistemas de gestão. As principais considerações sobre riscos vêm sendo abordadas de modo mais frequente em função das relações mais estreitas entre a iniciativa privada e o setor público na administração de rodovias. Desta forma, a compreensão sobre estes processos de análise enriquece a análise em nível de rede macro, por congregar aspectos diversificados mas de elevado interesse na gestão dos pavimentos.

As decisões estratégicas em níveis de rede e de projeto subsidiadas por sistemas de gerência de pavimentos têm diversos impactos, entre técnico, econômico, social e ambiental ao longo dos ciclos de vida das infraestruturas. As avaliações destes impactos são necessárias para assegurar decisões sustentáveis na definição de políticas, alocação de recursos, seleção de projetos e construção (Flintsch et al, 2009).

2.1 Gerência de pavimentos

O conceito de sistema de gerência de pavimentos surgiu após a segunda guerra mundial, por conta da necessidade de gestão dos recursos escassos frente a enormes demandas, entretanto, estudos revelam que o império romano já reconhecia a necessidade de manutenção das vias, estabelecendo mecanismos para tal condução. Carvalho et al (2012) afirmam que o conceito de gerência de pavimentos surgiu em meados da década de 1950, após os resultados da AASHO Road Test, a partir dos quais foi estabelecida a conexão entre desempenho e as atividades de planejamento, projeto, construção e manutenção dos pavimentos.

Todavia, no passado, atividades de manutenção não eram consideradas durante a construção de rodovias, sendo atividades relegadas às condições emergenciais de recuperação, baseadas apenas nas experiências dos técnicos envolvidos. O planejamento de atividades de manutenção periódica, com foco preventivo, além do corretivo gerou a necessidade de sistemas para monitoração e análise dos ciclos de vida dos pavimentos.

Com os desenvolvimentos computacionais recentes, houve avanço acelerado nesta área, sendo desenvolvidos diversos programas específicos, cada qual com conceitos voltados aos propósitos dos seus gestores e para atender um mercado em franco crescimento. Os sistemas de gerência de pavimentos impulsionados nas últimas décadas, vêm permitindo que agências possam programar investimentos adequadamente (Zaghloul et al, 2008). O uso de sistemas de gerência de pavimentos engendra uma abordagem mais racional e eficiente na distribuição de recursos para manutenção de pavimentos (Gao et al, 2007).

A implementação de um sistema de gerência facilita a organização de dados históricos, a obtenção de modelos de desempenho específicos para a rede em análise e a tomada de decisão para definição de atividades corretivas e preventivas (Shekharan, 2010).

Hudson et al (1997) definem a gerência de infraestrutura como um conjunto de ações coordenadas para a execução de todas as atividades necessárias, a partir da otimização dos recursos disponíveis, maximizando o desempenho; de acordo com os autores, a falta de gestão conduz a um cenário não aceitável de deterioração dos pavimentos e, por consequência, o uso inadequado de recursos. Shekharan et al (2008) definem a gestão de pavimentos como uma sequência interconectada de três processos: análise das condições dos pavimentos, previsão de desempenho e definição das atividades de intervenção.

Muitos autores, entre eles Hudson et al (1997) definem dois níveis distintos de análise na gerência de pavimentos: nível de projeto e nível de rede. Cada nível tem um grupo de atividades desenvolvido para alcançar os objetivos da análise, conforme apresentado na (Figura 2). Simplificadamente o nível de rede propõe cronograma de atuações, dentro de um determinado orçamento, e o nível de projeto define as atuações a serem implementadas para atender a estratégia de distribuição de recursos, proposta no nível de rede e cumprir os períodos de vida estabelecidos. De acordo com Huang (2004), análises em nível de rede representam a primeira fase das análises em nível de projeto, e o nível de projeto deve ser baseado nas análises do nível de rede.

Figura 2 - Principais atividades de cada nível de análise (modificado a partir de Haas et al, 1997)

Huang (2004) sugere que os principais objetivos dos sistemas de gerência em nível de rede estão relacionados a (i) identificação das necessidades de manutenção, (ii) determinação dos recursos necessários, (iii) seleção de estratégias de financiamento viáveis, (iv) determinação dos impactos das estratégias no desempenho e na utilização da via e, (v) desenvolvimento de um cenário otimizado de aplicação dos recursos.

No nível de projeto, Huang (2004) sugere que a distribuição dos recursos definidos no nível de rede seja aplicada em definidas seções dos pavimentos, contemplando (i) definições das necessidades de construção ou causa de deterioração, (ii) identificação da viabilidade técnica da estratégia corretiva, (iii) análise de diferentes alternativas

técnicas de correção, (iv) seleção da técnica mais efetiva dentro dos recursos disponíveis.

Crook et al, 2012 diferenciam os dois níveis afirmando que análises em nível de rede promovem uma visão em larga escala das condições dos pavimentos, e constituem uma importante ferramenta para decisão acerca das atividades de recuperação das seções deficientes, contemplando a otimização dos recursos. As análises em nível de projeto identificam detalhadamente as necessidades das seções indicadas pela análise em nível de rede, aplicando a melhor solução técnica com o recurso disponível.

A evidente necessidade de preservação da capacidade das vias e as estimativas de custos para os reparos se inserem nos sistemas de gerência de pavimentos, sendo que as atividades desenvolvidas com este propósito representam o mais importante aspecto na vida útil de uma estrutura, superando as atividades de projeto e construção originais.

Os níveis de projeto e de rede, embora complementares, apresentam diferenças importantes entre si, não apenas nos objetivos de cada análise, mas especialmente no tipo de informações requeridas para subsidiar as análises. A Figura 3, modificada a partir de Hudson et al (1997), pontua as diferenças na quantidade de dados e na complexidade dos modelos para cada nível de análise.

Figura 3 - Níveis de análise em função das informações requeridas (modificado a partir de Hass et al, 1997)

O Sistema de Gerência de Pavimentos procura coletar e agrupar todas as informações relativas ao desempenho dos pavimentos, permitindo administrar de forma eficiente, os recursos disponíveis dentro de um plano estratégico para atender as necessidades de segurança e conforto dos usuários que trafegam por uma rede viária. Esta ferramenta tem servido de subsídio para entidades de financiamento como por exemplo o Banco Mundial e o Banco Interamericano de Desenvolvimento, por propiciar resultados satisfatórios em nível de administração de sistemas (DNIT IPR 745, 2011).

As informações que compõem o banco de dados de um Sistema de Gerência de Pavimentos são decisivas na qualidade e confiabilidade das análises realizadas. Evidente que o maior número de informações históricas acerca das características técnicas dos pavimentos é desejável. Entretanto, diante das recorrentes dificuldades na obtenção destes dados, é mais relevante combinar os objetivos das análises dentro do sistema com a disponibilidade de dados. Muitos sistemas atuais buscam suprir as deficiências de bancos de dados com modelos de maior alcance, contudo, tais deficiências devem ser avaliadas criteriosamente, sob a pena de incorrer em resultados de pouca validade.

O nível de detalhamento das informações é diretamente associado ao tipo de análise almejado. Análises em nível de projeto requerem maior detalhamento das características existentes dos pavimentos, com maior precisão nos levantamentos de condições funcionais, estruturais e de segurança. O detalhamento requerido está associado ao método de projeto de dimensionamento de restaurações. As análises do sistema de gerência devem responder às necessidades corretivas a serem aplicadas na rodovia, em curto e médio prazo como mínimo.

As análises em nível de rede por sua vez, requerem uma maior série histórica de condições dos pavimentos, sem exigir o mesmo detalhamento no levantamento de dados relativos às condições funcionais e estruturais. Neste nível, é fundamental compor o banco de dados com informações relativas às intervenções e ao desempenho verificado a partir das mesmas.

Yang (2009) afirma que análises de falência funcional são mais atrativas para análises em nível de rede, enquanto análises de natureza estrutural são realizadas de modo mais completo em nível de projeto, em virtude da disponibilidade de dados relativos às características das camadas.

Um dos desafios nas análises realizadas nos sistemas de gerência são as divergências entre o que é projeto, e o que é de fato implementado. A qualidade das atividades de manutenção em um pavimento é determinante na vida de serviço da estrutura. Como decorrência, a previsão de desempenho é altamente dependente da qualidade nas execuções (Zaghloul et al, 2008).

Ainda de acordo com Zaghloul et al. (2008), a qualidade construtiva afeta o desempenho do pavimento, e é composta por muitas variáveis. Os autores dividiram os fatores de variação em três grupos principais: características dos materiais, espessura das camadas e condição estrutural. Os autores conduziram a avaliação de três projetos distintos, que tinham como única variável a qualidade construtiva, classificadas em (i) razoável, (ii) boa e (iii) muito boa, e identificou um impacto de até quatro anos de diferença na previsão de desempenho entre os projetos, sendo evidente que aquele que acolhe uma construção de baixa qualidade tende a se deteriorar mais rapidamente do que os demais. Entretanto, os autores reconhecem as

difficultades para integrar informações acerca da qualidade construtiva nos modelos de desempenho dos sistemas de gerência de pavimentos em nível de rede.

No entanto, está claro que o conjunto de variáveis que cerca o desempenho dos pavimentos requer gestão efetiva, combinando o máximo de informações pertinentes para auxiliar na tomada de decisão. As implicações do uso dos sistemas de gerência de pavimentos se estendem desde a correta indicação das intervenções nos pavimentos até a administração dos recursos disponíveis ou necessários.

Shekharan et al (2007) cita o departamento de transportes do estado americano de Virginia, que destinava recursos para a manutenção das vias baseando-se apenas no orçamento do ano anterior, adicionando efeitos de inflação e variáveis similares. A partir de um esforço para determinar as reais condições dos pavimentos, que passaram a ser obtidas sistematicamente, e a adoção de sistema específico para a gestão da malha, foi possível distribuir adequadamente os recursos entre os segmentos deficientes, além da programação justificada de gastos futuros. Também por meio da obtenção de dados confiáveis de classificação das condições dos pavimentos houve alterações importantes na categoria das intervenções, focando nas atividades preventivas para evitar a necessidade de atividades corretivas nos pavimentos, incrementando significativamente o processo de gestão de rodovias do estado.

Neste sentido, Kutay et al (2011) apontam que o elemento chave para a gerência de pavimentos é a definição precisa das atividades preventivas e corretivas, sendo que para ambas, a caracterização dos pavimentos é fundamental.

É comum a associação de que as análises em nível de rede se relacionem à caracterização das condições funcionais enquanto as análises em nível de projeto contemplem avaliações das condições estruturais dos pavimentos. Entretanto, Carvalho et al, 2012, destacam que apesar das medidas de condições de superfície serem mais frequentemente utilizadas para a avaliação das condições e do desempenho dos pavimentos, a capacidade estrutural afeta muito mais o desempenho de longo prazo, incluindo a ocorrência de defeitos de superfície. A principal diferença entre as análises em nível de rede e as análises nível de projeto

acerca das condições estruturais reside justamente no detalhamento de informações para atender cada nível.

Flintsch et al, 2009 relata que atualmente a gestão de pavimentos inclui considerações técnicas e econômicas nas análises dos ciclos de vida, no entanto a maior parte das agências utilizam apenas custos no nível de projeto, de modo que estão sendo incentivados por órgãos de fomento a incluir análises mais amplas, que incluem aspectos sociais, econômicos e ambientais (Figura 4).

Figura 4 - Estrutura proposta para análise em nível (Modificado a partir de Flintsch et al, 2009)

Claramente, nenhum dos dois níveis de análise dentro de um sistema de gerência de pavimentos contempla, historicamente, informações relacionadas à fonte dos recursos disponíveis. Assim, as análises nos sistemas de gerência de pavimentos pouco consideram os dados necessários para uma gestão economicamente

estratégica, além das restrições orçamentárias, fundamentando-se em critérios técnicos para a administração dos recursos disponibilizados. Habitualmente, o orçamento é simplesmente disponibilizado, sem análises mais extensas, para que a área técnica possa viabilizar as atividades de manutenção.

Huang (2004) pontua ainda que a avaliação e reabilitação dos pavimentos não é uma ciência exata e depende de amplo conhecimento técnico e sobre o histórico das condições, conjugando informações amplamente aceitas a crenças e opiniões técnicas.

2.1.1 Nível de projeto nos sistemas de gerência de pavimentos

Em nível de projeto, os sistemas de gerência de pavimentos utilizam predominantemente os conceitos de dimensionamento de pavimentos, tanto para construção, quanto para restauração. A aplicação de métodos de dimensionamento se vale do maior detalhamento de informações disponível, em especial no que tange às condições atuais dos pavimentos, tanto no que se refere à composição estrutural, quanto no que se refere ao comportamento parametrizado.

Conclui-se naturalmente que uma distinção elementar nas análises em nível de projeto está baseada nos modelos de desempenho adotados, uma vez que ao se valer de elementos comuns aos métodos de dimensionamento, automaticamente são adotadas as premissas de desempenho intrínsecas a tais métodos.

Dentre os objetivos das análises em nível de projeto destaca-se a perspectiva de atuação programada em curto, médio e longo prazo, dentro de horizontes de projeto individuais para cada ciclo de vida. São atividades corretivas e preventivas necessárias para a homogeneização das características de uma via no período de projeto, normalmente fixado entre 8 e 12 anos. O produto resultante das análises em nível de projeto, por sua vez, é a indicação detalhada de atividades necessárias para adequação das estruturas.

Tendo estes conceitos delimitados, é fundamental identificar quais elementos tem maior impacto nos resultados, e quais procedimentos podem ser assumidos para

assegurar a qualidade das análises e por conseguinte, dos resultados. Dois elementos podem ser considerados cruciais para a gerência de pavimentos: (i) qualidade dos dados de monitoração das condições atuais, (ii) aplicabilidade dos modelos de desempenho adotados. Estes elementos, por sua vez, são comuns tanto às análises em nível de projeto quanto em nível de rede, respeitadas suas particularidades em cada nível.

O que principalmente difere o nível de projeto em análises para fim de gerência de pavimentos é a forma de emprego dos dados. O nível de detalhamento requerido no processo de obtenção e na frequência de dados implica na elevada confiabilidade das análises em curto e médio prazo, mas implica também na dispersão, e portanto, perda de confiabilidade em prazos mais longos, com relevante dificuldade para atravessar mais de um ciclo de vida, sendo que o oposto a este detalhamento é que é inerente à previsão de comportamento futuro.

Esta consideração é corroborada pela adoção de métodos de dimensionamento para definição das atividades necessárias, já que os métodos projetam cada ciclo de vida, sem a obrigação de contemplar ciclos de vida posteriores ao ciclo vigente. O ciclo posterior pode ser considerado por meio da definição de limites de desempenho coordenados.

O sistema de gerência em nível de projeto não é no entanto, a mera determinação de projeto de restaurações, mas a definição de plano de atuações corretivas e preventivas distribuídas ao longo do ciclo de vida analisado, permitindo a seleção de políticas de atuação distintas no período analisado que estejam alinhadas com políticas mais abrangentes de investimentos de recursos. Isto significa que o nível de projeto fornece alternativas para a aplicação dos recursos, como as implicações da postergação de atividades preventivas, por exemplo.

Quando análises são realizadas paralelamente em nível de projeto e em nível de rede, o primeiro utiliza resultados do segundo, distribuindo criteriosamente os recursos diante de políticas selecionadas. Diversos critérios podem ser adotados para a análise em nível de projeto, elegendo por exemplo a adequação de um ou mais parâmetros, dentre aspectos estruturais e funcionais.

Naturalmente as análises realizadas neste nível devem fornecer resultados relativos às implicações de todas as políticas avaliadas, em especial por que no nível de projeto, é mais evidente a interação entre as características estruturais e funcionais dos pavimentos e suas decorrências em prazos razoáveis, comuns aos projetos de dimensionamento de pavimentos.

2.1.2 Nível de rede nos sistemas de gerência de pavimentos

As análises realizadas em nível de rede são conduzidas sob critérios específicos, intrinsicamente relacionados os objetivos definidos. O nível de detalhamento das informações bem como a confiabilidade dos resultados em um definido prazo analisado são aspectos determinantes sobre os resultados, sendo necessário manejar individualmente cada um destes aspectos e concatenar todos eles para atingir os objetivos a que a análise se propõe.

No nível de rede não são definidas as condições e deficiências dos pavimentos com amplo detalhamento, mas prioritariamente definidas classes de desempenho para a categorização dos segmentos avaliados, tendo como objetivo primordial, a distribuições técnica e financeiramente coerentes de atividades ao longo do período de análise.

Aumentar a confiabilidade dos resultados é possível por meio do incremento na qualidade dos dados. Tendo os conceitos de deflexão estrutural como exemplo, é possível determinar a condição de uma estrutura com diferentes níveis de precisão, desde uma análise minuciosa das bacias de deflexão em espaçamentos reduzidos, retroanalisada com informações coletadas de cada camada que compõe o pavimento, até análises limitadas à deflexão máxima, medidas em espaçamentos maiores.

Seguindo a análise de condição estrutural como exemplo, é possível definir as deficiências de cada camada do pavimento por meio do detalhamento mencionado, no entanto, a modelagem de desempenho para cada camada e finalmente para toda a estrutura apresenta elevada complexidade. Tais dificuldades se apresentam também em virtude das considerações adotadas na análise dos dados disponíveis,

mas em especial, em virtude das premissas adotadas na extrapolação para previsão de desempenho. As considerações adotadas para determinação da condição de cada camada são em geral obtidas pela inferência de conceitos teóricos.

A previsão de desempenho tende a ser mais eficiente quando realizada a partir da extrapolação de dados absolutos, isto significa que a estrapolação de dados provenientes de correlações tem menor confiabilidade, pois naturalmente insere os erros advindos de cada etapa de obtenção das informações. Assim, no nível de rede, as análises estatísticas subsidiam mais adequadamente as previsões de desempenho, exigindo menor e mais viável nível de detalhamento dos dados.

No nível de rede, as análises são conduzidas acompanhando alguns aspectos econômicos por meio de perspectivas mais estratégicas, com vistas aos impactos de longo prazo dos cenários analisados, enquanto são avaliados diversos ciclos de vida, conforme seja pertinente.

2.1.3 Dados das condições dos pavimentos

Em relação aos dados das condições dos pavimentos Byrne e Parry (2010) afirmam que quantidade e precisão são fundamentais para garantir qualidade da informação. A qualidade e precisão dos dados das condições dos pavimentos podem afetar as estimativas de custos de intervenções em até 25% (Shekharan et al, 2007).

A qualidade dos dados das condições dos pavimentos é importante tanto na determinação das necessidades de manutenção definidas dentro de um sistema de gerência de pavimentos, quanto na previsão de desempenho futuro (Flintsch e McGhee, 2009).

De acordo com Saliminejad e Gharaibeh (2012), uma coletânea de dados deve atender três premissas: (i) representatividade (quanto do segmento é representado adequadamente pelo dado), (ii) precisão (qual a repetibilidade a que a medida está sujeita) e (iii) extensão (quantidade suficiente de dados).

A frequência temporal dos dados relativos às condições dos pavimentos está igualmente relacionada com o tipo de análise realizada no sistema de gerência, apesar de desejável, para qualquer nível, o maior número de informações possível. Dados relativos às condições funcionais e estruturais das rodovias devem ser levantados com periodicidade coerente com as alterações correspondentes, ou seja, não é apropriado realizar medidas em demasia, que não evidenciem alterações de desempenho relevantes às análises.

Monitorações anuais suprem os bancos de dados que subsidiam análises em nível de projeto; deve-se no entanto considerar por exemplo, a extensão da via em análise e o período para a implantação do projeto de restauração. Além disso, é importante considerar as respostas das análises providas pelo sistema de gerência; quanto mais distribuídas as atividades de restauração entre curto, médio e longo prazo, maior é a necessidade de análises intermediárias nestes prazos, a fim de confirmar ou retificar as propostas de intervenções, seja em nível de projeto ou em nível de rede. De acordo com Bryce et al (2012), as análises em nível de rede permitem maior erro inserido nas medidas do que as análises em nível de projeto.

Monitorações menos frequentes podem servir às análises em nível de rede, desde que estejam correlacionadas aos ciclos de vida das intervenções aplicadas nas rodovias. Intervenções programadas anualmente em nível de projeto devem ser monitoradas também em nível de rede. Muitas agencias monitoram as condições dos pavimentos em intervalos de 1, 2 ou 3 anos, gerando incertezas no âmbito da previsão de desempenho, sendo que é desejável o menor intervalo possível, embora coerente, entre as medidas (Haider et al, 2011).

Também de acordo com Haider et al (2011) os dados exigem avaliações estatísticas consistentes, afim de evitar conclusões deturpadas. Os autores relatam que o aumento dos intervalos entre as medidas avaliadas no estudo, resultou em valores de R^2 superiores aos obtidos para medidas mais frequentes, no entanto isso não indica melhor qualidade dos dados mas sim a grande dispersão a que os dados estão sujeitos, e realça a necessidade de intervalos menores de monitoração. Isso evidencia que a maior quantidade de dados pode revelar mais adequadamente a dispersão dos dados, caso sejam muito heterogêneos, enquanto um número limitado de medidas

pode camuflar a dispersão.

Haider et al (2011), utilizaram modelos exponenciais para previsão de desempenho estrutural e funcional, e estimando erro associado às diferentes frequências de monitoração concluíram que medidas anuais são ideais para abastecer sistemas de gestão. Os autores identificaram que intervalos superiores implicam em maior variabilidade nas condições estruturais do que nas condições funcionais. Como resultado, os autores observaram que intervalos maiores de monitoração implicam no aumento de intervenções programadas, superestimando as necessidades de intervenções no caso das medidas estruturais, enquanto o desempenho funcional é subestimado com medidas nos mesmos intervalos. O comportamento verificado pelos autores pode não se repetir em todas as rodovias, pois os resultados podem estar associados a padrões de intervenção e condições funcionais e estruturais não explicitadas no trabalho mencionado.

Dados confiáveis advindos de levantamentos de condições funcionais e estruturais dependem também da utilização de equipamentos adequados para tais medições. A calibração referencial dos equipamentos é desejável, bem como a utilização de equipamentos equivalentes. Alterações no procedimento de medição devem ser acompanhadas de unidades de equivalência, de modo que todos os dados possam ser sempre comparáveis, ao longo da vida útil das rodovias em que são procedidas as análises.

O departamento de transportes do estado Americano do Alabama promoveu estudos para identificar a qualidade na coleta de dados sobre as condições dos pavimentos; os resultados analisados estatisticamente revelaram discrepâncias entre os dados coletados manualmente e os dados coletados automaticamente, justamente porque a coleta manual tem erros associados aos operadores, enquanto a coleta automática tem erros associados aos equipamentos (McQueen e Timm, 2005).

Em 2005, o estado Americano da Virginia iniciou um programa para a obtenção de dados por meio de processos com maior automação, no intuito de aumentar a confiabilidade nos dados das condições superficiais dos pavimentos. Aproximadamente 98% dos levantamentos automatizados de defeitos relacionados

aos efeitos do carregamento do tráfego, foram considerados adequados dentro do critério de qualidade estabelecido pelos pesquisadores (Shekharan et al, 2007).

A automatização na obtenção de medidas das condições dos pavimentos não impede a ocorrência de erros que podem se propagar para todas as etapas do sistema de gerência de pavimentos. De acordo com Saliminejad e Gharaibeh (2012), os erros podem ser sistemáticos ou randômicos, de natureza humana ou provenientes dos equipamentos utilizados. Haider et al (2011) acrescentam que os erros podem ser ainda, uma combinação de ambos, randômicos e sistemáticos.

Os erros inseridos nas medidas das condições dos pavimentos podem ter impactos significativos se propagando nas análises realizadas nos sistemas de gerência de pavimentos. Estudos conduzidos por Saliminejad e Gharaibeh (2012) mostraram que os erros que subestimam as condições dos pavimentos afetam mais consideravelmente os resultados finais das análises dos sistemas de gerência dos que os erros que superestimam as condições dos pavimentos.

Serigos et al (2014) sugerem que os impactos dos erros nas medidas das condições dos pavimentos sobre as análises do sistema de gerência estão diretamente relacionados à quantidade, severidade e tipo dos erros.

De acordo com Shekharan (2010) é impossível eliminar completamente variabilidades, em qualquer etapa, seja construtiva, de monitoração ou de desempenho. No entanto, medidas simples podem auxiliar na identificação de dados falhos. Neste sentido, Hudak (2009) afirma que aproximadamente 94% das agências americanas utilizam segmentos de controle (não identificados para os técnicos envolvidos nas medidas) para assegurar a confiabilidade das medidas obtidas na monitoração.

A partir do banco de dados que tenha sido considerado confiável, com medidas representativas para a via, são delimitados segmentos homogêneos nas rodovias, de modo que toda a extensão de cada segmento homogêneo possua características similares em relação aos parâmetros definidos, e por conseguinte, desempenho similar. A segmentação da rodovia serve a dois propósitos principais: (i) verificar a

consistência dos dados em termos de representatividade e (ii) permitir a gestão efetiva dos pavimentos.

De acordo com Shekharan et al (2010), a segmentação da rodovia em trechos homogêneos é necessária para a gestão e o planejamento de atividades. A extensão total do segmento deve apresentar características similares e representativas, com extensão coerente para o projeto aplicável de soluções. O autor cita três procedimentos comuns de segmentação: (i) método das diferenças acumuladas, (ii) método do menor denominador comum e, (iii) método do máximo desvio padrão. A variabilidade dos dados define a segmentação homogênea de uma via, no entanto, a faixa de variabilidade indica a qualidade dos dados. O relatório técnico da instituição australiana Austroads, AP – R 276/05 (2005), sugere a adoção destes três métodos, mas acrescenta que a segmentação pode se basear em inspeções visuais em campo, ou em extensões fixas, como a cada quilômetro, por exemplo.

O relatório técnico da Austroads, AP – R 276/05 (2005) indica que apenas os parâmetros mais importantes ou significativos na compreensão das condições do segmento sejam utilizados para definição da segmentação, e ainda que é necessário considerar os objetivos das análises (nível de projeto ou nível de rede) que serão realizadas sobre os dados, de modo que sejam manejáveis aos propósitos a que se destinam.

Os segmentos homogêneos são as bases de análises dos sistemas de gerência de pavimentos. A partir da identificação das condições existentes nas rodovias, é possível delimitar segmentos com características representativas semelhantes, em faixas com limites de variabilidade aceitável claramente definidas. A adoção de valores individuais de medidas de monitoração é inviável, tanto para a etapa de análise dos dados em qualquer nível, quanto para a etapa de aplicação de soluções preventivas ou corretivas, uma vez que a primeira etapa norteia a segunda.

A definição de segmentação homogênea é um conceito técnico aplicado para a caracterização de cada segmento da rodovia, sendo que todos os dados relativos a um mesmo segmento são considerados homogêneos e representativos ao longo de toda a extensão do referido segmento. Entre os segmentos, no entanto, não é

requerida qualquer similaridade. Os critérios para a segmentação variam de acordo com o objetivo da avaliação, conforme mencionado anteriormente; por exemplo, na avaliação do nível de serviço das rodovias, o HCM (1950) introduziu o conceito de segmentos homogêneos baseado nas características físicas das vias, destacando-se a geometria, e características de operações de tráfego.

A definição de faixas para a delimitação de segmentos homogêneos é elementar para o processo. Devem ser realizadas análises de sensibilidade para o parâmetro adotado. A verificação da sensibilidade é importante para garantir que a faixa de tolerância seja coerente em amplitude, sem restringir demasiadamente mas sem permitir especialmente o tratamento de desiguais como iguais.

Para cada variável, recomenda-se a adoção de limites específicos. A variabilidade no tráfego dificilmente será a mesma variabilidade encontrada nas condições funcionais de uma rodovia, que também pode ser consideravelmente diferente da variabilidade na condição estrutural dos pavimentos.

Os limites podem também variar em função do tipo de análise almejada. Para uma análise em nível de projeto, a irregularidade longitudinal, por exemplo, deve ter uma faixa de variabilidade com limites mais restritivos do que para as análises em nível de rede; para projeto, segmentos menores são adequados, enquanto em nível de rede, é mais importante a classificação mais abrangente, não detalhada.

2.1.4 Modelos de desempenho de pavimentos

Para gerir uma malha é necessário conhecer a condição atual dos pavimentos e estimar as condições futuras em diversos cenários (Pedigo et al, 1981). A previsão das condições futuras dos pavimentos é essencial dentro dos sistemas de gerência para determinar a necessidades dos pavimentos e os impactos das estratégias de manutenção (Gao et al, 2007).

Byrne e Parry (2010) reforçam que o mais importante elemento para a gestão é a previsão de desempenho; mesmo que todos os demais aspectos que integram o sistema estejam corretos, nenhum resultado será confiável se os modelos de

desempenho estiverem incorretos. Ainda segundo os autores, modelo de desempenho é a representação de um determinado parâmetro em diferentes momentos futuros desde a condição atual. Reduzir o valor do erro nas medidas de estimação futura é muito significativo, podendo responder pela melhor determinação dos custos de manutenção dos pavimentos, evitando subestimar ou superestimar condições.

A implantação de um sistema de gerência implica na necessidade de modelos específicos de desempenho, os quais podem advir da calibração de modelos existentes, ou da definição de novos modelos, mas estes devem necessariamente refletir a realidade da rede gerida, além de ser indispensável a atualização. Segundo Zaghloul et al (2008), o desempenho de pavimentos é muito dinâmico e se altera significativamente em função do tráfego solicitante e condições climáticas, dentre outras variáveis.

Desenvolver modelos representativos para a previsão de desempenho é uma tarefa complexa que depende da interação entre os muitos aspectos que afetam os pavimentos. Wu e Flintsch (2008) destacam que os planos de manutenção de rodovias existentes em geral se deparam com variáveis importantes nas condições de cada seção da via, no desempenho ao longo da vida de serviço, na qualidade construtiva, condições climáticas e de tráfego, dentre outros. De acordo com Pedigo et al (1981), para análises em nível de rede são necessários modelos generalistas para estimar o desempenho de pavimentos agrupados em classes, sem requerer altos níveis de detalhamento.

A coleta de dados históricos e atuais é primordial para a geração de modelos de desempenho. Para Gao et al (2007), nem todos os dados coletados para integrar o sistema de gerência de pavimentos podem ser utilizados nos modelos de desempenho. Combinar dados relativos à deterioração com dados do histórico das atividades de manutenção implica na perda inevitável de informação, uma vez que nem sempre os dados são consistentes.

É necessário estabelecer prioritariamente, variáveis de interesse que possam servir de parâmetros para a determinação do processo de deterioração. Estes indicadores

de desempenho devem ser analisados com vistas a atender três premissas básicas: (i) serem relacionáveis a outros parâmetros de deterioração dos pavimentos, (ii) advirem direta ou indiretamente de dados que permitam mensurar as condições dos pavimentos e, (iii) serem representativos para o nível de análise a que se destinam.

A relação entre um indicador e outros parâmetros é necessária para garantir coerência no resultado de previsão de desempenho do pavimento. Tendo em vista que o desempenho dos pavimentos é resultado da interação de diferentes elementos, o indicador não pode ser independente, devendo contemplar parte destas interações. A irregularidade longitudinal, conforme citado na literatura por diversos autores, tais como Hudson et al. (1994) e Sayers & Karamihas (1996) é o parâmetro mais utilizado internacionalmente, para a avaliação funcional de pavimentos. Isso ocorre pois a medida de irregularidade longitudinal reúne outros parâmetros indicadores de deterioração, ou seja, é afetado por exemplo, pela ocorrência de trincamentos e comprometimento estrutural e de deformações, em função da variação do tráfego.

Os dados necessários para a modelagem da deterioração advêm de medidas diretas ou indiretas das alterações nas condições dos pavimentos como efeito do tempo ou tráfego. O processo logicamente deve resultar das medidas periódicas e sistemáticas de algum aspecto que indique as condições dos pavimentos.

Avaliações da área trincada por exemplo, podem ser realizadas sistematicamente e periodicamente, mesmo que por métodos manuais, indicando mudanças associadas à deterioração; levantamentos com georadar para a identificação das características de espessura e porosidade das camadas não indicam, no entanto, alterações associáveis ao tráfego ou tempo, apesar de serem medidas sistemáticas. A previsão de desempenho é um desafio ainda maior quando um sistema está sendo implantado, e não dispõe de dados históricos suficientes para o desenvolvimento de modelos confiáveis (Amador & Mrawira. 2008).

Os modelos devem por fim, estar associados ao nível de análise proposto no sistema de gerência de pavimentos. No nível de projeto, os modelos podem estar associados ao método de projeto de dimensionamento de pavimentos empregado, indicando o detalhamento almejado. Em nível de rede espera-se que as variáveis de interesse

possam indicar estimativa de vida útil associada a gatilhos de intervenção, para os segmentos individualmente, mas especialmente para toda a rede analisada e durante vários ciclos de vida.

De acordo com Carvalho et al (2012), os modelos de desempenho estrutural utilizados nos sistemas de gerência de pavimentos variam significativamente entre os que simplificadamente adotam parâmetros deflectométricos e os que buscam detalhamento das características das camadas, variações associadas aos níveis de análise.

É importante observar que os modelos de desempenho aplicados em sistemas de gerência de pavimentos devem ser continuamente avaliados. A contínua obtenção de dados das condições dos pavimentos retroalimenta o sistema, monitorando a efetividade dos modelos utilizados para a previsão de desempenho (Serigos et al, 2014).

Aumentar a precisão na previsão de desempenho é uma meta alcançável por meio dos elementos citados, entretanto, cabe ressaltar que a estimativa sobre o comportamento de uma variável, como função da deterioração do pavimento, é afetada por outras variáveis que também dependem de estimativa; especialmente em relação ao tráfego, não é possível definir com precisão a configuração futura, o que se configura como uma variável de interesse, com estudos de cenários. Ainda assim, quanto mais extenso for o banco de dados, mais confiáveis serão os modelos de desempenho derivados do processo (Hosten et al, 2013).

Os modelos de previsão de desempenho são normalmente categorizados em duas classes: modelos determinísticos e modelos probabilísticos. O primeiro é resultado de funções matemáticas desenvolvidas sobre medidas ou observações da deterioração de um determinado segmento de via. Entretanto, incertezas e variações em fatores como tráfego, clima, materiais, dentre outros, dificultam a obtenção de modelos determinísticos (Gao et al, 2007).

Como decorrência, os modelos determinísticos são válidos exclusivamente para o segmento original, não sendo representativos para pavimentos com qualquer variação

em relação à origem dos dados. Wu e Flintsch (2008) confirmam este entendimento afirmando que a previsão de desempenho de pavimentos é reconhecidamente probabilística, não sendo possível definir com precisão qual será a condição ao longo do tempo.

Para Gao et al (2007) os modelos probabilísticos contemplam variações em fatores de interferência no desempenho. Adicionalmente, Shekharan et al (2010) definem que modelos probabilísticos de desempenho são puramente empíricos.

Apesar disso, merece destaque a afirmação de Amador e Mrawira (2008) de que ponto chave dos modelos probabilísticos é a inserção de incertezas nos modelos, como de fato é a realidade; contudo, como esperado, os modelos probabilísticos tem reduzida sua confiança conforme a previsão se distancia no tempo, conforme Figura 5, adaptada dos autores. A previsão de desempenho entre ciclos de vida, conforme apresentado na figura, também pode sofrer alterações, e conforme esperado, as incertezas tendem a ser maiores quanto mais distante no tempo.

Figura 5 - Incertezas na previsão de desempenho (modificado a partir de Amador e Mrawira, 2008)

Os modelos de desempenho são normalmente representados graficamente por curvas no plano, em função de pelo menos uma variável (normalmente tráfego ou tempo). De acordo com Yang (2009), os modelos mais comumente utilizados para

descrever a vida remanescente cumprem funções logarítmica, exponencial e distribuição de Weibull.

Gedafa et al. (2012) desenvolveram modelos de desempenho para a evolução do trincamento em função da deflexão do pavimento, do número estrutural (Structural Number – SN), do tráfego, entre outras variáveis, utilizando curva do tipo sigmoide. Marcon (1996) desenvolveu modelos de desempenho para a deflexão máxima em função da idade e em função do tráfego descritos por equações lineares.

Mais uma vez é necessário pontuar que o modelo de desempenho deve ser desenvolvido por equações que melhor representam o comportamento do indicador de desempenho eleito. Yang (2009), no desenvolvimento de modelo para a vida remanescente do pavimento em função do tempo, utilizou a função que melhor descreve o comportamento da variável a ser representada. O modelo proposto pelo autor é aplicável somente em condições similares às seções observadas para o desenvolvimento. No entanto, os modelos podem ser utilizados após adaptações ou calibrações para condições distintas.

Além disso, a representatividade do modelo está associada às características comuns aos dados de origem. Segundo Amador e Mrawira. (2008), o agrupamento de seções similares é necessário para o desenvolvimento dos modelos de desempenho; características de interesse como estrutura ou tráfego diferenciam o desempenho de longo prazo, e portanto, não é conveniente conjugar seções heterogêneas nos modelos.

Gao et al (2007) utilizaram a teoria da cadeia de Markov partindo da premissa de que a condição futura é resultado somente da condição atual, não importando a quais atividades de manutenção o pavimento esteve sujeito, portanto, não impactam na deterioração, e desenvolveu o modelo de desempenho em função da variável Present Serviceability Index – PSI, descrito por função polinomial. É importante pontuar que a consideração do autor despreza o nível de eficiência corretiva de cada tipo de intervenção que possa ser executada no pavimento, o que pode em contrariar o conceito elementar que diferencia intervenções efetivamente corretivas de intervenções paliativas.

Na formulação de modelos matemáticos capazes de descrever o comportamento de uma variável é necessário estabelecer procedimento para o tratamento dos dados, bem como procedimento de verificação da validade do modelo. Yang (2009) tratou os dados das medidas das condições dos pavimentos em dois grupos distintos: modelagem e verificação. Desta forma os dados utilizados para a verificação não integram os dados que deram origem ao modelo, preservando os dados de verificação.

2.2 Administração de rodovias

As rodovias há muito foram reconhecidas como patrimônio valioso para as economias de países e até de continentes, através das quais são estabelecidos elos de desenvolvimento. A expansão da malha, tal como a manutenção das vias existentes representam investimentos vultosos e desafios constantes para os administradores envolvidos.

O setor público comumente mantém a rede viária em operação por meio de recursos de fundos ou de taxas sobre elementos específicos como combustível e licenciamento de veículos. De acordo com o World Bank (2015), estes mecanismos de financiamento têm enfrentado problemas pelo favorecimento de outros setores da economia, comprometendo a manutenção de longo prazo e a sustentabilidade da rede viária.

Adicionalmente, a administração pública, com a responsabilidade de promover impactos positivos no desenvolvimento da economia, frequentemente tem que decidir sobre gestão de transportes por meio da manutenção de vias existentes atendendo ao contínuo crescimento de tráfego, ou da construção de novas vias, ampliando a rede viária e estabelecendo novas conexões para o tráfego.

Infraestruturas envelhecendo, especialmente em países desenvolvidos ou países em crescimento que com necessidades de infraestruturas, demandam adequada construção, manutenção, atualização, substituição ou reconstrução, mas estas necessidades não podem ser supridas somente pela administração pública, sendo que o capital privado é extremamente necessário (World Economic Forum, 2016).

Enquanto a administração pública enfrenta dificuldades para exercer todas as atividades devidas, a iniciativa privada vem aumentando sua participação na administração das rodovias, por meio da prestação de serviços, construção e conservação da malha mediante mecanismos específicos de remuneração. Historicamente, a iniciativa privada faz parte da manutenção das vias desde o império romano, em que eram construídas e geridas por períodos de 5 anos, sob contratos específicos que por vezes incluíam atividades de manutenção (World Bank, 2015). Nos dias atuais, muitos artigos se dedicam a desmistificar ou a esclarecer os papéis de cada participante nas Parcerias Público-Privadas – PPP's, o que evidencia os conflitos e a resistência ao processo.

De acordo com a FHWA (2015) a participação da iniciativa privada na administração e financiamento de rodovias pode expandir a capacidade de gestão do estado, com ganhos na aceleração das construções, potencial redução nos custos, transferência de riscos e incremento de eficiência na manutenção de longo prazo, entretanto, esses contratos são transações complexas com um conjunto notável de vantagens e desvantagens que requerem análises adequadamente fundamentadas, investigações e expertise técnica para assegurar o cumprimento dos objetivos.

A participação do setor privado pode se enquadrar em diversos tipos de contrato, sendo fundamental estabelecer a diferença entre Privatizações e Parcerias Público-Privadas, pois todos os demais aspectos pertinentes aos contratos decorrem desta diferenciação: as privatizações transferem o controle e a propriedade à iniciativa privada, não cabendo à administração pública qualquer interferência, enquanto nas PPP's, a propriedade pertence à administração pública, que regula e fiscaliza os aspectos relacionados à administração que são transferidos, por período estabelecido e sob parâmetros definidos, à iniciativa privada, de modo que as responsabilidades transferidas à iniciativa privada retornam à gestão pública com a finalização do contrato; o setor público deixa de ser o provedor e passa a exercer a função de facilitador.

Entretanto, European Commission (2003) ressalta que o sistema de PPP não é milagroso, e seu sucesso depende da sua adequada aplicação. A parceria público-

privada (PPP) representa um importante engajamento entre as partes, sem que nenhuma parte tenha controle absoluto. Martinez et al (2013) posicionam as PPP's entre duas condições opostas, as rodovias geridas pela administração pública e as rodovias privatizadas à iniciativa privada.

Muitos benefícios podem ser apontados como decorrência das PPP's, indicados por Huang e Gao (2014), como a associação de três partes: (i) governo, como poder regulatório, (ii) instituição privada, que investe e opera na rodovia, explorando os valores obtidos pelo pagamento de tarifas ou outros mecanismos de remuneração, e (iii) usuários que utilizam a rodovia.

As PPP's devem ser atraentes para as empresas privadas, mas prioritariamente, ter como objetivo atender aos interesses públicos da sociedade, sendo a lucratividade associada, um meio e não uma finalidade em si mesma. A avaliação adequada dos custos e riscos das inúmeras possibilidades estratégicas é crucial para estabelecer equilíbrio na relação entre as partes. Se as análises forem conduzidas pelo setor público, os contratos podem ser melhor delineados, limitando a atuação do parceiro privado aos interesses da sociedade. Os benefícios de uma PPP devem ser menores que seus custos para a sociedade.

O relatório apresentado pelo Departamento de Transporte dos Estados Unidos ao congresso americano define as PPP's como: "O contrato acordado entre a entidade pública e o parceiro do setor privado que permite maior participação deste setor, do que sua participação habitual. Os contratos geralmente envolvem a agência governamental como contratante de um parceiro privado para a restauração, construção, operação, manutenção e/ou gestão de um elemento de infraestrutura. Enquanto o governo detém a propriedade sobre o objeto do contrato, o parceiro privado detém as responsabilidades para definir como os parâmetros do contrato serão cumpridos."

O World Bank (2015) afirma que a implementação de PPP's deve estar integrada em um conjunto de ações, como parte de uma política nacional de investimentos para promover a infraestrutura pública, não apenas para os usuários, mas para toda a

sociedade. Entretanto, cada projeto deve ser detalhado em suas especificidades próprias de contexto, objetivos e dinâmica.

O Banco Mundial estimula a opção de formação de parcerias com o setor privado para o financiamento, manutenção e operação de rodovias, resguardando os interesses públicos concernentes à propriedade das vias e o poder de regulação exercido pelo setor privado. A sociedade necessita de regulação, assim, os negócios também dependem de regulação, sob o risco de produzir resultados indesejáveis. A remuneração para o parceiro privado é um fator de extrema relevância, uma vez que a maioria dos investidores se interessa apenas por projetos que possam indicar uma fonte segura de remuneração.

DeCorla-Souza et al (2013) mencionam três possibilidades mais comuns de remuneração para a iniciativa privada: (i) receita dos pedágios impostos aos usuários, (ii) pagamento fixo baseado nos benefícios gerados pela administração privada, com base nas receitas dos pedágios que são geridos pelo governo, especialmente em casos que o risco de demanda seria altamente taxado pela iniciativa privada, e (iii) por meio de pagamento fixo por parte do governo, relativo ao benefícios que atendam aos padrões estabelecidos, em rodovias não pedagiadas, comum em rodovias em que não há viabilidade para cobrança de tarifa.

Segundo o relatório da FHWA (2007), é importante ainda, diferenciar entre os diversos tipos de contratos de PPP's (Figura 6), uma vez que as diferenças afetam enormemente os contratos estabelecidos (Tabela 1).

Figura 6 - Project Delivery Methods para infraestrutura - Perspectiva internacional (Modificado a partir de FHWA, 2007)

Tabela 1 - Baseado na publicação da FHWA, 2007

Método	Definição
Abordagem tradicional (sem PPP)	
Projeto + Leilão + Construção (Design-Bid-Build - DBB)	Método tradicional de contratação para a execução de um projeto, por empresas diferentes (projeto e construção)
Abordagem PPP	
Projeto e construção (Design-Build - DB)	Fases de projeto e de construção combinadas em único contrato, com potencial para redução de custos e tempo, melhoria de qualidade e divisão de riscos mais eficiente que DBB
Contrato de privados para serviços e manutenção	Contratos com companhias privadas para serviços realizados internamente (planejamento, estudos ambientais, gestão de recursos, operações, manutenções, entre outros).
(Construction Manager @ Risk - CM@R)	O gestor de construção viabiliza as atividades necessárias durante a fase de projeto, e permanece negociando com as empresas contratadas para construção.
Projeto e construção com garantia (Design-Build +Warranty)	Projetos DB nos quais se considera período de garantia após a construção, que pode se referir a desempenho ou aos elementos de construção
Design-Build-Operate-Maintain - DBOM; Build-Operate-Transfer - BOT; Build-Transfer-Operate - BTO	A empresa contratada realiza as etapas de projeto, construção, operação e manutenção de um determinado nível de qualidade requerido, resultando em níveis mais elevados de qualidade. O público retém riscos financeiros, eventualmente compensando o privado.
Design-Build-Finance - DBF; Design-Build-Finance-Operate - DBFO; Design-Build-Finance-Operate-Maintain - DBFOM)	São variações de DB e DBOM para os quais o privado participe do financiamento (parcial ou integral) sendo compensado por cobrança de tarifas em pedágios
Concessões de longo prazo (brownfield)	Em um definido período, a concessionária opera e mantém os ativos, realizando investimentos em troca da receita gerada por cobrança de tarifas. O método pode incluir o pagamento de uma outorga inicial ao público.
Privatização	
Build-Own-Operate (BOO), Build-Own-Operate-Transfer (BOOT)	Projeto, construção, operação e manutenção são de responsabilidade dos contratados, que detém o ativo como propriedade, incluindo todas as receitas advindas. Uma variação pode ser BOOT, no qual o ativo é transferido ao público depois de um período.
Venda de ativo	Ativos construídos por financiamento público são integralmente transferidos para o privado detendo a propriedade.

DeCorla-Souza et al (2013) destacam as seguintes motivações para a implementação de PPP's: promover crescimento econômico, encorajar a competição e inovação, poupar recursos no longo prazo, transferir riscos de cronograma e orçamento para a administração privada, acelerar a execução de projetos mais importantes.

Boyer (2013) alerta para a importância do papel do poder público na implementação de uma PPP, a fim de proteger os interesses da sociedade por meio da definição clara de objetivos. Roumboutsos & Sciancalepore (2013) afirmam que as agências devem estar atentas para garantir que a iniciativa privada não demonstre interesse somente em projetos mais atrativos, e abandonem projetos com perspectivas de lucros mais baixos. O controle deve ser exercido pelo governo para assegurar que os melhores empreendimentos sejam os mais importantes para o interesse público, e não o contrário.

O relatório NCHRP 391 (2009) também indica aspectos concernentes ao setor público e sua relação com os parceiros privados, a fim de prover contratos mais abrangentes em relação aos riscos envolvidos e aos benefícios esperados.

DeCorla-Souza et al (2013) sugerem que os órgãos públicos devem realizar estudos específicos para os seguintes tópicos: (i) tráfego e receita em diversos cenários econômicos, de modo que seja possível definir a transferência, retenção ou divisão de riscos, e conseqüentemente, o que esperar do comportamento do parceiro privado, (ii) análise de riscos, permitindo a busca por estratégias mitigadoras dos riscos (o que inclui da divisão ou retenção) ou o pagamento devido à probabilidade de ocorrência, (iii) mecanismos de financiamento, para identificar fluxos de caixa em diferentes cenários contratuais, provendo perspectivas de resultados para a iniciativa privada que possam ser utilizados como incentivo e, (iv) análises comparativas entre os custos do setor público e do setor privado para o projeto, considerando o análises de ciclo de vida e ajustes de riscos.

De acordo com Huang e Gao (2014), é comum esperar que cada parte de uma PPP procure aumentar seus benefícios ou reduzir seus custos, entretanto, estas ações são, em sua grande maioria, prejudiciais ao bem público.

Estabelecer o potencial de um projeto para implementação de uma PPP requer as seguintes análises (NCHRP 391, 2009):

- Desenvolver uma maior compreensão do projeto geotécnico e alterações no local através de reconhecimento avançado;
- Concepção do projeto avançada com vistas aos principais atributos e características;
- Empregar engenharia de elevada qualidade para assegurar custos baixos para os projetos;
- Revisar pressupostos comuns utilizados para estimação de volume de tráfego, potencial de receita, alteração de tarifas de pedágio;
- Reconhecer riscos relativos aos aspectos inflacionários nos custos;
- Considerar valor atrelado ao benefício da redução dos transtornos à sociedade por meio de construções aceleradas.

Apesar do interesse crescente nas PPP's, os riscos têm refreado a ampla implementação, especialmente em relação aos custos e as dificuldades de alterações contratuais, o que tem requerido o refinamento das abordagens estratégicas para além das práticas atuais arraigadas nas atividades desenvolvidas pelo setor público.

Boyer (2013) realizou uma pesquisa para identificar lacunas no conhecimento necessário aos representantes públicos envolvidos em processos de PPP's, concluindo que o investimento em formação técnica e visão global são aspectos fundamentais para o desenho adequado dos contratos. O NCHRP 391 identificou por meio de pesquisas entre departamentos públicos de transportes, que percepções equivocadas têm se alastrado, limitando a implantação assertiva de PPP's.

DeCorla-Souza et al (2013) destacam que o delineamento de uma PPP requer habilidades nas áreas técnica, política, legal, financeira e administrativa, tendo em perspectiva todo o período dos contratos. De acordo com os mesmos autores o contrato deve prever flexibilidades para acomodar mudanças necessárias nas cláusulas ao longo do período de concessão, sem permissividade em excesso que aumenta o risco de descumprimento dos padrões de qualidade esperados, mas

também sem restrições extremas que impeçam a incorporação de novas tecnologias e conceitos aos processos. Os conflitos são inerentes aos empreendimentos de PPP's, no entanto, prever a participação de um terceiro participante que possa mediar impasses entre as agências do governo e a iniciativa privada pode representar elevados ganhos no decorrer do contrato.

Martinez et al (2014) sugerem que o principal elemento para garantir o sucesso para todas as partes envolvidas é a adequada distribuição de riscos. Os autores afirmam que os benefícios das PPP's são mais evidentes, assim como o otimismo em relação às barreiras existentes, para aqueles que participam destes empreendimentos, tanto como privado, como público. As principais barreiras são: (i) a percepção de que a administração pública fica sobre controle da administração privada e, (ii) a percepção de que os interesses da administração privada são contrários aos interesses da sociedade.

Estas percepções revelam que é importante assegurar transparência às PPP's e que o principal esforço entre as partes deve ser a busca por benefícios para a sociedade, além dos benefícios para as partes, pública e privada, sendo impossível ignorar que ambas devem ter interesses e benefícios, como atrativos do negócio.

Segundo Seppo et al. (2014), o equilíbrio dos riscos é o principal desafio, especialmente relacionados aos custos e cronogramas dos serviços e suas eventuais alterações em contratos estabelecidos. Cada participante lida melhor com determinados riscos, e o equilíbrio na divisão de riscos assegura os benefícios para a sociedade. Para Huang e Gao (2014) instituição privada, que agrega em seu contrato muitos riscos e altos custos de manutenção, precisa impor tarifas mais elevadas, em virtude do desequilíbrio contratual.

O contrato de concessão proposto pela administração pública pode transferir riscos para a iniciativa privada, a qual pode não se interessar (Jolley e Garvin, 2014). Os autores descrevem um processo pelo qual a iniciativa privada pode avaliar e sugerir inovações no contrato, mitigando os desafios de confiança entre as partes. Através do processo proposto pelos autores, os participantes de contratos de concessão podem mensurar adequadamente os riscos envolvidos.

Análise de potencial de investimento para a implementação de uma PPP, o objetivo é viabilizar o projeto sob a perspectiva dos riscos e do fluxo de caixa, para atingir as expectativas de benefícios para a sociedade e de atratividade para a iniciativa privada. Os investidores reagem à elevada alocação de riscos demandando taxa de retorno mais elevadas, enquanto os financiamentos requerem maior taxa de juros ou limitam os empréstimos (DeCorla-Souza, 2013).

A adaptação e adequada distribuição dos riscos determina a perspectiva de sucesso de uma PPP. Alguns riscos são mais adequadamente assumidos pelo poder público, sem comprometer os benefícios advindos da concessão; da mesma forma, existem riscos que devem ser integralmente transferidos à concessão, pois o inverso oneraria o estado. Simplificadamente, a divisão da matriz de risco deve garantir que o estado não precise premiar a concessão além do necessário, o que aumentaria o valor das tarifas, nem tampouco que a concessão assumira todos os riscos, inviabilizando assim a prestação adequada dos serviços, como nos casos em que a concessão não consegue administrar a ocorrência de um determinado risco, e exige a reestruturação do projeto.

Seppo et al. (2014) apontam que o tipo de processo de remuneração selecionado pode impactar nos riscos do contrato, especialmente aqueles relacionados a cobrança de pedágios nas rodovias, sendo fundamental equilibrar os riscos por meio de técnicas de gestão e mecanismos que possam reestabelecer equilíbrios contratuais.

Em oposição à valoração dos riscos, os benefícios advindos da implementação de PPP's são de difícil identificação e quantificação, mas também importantes na equação em análise. A publicação da EPEC (2011) aponta a importância da avaliação dos benefícios não-financeiros das PPP's além da avaliação dos custos e riscos do empreendimento. As avaliações comuns como Value for Money – VfM (ferramenta para correlação entre os custos e os benefícios), podem não representar adequadamente todos os elementos de uma PPP, especialmente no que tange aos benefícios de cumprimento de cronogramas dos projetos (conclusão no prazo ou antecipada), qualidade mais elevada nos projetos (por meio de abordagens relativas aos ciclos de vida e implementação de inovações aplicáveis) e dos impactos sociais

decorrentes, além dos usuários diretos da via e serviços, sendo este último aspecto de mais difícil mensuração monetária.

Neste sentido, Rangel e Vassallo (2013) concluíram que dentre as rodovias analisadas no estudo, aquelas administradas por meio de PPP's apresentaram menores taxas de acidentes, indicando as vantagens de se associar a redução de acidentes de tráfego aos contratos.

Seppo et al. (2014), afirmam por sua vez que a Finlândia foi um dos primeiros países a iniciar o processo de PPP, e com o fim do contrato indica como principal benefício a redução dos prazos de construção de melhorias em relação aos prazos estimados para construção via financiamento público. Adicionalmente a escolha da rodovia faz parte dos benefícios alcançados, uma vez que se tratava de uma via comumente congestionada, com altas taxas de acidentes.

A viabilidade técnica, legal e financeira para a administração de vias, considera finalmente, o contexto no qual a via está inserida, por comparação com as demais vias no entorno. O tipo de investimento proposto não ignora a necessidade de investimentos em outras vias e elementos, tanto para as agências públicas e suas áreas de abrangência, como um estado ou município, quanto para a iniciativa privada e seus demais investimentos, como um grupo de concessões rodoviárias. Assim, em último nível de análise, é necessário comparar os investimentos propostos para cada via dentro de um grupo coerente de análise, e os respectivos retornos.

2.3 Viabilidade de implementação de PPP

A viabilidade de implementação de um projeto destinado a parceria público-privada avaliada pelo setor público deve considerar aspectos incomuns à administração pública. A FHWA (2015) aponta a dificuldade do setor público na visão total do projeto especialmente em relação às considerações sobre os custos dos ciclos de vida do projeto, além das considerações para a adequada mensuração e administração dos riscos, frequentemente ignorando a necessidade de remuneração pela administração de determinados riscos por parte do parceiro privado.

O setor público deve compreender, por exemplo, que assumir determinados riscos sem a cobertura de um seguro específico implica no aumento não proporcional dos próprios custos ao invés da falsa percepção de que houve um ganho econômico, da mesma forma que os riscos retidos pelo setor público ainda impactam no custo no projeto. World Bank (2015) ressalta a importância dos responsáveis no setor público na gestão dos contratos e estabelece a ampla compreensão dos projetos como atributo essencial.

Os procedimentos para a avaliação da viabilidade de implementação de PPP englobam uma série de aspectos, que somados representam a complexidade da decisão de transferência de elementos de infraestrutura à iniciativa privada. O relatório síntese da NCHRP apresenta uma abordagem que considera três tópicos principais nas avaliações: seleção do projeto adequado para administração por PPP, transparência do processo e termos do contrato de uma PPP (Figura 7). Os estudos que fundamentam a determinação de viabilidade de implementação orientam também o sistema de concessão (tipo de recompensa, elementos concessionados, entre outros).

Figura 7 - Alocação de risco em projetos de PPP's, para ambos os parceiros, público e privado

A FHWA (2007) indica que todas as especificidades de cada projeto sejam consideradas nos estudos de viabilidade e nos contratos, incluindo responsabilidades,

riscos e recompensas de cada participante, além dos benefícios advindos do projeto, como alívio de congestionamentos, incremento na segurança, redução do tempo de viagem, dentre outros (Figura 8).

Figura 8 - Ciclo para projetos de PPP's

No que se refere à seleção do projeto adequado, a OECD (2007) relaciona quatro princípios: (i) a decisão deve se basear em análises de relação custo-benefício de diversas alternativas possíveis, (ii) devem estar disponíveis os mecanismos pelos quais as atividades serão remuneradas e ainda a disponibilidades de financiamentos para condições não previstas, (iii) a seleção do tipo de PPP e a alocação de riscos deve primar pelos interesses públicos, e (iv) disciplina e transparência fiscal devem ser asseguradas, observadas as implicações de financiamento público.

O World Bank (2015) sugere que primordialmente os riscos sejam detalhadamente analisados para indicar a viabilidade do projeto. Adicionalmente sugere a coleção dos seguintes documentos para subsidiar os contratos de PPP's: informações legais e regulatórias, orientações para a contratação, modelos de contratos de PPP's, política de gestão de riscos, política de financiamento, definição dos ciclos do projeto e função dos conselheiros, padrões para os projetos e serviços e documentação institucional.

O estudo de viabilidade da implementação de uma PPP considera diversos aspectos técnicos e legais, entretanto, o aspecto que melhor resume os principais elementos analisados é o custo. O custo do projeto, incorporados todos os riscos, define a viabilidade do empreendimento; a transferência para parceria público-privada deve estar subsidiada pela comparação entre os setores (público e privado) que revele menores custos do projeto sob administração da iniciativa privada. Alguns mecanismos estão disponíveis para as análises comparativas de custos. Simplificadamente, a análise sobre todos os custos envolvidos para comparar o setor privado com o setor público deve garantir que o primeiro consiga realizar as demandas necessárias por custos inferiores ao segundo.

Análises com a abordagem Value for Money – VfM têm sido vastamente empregadas para a comparação entre os custos do setor privado e do setor público. A ferramenta permite a comparação dos custos de diversos proponentes da iniciativa privada e suas respectivas capacidades administrativas. HM Treasury, (2004) define Value for Money como a combinação ótima entre o ciclo total de vida e qualidade do bem ou serviço para os usuários, ressaltando que esta abordagem não está baseada no conceito de escolha de bens ou serviços pelo menor preço.

O World Bank (2015) desencoraja a comparação com o setor público, baseado no fato de que a análise é relativamente complexa e não adequada para todos os países, ressaltando que sua adoção pode ser contraproducente. Contudo, o mesmo material produzido pelo World Bank, destinado a auxiliar nos estudos de PPP's, propõe meios para proceder com este tipo de análise.

As análises de Value For Money não se baseiam somente no menor custo, mas na maior eficiência, especialmente no tratamento dos riscos (Figura 9) e são indicadas no relatório da NCHRP 391 (2009) com os seguintes propósitos: (i) apoiar na definição de um plano de negócio para um projeto de PPP, (ii) prover importantes informações sobre a capacidade do projeto de obter financiamento, (iii) permitir o teste de hipóteses no início do projeto, como período de concessão, características de tráfego e valores de tarifas e, (iv) fornece um método para otimizar a transação e encorajar a

competição e inovação. O procedimento deve indicar se o projeto de PPP pode retornar valor para o interesse público.

Analises para definição do Value for Money se baseiam na comparação hipotética entre os cenários do setor público de comparação e o setor da iniciativa privada. Tais analises são precedidas de alguns ajustes necessários para tornar a comparação justa e realista. Analises de Value for Money devem buscar mais do que a confirmação do valor mas também e talvez principalmente se o negócio efetivamente compensa o investimento (Morallos et al, 2009).

Figura 9 - Comparação com setor público para determinação de Value for Money

A European Comission (2003), indica o procedimento como elemento primário para assegurar os interesses públicos em PPP's, citando como principais aspectos de análise: redução dos custos no ciclo de vida, melhor alocação de riscos, implantação acelerada de elementos de infraestrutura, incremento na qualidade dos serviços e geração de receitas adicionais.

Os custos finais para implementação de uma PPP dependem de sua inserção no cenário de mercado; Roumboutsos e Sciancalepore (2014) apresentam estas implicações na Figura 10, comparando os custos totais com o número de parceiros privados em condições de atender as premissas necessárias ao projeto. A FHWA (2007) afirma que o número coerente de competidores impõe transparência ao

processo de implementação de PPP, além de estimular uma competição benéfica. O principal objetivo é atrair empresas de maior capacidade administrativa, inclusive sobre os riscos, e que não exigem elevadas recompensas (FHWA, 2015).

Figura 10 - Mercado resultante da relação entre o número de participantes em leilões e o custo de entrada de projetos de PPP

De acordo com (Roumboutsos e Sciancalepore, 2014), quanto maior a quantidade de competidores em um leilão, maior a probabilidade de insucesso, pois empresas de maior capacidade técnica, e portanto, capacidade para atender a limites de qualidade, são ofuscadas por instituições não adequadamente qualificadas que oferecem o menor preço, e suas decorrências. Assim, o procedimento prévio de análise permite tornar o processo mais eficiente, com maior possibilidade de sucesso.

No que se refere ao período de concessão, este deve ser avaliado no intuito de ampliar a possibilidade de uma PPP que atenda as diversas demandas apontadas. Para garantir esta premissa, a duração da concessão deve ser avaliada criteriosamente, uma vez que períodos muito curtos (até 12 anos) evidenciaram altas taxas de insucesso, com valores elevados de tarifas, enquanto períodos muito longos (superiores a 35 anos) revelam que os interesses públicos podem se perder, com possibilidade de monopólio e ausência de competição de mercado (European Commission, 2003).

A iniciativa privada tem interesse em contratos de longo prazo para amortizar grandes investimentos iniciais, por meio de manutenções periódicas de menor porte que reduzem a necessidade de manutenções onerosas em longo prazo (NCHRP, 391). Apesar disso, tem se verificado o aumento de empresas, especialmente fundos de investimento operando de modo contrário, com participação por períodos limitados em contratos de PPP's, transferindo contratos para outras empresas.

É coerente portanto, estabelecer períodos de concessão que sejam atrativos para a iniciativa privada, mas que não vão ferir os interesses da sociedade, seja por elevados ganhos de capital para o parceiro público, por contratos demasiadamente longos, seja por contratos de curto prazo que sobretaxam os usuários, pela ausência do equilíbrio financeiro distribuído no ciclo de vida (Figura 11).

Figura 11 - Relação do período de concessão em relação aos investimentos

Ao longo dos ciclos estabelecidos para os contratos de PPP's, são identificados também benefícios não-financeiros, os quais são mais dificilmente mensuráveis mas significativamente importantes dentre as diversas considerações a respeito da viabilidade. A EPEC (2011) estabelece algumas premissas para o cálculo dos custos advindos dos benefícios não-financeiros classificados entre (i) quantificáveis e valoráveis, (ii) quantificáveis e (iii) identificáveis. Apesar das dificuldades para mensuração, para cada projeto é importante identificar benefícios não-financeiros que

possam se destacar como diferencial, e inferir valor ao benefício para que este possa integrar todos os aspectos analisados para a implementação da PPP.

Claramente a sustentabilidade na gestão das rodovias é o principal objetivo a ser perseguido. Sustentabilidade como conceito é indicado pela IAM (2016) como o equilíbrio ideal entre desempenho, riscos e custos ao longo dos ciclos de vida, evitando impactos adversos de longo prazo por decisões de curto prazo.

2.4 Riscos e custos associados

Riscos são inerentes a qualquer projeto, seja administrado pelo setor público ou privado. Os modelos de concessão da administração à iniciativa privada apresentam características peculiares no que se refere ao tratamento dos riscos dos projetos. A transferência ou divisão de riscos é considerada um dos principais benefícios das PPP's, e tem três razões primordiais para a abordagem: (i) a iniciativa privada está a frente de diversas atividades ao longo do período de concessão, incluindo aspectos técnicos e financeiros, (ii) a percepção dos riscos é muito particular para cada parte, e, (iii) a forma de tratar os riscos reside nas habilidades peculiares de cada parte (NCHRP 391, 2009).

Os riscos advêm de incertezas tomadas como premissas e podem ser transferidos mediante compensação financeira, ou retidos pelo setor público, e avaliados individualmente para cada fase do projeto pois influencia todo o projeto (World Bank, 2015) (Figura 12). O objetivo da transferência é a otimização, não a maximização, ou seja, atribuir o risco a quem puder melhor manejá-lo, pelo menor custo que retorna ao projeto, como custo, tempo ou qualidade (European Commission, 2003).

Figura 12 - Principais riscos durante as fases de um projeto

A implementação de uma PPP deve considerar benefícios para todas as partes. Embora os interesses públicos devam ser prioritariamente assegurados, o participante privado não pode ser usurpado para sustentar a ocorrência desproporcional de riscos. A divisão dos riscos deve ser coerente, seja em contrato originalmente firmado, seja em revisão, tal como seria coerente, no caso de administração exclusivamente pública, de modo que os ônus excessivos decorrentes dos riscos devem ser divididos entre os beneficiados pelo projeto.

É necessário adotar procedimentos de concorrência equitativas, para permitir competições justas que não inclinem os processos em favor do setor público ou em favor dos licitantes do setor privado (NCHRP 391, 2009). A transferência ou divisão de riscos, não deve permitir também que o parceiro privado entre em falência, em virtude da alocação indevida ou da remuneração insuficiente, uma vez que não é requerida a simples alocação de riscos, mas a melhor relação custo-benefício da alocação de riscos. A falência do parceiro privado evidencia a deficiência do contrato estabelecido, e também causa prejuízos à sociedade, e especialmente ao grupo de pessoas direta e indiretamente envolvidas.

Além da divisão dos riscos, é necessário que as responsabilidades de cada parte estejam adequadamente descritas. Na divisão dos riscos, todo o período de

concessão deve ser avaliado, para evitar que interesses privados impliquem em perdas para o interesse público no longo prazo. A análise e mitigação de riscos pode ser conflitante em relação ao participante que está analisando, uma vez que as perspectivas do parceiro público devem ser significativamente distintas das abordagens do parceiro privado.

O Banco Mundial indica quatro fases de análises de riscos, que resultam em um processo iterativo, sendo que cada fase é composta por análises internas, conforme apresentado a seguir:

Fase 1 – Identificação dos riscos: listar todos os riscos possíveis e representativos para cada projeto, respeitando suas particularidades e observando o impacto potencial de cada risco, que possam estar relacionados à:

- Condições regionais – como resultado de políticas públicas adotadas, tanto de impactos diretos nas rodovias, como aspectos regulatórios, quanto de impactos indiretos, como crescimento econômico e aspectos da macroeconomia.
- Projetos – os riscos de variação nos pressupostos de projetos, seja na fase de construção, como aqueles relativos à estudos geológicos e desapropriações, ou na fase de operação, como os riscos relacionados a licenças de serviço, e aspectos técnicos operacionais.
- Comerciais – especialmente relacionados as características de tráfego, com variação de demanda que impacta na receita e/ou remuneração para o parceiro privado.

Fase 2 – Análise dos riscos: estudos adequadamente fundamentados por informações necessárias, para análises quantitativas e qualitativas por meio de métodos e ferramentas confiáveis, que considerem os seguintes aspectos para determinação dos impactos dos riscos:

- Intensidade dos riscos – quando da ocorrência do risco, quais são os custos das implicações e os impactos no plano econômico, além do período do projeto em que podem ocorrer.

- Ocorrência dos riscos – probabilidade de ocorrência subjetivamente estimada em experiências anteriores e melhores práticas para cada elemento, com classificação de ocorrência entre os riscos.
- Grupos de riscos – análises parciais dos grupos, que possam ser divididos em subgrupos, para facilitar a determinação das implicações de elementos distintos nos impactos dos riscos.

Fase 3 – Alocação dos riscos: distribuição adequada dos riscos entre o parceiro privado e o parceiro público, da forma mais eficiente que cada participante pode lidar com o risco, sendo administrados em quatro categorias (aceito, transferido, evitado e segurado), sob os seguintes princípios:

- Limitar a transferência de riscos para o parceiro privado quando for requerida elevada recompensa.
- O risco deve ser adequadamente mensurado para ser alocado, de modo que o parceiro que o recebe tenha condições de gerenciá-lo.
- Magnitude do risco e prejuízo financeiro não fazem parte do mesmo grupo de riscos e não devem ser analisados da mesma forma.

Fase 4 – Mitigação dos Riscos: os parceiros privados e públicos podem atuar individualmente na mitigação dos riscos a que estão expostos e podem utilizar ferramentas específicas para auxiliar nesta tarefa, no entanto, é do setor público a responsabilidade de dividir os riscos de modo a minimizar o risco total do projeto em implementação.

Taothong et al. (2011) mencionam diversos elementos a serem considerados na avaliação da implementação de uma PPP, sob o ponto de vista dos riscos envolvidos:

- Região na qual será implementada (países mais adaptados às PPP's oferecem maior chance de sucesso ao projeto);
- Níveis de corrupção na região (países com maiores níveis de corrupção tem maiores taxas de insucesso de PPP's);
- Questões políticas relacionadas à democracia (países mais democráticos tendem a ser governados de modo menos centralizador);

- Questões políticas relativas à estabilidade (mudanças muito frequentes nos governos locais podem extinguir contratos mais comumente);
- Taxas de renda per capita (taxas mais elevadas de distribuição de recursos tendem a revelar populações com mais facilidade para aceitar a cobrança de tarifas);
- Relações históricas entre a iniciativa privada e os agentes de governo (tratativas históricas tendem a se repetir no futuro, de sucesso ou insucesso nas relações);
- Áreas afetadas pela implementação de vias pedagiadas entre urbanas e rurais (em especial relativo a custos de desapropriações e interferências);
- Presença de vias alternativas à via em concessão (que implicam da eventual divisão de receitas);
- A extensão de vias sob concessão (quanto mais extensas as vias, mais atraentes se tornam para a iniciativa privada);
- Tipo de projeto entre construção de vias novas ou manutenção de vias existentes (sendo que as vias novas tem se mostrado mais arriscadas, especialmente pela dificuldade na previsão de tráfego futuro);
- Distribuição de ações entre os participantes privados (sendo lógico esperar mais comprometimento do participante privado quanto maior seu percentual de participação na empresa concessionária).

O relatório síntese do NCHRP apresenta uma relação de riscos a serem avaliados nos projetos de PPP's:

- Aceitação pública - grau de aceitação pública do projeto, a sua contratação como uma PPP, e os meios de que o projeto vai ser pago (por exemplo, de cobrança de pedágios).
- Controle de ativos - percepção de perda de controle, particularmente o nível e a frequência de aumentos da taxa de pedágio, condição física e aparência da infraestrutura e proteção do interesse público.
- Protecionismo - preocupação sobre a nacionalidade das empresas que compreende a equipe de PPP, o que pode resultar em esforços legislativos para limitar a participação estrangeira ou estadual / local política e esforços de

base públicas se opor com PPP significativo envolvimento empresa estrangeira.

- Estabilidade Política - Continuidade de apoio político para a projeto de PPP deve haver uma mudança na estrutura política ou composição.
- Aspectos morais – engajamento público para evitar conflito de interesses e atividades fraudulentas durante a aquisição e fases de execução do projeto. Setor público para segurar provedor de PPP publicamente responsável pela execução adequada do projeto de acordo com os termos do contrato.
- Volumes de tráfego – frequentemente, demandas de tráfego superestimadas, incluindo as previsões de crescimento, conduzem à ruína de projetos para manutenção de rodovias. Os riscos associados à demanda de tráfego são em geral, ainda maiores em projetos do tipo *greenfield*, implantações integralmente novas. Em contrapartida, demandas subestimadas com impactos nos níveis de serviço afetam a previsão de investimentos.
- Receita – características de rendimentos provenientes de pedágios e utilização da estrada.
- Meio ambiente/ sítio arqueológico– locais que requeiram atividades de mitigação de impactos e os custos e reponsabilidades relacionados às atividades.
- Desapropriações – incerteza nos custos de desapropriações de áreas necessárias ao projeto.
- Custos de construção – impactos dos custos de materiais, mão-de-obra e manutenção do tráfego.
- Custos de manutenção – custos de atividades de manutenção e restauração que pode ser afetado pelas características de concepção e construção, e ainda por mudanças no volume de tráfego, entre outros.
- Responsabilidades / Defeitos ocultos – defeitos de projeto ou construção e os custos e responsabilidades decorrentes.
- Custos de ciclo de vida - custos cumulativos de manutenção, restauração, reconstrução e ampliação ao longo de período de concessão e seu efeito sobre o fluxo de caixa e reservas.
- Regulação contratual – alterações na regulamentação ou disposições no contrato que afetam o custo de um ou mais parceiros.

- Estrutura de remuneração / Mecanismo – efeito sobre o valor do projeto em relação à fonte, método e tempo de remuneração de custos do projeto ou a disponibilidade de pagamento.
- Custos de Transação – nível de custos associados às diversas operações envolvidas na contratação da PPP e a responsabilidade pelo pagamento destes custos.
- Alterações na Lei - mudanças de estatutos e regulamentos da nova legislação, incluindo padrões de concepção / construção, que afetam o custo do projeto e o cronograma de entrega.
- Compensação / Rescisão – Como o parceiro privado será compensado pelo trabalho concluído no caso de contrato rescindido, dependendo motivos para a rescisão, e quaisquer penalidades por rescisão antecipada pela agência pública.
- Mudanças econômicas – alterações nas atividades econômicas e demográficas atendidas pela via, que poderiam afetar o tráfego e a receita ao longo do período de vigência do contrato.
- Moeda / Variação Cambial - Mudanças no valor relativo das moedas nacionais que podem afetar o custo do projeto e valor da receita para um provedor de PPP com base em outro país com moeda diferente usado para remuneração do projeto ou pagamento provenientes de receita.
- Tributação – taxas nacionais, estaduais ou locais: impostos sobre os materiais utilizados nas atividades relacionadas à infraestrutura, que pode afetar a viabilidade financeira do projeto.

A quantificação e a valoração dos riscos dependem inicialmente de uma análise de três elementos: exposição ao risco, probabilidade de ocorrência, e extensão das consequências. Um determinado risco que tenha uma baixa probabilidade de ocorrência, mas com consequências significativas, deve ser consistentemente avaliado.

A gestão dos riscos pode ser realizada por meio de matrizes de análises de riscos, sendo que cada combinação entre exposição, probabilidade e consequência deve receber tratamento específico. Definido o tipo de tratamento para cada risco, é

possível distribuir os riscos entre os participantes da PPP, e por conseguinte, sua adequada remuneração.

São discutidos a seguir, aspectos relevantes em relação a alguns tipos de riscos em PPP's; a FHWA sugere a classificação dos riscos de acordo com a fase a que cada risco está relacionado, como planejamento, construção ou operação, conforme o tipo de contrato proposto.

- **Demanda** – o risco de demanda é significativo em contratos cuja remuneração para a iniciativa privada esteja vinculada à receita advinda do pagamento de pedágios. A demanda pode ser afetada, por exemplo, pela qualidade da via, o que estimula a concessionária a incrementar as condições oferecidas. Por outro lado, a demanda de tráfego pode ser afetada por fatores externos à concessão e fora a dos seus limites de atuação, como alterações significativas nas atividades econômicas, a presença de infraestrutura paralela em concorrência, ou integração de baixa qualidade entre a rodovia e o restante da rede viária. O risco, comumente atribuído à iniciativa privada, pode ser compartilhado com o setor público, especialmente em condições econômicas instáveis, por meio da garantia de valor mínimo pago a iniciativa privada quando a demanda se reduz muito ou não se comprova como nas previsões. No sentido oposto, quando a receita excede muito a expectativa, poderá ser prevista em contrato, a divisão de receitas entre o parceiro público e o parceiro privado, desde que assegurada remuneração para compensar o incremento na deterioração. Os riscos de demanda tendem a se reduzir após os primeiros anos de operação.
- **Tráfego** – A composição da frota total que solicita uma rodovia é determinante para a programação de atividades de conservação e de manutenção. Uma maior participação de veículos comerciais na frota total de veículos certamente geraria maior receita pela cobrança de tarifa. A proporcionalidade entre o dano às estruturas de pavimento e a variação na receita nem sempre é verificada, tampouco é linear, especialmente pela presença tão frequente de veículos comerciais trafegando com sobrecarga e muitas vezes não sujeitos à fiscalização efetiva.

- Geotécnicos – especialmente impactantes na fase de construção, podendo alterar dramaticamente os custos de projetos, também pode se manifestar posteriormente, revelando passivos na fase de operação. Podem ser mitigados por meio de estudos bem embasados e investigação criteriosa durante a fase de projeto.
- Passivos ocultos – condições não identificadas durante a fase de implementação da PPP, especialmente relacionadas a características datadas da construção, contrárias às condições usualmente verificadas em obras semelhantes. Os riscos podem ser minimizados por meio de inspeções detalhadas prévias à definição dos contratos.
- Taxa interna de retorno – análises de dados de grupo de gestão de infraestrutura mostram que a taxa interna de retorno média de longo prazo em concessões do tipo *brownfield* (infraestruturas existentes) com a gestão de ativos existentes é de aproximadamente 12% enquanto as concessões do tipo *greenfield* (infraestruturas a serem construídas), com a implantação de ativos novos é de aproximadamente 14% (Page, 2008), como exemplo dos fatores que podem influenciar a variação nas taxas.
- Financiamento – os custos e a projeção de tráfego estimados podem não se confirmar durante a concessão, reduzindo a confiabilidade no projeto e consequentemente a disponibilidade de recursos provisionados por instituições de empréstimo. Adicionalmente, fatores extrínsecos ao projeto podem comprometer a disponibilidade de financiamento, especialmente para projetos com períodos longos de retorno do débito, como em geral é o caso das concessões.
- Sinistros – o NCHRP, 391 menciona os riscos relacionados à responsabilidade em sinistros, incluindo pagamento de indenizações e contratação de seguros; o documento sugere que os riscos devem ser compartilhados solidariamente entre as partes, de modo geral, e que cláusulas contratuais de transferência do

risco não eliminam a possibilidade de acionamento da agência pública como responsável na ocorrência de danos aos indivíduos.

- Expansão - As transferências de riscos associados às construções de expansão de vias existentes podem ser balanceadas com a contratação das atividades de operação e manutenção de longo prazo, o que estimula o parceiro privado a incrementar suas ações durante a construção para obter resultados compensadores durante a operação e manutenção (NCHRP 391, 2009)
- Custos adicionais - a implementação de PPP podem implicar em custos adicionais, como por exemplo custos de monitoração de desempenho (NCHRP 391, 2009). Entretanto, as monitorações periódicas não são apenas indicadores de desempenho, mas elementos que fundamentam a tomada de decisão para gestão, assim, embora exista o custo associado, a monitoração se apresenta como ferramenta para mitigar os riscos da deterioração descontrolada da infraestrutura, permitindo assim que as agências regulatórias possam exigir ajustes de conduta dos parceiros privados.
- Custos financeiros – os custos de financiamento podem se alterar significativamente ao longo dos períodos de concessão, o que pode afetar o equilíbrio financeiro, especialmente quando a previsão de investimentos massivos superar o curto e médio prazo. Cláusulas contratuais podem considerar o repasse às tarifas, ou ainda, financiamento público, quando for conveniente aos interesses públicos. Devem ainda ser considerados outros benefícios fiscais que possam ser repassados ao parceiro privado para suprir os prejuízos decorrentes de custos atípicos de financiamento.
- Participação estrangeira - as características do parceiro privado também pode representar risco na implementação de PPP's, por exemplo, quando se trata de grupos privados estrangeiros, que podem ou não ter influência de governos estrangeiros. A presença de grupos estrangeiros pode dificultar o desenvolvimento interno de parceiros locais, com efeito sobre a macroeconomia; parceiros estrangeiros podem ainda representar um

compromisso menor com os interesses públicos locais. Para preservar a economia local, o contrato pode requerer taxas de participação de prestadores de serviço nacionais (NCHRP 391, 2009). Entretanto, benefícios pela participação estrangeira podem ser obtidos, como utilização de tecnologias de inovação.

- Conclusão do contrato - as condições da via concessionada ao final do período de contrato são comumente estabelecidas por meio da fixação de parâmetros de desempenho mínimos aceitáveis. No entanto, para garantir o cumprimento de tais parâmetros, algumas medidas podem ser previstas em contrato, como a criação de fundos, cuja utilização está vinculada ao cumprimento dos parâmetros. Em contratos que o setor público é gestor das tarifas, repassando à iniciativa privada, os valores firmados, o primeiro pode realizar repasses parciais, retendo percentuais a serem pagos após a constatação das condições da via.
- Meio ambiente - os riscos relacionados a questões ambientais, são em geral, melhor administrados pelo setor público, especialmente quando envolvem o trato com agências públicas de caráter ambiental para emissão de licenças. Outros aspectos relativos a questões ambientais podem estar relacionados nos escopos dos contratos, para assegurar melhores práticas de manejo, contenção de danos e interferências, controle de emissões de agentes poluentes, além de medidas de inovação neste sentido, contudo, deverá ser considerada a remuneração destes elementos.

Embora estes conceitos sejam indicados nas análises de projetos para PPP's, os riscos mencionados ocorrem também no âmbito da administração exclusivamente pública, recebendo por vezes, tratamentos similares aos sugeridos neste trabalho.

2.5 Análise de Riscos

Os impactos dos riscos são analisados por meio dos elementos relativos a exposição, probabilidade e consequência. Entretanto, inicialmente pode ser conveniente

subdividir os riscos em outros riscos, ou sub-riscos, que compõe o primeiro, como por exemplo, o risco de demanda de tráfego que pode ser avaliado em relação aos parâmetros econômicos em geral, e detalhadamente e individualmente quantificados como fatores contribuintes para a ocorrência do risco principal de tráfego.

As análises dos riscos integram um processo iterativo, uma vez que a disponibilidade de novas informações revela a natureza cíclica de otimização das análises (FHWA, 2013). Cada resultado deve ser analisado sob uma ótica de otimização na qual é deflagrada uma nova sequência de probabilidades (Figura 13).

Figura 13 - Processo iterativo na análise de riscos

Análises qualitativas e quantitativas subsidiam com assertividade a determinação dos custos dos riscos, desde que sejam conduzidas criteriosamente sobre cada fator significativo, possibilitando a identificação de ações mais eficientes para o manejo individual de cada risco, avaliado em função das consequências ou dos efeitos econômicos dos mesmos.

A Tabela 2 sugere a alocação de riscos entre os parceiros em PPP's, guardadas proporções razoáveis que cada qual possa suportar, reforçando que o objetivo não é maximizar a transferência de riscos mas sim otimizar a alocação dos riscos para o parceiro que possa administra-lo com mais eficiência. Como exercício inicial e simplista, pode-se alocar os riscos àquele que tenha controle sobre o item. Este conceito reforça as perspectivas positivas dos projetos de PPP's, com cenários razoáveis.

Tabela 2 - Matriz típica para alocação de risco

Tipos de riscos	Parceiro mais indicado para administrar o risco
Políticos e legais	Setor público e instituições internacionais
Econômicos e financeiros	Governo
Construtivos	Parceiros privados e construtores
Operacionais	Parceiros privados e operadores
Comerciais	Agência reguladora
	Operador
	Parceiro Privado

Análises de risco podem ser conduzidas com dois enfoques: qualitativas e quantitativas. As análises qualitativas são realizadas em processo de hierarquização dos riscos num primeiro estágio, permitindo posteriormente a determinação das probabilidades de ocorrências em termos percentuais e das consequências em termos monetários. As análises quantitativas por sua vez computam os impactos globais dos custos dos riscos no modelo econômico do projeto, fundamentadas em processos lógicos e de maior complexidade. Ambos os processos são interconectados, sendo que as análises quantitativas são conduzidas sobre os riscos identificados como prioritários nas análises qualitativas.

O World Bank (2015) elenca diversas ferramentas para a análise quantitativa de riscos: Estrutura Analítica de Projetos - EAP, árvore de falhas (Fault Tree Analysis – FTA), análise de causa e consequência, diagrama de linha de influência, redes CPM e PERT, árvore de decisão, análise de decisão, simulação estocástica, análise de sensibilidade e conceitos de inteligência artificial; o órgão destaca como mais relevantes a análise de sensibilidade e a simulação estocástica, diferenciando-os entre simplista e sofisticado respectivamente, cada qual apresentando vantagens e desvantagens específicas.

A FHWA (2015) destaca a análise determinística *formula-based analysis*, precedida da análise de sensibilidade, que utiliza uma formula simples para calcular o impacto

médio para cada risco utilizando máximo, mínimo e mais provável risco de impacto em custos e cronograma, além das simulações estocásticas probabilísticas.

No guia para análises de riscos a FHWA (2013) propõe que cada risco seja avaliado individualmente, nem sempre com a mesma ferramenta, a depender da sua classificação, conforme a Figura 14. Os riscos devem ser avaliados ainda por abordagens distintas, como em função de diferentes cenários de consequências, como por exemplo, o atraso na construção de uma estrutura que pode implicar no aumento de custos (i) pela necessidade de turnos noturnos para a atividade, (ii) pela perda na receita proveniente do pedágio ou (iii) pelos impactos sociais e econômicos do aumento do tempo de viagem na região.

Figura 14 - Categorização de riscos

A análise de riscos por meio de ferramentas estatísticas são particularmente úteis em análises simultâneas de riscos, destacando-se as técnicas de análises com multivariáveis, como a amplamente utilizada simulação de Monte Carlo. Este tipo de simulação inclui variabilidades aleatórias que melhor representam a realidade sob diversas abordagens, resultando em mais cenários de análise, incluindo máximos e mínimos custos para os projetos, e toda a variedade esperada entre estes.

Segundo Schrock et al (2010) o Método de Monte Carlo permite a geração de uma grande quantidade de amostras por simulação de dados a partir de uma distribuição de dados amostrais conhecidos e preenchendo esta distribuição, revelando uma população mais completa, suficiente para estimar probabilidades de ocorrências (Figura 15). O princípio se baseia na observação do comportamento estatístico da população (entre as amostras reais e as amostras obtidas por simulação).

Figura 15 - Procedimento bootstrapping para determinar a convergência em simulações de Monte Carlo (modificado a partir de Lea, 2013)

A principal desvantagem das análises com multivariáveis é a quantidade requerida de dados confiáveis, com elevada complexidade de interpretação dos resultados, além disso, pode deturpar o foco necessário a alguns riscos que devem ser analisados individualmente para serem adequadamente compreendidos. Como em qualquer procedimento de análise estatística, os resultados devem ser analisados com as devidas precauções, considerando as amostras e todas suas características.

O Método de Monte Carlo tem sido largamente utilizado para solucionar problemas de difícil determinação analítica. O procedimento se baseia na repetição de cálculos em número muito grande de vezes, utilizando dados aleatórios independentes para representar a função do parâmetro de interesse.

O conceito deste tipo de análise estatística é simplificada demonstrado no exemplo da Figura 16, da qual se pretende obter a superfície demarcada em azul. A

exatidão do resultado será proporcional à repetição aleatória do número total de pontos.

Figura 16 - Representação esquemática de repetição aleatória para determinação do objeto

Quanto maior o número de repetições, maior será o tempo de processamento, mas menor será o erro da estimativa do parâmetro simulado. Principalmente por este motivo, o Método de Monte Carlo ganhou impulso efetivo a partir dos incrementos computacionais disponíveis. Matematicamente o método se baseia em processos determinísticos e estocásticos mesclados. Contudo, Lea (2013) pontua que é desejável limitar o número de repetições ao mínimo necessário para garantir que o resultado obtido é próximo o bastante da realidade.

A adequada aplicação do método depende da independência das variáveis aleatórias, de modo que uma variável não influencie ou influencie minimamente outra variável; a aplicação requer também a adequada distribuição probabilística para as variáveis.

Gransberg (2009) por exemplo, escolheu o Método de Monte Carlo para avaliar as diferenças econômicas decorrentes da seleção de diferentes alternativas de restauração de textura superficial em pavimentos asfálticos, incluindo análises sobre os ciclos de vida de cada alternativa e alguns aspectos relativos a disponibilidades de matéria prima e volatilidade do mercado fornecedor.

Ashley (1980) por sua vez, desenvolveu uma abordagem para quantificar a incerteza na previsão de demanda de tráfego utilizando o Método de Monte Carlo e

incorporando a simulação ao processo de tomada de decisão, considerando diferentes níveis de variação nas previsões.

Diversos autores relatam a utilização do método, com aplicabilidade em inúmeros problemas. Os resultados estatísticos das simulações utilizando o Método de Monte Carlo fornecem elementos para a estimação de probabilidades, fundamentando a análise dos riscos relacionados às ocorrências.

2.6 Critérios para processo de tomada de decisão

O processo de tomada de decisão vem sendo refinado com o objetivo de direcionar mais adequadamente os resultados deste processo e coordenar com estratégias e políticas, inserindo argumentos de maior confiabilidade e se utilizando de ferramentas lógicas, procurando o equilíbrio entre “arte” e “ciência”.

O planejamento estratégico por si é um processo decisório que procura encontrar a solução de problemas, aproveitar oportunidades, e esquivar ameaças ou crises. A tomada de decisão é um processo cognitivo no qual é selecionada uma opção entre diversos cenários para uma determinada situação, e cuja sistemática tornou-se conhecida como a “teoria da decisão”.

A administração como disciplina fornece conceitos que cercam o ambiente de tomada de decisão baseando nas (i) condições de certeza, quando cada alternativa possui resultados conhecidos, (ii) condições de incerteza, quando as probabilidades estatísticas dos resultados das alternativas são desconhecidas e impossíveis de serem estimadas e (iii) condições de risco, quando os resultados das alternativas não estão claros, mas os administradores possuem suficientes informações para avaliar os possíveis resultados. A condição de risco assume que os administradores podem calcular estatisticamente as probabilidades dos resultados associados às alternativas. Quanto mais informações precisas e no momento adequado, tanto maior a confiança nos resultados.

As decisões podem requerer escolha, classificação, ordenação ou priorização com um ou mais critérios (monocritério ou multicritério). Assim a modelagem de um

processo de decisão aproxima a realidade e o problema abordado, distanciando o processo do abstracionismo, e fortalecendo a definição clara de objetivos, a compreensão dos relacionamentos entre as decisões e a identificação de variáveis e limitações (Lachtermarcher, 2004).

As decisões sobre problemas multicritérios se valem de modo mais eficiente de ferramentas específicas para apoio à tomada de decisão, que agregam modelagens matemáticas com suposições qualitativas e subjetivas, em virtude das inerentes complexidades. Os resultados nem sempre são assumidos como ótimos, mas como mais coerentes com as escalas de valores e método adotados.

Segundo Tchemra, A.H. (2009) os processos sistematizados de tomada de decisão minimizam os riscos pela escolha de uma determinada alternativa ou cenário, diante de uma situação ou problema. Quanto mais estratégico o objetivo da decisão, menos programado e mais personalizado deve ser o sistema de análise de opções.

Sistemas de apoio à decisão fornecem informações de forma interativa, fundamentados em modelos de referência que expressam matematicamente as relações entre as variáveis da situação (O'brien, J. A., 2004.). Destaca-se como método amplamente difundido e utilizado pelo mundo, o Processo Analítico Hierárquico (Analytic Hierarchy Process – AHP).

O Processo Analítico Hierárquico foi desenvolvido na década de 1970 com o objetivo de preencher uma lacuna no enfoque sistêmico para a determinação de prioridades na tomada de decisão (Saaty, 1991). O método reúne conhecimentos e julgamentos qualitativos e subjetivos incluindo os graus de certeza e incerteza da situação, avaliados em termos de consistência lógica. O método está baseado em três etapas: construção de hierarquias, definição de prioridades e verificação de consistência lógica.

A primeira etapa é uma abstração, como um exercício necessário para a compreensão das interações entre os componentes e os impactos. A situação é estruturada em níveis hierárquicos considerando (i) os objetivos globais, (ii) o conjunto de alternativas viáveis e (iii) conjunto de critérios, conforme proposto na Figura 17.

Figura 17 - Estrutura hierárquica genérica de problemas de decisão

A segunda etapa se baseia na capacidade humana de julgamento e observação das relações entre critérios. O método requer o estabelecimento de escala hierárquica para os elementos de cada nível, como representação do grau de importância de cada elemento em seu determinado nível sobre os elementos do nível inferior. Nesta etapa é construída uma matriz de comparação paritária a partir da qual é são definidos os julgamentos. A terceira etapa avalia a consistência das matrizes obtidas, por meio de um indicador alcançado matematicamente.

O método requer um grau de compreensão sobre a situação avaliada por parte do julgador. Alguns autores consideram este aspecto negativo, enquanto outros apontam a necessidade de confiar em pessoas com experiência para decisão sobre a situação, não relegando as decisões a análises superficiais realizadas por pessoas alheias às decorrências das decisões. O método inclui a participação do tomador de decisão na estruturação da situação.

Apesar de o método utilizar escalas baseadas em pressupostos não testados, e de a escala variar somente de 1 a 9, o que pode ser limitador tendo em vista que algumas variáveis podem ter grau de importância superior à esta escala, o método oferece algumas possibilidades de maior relevância. Neste sentido destaca-se a possibilidade de variar a importância dos critérios e naturalmente a possibilidade de realizar análises de sensibilidade para estabelecer as implicações do peso de cada critério, e também para garantir a solidez dos resultados. A escala de até nove classificações também

corresponde a um aspecto psicológico, no qual se presume que o ser humano tem limitações na capacidade de julgamento paralelo de mais critérios.

Diferentes autores relatam a adoção de variações do método AHP, com o objetivo de suprir deficiências metodológicas. Javed e Fwa (2009) avaliaram os procedimentos de priorização de manutenção de pavimentos por meio de três procedimentos distintos para o método AHP e concluíram que respeitadas suas diferenças, os três apresentaram resultados consistentes.

3 MODELO DE ANÁLISE DE SISTEMAS DE REDE VIÁRIA PROPOSTO

A gestão de rodovias vem se ampliando gradualmente, requerendo o conhecimento e controle de um maior número de variáveis, tendo em vista que os planejamentos estão se expandindo para maiores períodos de análise, ao mesmo tempo em que é requerida maior assertividade nas previsões de desempenho.

Historicamente, cada nível de análise na gerência de manutenção de pavimentos se apropria de um determinado número e tipos de variáveis, com detalhamentos específicos, a partir dos quais são definidos os programas de atuação. Existe entretanto, uma conexão entre os níveis de análise, que pode ser entendida como uma relação complementar.

O nível de projeto oferece um detalhamento contundente das condições atuais das rodovias, muito embora seja menos consistente a projeção de variáveis neste nível de detalhamento. O nível de rede, no entanto, utiliza-se de variáveis de projeção mais coerentes, porém com nível de detalhamento mais superficial ou simplificado, que impacta na precisão das projeções.

Apesar da utilização, quase como uma regra, dos níveis de rede e de projeto nesta sequência relatada pela bibliografia, este trabalho propõe a inversão, iniciando as análises pelo nível de projeto pois a inclusão deste nível tem o objetivo de promover uma maior precisão de alguns pontos e depois estender no nível de rede e, conseqüentemente, no nível de rede macro, ou seja, do sistema viário.

Mantendo a coerência das vantagens e das desvantagens, ou aplicabilidade de cada nível, é possível conjugar as análises, de modo a aumentar a precisão, sem necessariamente aumentar o grau de detalhamento das informações normalmente necessárias. A partir deste processo combinado, é possível adicionar um novo nível de análise na gestão de rodovias, incorporando aspectos adicionais, técnicos ou não-técnicos, relacionados às condições de contorno dos ativos.

Para qualquer nível de análise, o caráter das atividades, entre ações reativas ou ações preventivas, sinaliza o tipo das intervenções aplicadas; de modo geral, as atividades

preventivas são realizadas em frequências mais rotineiras, procurando limitar-se a serviços de natureza funcional. Evitam-se, sempre que possível, intervenções robustas estruturais, associadas à redução significativa das condições dos pavimentos, que passam a requerer atividades corretivas por período recorrido sem atividades preventivas, conforme exemplificado esquematicamente na Figura 18. Nesta figura, sugere-se um período curto de tempo como oportunidade, no qual as atividades de correção são adotadas ainda de modo preventivo.

Figura 18 - Representação esquemática das atividades preventivas e corretivas

Assim, considerando estes conceitos, os sistemas de gestão que objetivam a manutenção de um determinado nível de qualidade associado a um conjunto de atividades, deveriam atuar em bases preventivas idealmente. Quando não é possível aplicar estes conceitos, as análises devem indicar o conjunto ótimo de atividades necessárias para o equilíbrio entre condições e investimentos, compreendidos em um período suficiente para incluir conjunto de ações preventivas.

Isto significa que mesmo que o conjunto de atividades seja relegado a atividades corretivas, indicando o comprometimento da qualidade dos pavimentos, por um determinado período, é fundamental que em tempo adequado, a política de atuação

se converta em ações preventivas, o que indica o nível de qualidade alcançado, e por um período que permita alcançar o equilíbrio nos investimentos.

Apesar de comprometidos os níveis de qualidade, é importante estabelecer limites para tolerância aos defeitos, conforme sugerido na Tabela 3. A delimitação de tais defeitos deverá considerar os decorrentes efeitos em contratos vigentes, que estabelecem parâmetros de desempenho mínimos, além de considerar os efeitos financeiros que decorrem da tolerância estendida a valores muito baixos de desempenho.

Tabela 3 - Representação esquemática para a tolerância de defeitos em pavimentos asfálticos (Modificado a partir de Zimmerman, 2010)

Defeitos em pavimentos asfálticos		
Tipo de defeito	Extensão dos defeitos	
	Baixa ←	→ Alta
Trincamento por fadiga		
Trinca de blocos		
Exsudação		
Deformação Permanente		
Redução de atrito		
Irregularidade		

O modelo proposto neste trabalho considera os aspectos individuais de cada nível de análise, conforme descrito neste capítulo, pontuando os elementos de conexão entre os níveis.

Apesar da complementaridade entre os níveis de análise, cabe ressaltar que os resultados das análises em cada nível têm validades específicas, sendo requeridas simulações periódicas para ajustar os desempenhos verificados aos planos de atuação propostos, conforme detalhado na descrição de cada nível.

Simplificadamente, este capítulo descreve as particularidades de cada nível, com o objetivo de conduzir à análise em nível macro, para um conjunto de rodovias, conforme exemplo apresentado na Figura 19, que exhibe uma rede concessionada na França.

Figura 19 - Representação de uma rede de rodovias na França, administradas por uma mesma instituição

3.1 Nível de projeto

O objetivo da análise em nível de projeto dentro do sistema de gerência em nível de rede macro é aumentar a assertividade na determinação das condições dos pavimentos e das atividades necessárias a serem executadas em curto e médio prazos. Este grau de detalhamento inicial impacta de modo significativo na confiabilidade das projeções de longo prazo. Deste nível deriva grande parte da estrutura do sistema de gerência em nível de rede macro.

Análises em nível de projeto são necessariamente baseadas em informações com maior grau de detalhamento, a respeito das características e condições dos pavimentos. Este grau de detalhamento possibilita a indicação mais precisa de soluções para intervenções em curto e médio prazos.

A coleta de dados é fundamental para o sucesso do programa de intervenções de pavimentos, permitindo avaliações confiáveis das rodovias. Para tanto é crucial que os dados sejam precisos, livres de desvios, e consistentes na tradução das condições dos pavimentos, orientando as ações a serem tomadas e mensurando a eficiência das ações implementadas (Pothole, 2015).

A determinação detalhada de características estruturais e funcionais dos pavimentos não permite a generalização de propriedades e comportamentos. É necessária a delimitação mais precisa, tanto quanto possível dentro da lógica e métodos técnicos, de segmentos considerados homogêneos.

A definição de faixas para a delimitação de segmentos homogêneos é elementar para o processo. Devem ser realizadas análises de sensibilidade para o parâmetro

adotado. Para proceder com análises detalhadas, em nível de projeto, é crucial segmentar adequadamente às vias, sendo vital a verificação da sensibilidade, a fim de garantir que a faixa de tolerância seja coerente em amplitude, sem restringir demasiadamente, mas sem permitir o tratamento de desiguais como similares.

A inserção de elementos na segmentação deve ser acompanhada das mencionadas análises de sensibilidade, a fim de se identificar impactos efetivos da presença de cada elemento que justifique a decorrente concepção de um maior número de modelos de desempenho.

Para cada variável, recomenda-se a adoção de limites específicos. A variabilidade no tráfego dificilmente será a mesma variabilidade encontrada nas condições funcionais de uma rodovia, que também poderá ser consideravelmente diferente da variabilidade na estrutura dos pavimentos (Tabela 4).

Tabela 4 - Processo de segmentação pelo método do mínimo denominador comum

Rodovia (km)	Tráfego	Estrutura	Intervenção (última)	Segmentação Final	Extensão do segmento
0	5,00E+07	Flexível	Reforço estrutural	Tráfego 5E+07, Pavimento Flexível, Reforço estrutural	30 km
10					
20					
30				Tráfego 5E+07, Pavimento Semirrígido, Reforço estrutural	10 km
40				Tráfego 5E+07, Pavimento Semirrígido, Correção Superficial	10 km
50		Semirrígido	Superficial	Tráfego 1E+08, Pavimento Semirrígido, Correção Superficial	20 km
60					
70	1,00E+08			Tráfego 1E+08, Pavimento Semirrígido, Atividades de Rotina (pontual)	10 km
80		Flexível	Rotina (pontual)	Tráfego 1E+08, Pavimento Flexível, Atividades de Rotina (pontual)	20 km
90					
100			Reconstrução	Tráfego 1E+08, Pavimento Flexível, Reconstrução	10 km

As estruturas projetadas para os pavimentos, frequentemente variam de forma considerável em relação às espessuras e materiais das camadas constituintes. Ao

longo da vida de serviço dos pavimentos, um número ainda maior de variáveis impacta no desempenho das estruturas, dentre os quais destacamos o tráfego e as condições climáticas, e o regime de intervenções de manutenção a que são submetidos.

O desempenho dos pavimentos depende da configuração de solicitações e principalmente da forma como cada estrutura reage às solicitações, sendo que esta resposta está intimamente relacionada ao tipo de estrutura construída.

Por sua vez, o regime de intervenções a que um pavimento está submetido altera o desempenho das estruturas de modo especialmente significativo. Qualquer intervenção, afeta o desempenho dos pavimentos pois o desempenho futuro é resultado da condição atual, da combinação de defeitos que acometem o pavimento no instante considerado, com as solicitações previstas.

Qualquer tipo de intervenção afeta o desempenho, mesmo que a intervenção executada não restaure o pavimento em todas as suas propriedades almejadas. A durabilidade dos efeitos da intervenção executada, no entanto, depende em primeiro lugar, do impacto restaurador da mesma, sendo que a mensuração das mudanças nem sempre são evidentes a depender do tipo de intervenção.

Pavimentos com deficiências estruturais podem ter uma curva de desempenho alterada temporariamente, com desaceleração da deterioração, mesmo que seja submetido aos tratamentos superficiais que objetivem amenizar defeitos funcionais, pois existe relação entre a ocorrência de defeitos superficiais e a interação entre as solicitações e a estrutura. Os efeitos das cargas dinâmicas se alteram pela presença de defeitos de superfície, agravados os efeitos quanto maior a irregularidade superficial. Os impactos decorrentes das intervenções superficiais são dependentes das características das estruturas assim como das solicitações.

Para a definição dos modelos de desempenho estruturais, as influências das intervenções são separadas em dois conceitos: (i) efeito da última intervenção executada, e (ii) tipos de intervenções utilizadas que podem ser reproduzidas no futuro.

Em relação ao primeiro conceito, é necessário considerar que as intervenções executadas estabelecem limites dentro dos bancos de dados, pois os dados são considerados representativos de desempenho, quando não houve interferência na condição de deterioração em função do tráfego ou tempo. Por exemplo, um pavimento que recebe intervenções funcionais anualmente não permite uma boa definição de curvas de desempenho que possam ser empregadas para previsão de comportamento futuro, por estarem em constante alteração. O conceito pode ser observado por uma sequência de atividades e o relativo valor de serventia do pavimento (Figura 20).

Figura 20 - Período recomendável para a manutenção dos pavimentos (Bernucci et al, 2007)

A previsão de desempenho não é simples nesses casos e passível de erros mais significativos e perpetuados, pois este nível de detalhamento não permite a generalização.

As variáveis a serem analisadas em nível de projeto podem se referir a elementos diversos, como indicadores das condições dos pavimentos, como por exemplo, deflexão, capacidade de suporte, trincamento, deformações, irregularidade superficial, textura, dentre outros.

Alguns dos indicadores mencionados podem ser obtidos por mecanismos simples, não obstante, a aplicação dos resultados medidos pode indicar maior grau de complexidade. Como exemplo, destaca-se a condição estrutural dos pavimentos, que

pode ser mensurada continuamente, enquanto o tratamento dos resultados depende de extensiva análise e, frequentemente, da complementação com dados adicionais obtidos por processos menos simples. Estas interações são discutidas neste capítulo.

3.1.1 Deflexão de pavimentos

A deflexão de pavimentos é uma medida não destrutiva, pois não altera as condições físicas das estruturas, largamente utilizada para a avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos. Hudak et al (2009), afirmam que apenas 16% dos estados americanos coletam informações sistematicamente das condições estruturais das vias para análises em sistemas de gerência de pavimentos em nível de rede, sendo em grande parte, devido aos elevados custos associados uma vez que as redes são muito extensas. Além disso, as estruturas de pavimentos norte-americanas são mais robustas que as brasileiras em geral, que implicam em pequenas alterações anuais de deflexão, a não ser que já esteja em processo de fadiga ou deterioração. Avaliação estrutural completa requer medidas de deflexão e identificação das camadas e espessuras dos pavimentos.

Avaliações da capacidade estrutural dos pavimentos podem ser realizadas por meio de distintos equipamentos / sistemas, o que está relacionado inclusive com o tipo de informação disponível acerca das características das estruturas analisadas (Crook et al, 2012).

O procedimento pode ser realizado por diversos tipos de equipamentos, divididos em três categorias básicas: estático (ou quase-estático), dinâmico e impacto, representados pelos amplamente conhecidos equipamentos Viga Benkelman, Dynaflex e Falling Weight Deflectometer (FWD) respectivamente, de acordo com Huang (2004). De acordo com Ahmed et al. (2013), o carregamento é um dos mais importantes fatores na previsão de resposta do pavimento, em termos de tensão, deformação ou deflexão da estrutura. Os autores ressaltam que o carregamento estático não é uma representação real do tráfego que solicita os pavimentos.

O FWD é o equipamento mais adequado utilizado para tal objetivo. A análise dos resultados das medidas de FWD é frequentemente realizada com o objetivo de indicar

de modo indireto, a rigidez estrutural por meio do Número Estrutural de cada seção, conhecidas ou não as características das camadas dos pavimentos (Crook et al, 2012).

Diversos estudos têm procurado estabelecer comparações entre os diferentes processos de medida de deflexão. Fonseca (2002) menciona os resultados de um estudo realizado em cooperação entre o Departamento de Transportes de Illinois (IDOT) e a Universidade de Illinois nos Estados Unidos, que mostrou, dentre as principais conclusões, uma comparação entre equipamentos por impacto e estáticos, onde as respostas dos pavimentos às cargas impostas pelo equipamento FWD se aproximam mais dos deslocamentos na superfície produzidos por veículos em movimento; as deflexões medidas com Viga Benkelman, tendem a superestimar as medidas com roda em movimento, enquanto as medidas com equipamentos dinâmicos tendem a ser menores do que as obtidas em cargas em movimento.

Huang (2004) corrobora estes resultados, afirmando que o FWD é o equipamento mais adequado para medidas não destrutivas de caracterização da condição estrutural dos pavimentos, pois simula a solicitação de roda em movimento, em magnitude e duração. Isso é obtido por meio da queda de um conjunto de massas a partir de altura pré-fixada, e transmite a uma placa apoiada no pavimento, a carga aplicada. Ahmed et al (2013) destacam que embora o carregamento do FWD simule mais adequadamente o carregamento do tráfego, este se difere em alguns detalhes, como área de aplicação de carga e pico de aplicação de carga.

Segundo Yang (2009), muitos estudos foram realizados com o intuito de estimar a vida remanescente dos pavimentos, tanto em relação às condições funcionais quanto estruturais, normalmente em função do tráfego ou do tempo. Mais recentemente surgiram modelos baseados nos resultados das leituras de deflexão com FWD, e ainda modelos com múltiplas variáveis explicatórias para o desempenho dos pavimentos. Entretanto, Gedafa et al (2012) afirmam que o uso do FWD para a gestão em nível de rede é praticamente inviável, e aconselha a adoção do Rolling Weight Deflectometer (RWD), o qual fornece apenas a deflexão no ponto de aplicação de carga, sugerindo que apenas a deflexão no ponto máximo é suficiente para este nível

de avaliação.

O procedimento para medições utilizando o FWD são descritas na norma brasileira DNER-PRO 273 e na norma americana ASTM D 4695. O equipamento automatizado fornece resultados de deslocamentos recuperáveis a partir de transdutores de velocidade apoiados no pavimento, guiados por uma barra metálica na qual se pode definir os espaçamentos entre cada sensor, e a partir dos quais é possível obter a deformada ou bacia de deflexão, conforme o esquema apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Falling Weight Deflectometer (Preussler, 2007 apud Dynatest, 1995)

O esforço imposto pelo equipamento gera uma distribuição de tensão entre as camadas, a qual pode ser associada às propriedades de estrutura e de cada camada individualmente, conforme o desenho esquemático apresentado na Figura 22.

De acordo com Bernucci et al. (2007), a principal vantagem na obtenção da bacia de deflexão com grande acurácia é a decorrente determinação dos módulos de elasticidade das camadas dos pavimentos por meio de retroanálise, permitindo uma avaliação estrutural mais adequada. Huang (2004) ressalta, entretanto, que nenhum método de retroanálise é totalmente confiável, especialmente aqueles com pavimentos de camadas delgadas. O processo de retroanálise requer conhecimento acerca das espessuras e dos tipos de materiais das camadas.

Figura 22 - Zona de tensões e correlação com as propriedades das camadas (modificado a partir de Donovan e Tutumluer, 2009)

O NCHRP 381 (2008) indica a utilização das medidas de deflexão com FWD para a determinação de reforços estruturais, gerência de pavimentos, controle de qualidade, dentre outros usos. Os dados provenientes do FWD são ainda fundamentais para projetos mecanísticos-empíricos. Na gerência de pavimentos, o equipamento permite avaliações não apenas da capacidade estrutural, mas também da resistência do subleito e da execução de camadas de reforço.

As medidas de deflexão são afetadas pelas características dos pavimentos, pelas características de carregamento e pelas condições climáticas (Huang, 2004). As condições dos pavimentos afetam diretamente as medidas de deflexão, não apenas pela capacidade estrutural verificada, mas em função da presença de defeitos funcionais. Pavimentos com extensas áreas trincadas ou deformações permanentes importantes apresentam, normalmente, deflexões superiores àquelas medidas em áreas não comprometidas superficialmente. O processo está associado à dissipação do carregamento através das camadas dos pavimentos.

Também são fatores de interferência nas medidas de deflexão, as condições climáticas, especialmente de temperatura, frequência pluviométrica e sua consequente interferência na drenagem dos pavimentos. Pavimentos sujeitos à umidade tendem a apresentar deflexões superiores às medidas realizadas em

períodos secos, ao passo em que pavimentos sujeitos ao congelamento apresentam maior rigidez durante este período, culminando em deflexões menores. A baixa temperatura contribui para o enrijecimento das estruturas, não apenas nas regiões sujeitas a congelamento mas pela baixa temperatura em revestimentos asfálticos que enrijecem pela queda de temperatura; elevadas temperaturas diminuem a viscosidade dos materiais asfálticos, reduzindo sua rigidez e aumentando consequentemente as deflexões medidas. Gedafa et al 2012 afirmam que a temperatura afeta os resultados de FWD, sendo fundamental a normalização dos resultados em função de uma temperatura padronizada. Da mesma forma, os resultados de deflexão medidos devem ser normalizados para a carga padrão aplicada.

Bayat et al. (2011) relatam a necessidade de correções para normalizar a temperatura nas medidas de deflexão e citam diversos autores que desenvolveram equações para considerar esta variável, sendo que a maior parte objetiva corrigir os resultados de módulo das camadas, estimados a partir da deflexão medida. No Brasil, não se observa a mesma preocupação com as correções, apesar da disparidade de temperaturas entre as regiões do país. Somente a norma do DER-SP (2006) faz menção à necessidade de corrigir as temperaturas dos revestimentos asfálticos dos pavimentos para estudos de análise estrutural de pavimentos.

As características de carregamento, entretanto, são os aspectos mais relevantes nas medidas de deflexão. A magnitude e a duração da carga aplicada é fundamental para a acurácia dos resultados; carregamentos muito inferiores ou muito superiores às solicitações reais dos veículos de cargas produzem resultados distorcidos, não proporcionais para extrapolação e com erros significativos (Huang, 2004).

O protocolo para obtenção de bacias de deflexão no estado americano da Virginia requer que sejam realizadas medidas a cada 160 metros (que corresponde a 0,1 milhas), aproximadamente, em quatro níveis distintos de carregamento (26 kN, 40 kN, 53 kN e 71 kN) e três bacias para cada nível de carregamento (Alam, 2007). No entanto, os autores sugerem que apenas um nível de carregamento pode ser utilizado, com medidas realizadas a cada 500 metros aproximadamente, sem comprometer a qualidade e a validade estatística dos dados. Donovan e Tutumluer (2009)

apresentam as diferenças nas curvas geradas por carregamentos de magnitudes distintas aplicados numa mesma estrutura por meio do equipamento FWD (Figura 23).

Figura 23 - Bacias de deflexão em diferentes níveis de aplicação de carga (modificado a partir de Donovan e Tutumluer, 2009)

Noureldin et al. (2005) sugerem a adoção de um único nível de carregamento (4,1tf) com medidas espaçadas a cada 320 metros (0,2 milhas), garantindo qualidade estatística para os dados, apesar de indicar que medidas a cada 500 metros seriam suficientes para análises em nível de rede. Cabe neste ponto reforçar os conceitos indicados por Huang (2004), que menciona discrepâncias não correlacionáveis com a deterioração do pavimento, quando da aplicação de cargas muito distintas das cargas médias de solicitação, reiterando que o dano não é proporcional ao carregamento.

Os parâmetros de curvatura da deformada obtida por medidas de FWD são importantes indicadores das condições do pavimento e das camadas individualmente. A dissipação dos esforços de carregamento nos pavimentos depende das características de cada camada individualmente e do conjunto formado por estas. A interação entre as camadas afeta o desempenho de toda a estrutura, assim, as

medidas fornecidas por cada sensor devem ser analisadas em conjunto para maior acurácia na qualificação dos pavimentos.

Lopes (2012) apresentou duas deformadas na Figura 24, sendo que ambas têm a mesma deflexão máxima, variando-se as demais medidas da deformada, revelando diferenças na capacidade estrutural de cada pavimento representado pelas bacias.

Figura 24 - Deflexão máxima para duas bacias de deformação diferentes (Lopes, 2012 apud Horak, 1987)

A condição estrutural global pode ser indicada pela deflexão máxima, no entanto, a condição de cada camada da estrutura não é adequadamente representada pela deflexão máxima, sendo requeridas análises sobre todos os parâmetros das bacias de deflexão para este fim. A análise acerca dos parâmetros pode fornecer informações mais detalhadas das condições individuais das camadas do pavimento, tal como é necessário no nível de projeto. Mais uma vez, fica realçada a necessidade de levantamento da bacia completa e não somente da deflexão máxima, comumente obtida pela viga Benkelman. Assim, deve-se contar com o FWD que tem maior rendimento e fornece dados da bacia completa.

3.1.2 Parâmetros das bacias de deflexão

Os resultados obtidos por meio das medidas de deflexão nos pavimentos têm sido analisados sob óticas diversas, no intuito de inferir características dos pavimentos a partir das medidas. Kumlai et al (2014) afirmam que os resultados de medidas de deflexão podem ser analisados no intuito de determinar os módulos de cada camada

do pavimento, por meio da técnica relativamente simples de retroanálise baseada na teoria da elasticidade. Bryce et al (2012) por sua vez, afirmam que medidas de deflexão são importantes parâmetros para avaliações como capacidade estrutural e vida remanescente dos pavimentos enquanto FuJian et al (2010) reforçam que a deflexão é um dos mais importantes indicadores estruturais dos pavimentos. Amador e Mrawira (2008) apontam estudos mostrando boa correlação entre as medidas de deflexão, como indicador de capacidade estrutural, e a ocorrência de defeitos. Kutay et al (2011) corroboram afirmando que ensaios não destrutivos, tal como medidas de deflexão, são reconhecidamente a melhor maneira de avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos.

Apesar das indicações, a utilização das medidas ainda é alvo de extensas discussões e contradições entre pesquisadores. As divergências refletem o grande número de variáveis que afeta os pavimentos, não apenas em relação à composição estrutural ou aos erros associados aos equipamentos de medição, mas também em relação às equações utilizadas e as premissas que subsidiam cada equação proposta. Nem sempre os parâmetros refletem a capacidade estrutural.

Segundo Mamlouk e Zapata (2010), o MEPDG como um método de dimensionamento de pavimentos, concebido por um programa destinado às atividades relacionadas a projeto, utiliza modelos baseados em estudos de laboratório, no entanto, especifica a necessidade de calibrações de campo, o que requer informações detalhadas acerca das estruturas dos pavimentos e demais variáveis. Os autores explicam que muitos dados historicamente armazenados no programa LTPP, que envolve dezenas de trechos monitorados, com a finalidade de subsidiar análises em nível de rede, estão sendo utilizados para a calibração do MEPDG, resultando em conflitos e diferenças significativas, reiterando as mencionadas contradições entre pesquisadores.

Muitos autores, especialmente entre os americanos, relatam que o principal uso das medidas de deflexão é a determinação do Número Estrutural. A ampla adoção do SN entre os engenheiros rodoviários pode estar associada à sua simplicidade como indicador da condição do pavimento. De acordo com Kumlai et al (2014) o número estrutural calculado a partir das medidas de deflexão é um indicador amplamente difundido, a partir do qual procura-se estabelecer a condição do pavimento.

Kim et al (2013) afirma que o número estrutural é um bom indicador da capacidade estrutural do pavimento e cita o desenvolvimento de um indicador no estado americano do Texas, a partir do número estrutural, para análises em nível de rede; o *Structural Condition Index* – SCI, definido pela razão entre o número estrutural efetivo (SN_{eff}) e número estrutural requerido (SN_{req}). Entretanto, o autor sugere nova equação para a obtenção do número estrutural a partir das medidas de deflexão, por entender que as equações normalmente utilizadas apresentam deficiências importantes em suas premissas, o que subestima o valor final do número estrutural. As afirmações dos autores reforçam que a transformação de um dado em outro é complexa e varia significativamente de acordo com as condições de cada local.

Dentre diversas equações disponíveis, destaca-se a equação proposta pela AASHTO (1993) utilizadas, por exemplo, por Diefenderfer & Apeageyi (2010), na avaliação de pavimentos a partir das medidas de deflexão, definindo o número estrutural efetivo por meio das equações indicadas.

$$SN_{ef} = 0,0045 * D * \sqrt[3]{Ep} \quad (1)$$

Onde:

SN_{ef} : número estrutural efetivo

D: espessura total do pavimento sobre o subleito (polegadas)

Ep : módulo efetivo das camadas sobre subleito (psi) – sendo Ep calculado a partir da equação (1).

$$d_0 = 1,5 * p * \alpha * \left[\frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(D/\alpha * \sqrt[3]{Ep/M_R} \right)^2}} + \frac{1 - 1/\sqrt{1 + (D/\alpha)^2}}{Ep} \right] \quad (2)$$

Onde:

D_0 : deflexão no ponto máximo (10^{-3} mm)

p: pressão de contato (psi)

M_R : Módulo de resiliência no subleito (psi)

D: espessura total do pavimento sobre o subleito (polegadas)

a: raio da placa de aplicação de carga (polegadas)

Adicionalmente, para incorporação das características do subleito utilizam-se equações para obtenção do número estrutural corrigido – SNC, o qual representa também a contribuição do subleito na capacidade estrutural, conforme descrito na equação 3.

$$SNC = SN + 3,52 \log CBR - 0,85 (\log CBR)^2 - 1,43$$

(3)

Onde:

SNC: número estrutural corrigido

SN: número estrutural

CBR: Índice de Suporte Califórnia (%) do subleito

O conjunto de equações apresentado mostra que as medidas de deflexão são utilizadas indiretamente para a determinação do número estrutural. Para tanto é necessário obter o valor de módulo das camadas do pavimento correspondente às medidas de deflexão. Segundo Cary e Zapata (2009), a determinação dos módulos de resiliência das camadas dos pavimentos por meio da retroanálise de bacias de deflexão é uma ferramenta comumente utilizada para avaliação das propriedades dos materiais. Para retroanalisar bacias de deflexão é necessário combinar os resultados com as informações das características das camadas, como espessura e tipo de material (Schmalzer, 2008).

Os módulos retroanalizados a partir das medidas de deflexão, representam um importante foco de conflito na literatura mundial. Três aspectos merecem destaque para exemplificar os conflitos, e são descritos nos parágrafos a seguir: (i) diversidade de modelos e programas utilizados para a obtenção dos módulos, (ii) características estruturais regionais, em relação aos materiais e espessuras utilizados na construção dos pavimentos e, (iii) propósito das análises.

No que se refere à diversidade de modelos e programas para a determinação dos módulos das camadas dos pavimentos, Cary e Zapata (2009) afirmam que a metodologia utilizada e o método de retroanalisar bacias de deflexão obrigatoriamente influenciam os resultados. Contudo, os autores testaram dois programas distintos de retroanálise de bacias de deflexão e encontraram boa correlação na comparação dos resultados. Yin e Mrawira (2009) também relataram a comparação entre resultados de retroanálise de diferentes programas de computador e verificaram boa correlação, desde que mantidos os mesmos critérios de análise. É conveniente mencionar que a retroanálise tem por base a Teoria da Elasticidade, sendo que as equações constitutivas são iguais, mas as condições de contorno variam nas análises realizadas pelos autores.

A alteração nos critérios, como a aplicação em estruturas muito distintas também pode indicar diferenças significativas Kumlai et al, 2014 utilizaram as medidas de deflexão para definir equações de cálculo dos módulos de cada camada para pavimentos delgados, entretanto, indicaram limitações para o uso dos modelos desenvolvidos pelos autores.

Cary e Zapata (2009) utilizaram fontes distintas de dados de deflexão (ambas medidas com FWD) para obter módulos por retroanálise das bacias e encontraram diferenças significativas, com baixa correlação entre os resultados. As diferenças se concentram nas camadas superiores dos pavimentos, revelando que a consistência dos dados originais tem impacto significativo nos resultados.

O propósito da correlação das deflexões com as condições das camadas dos pavimentos evidencia finalmente as dificuldades mencionadas. O guia da AASHTO (1993) indica o procedimento para o cálculo da vida remanescente do pavimento por meio da bacia de deflexões. Fujian et al, 2010, no entanto, afirmam que a obtenção de módulos por retroanálise de bacias de deflexão tem várias desvantagens, sendo mais indicado o uso dos parâmetros das bacias de deflexão para estimar as condições das camadas dos pavimentos.

A retroanálise da bacia de deflexão para obtenção de módulos das camadas dos pavimentos não é apropriada para análises em nível de rede, justamente porque os

resultados dependem de análises detalhadas das características dos pavimentos, como espessura das camadas. Assim os autores recomendam o uso dos parâmetros de deflexão para indicar a capacidade de suporte dos pavimentos, sem derivações (Amador e Mrawira. 2008).

Rahman et al (2014) investigaram a deterioração das camadas asfálticas em diferentes idades por meio da alteração nos módulos de resiliência, e comparou com medidas de deflexão, que corroboraram o dano verificado nas características de módulo. Os autores indicam que avaliações não destrutivas sejam realizadas nos pavimentos para indicar quais camadas estão mais comprometidas na estrutura.

Cary e Zapata. 2009 concluem que a retroanálise não oferece adequada confiabilidade para a estimação dos módulos das camadas de revestimento e de base, especialmente. Os autores afirmam que as medidas de deflexão carregam por si, alta variabilidade associada a variáveis importantes como heterogeneidade na estrutura dos pavimentos, temperatura e condição de dano dos pavimentos.

Kutay et al (2011) estabeleceram relação entre as deflexões medidas com FWD e o módulo dinâmico das camadas dos pavimentos, contudo, em alguns cenários analisados, não foi possível obter resultados confiáveis a partir da retroanálise realizada.

Embora muitas afirmações indiquem que as avaliações das condições estruturais dos pavimentos possam ser verificadas por meio dos resultados de bacias de deflexões, é importante destacar que avaliações em nível de rede não são subsidiadas pelo mesmo nível de detalhamento de informações indicadas para o nível de projeto.

Wu et al (2009) assumem que as análises em nível de rede consideram a capacidade estrutural dos pavimentos, com classificações simples dos resultados de deflexão, e ainda, o número estrutural calculado a partir das deflexões e o módulo de resiliência do subleito. Entretanto, a obtenção dos módulos de resiliência e do número estrutural não é tão simples. Os mesmos autores afirmam que os princípios das coletas de dados para os sistemas de gerência estão diretamente relacionados ao tipo de análise proposta.

Os conflitos nas análises das deflexões se estendem ainda para as correlações diretas das medidas das bacias, apesar de encontrarem maior consenso entre seus adeptos. É conveniente a análise combinada da deflexão máxima com parâmetros de curvatura da deformada para a adequada determinação das características estruturais dos pavimentos. Donovan e Tutumluer (2009) afirmam que as análises sobre as bacias de deflexão podem ser classificadas em três tipos básicos: área, curvatura e inclinação, indicados, resumidamente, na Figura 25.

Figura 25 - Deterioração identificada a partir de medidas de deflexão (modificado a partir de Donovan e Tutumluer, 2009)

Kumlai et al (2014) confirmam este conceito ao afirmar que cada parâmetro da bacia de deflexão tem sido relacionado à uma camada ou conjunto de camadas dos pavimentos. Lopes (2012) apresenta a definição de alguns parâmetros, a partir de diversos autores, conforme segue:

Deflexão máxima – deflexão medida no ponto de aplicação de carga indica a capacidade estrutural de todo o conjunto de camadas que compõe o pavimento. Quanto maior o valor da deflexão, maior é o comprometimento estrutural do pavimento. Contudo, diversos autores mencionam que a análise isolada da deflexão máxima pode ser insuficiente para demonstrar a condição efetiva da estrutura.

Raio de curvatura – é um parâmetro extensamente difundido no meio rodoviário brasileiro, obtido a partir das medidas no ponto de aplicação da carga e no ponto distanciado 25 cm da aplicação da carga, indicando o arqueamento da deformada. Quanto menor o valor do raio de curvatura, maior tende a ser o comprometimento estrutural. É importante mencionar que as medidas de deflexão obtidas com FWD, são regularmente provenientes de uma configuração de sensores que não contempla a distância de 25 cm do ponto de aplicação de carga, conforme equação (4).

$$R = \frac{6250}{2 \cdot (D_0 - D_{25})} \quad (4)$$

Parâmetro Área – área da bacia de deflexão também expressa a capacidade estrutural total do pavimento. O parâmetro relaciona o tamanho da área formada pela curva de deflexão com a capacidade estrutural, sendo que quanto maior o valor, mais rígida tende a ser a estrutura, na qual as tensões se distribuem de modo menos danoso. A equação (5) advém de uma aproximação de retângulos para simplificação da área descrita pela deformada.

$$A = 15 \times \left[1 + 2 \times \frac{D_{30}}{D_0} + 2 \times \frac{D_{60}}{D_0} + \frac{D_{90}}{D_0} \right] \quad (5)$$

Índice da Curvatura da Superfície (*Surface Curvature Index* – SCI) – indica a resistência das camadas mais superiores do pavimento. Relaciona as medidas de deflexão no ponto de aplicação de carga e no ponto distanciado em 30 cm do carregamento, de acordo com a equação (6). Este indicador tem apresentado boas correlações com as condições do revestimento asfáltico, sendo que quanto menor o seu valor, mais rígida é a estrutura.

$$SCI = D_0 - D_{30}$$

(6)

Índice de Danos à Base (*Base Damage Index* – BDI) – o parâmetro indica a condição da base a partir da diferença entre as medidas a 30cm e a 60 cm do ponto de aplicação da carga, como mostrado na equação (7). Como as espessuras das camadas variam, diversos autores apontam que as condições de base e de sub-base podem ser descritas pelo parâmetro. Quanto maior o valor de BDI, melhor a condição das camadas relacionadas.

$$BDI = D_{30} - D_{60}$$

(7)

Índice de Curvatura da Base (*Base Curvature index* – BCI) – o parâmetro indica a condição do subleito, com valor inversamente proporcional ao CBR, de modo que quanto menor seu valor, melhor a condição do subleito, de acordo com a equação (8). O parâmetro varia pouco ao longo da vida útil de um pavimento.

$$BCI = D_{60} - D_{90}$$

(8)

Kumlai et al (2014) advertem que embora os parâmetros SCI, BDI e BCI sejam calculados para indicar as características do revestimento, base e sub-base respectivamente, variações nas espessuras destas camadas conduzem a elevada incerteza na determinação destes índices. Os autores sugerem o uso de ajustes para a interpretação dos resultados destes índices (Tabela 5). Apesar da sugestão do autor, as medidas indicadas não são facilmente aplicáveis, pois o comportamento da estrutura face aos parâmetros depende da configuração das camadas além de suas condições de integridade, de modo que a distinção entre classes de condição estrutural não respeita os valores preconizados pelo autor.

Tabela 5 - Parâmetros para interpretação de bacia de deflexões (Kumlai et al., 2014)

Tipo de base	Status da condição estrutural	Parâmetros da bacia de deflexões (μm)			
		D0	D0-D30	D30-D60	D60-D90
Base Granular	Razoável	<500	<200	<100	<50
	Ruim	500-750	200-400	100-200	50-100
	Péssimo	>750	>400	>200	>100
Base Cimentada	Razoável	<200	<100	<50	<40
	Ruim	200-400	100-300	50-100	40-80
	Péssimo	>400	>300	>100	>80
Base Betuminosa	Razoável	<400	<200	<100	<50
	Ruim	400-600	200-400	100-150	50-80
	Péssimo	>600	>400	>150	>80

Em relação à complexidade para a determinação das condições estruturais de um pavimento, há de se reconhecer que a despeito de inúmeras tentativas, a caracterização efetiva das condições dos pavimentos por meio de métodos não destrutivos ainda é um desafio para a engenharia rodoviária.

Apesar de inúmeras tentativas na engenharia rodoviária e da diversidade de parâmetros indicadores das condições estruturais dos pavimentos a partir das medidas de deflexão, não existe consenso na adoção, tanto dos parâmetros, quanto das equações que os definem. É mais conveniente, sempre que possível, a análise combinada de diversos parâmetros, de modo que a deficiência de um seja suprimida pela presença de outro. Entretanto, as análises mencionadas se restringem a dados existentes, de medidas de deflexão em pavimentos, para análise de condição estrutural, não se estendendo à previsão de desempenho a partir da evolução destes parâmetros.

3.1.3 IRI e Área Trincada

Como resultado de uma complexa interação entre estrutura, nível de solicitação e clima, são definidos os parâmetros relativos à vida útil dos pavimentos e à ocorrência

e evolução de defeitos. As características superficiais dos pavimentos têm forte influência em distintos aspectos, como a percepção de segurança, conforto ao rolamento e ainda aspectos relacionados aos custos dos usuários.

No que se refere ao conforto ao rolamento, a resposta do parâmetro de IRI reflete nitidamente a percepção dos usuários, incluindo os representantes das agências e instituições responsáveis, o que torna fácil a identificação de pontos deficientes. Os requisitos para este parâmetro também são associados à velocidade de operação das vias, conforme demonstrado na Figura 26 (Ballesteros e Vassallo, 2012).

Tráfego médio diário	IRI (International Roughness Index)							
	0 - 2 <small>(m/km)</small>	2 - 4 <small>(m/km)</small>	4 - 6 <small>(m/km)</small>	6 - 8 <small>(m/km)</small>	8 - 10 <small>(m/km)</small>	10 - 12 <small>(m/km)</small>	>12 <small>(m/km)</small>	
0 - 4999	Muito bom		Bom		Regular		Ruim	Péssimo
5000 - 9999								
10000 - 19999								
> 20000								

Figura 26 - Limites recomendados pela OECD em função do volume de tráfego (modificado a partir de Ballesteros e Vassallo, 2012)

O IRI é o parâmetro que melhor representa os aspectos mencionados, sendo rotineiramente associado aos custos dos usuários, sendo inclusive uma sugestão do Banco Mundial como mais relevante elemento para a avaliação de tais custos. A Figura 27 apresenta uma relação entre os custos de usuários e os custos de manutenção dos pavimentos para um determinado volume de tráfego, pois esta relação se altera em virtude do tráfego.

Figura 27 - Relação entre os custos de usuários e os custos de manutenção dos pavimentos.
(Modificado a partir de Ballesteros e Vassallo, 2012)

Assim, tão comum quanto se verifica, é sempre conveniente que as estruturas de pavimentos sejam analisadas com vistas ao atendimento a este parâmetro, incluindo suas variações ao longo dos ciclos de vida dos pavimentos. Ballesteros e Vassallo (2012) indicam que as agências do governo devem estabelecer critérios e parâmetros por meio dos quais seja possível verificar a qualidade dos pavimentos da via concessionada, sugerindo que os principais indicadores sejam a capacidade estrutural, a irregularidade longitudinal e a resistência à derrapagem.

No que se refere ao parâmetro de área trincada é necessário destacar que a previsão de evolução desde o processo de surgimento e agravamento das trincas depende desta complexa interação. Os modelos de desempenho para este tipo de defeito são influenciados por tantas variáveis que resulta num grande número de equações, como se observa por exemplo entre aquelas sugeridas pelo Banco Mundial.

A mensuração da ocorrência de áreas trincadas tem como objetivo primordial monitorar o envelhecimento dos pavimentos, tendo em vista a associação entre o defeito e a fadiga do revestimento asfáltico. A vida útil do revestimento e, por

consequente, da estrutura do pavimento é afetada pela área trincada e pela incidência de outros defeitos que interagem e se somam cumulativamente.

Ballesteros e Vassallo (2012) mencionam a necessidade de parâmetros ajustáveis e coerentes ao longo dos ciclos de vida dos pavimentos, de modo que os custos necessários para determinados padrões de qualidade sejam inferiores aos custos de manutenção dos usuários.

3.1.4 Modelos de desempenho em nível de projeto

A concepção dos modelos de desempenho não é o objeto deste trabalho, entretanto, é relevante destacar sua importância no sistema de gestão proposto. Assim são destacados alguns elementos dos modelos que se alinham com os propósitos deste trabalho, na definição de um nível adicional de análise nos sistemas de gerência de manutenção.

Os pavimentos têm uma característica dinâmica e de resposta variável, baseada nas solicitações aleatórias e sequenciais a que são acometidos. A previsão de desempenho dos pavimentos ao longo da vida útil apresenta uma série de dificuldades, sendo que a principal delas reside justamente na sequência de solicitações aleatórias e na relação de danos não proporcional e não linear.

A previsão de desempenho dos elementos vinculados a análises em nível de projeto revela a elevada complexidade na definição e confiabilidade dos modelos, e em especial no que se refere a variáveis obtidas por correlações. Os modelos de desempenho apropriados para este nível traduzem as expectativas de projeto, baseados nos mesmos princípios de falência e de limites para tolerância de defeitos. Assim o período abrangido pelos modelos mais adequados para análises em nível de projeto pode estar, em geral, restrito a um único ciclo de vida, mantidos padrões aceitáveis de confiabilidade. A Figura 28 ilustra a possibilidade de variações no desempenho após o primeiro ciclo de vida.

Figura 28 - Período recomendável para a manutenção dos pavimentos (Bernucci et al, 2007)

Exemplo da complexidade na definição de modelos de desempenho é o grande número de equações distintas para previsão de evolução de trincamento, propostos e adotados no sistema HDM (2014). As equações estão relacionadas a aspectos como, espessura das camadas existentes, épocas de restaurações, características dos materiais das camadas, dentre outros.

No que se concerne às variáveis obtidas por correlação, a complexidade dos modelos tende a ser ainda maior. Tendo em vista as aproximações necessárias e premissas adotadas para estabelecer correlações entre medidas efetuadas, comportamentos esperados e desempenhos verificados, a projeção de correlações inclui erros de diversas fontes, o que revela que este tipo de projeção é particularmente crítico.

Uma vez que a determinação das condições estruturais detalhadas atuais de um pavimento é complexa, a previsão de desempenho é uma potência destas dificuldades. Prever o desempenho individual de uma base, por exemplo, implica na propagação dos erros inerentes à definição prévia da condição desta base.

Como resultado, os modelos aplicados para análises em nível de projeto consideram variáveis comuns aos métodos de dimensionamento, tanto para construção como para restauração, de pavimentos. Muito embora, destaca-se que os modelos de desempenho para nível de projeto sejam diferentes da simples aplicação de um

método de dimensionamento de restauração pois cada qual funciona em ordem inversa em relação ao outro no que se refere à definição de soluções; o método de dimensionamento define a solução necessária em termos equivalentes de uma solução de referência, enquanto a solução e consequentemente a adoção de um modelo de desempenho está vinculada a uma gama limitada de possibilidades efetivas.

Paralelamente ao desenvolvimento de modelos de desempenho, é crucial a determinação do valor de deflexão que deve resultar da utilização de uma determinada intervenção. O conceito é necessário pois, com a proposição de uma determinada intervenção, além da previsão de desempenho para a definida intervenção, deve-se definir qual o benefício associado, nos termos da variável adotada.

O valor de reinício será mais adequadamente representativo quando obtido a partir dos dados selecionados para subsidiar o desenvolvimento dos modelos de previsão de desempenho. A relação para a determinação do efeito de determinada intervenção depende do primeiro dado medido após a execução da intervenção e do último dado medido previamente à execução.

Os intervalos entre as medidas (antes e depois) e a data da execução podem ser considerados a partir dos modelos de desempenho desenvolvidos (modelo para a intervenção executada – aplicável no período entre a execução e a medida da variável posterior e, modelo de deterioração para atividades pontuais de rotina, por exemplo – aplicável entre a medida da variável prévia à execução da intervenção), conforme representado na Figura 29, adotada a deflexão como variável de exemplo.

Figura 29 - Representação gráfica dos dados utilizados para a definição do incremento obtido por uma intervenção corretiva

O valor de reinício obtido é válido para a condição estrutural verificada, o que significa que, diferentemente do desenvolvimento dos modelos, os valores das medidas de deflexão impactam na aplicação do valor de reinício obtido. O valor de deflexão de reinício de 20 (0,01mm) obtido para um subsegmento não pode ser aplicado para um segmento cuja deflexão esteja na ordem de 50 (0,01mm), por exemplo.

Além disso, a comparação entre os dados deve ser realizada com vista à uma nova segmentação, pois a influência de alguns critérios passa a ser desprezível para os valores de reinício, destacando-se aqueles associados ao dano futuro, como o tráfego.

3.1.5 Elemento de conexão com o próximo nível – rede

A partir das definições para as análises em nível de projeto é possível obter informações detalhadas acerca das condições dos pavimentos, projetando e distribuindo com mais segurança as atividades corretivas e preventivas durante o primeiro ciclo de vida dentro do período contemplado na análise. O primeiro ano é

especialmente importante na análise, pois define com elevada precisão, o conjunto de atividades necessárias.

A partir das análises em nível de projeto podem ser definidas as variáveis que seguem sendo projetadas em nível de rede. A essência da seleção de variáveis que prosseguem integrando a análise em nível de rede é a identificação de um aspecto chave: a variável pode ser medida diretamente ou está associada a correlações?

Para as análises em nível de rede é mais conveniente adotar variáveis de análise que possam ser comparadas de modo simples com medidas diretas indicadoras das condições dos pavimentos. Com frequência, os parâmetros de desempenho apontados em contratos são resultados de medidas diretas com estas características. Naturalmente, as variáveis que avançam para o nível de rede são utilizadas primeiro no nível de projeto. Desta forma, o nível de rede compartilha, necessariamente, algumas variáveis analisadas no nível de projeto.

3.2 Nível de rede

O objetivo da análise em nível de rede dentro do sistema de gerência em nível de rede macro é propiciar avaliações de longo prazo dentro de confiabilidades aceitáveis, fundamentando o processo de tomada de decisão de estratégias de atuação.

O nível de rede nos sistemas de gerência apresenta características bastante particulares. Avaliações neste nível não requerem extensos detalhamentos acerca das condições dos pavimentos, assim, os modelos de previsão utilizados refletem este conceito, não sendo necessário fornecer detalhamento de condições futuras dos pavimentos, mas sim uma estimativa de condição global.

Espera-se em nível de rede que os resultados possam municiar os gestores com informações globais da deterioração da estrutura, sem a necessidade de indicar por exemplo, quais camadas dos pavimentos podem estar comprometidas e com qual intensidade de danos. A intensidade de danos sob uma ótica global é mais relevante, assim, a indicação da severidade pode ser simplificada associada a indicadores simples.

Conforme mencionado anteriormente, no nível de rede é mais apropriado utilizar variáveis que possam ser medidas diretamente, evitando correlações. Evidente que tal premissa implica na desconsideração de informações de importante impacto acerca das características dos pavimentos, contudo, permite uma rápida determinação da condição global da estrutura.

Outra vantagem da adoção de variáveis de medida direta que estejam vinculadas ao cumprimento contratual é a possibilidade de se utilizar os limites de contrato como referência para a análise da rede. Desta forma, é possível verificar e comparar as condições projetadas para os pavimentos com os limites dos parâmetros de desempenho.

A primeira decorrência é a comprovação do atendimento aos parâmetros de desempenho contratuais em nível de rede. Para efeito de comparação, a verificação do desempenho baseada em dados detalhados provenientes da análise em nível de projeto pode resultar em grande variabilidade em inúmeros segmentos homogêneos curtos, sem permitir a definição efetiva das condições gerais da via.

Cabe observar que a verificação de qualquer parâmetro de desempenho em nível de rede significa a delimitar em segmentos homogêneos, cujo resultados possa traduzir seu desempenho; valores pontuais ou individuais discrepantes não traduzem o desempenho de um segmento homogêneo e devem ser tratados pontualmente, de forma específica. O processo de segmentação homogênea deve respeitar critérios de repetibilidade e coerência técnica, de modo a assegurar que as medidas sejam representativas como indicadores eficientes das condições dos pavimentos similares.

A segunda e talvez mais importante decorrência da utilização de variáveis de simples mensuração é a possibilidade de estimar os impactos das estratégias adotadas no cumprimento ou não dos parâmetros. Estimar os percentuais de descumprimentos contratuais permite conhecer as possibilidades de eventuais penalizações, assim como permite definir segmentos prioritários para atuação sob diferentes critérios, como por exemplo, considerando os impactos nos custos dos usuários.

Estimar percentuais de atendimento a definidos limites para os parâmetros de desempenho é necessário para qualquer sistema de gerência de pavimentos, uma vez que este resultado é fundamental para a comparação de diferentes cenários, que por sua vez subsidiam a seleção de estratégias de atuação. Neste trabalho, estes resultados orientam sobretudo, a estimação dos valores relativos às penalizações.

A identificação de segmentos prioritários é realizada a partir da análise em nível de rede, conjugada com fatores como, por exemplo, aspectos relativos ao tráfego, como nível de serviço, volume de tráfego, classificação da frota, relevância regional, dentre outros. Definir segmentos prioritários depende das estratégias adotadas em nível de rede.

A política de manutenção de rodovias mais comumente aplicada está baseada no conceito *worst-first* (o pior, primeiro) que remonta à cultura de correção, ignorando os benefícios da política de atuação preventiva que contempla aspectos de longo prazo (Pothole, 2015)

A atuação preventiva é definida pelo NCPP (2015), como um conjunto de práticas de adequada relação benefício / custo que estendem os ciclos de vida útil dos pavimentos, incrementando a segurança e o conforto dos usuários enquanto poupa recursos.

A programação de atividades preventivas deve ser individualizada para cada rodovia e considerar os custos destinados, os dados necessários para previsão e monitoração das vias, e principalmente, como e quando as atividades devem ser executadas para prolongar a vida útil dos pavimentos de modo eficiente.

As ações de natureza preventiva são executadas no tempo exato, sem atrasos que conduzam a comprometimento estrutural, e sem antecipação que conduza a desperdício de tempo, dinheiro e recursos. Estes conceitos expõem as dificuldades no planejamento de investimentos, o que requer maior precisão dos dados e especialmente, dos modelos de desempenho adotados.

Conjugar as condições e requerimentos técnicos a informações de tráfego direcionam de modo mais eficiente as alternativas, não somente mas especialmente em cenários de restrição orçamentária. Isso porque nesse tipo de cenário, é fundamental eleger quais segmentos são prioritários; um dos critérios pode ser aquele que têm mais impacto em mais usuários e por conseguinte, impactos nos custos operacionais.

Em relação às restrições orçamentárias, os impactos que alteram planos de investimento em nível de rede devem ser verificados para todo o período, contudo compensações são mais eficientes quando a distribuição é realizada no período de médio prazo, devido a maior confiabilidade associada ao nível de projeto incluído neste formato de análise.

Apesar de critérios técnicos distintos ao longo do período analisado, que inclui os elementos dos níveis de projeto e de rede, as análises contemplam todo o período, considerando o valor total dos ciclos de intervenções, para toda a extensão de vias, independente da priorização sobre a segmentação homogênea.

A segmentação homogênea da rede pode variar do nível de projeto para o nível de rede, sendo inclusive recomendável, quando em nível de projeto a segmentação se revelar demasiadamente detalhada. Em verdade, a segmentação homogênea pode variar já a partir do primeiro ano de simulação, embora a variação de segmentação acompanha algumas premissas.

Primeiramente porque a aplicação dos modelos de desempenho está associada às condições verificadas ou projetadas e às intervenções executadas. Um dado segmento que recebe uma intervenção terá seu desempenho projetado por um modelo específico a este tipo de intervenção e naturalmente, este modelo permanece válido por um período estimado previamente. Conjugar segmentos que receberam intervenções distintas, significa que um único modelo de desempenho será aplicado a partir deste ponto da re-segmentação, o que pode conduzir a discrepâncias na projeção, mesmo que os segmentos restaurados apresentem após as intervenções, condições similares nos termos dos parâmetros de desempenho adotados.

Um segmento que sofreu uma reconstrução pode ter os mesmos valores como indicadores de desempenho que um segmento em excelentes condições, relativamente estável e que vem recebendo somente intervenções superficiais. Entretanto, os modelos de desempenho podem ser diferentes para cada caso, implicando em projeções distintas.

A implicação mais evidente é que o tipo de intervenção proposta deve ser critério adicional para a nova segmentação. Quando os modelos de desempenho são similares para estruturas com os mesmos valores de indicadores de desempenho, é possível simplificar os processos, desconsiderando o tipo de intervenção como critério de re-segmentação.

Uma vez mais, o objetivo da segmentação homogênea é tratar similares como similares e desiguais como desiguais, independente dos critérios que os tornam semelhantes ou desiguais.

Em nível de rede é oportuno trabalhar com segmentações homogêneas mais amplas, reduzindo o número de segmentos. Apesar disso, é necessário manter critérios claros para a segmentação, prezando pela confiabilidade agregada às projeções. Também é mandatório definir os critérios que tenham impacto observável no desempenho funcional e estrutural dos pavimentos.

Na prática, o número de segmentos homogêneos tende a diminuir, quando são executadas atividades sistemáticas de manutenção e observados os resultados de indicadores de desempenho como irregularidade longitudinal e deflexão. Mesmo que o desempenho de médio e longo prazo apresente distinções, as discrepâncias tendem a ser cada vez mais pontuais. Após os primeiros anos, é natural que outros critérios passem a ser relevantes como tráfego, clima e elementos construtivos, na segmentação homogênea de uma via.

3.2.1 Variáveis de desempenho

As estruturas projetadas dos pavimentos variam consideravelmente em relação às espessuras e materiais das camadas constituintes. Ao longo da vida de serviço dos

pavimentos, um número ainda maior de variáveis impacta no desempenho das estruturas, dentre os quais destacamos o tráfego e as condições climáticas, e o regime de intervenções de manutenção a que são submetidas.

O desempenho dos pavimentos depende da configuração de solicitações, e principalmente da forma como cada estrutura reage às solicitações, sendo que esta resposta está intimamente relacionada ao tipo de estrutura construída.

As estruturas de pavimentos são geralmente projetadas tendo como referência, padrões clássicos de disposição das camadas, propondo-se variações nas espessuras e algumas características dos materiais constituintes, indo ao encontro à mecânica dos pavimentos consagrada. Como resultado, o padrão de deterioração depende do tipo de estrutura, pois em cada tipo de estrutura as camadas são exigidas de modos distintos, ainda que o conjunto de solicitações seja o mesmo.

Apesar da evolução diferenciada de danos em estruturas de concepção distintas, este trabalho propõe algumas simplificações que vão ao encontro das premissas da análise em nível de rede, que objetiva estimar o desempenho dos pavimentos em termos globais, sem apontar detalhes no que se refere à constituição das camadas individualmente. Assim, em nível de rede, as variáveis adotadas advêm de medidas diretas sobre as condições dos pavimentos, abstendo-se de correlações.

Neste trabalho é proposta a adoção de medidas de deflexão estrutural e medidas de irregularidade longitudinal da superfície. Ambos os parâmetros se destacam como indicadores de desempenho de pavimentos em inúmeros estudos conduzidos em diversos países. A principal vantagem verificada para a utilização em análises em nível de rede reside no fato que são medidas diretas, independente de correlações ou de interpretações. São também medidas de trato comum no ambiente da engenharia de pavimentos, relacionados frequentemente com a qualidade da via.

Além destas, outras variáveis de desempenho podem ser adotadas seguindo estes mesmos requisitos. As medidas de área trincada por exemplo, podem ser realizadas sistematicamente por meio de equipamentos mais modernos, capazes de identificar

abertura e profundidade das trincas. O mesmo ocorre com medidas de deformações permanentes, textura, entre outros.

A eleição das medidas de deflexão e de irregularidade longitudinal, no entanto, se baseou na busca por indicadores de natureza estrutural e de natureza funcional, respectivamente, com maior relevância no desempenho dos pavimentos com uma associação simples a estas variáveis.

Os gestores de rodovias têm elevada preocupação com a manutenção da capacidade estrutural de um pavimento, pois a redução desta capacidade implica em elevados custos de recuperação. Por outro lado, o conforto ao rolamento é reflexo incontestável da qualidade percebida pelos usuários de uma via, impactando diretamente nos custos operacionais dos veículos, o que naturalmente demanda investimentos em intervenções. As variáveis adotadas permitem eleger com segurança, estratégias de intervenções que afetam todo o período de análise.

As estratégias definidas com base nas projeções de deflexão e de irregularidade longitudinal tem amplo alcance, ou seja, no momento efetivo de execução das intervenções programadas, a variação entre a solução detalhadamente indicada e a intervenção proposta previamente pelo sistema não afeta, em linhas gerais, a programação de investimentos.

No que tange aos tipos de intervenções executadas, que podem ser reproduzidas nas atividades de manutenção futuras, é necessário definir categorias para a segmentação da rodovia associáveis às executadas.

Simplificadamente pode-se dividir as atividades de manutenção corretiva em duas categorias: correção funcional e correção estrutural. Tendo em vista que as intervenções para correção funcional têm, em geral, efeitos limitados nas condições estruturais, esta categoria pode restringir todas as intervenções desta natureza a um único representante.

Às atividades de correção estrutural, porém, é conveniente a divisão da categoria em grupos ou tipos notáveis. Os parâmetros adotados para a classificação podem variar

de acordo com as características de cada rodovia ou rede, assim como para os demais critérios mencionados (tráfego e estrutura). O objetivo primordial da classificação permanece o mesmo: agrupar características semelhantes que afetam o desempenho dos pavimentos em níveis significativos para a variável em análise.

As variáveis de desempenho adotadas carregam ainda erros inerentes ao processo de obtenção das medidas, que devem estar considerados no nível de confiabilidade dos modelos de desempenho desenvolvidos. Conforme mencionado anteriormente, erros nas medições podem se alastrar por todas as etapas dos sistemas de gerência. Assim, para contrapor ocorrências deste tipo, frequência de medição e qualidade dos dados devem ser ajustados.

Cabe mencionar que seleção de variáveis de desempenho para o nível de rede, implica na exclusão de variáveis de desempenho do nível de projeto, o que naturalmente reduz da qualidade da análise, tendo especial relevância na transição entre os dois níveis de análise. Isto porque os segmentos que não recebem as intervenções devidas quando avaliados por meio de um conjunto mais detalhado de variáveis de desempenho em nível de projeto, pode ser subavaliados quando avaliado em nível de rede por menos variáveis de desempenho (Figura 30).

Figura 30 - Representação esquemática de soluções aplicadas a conjuntos de variáveis de nível de projeto e de nível de rede

3.2.2 Modelos de desempenho em nível de rede

Conforme mencionado anteriormente, não é objetivo deste trabalho explorar a concepção de modelos de desempenho a serem utilizados no sistema de gerência de pavimentos, no entanto, é conveniente destacar algumas observações.

A previsão de desempenho em nível de rede está associada às variáveis adotadas neste nível. No intuito de evitar conflitos, a mesma estrutura matemática deve ser adotada, tanto em nível de rede, quanto em nível de projeto. Neste trabalho, são utilizadas equações exponenciais desenvolvidas especificamente com base nos dados utilizados.

Para o nível de rede, os modelos foram desenvolvidos para variáveis consideradas como medidas direta, gerados a partir das deflexões, os quais apresentam uma vantagem adicional, baseada justamente no fato de que não advém de correlações, ou seja, é uma medida direta, cuja extrapolação permanece verificável a partir de uma medida direta. Portanto, não depende de qualquer interpretação, tampouco requer que sejam preservadas premissas de análise em qualquer equação de obtenção de novo parâmetro.

Apesar disso, algumas condições para a validade precisam ser consideradas. É necessário agrupar cada variável em trechos similares, para que o modelo desenvolvido seja representativo e carregue maior precisão. Para ilustrar a importância do agrupamento de informações, a Figura 31 apresenta um modelo baseado nas deflexões significativamente heterogêneas de uma rodovia de 400 quilômetros de extensão, e a respectiva variabilidade representada por modelos não específicos (Figura 32).

Figura 31 - Medidas de deflexão máxima obtidas ao longo de uma rodovia com características heterogêneas inerentes à elevada extensão

Figura 32 - Modelos de desempenho desenvolvidos a partir dos valores médios das deflexões heterogêneas (não segmentadas) de uma rodovia

A projeção em nível de rede tende a compreender um período mais longo do que as projeções em nível de projeto. Por esta razão, cuidados adicionais são desejáveis na geração dos modelos, elegendo critérios relevantes e coerentes com os dados analisados e com o nível de análise.

A quantidade de critérios selecionados impacta no número de modelos a serem gerados. Cada variação vai requerer modelos específicos que representem o comportamento da deflexão face à condição. Evidente que quanto mais segmentada for a rodovia, maior será a precisão do modelo. Contudo, quanto maior o número de critérios para segmentação, maiores serão as dificuldades para geração, validação e utilização dos modelos, contrariando os objetivos das análises em nível de rede (Figura 33).

Figura 33 - Número de modelos associados a cada nível de classificação de cada critério de segmentação

Para cada critério, são identificadas classes ou tipos que afetam o desempenho dos pavimentos. Embora seja normal estar inclinado para o aumento da precisão é importante reconhecer que quanto maior o número de classes ou tipos dentro de cada critério, maior será a precisão dos modelos, mas maior será a complexidade do desenvolvimento e utilização dos mesmos, implicando em profusão de grupos de modelos.

Um número muito elevado de modelos, por sua vez não é recomendável, já que é importante testar a validade das equações, o que pode se revelar um trabalho pífido. Análises de sensibilidade podem ajudar a reduzir o número de modelos, apontando a amplitude de cada modelo, indicando resultados de projeção similares que permitam

o agrupamento de modelos. Ao definir desempenhos similares, o principal indicador pode ser o nível de variação nos valores da variável em questão, considerando a porcentagem de erro inerente às medidas desta mesma variável.

As equações formuladas são necessariamente acompanhadas de um período durante o qual as condições dos pavimentos cumprem as projeções, incluídas suas faixas de tolerância. Estabelecer o período de validade dos modelos assegura a confiabilidade do mesmo. Após o período em que as projeções se enquadram com confiabilidade ao modelo, o pavimento pode exibir comportamento errático, ou significativamente distinto das projeções iniciais, conforme sugerido na Figura 34.

Figura 34 - Período de confiabilidade dos modelos

Assim, em adição aos modelos desenvolvidos para cada conjunto de condições é oportuno incluir um modelo com número reduzido de critérios, que inclua desempenhos diversos, sem estar associado a um determinado tipo de intervenção ou outros critérios. O modelo pode não ser totalmente desprovido de critérios, no entanto, estes deverão ser reduzidos ao mínimo tecnicamente possível, por exemplo, diferenciados somente entre tipos distintos de estruturas construtivas.

Tais modelos são empregados imediatamente após o fim do período de confiabilidade de cada modelo apropriado. Evidente que este tipo de modelo, com características

mais genéricas carregam uma confiabilidade expressivamente mais baixa, no entanto, são de extrema valia aos sistemas de gerência de pavimentos, em qualquer nível de análise.

Desenvolver modelos de desempenho para a deterioração do pavimento, não associada à qualquer intervenção, são necessários para suprir situações como dificuldade na obtenção de dados históricos, longo período desde a última intervenção executada, ou ainda pela ausência total de atividades de manutenção.

No caso da identificação da ausência de intervenções corretivas ou preventivas, a deterioração ocorre de modo mais evidente, traduzido pelo modelo de desempenho. Atividades de rotina realizadas nos pavimentos em caráter pontual, embora afetem o desempenho total, não são em princípio, classificáveis como intervenções sistemáticas. A Figura 35 mostra a comparação do desempenho esperado de um pavimento sujeito a intervenções sistemáticas, a intervenções pontuais de correção e a ausência total de intervenções.

Figura 35 - Padrão de deterioração para pavimentos sujeitos a diferentes processos de manutenção

3.2.3 Análise de cenários em nível de rede

Aos sistemas de gerência de pavimentos cabe avaliar distintos cenários que contemplem as diversas variáveis de interesse e indicar resultados comparativos entre estratégias de investimentos. Os cenários construídos nos sistemas de gerência estão baseados em premissas previamente definidas, cujas consequências são expressas nos resultados das análises.

A construção dos cenários se inicia com a definição de situações possíveis. O primeiro e óbvio cenário é a condição de recursos integralmente disponíveis, podendo ser aplicados sempre que requerido. Neste cenário, o sistema de gerência de pavimentos indica o momento adequado para cada intervenção, evitando tanto o investimento excessivo não justificado por demasiadas intervenções, quanto o investimento tardio, que possa comprometer as funções estruturais ou funcionais dos pavimentos, requerendo investimentos mais robustos, ainda que mais espaçados. Este cenário se caracteriza pelo valor que seria necessário para manter os pavimentos com todos os indicadores necessários, podendo se dispor dos recursos sempre que fossem necessários.

Em oposição, a situação de restrição orçamentária motiva a construção de diversos cenários, os quais consideram por exemplo, tipos diferentes de intervenções para condições idênticas ou a negligência de determinados segmentos por períodos definidos. Tais cenários guardam maior complexidade, e a seleção estratégica dos resultados das análises dependem mais dos tomadores de decisão, pois envolvem a aceitação de mais riscos.

Neste trabalho são sugeridos alguns subsídios para a construção de cenários, considerando o objetivo principal de conduzir a uma análise em nível de rede macro. Para tanto, é necessário considerar que cada cenário deve fornecer informações para o próximo estágio de análise.

Em cenários de restrição orçamentária a estratégia mais utilizada no passado é concentrar os investimentos nos segmentos com pior desempenho. Esta tática, embora amplamente difundida e ainda em utilização por muitos que julgam conhecer

os efeitos desta política, tem consequências devastadoras, especialmente quando adotados por longos períodos.

Tratar somente trechos em condições críticas enquanto trechos em condições intermediárias são preteridos implica no aumento substancial de investimentos requeridos. As intervenções para condições críticas têm natureza robusta com custos mais elevados enquanto as intervenções executadas em segmentos em condições intermediárias têm custos menores e são menos profundas. Assim, a postergação da atuação em segmentos em condições intermediárias até que estes apresentem condições críticas resultam em incrementos substanciais de custos.

A postergação do investimento em segmentos em outras condições permite o agravamento dos defeitos destes, até que sejam demandadas intervenções mais profundas do que a requeridas em cada nível de condição.

Se não é aconselhável tratar somente os trechos críticos, estes tampouco podem ser negligenciados em absoluto, pois afetam a capacidade de cumprimento dos indicadores de desempenho, podendo desencadear outras consequências. Evidente que quanto mais crítica for a condição de um pavimento, menor será o efeito da postergação em termos técnicos; um segmento que requer reconstrução continuará requerendo reconstrução, independente do período de postergação. Os problemas decorrentes de tais adiamentos estão relacionados à qualidade e segurança no conforto ao rolamento, à elevação de custos operacionais, além de medidas de penalização, quando for o caso.

A definição dos cenários está diretamente associada aos gatilhos para intervenções, o que inclui as categorias de desempenho dos pavimentos em relação a cada variável e ao conjunto das variáveis selecionadas.

As condições dos pavimentos traduzidas pelas variáveis de análise implicam na associação da qualidade aos resultados. Em termos de irregularidade longitudinal, como exemplo inicial, um único valor pode ser definido para indicar a condição do pavimento; todos os segmentos homogêneos com resultados estatísticos abaixo do valor definido significam que o pavimento tem uma determinada qualidade.

No entanto, a definição de um único valor para a classificação dos pavimentos não é adequadamente orientativa para análises em sistema de gerência de pavimentos. Um único limite é comumente definido em contratos para aceitação ou rejeição dos pavimentos. Deste modo, para estabelecer estratégias de atuação mais eficientes, é importante conhecer toda a gama de condições dos pavimentos avaliados. Este amplo espectro permite a proposição de diferentes técnicas de intervenção, apropriadas a cada condição.

A demarcação de classes de desempenho é função dos especialistas envolvidos, os quais devem reconhecer o alcance de cada classe, assegurando também que o número de classes não seja excessivo, separando em classes distintas algumas condições que sejam exemplares similares.

Um dos indicadores do número excessivo de classes pode ser a associação às atividades de intervenções. Quando duas classes inicialmente distintas são candidatas ao mesmo tipo de intervenção, significa que estas podem ser agrupadas em uma única classe, simplificando o processo.

Categorias clássicas de comportamento entre *excelente*, *bom*, *regular*, *ruim* e *péssimo* são pontos de partida coerentes, sobretudo porque é bastante limitada a disponibilidade de tipos de atividades para intervenções. O exercício para limitar o número de classes deve ser realizado somente nesta etapa, sobre cada variável individualmente.

A definição de classes de desempenho, embora individualizada inicialmente para cada variável, exige uma conjugação entre todas as variáveis selecionadas. O resultado desta combinação é um grande número de classes, as quais seguramente vão incluir a repetição de algumas soluções para intervenção. Tal combinação assegura que todas as condições de pavimentos são contempladas. O número de classes resultante é função exponencial do número de classes e número de variáveis. A Tabela 6 exemplifica a composição de matrizes com o número de conjunto de classes em função das variáveis combinadas.

Tabela 6 - Composição de matrizes com o número de conjunto de classes

Variáveis de desempenho			Condição
Deflexão máxima (Df1) - [10 ⁻² mm]	min	max	
	0,0	30,0	Excelente
	30,0	45,0	Bom
	45,0	60,0	Regular
	60,0	75,0	Ruim
	75,0	100,0	Péssimo
Deflexão de base (Df1-Df4) - [10 ⁻² mm]	0,0	15,0	Bom
	15,0	25,0	Regular
	25,0	40,0	Ruim
Deflexão de subleito (Df7) - [10 ⁻² mm]	0,0	4,0	Bom
	4,0	7,0	Regular
	7,0	10,0	Ruim
Irregularidade longitudinal - IRI - [m/km]	0,5	1,4	Excelente
	1,4	1,9	Bom
	1,9	2,4	Regular
	2,4	2,7	Ruim
	2,7	3,5	Péssimo

+

Tráfego	
min	max
≥1E+6	<5E+6
≥5E+6	<1E+7
≥1E+7	<5E+7
≥5E+7	<1E+8
≥1E+8	<2E+8

=

1.125 classes

Variáveis de desempenho			Condição
Deflexão máxima (Df1) - [10 ⁻² mm]	min	max	
	0,0	30,0	Excelente
	30,0	45,0	Bom
	45,0	60,0	Regular
	60,0	75,0	Ruim
	75,0	100,0	Péssimo
Irregularidade longitudinal - IRI - [m/km]	0,5	1,4	Excelente
	1,4	1,9	Bom
	1,9	2,4	Regular
	2,4	2,7	Ruim
	2,7	3,5	Péssimo

+

Tráfego	
min	max
≥1E+6	<5E+6
≥5E+6	<1E+7
≥1E+7	<5E+7
≥5E+7	<1E+8
≥1E+8	<2E+8

=

125 classes

Ao conjunto de classes de condições dos pavimentos são propostas soluções para intervenção nos pavimentos, objetivando uma determinada qualidade após as devidas execuções (Tabela 7). Tendo em perspectiva as diferentes políticas que podem ser avaliadas no sistema de gerência de pavimentos, naturalmente deverão ser concebidas diferentes matrizes.

Tabela 7 - Combinação entre as condições dos pavimentos para proposta de soluções

Variáveis de desempenho		Tráfego	
	min max	min max	
Deflexão máxima (Df1) - [10 ⁻² mm]	0,0 30,0	<1E+6 <5E+6	
	30,0 45,0	≥5E+6 <1E+7	
	45,0 60,0	≥1E+7 <5E+7	
	60,0 75,0	≥5E+7 <1E+8	
	75,0 100,0	≥1E+8 <2E+8	
		+	
Irregularidade longitudinal - IRI - [m/km]	0,5 1,4		
	1,4 1,9		
	1,9 2,4		
	2,4 2,7		
	2,7 3,5		

Tráfego	Deflexão máxima (Df1) [10 ⁻² mm]	Irregularidade longitudinal IRI - [m/km]	Solução - Atividade
min max	min max	min max	
≥1E+6 <5E+6	30,0 45,0	0,5 1,4	→ Conservação rotineira
≥1E+6 <5E+6	30,0 45,0	1,4 1,9	→ Microfresagem + Microrrevestimento
≥1E+6 <5E+6	30,0 45,0	1,9 2,4	→ Reforço em CBUQ - 3,0 cm
≥1E+6 <5E+6	30,0 45,0	2,4 2,7	→ Fresagem e recomposição em CBUQ - 5 cm
≥1E+6 <5E+6	30,0 45,0	2,7 3,5	→ Fresagem e recomposição em CBUQ - 10 cm

As políticas devem se refletir nas soluções propostas, por meio dos impactos nos resultados das condições dos pavimentos. Uma solução paliativa significa que os efeitos restauradores de uma determinada intervenção propiciam ao segmento uma condição aceitável durante um curto período de tempo, após o qual, o segmento deve receber nova intervenção. As intervenções de caráter paliativo geralmente são aplicadas por restrições orçamentárias, uma vez que podem ser mais econômicas que as intervenções com maior durabilidade. Uma solução definitiva, por sua vez, embora mais durável, implica em custos mais elevados.

Outra abordagem no estabelecimento de políticas de atuação é o cumprimento de parâmetros de desempenho estabelecidos em contratos. A qualidade mínima definida contratualmente pode ser uma meta estipulada dentro do sistema. Naturalmente, para cada política estabelecida, o sistema fornece as devidas implicações e resultados (Tabela 8).

as condições das vias. Também é comum a inclusão de parâmetros diferenciados no período final do contrato, estabelecendo uma condição particular para o retorno das vias à administração pública. Mesmo em rodovias não concessionadas, é conveniente adotar parâmetros distintos para o período final da análise no sistema de gerência, de modo a garantir que a deterioração do pavimento esteja sempre controlada (Tabela 9).

Tabela 9 - Variação nas características de contrato em função de distintas políticas contratuais de atuação

Período de análise	Condições de contrato		Política de atuação
2015 a 2040	1º ao 5º ano	Fase de recuperação	Restauração integral para assegurar um ciclo de vida de 10 anos - atividades distribuídas anualmente com priorização de segmentos com condições regulares a ruins.
	5º ao 20º ano	Fase de manutenção	Restauração para atendimento aos parâmetros de desempenho de contrato - atividades distribuídas anualmente com priorização de segmentos com condições regulares a ruins.
	20º ao 25º ano	Fase de melhoramentos	Inventimentos para incremento nas condições - alteração dos limites dos parâmetros de desempenho - atividades distribuídas anualmente com priorização em função da durabilidade projetada.

Assim, considerando o conjunto de políticas, o conjunto de classes de condições dos pavimentos e o conjunto de parâmetros de desempenho almejados, é possível construir cenários direcionados com resultados mais completos de análises.

A construção efetiva dos cenários, baseada nos gatilhos e políticas de intervenções, consiste na definição de prioridades entre os segmentos classificados conforme suas condições. São apresentados na Tabela 10, exemplos de diferenciação no processo de priorização.

Tabela 10 - Construção de cenários com base em políticas de atuação, condições do pavimento e gatilhos de intervenção

	Política de atuação		Condição do pavimento		Gatilho de intervenção
	1. Restauração integral 2. Recuperação paliativa 3. Sem atuação	X	a. Bom/ Excelente b. Regular c. Ruim/ Péssimo	X	i. Limites admissíveis ii. Limites contratuais iii. Limites preventivos
Cenário 1	1. Restauração integral	→	Regular Ruim/ Péssimo	→	(i) Limites admissíveis
Cenário 2	1. Restauração integral	→	Regular Ruim/ Péssimo	→	(ii) Limites contratuais
Cenário 3	1. Restauração integral	→	Regular Ruim/ Péssimo	→	(iii) Limites preventivos
Cenário 4	2. Recuperação paliativa	→	Regular Ruim/ Péssimo	→	(ii) Limites contratuais
Cenário 5	1. Restauração integral 3. Sem atuação	→ →	Regular Ruim/ Péssimo	→	(iii) Limites preventivos
Cenário 6	3. Sem atuação 2. Recuperação paliativa	→ →	Regular Ruim/ Péssimo	→	(i) Limites admissíveis
Cenário 7	1. Restauração integral 2. Recuperação paliativa	→ →	Regular Ruim/ Péssimo	→ →	(iii) Limites preventivos (ii) Limites contratuais

A definição do enquadramento de cada classe de condição é uma medida auxiliar muito útil, pois permite testar a sensibilidade do sistema à tolerância às deficiências e os respectivos impactos de cada política. Funcionam com gatilhos de intervenção secundários, que podem ser manipulados para atender / ampliar o alcance dos cenários, sem que seja necessário alterar o cenário (Tabela 11).

Tabela 11 - Associação da condição do pavimento aos parâmetros de desempenho

Condição do pavimento	Limite de referência	
	IRI	Df
a. Bom/ Excelente	$\leq 1,9$ [m/km]	≤ 30 [10^{-2} mm]
b. Regular	$\leq 2,3$ [m/km]	≤ 45 [10^{-2} mm]
c. Ruim/ Péssimo	$\geq 2,7$ [m/km]	≥ 45 [10^{-2} mm]

Os cenários são completos para cada ano da análise, com base nas condições das condições medidas e posteriormente com base nas condições resultantes do ano anterior. Embora exista um conjunto de resultados para cada cenário e para cada ano, a conjugação dos anos é que gera uma sequência de possibilidades que precisa ser avaliada por meio de critérios específicos.

As análises em nível de rede, assim, como as análises em nível de projeto podem se utilizar dos mesmos cenários. Porém, o primeiro ano de análise pode se valer de cenários com maior nível de detalhamento, ainda que a forma de apresentar os resultados seja sempre a mesma.

Os resultados de cada cenário precisam estar expressos em dois formatos, (i) como resultado de cada variável adotada na análise e (ii) como resultados que compõem a etapa de decisão.

Os resultados na forma da variável são os elementos de conexão entre os anos de análise. O próximo ano depende sempre da definição de um conjunto de dados que indique as projeções das condições dos pavimentos após cada conjunto de intervenções propostas no ano anterior (Figura 36).

Figura 36 - Elementos de conexão entre os cenários, nos anos de análise

No que se refere aos dados que compõem a etapa de decisão, estes são obviamente derivados das variáveis adotadas, mas agregam informações para auxiliar a seleção das melhores estratégias. A Figura 37 apresenta alguns resultados que podem ser utilizados com esta finalidade.

Início da análise		Condição inicial - detalhamento de projeto - janeiro/2015					Cenário 1						
Segmento		Df1	Df1-Df4	Df7	IRI	Área trincada	Solução proposta	Df1 (reinício)	IRI (reinício)	Custo	Projeção Df1 (após 12m)	Projeção IRI (após 12m)	
km Inicial	km final	[10 ⁻² mm]	[10 ⁻² mm]	[10 ⁻² mm]	[m/km]	[%]		[10 ⁻² mm]	[m/km]	[kR\$/seg.m]	[10 ⁻² mm]	[m/km]	
1,300	2,500	63,5	41,0	8,1	1,60	60	Reconstrução	30,00	1,35	147.000,00	30,5	1,43	
2,500	3,000	43,0	12,7	5,5	2,30	10	Fresagem e recomp.	27,50	1,35	2.500,0	28,1	1,44	
3,000	3,800	38,6	11,9	2,3	3,10	5	Microrrevestimento	37,50	2,60	24.500,0	38,6	2,82	
3,800	4,900	55,3	29,5	2,0	2,20	35	Reforço estrutural	43,00	1,70	73.500,0	44,3	1,78	
4,900	6,500	22,9	13,4	4,5	1,70	5	Conservação de rotina	22,90	1,70	5.500,0	23,4	1,77	
							23%	17%	253.000,00	23%	17%		
							Valor total do cenário						
							% Extensão de segmentos com IRI acima do limite admissível						
							% Extensão de segmentos com Df acima do limite admissível						

Figura 37 - Resultados obtidos a partir das variáveis adotadas

A decisão para seleção da combinação de cenários é por certo, realizada por um processo iterativo conforme descrição no item 3.3.

3.2.4 Elemento de conexão com o próximo nível – rede macro

Como resultado dos procedimentos desenvolvidos no nível de rede, os diversos cenários possíveis apresentam uma série de informações que fundamentam o processo de tomada de decisão no próximo nível. Embora o processo de análise

possa ser definido como uma abordagem iterativa, os resultados individuais dos cenários não sofrem alteração decorrente do processo de tomada de decisão.

Assim, o principal elemento de conexão com o nível de rede macro é a construção dos cenários que serão analisados no próximo nível. Destaca-se que os resultados dos cenários fornecem as informações que serão processadas no próximo nível, para só então integrarem o processo de tomada de decisão.

É importante destacar que o desmembramento entre os níveis de análise é teórico e cumpre um efeito didático para apresentação dos conceitos e etapas que conduzem ao nível de rede proposto neste trabalho.

3.3 Nível de rede macro

O nível de rede macro proposto neste trabalho é uma decorrência das análises desenvolvidas no nível de rede, sendo acrescentados elementos considerados relevantes no processo de tomada de decisão estratégica na gestão de pavimentos.

Neste nível, este trabalho propõe que várias rodovias sejam avaliadas em concomitância de modo que os resultados de cada via impliquem nas decisões para as demais. Tal simultaneidade permite identificar equilíbrios e desequilíbrios entre as estratégias, permitindo uma distribuição de recursos mais eficiente, especialmente diante de cenários de restrições orçamentárias.

Os conceitos de eficiência dependem claramente de uma série de definições prévias, a partir das quais são conduzidas as análises. Quanto mais rica e detalhada a análise, mais coerentes tendem a ser os resultados. Por esta razão, o procedimento proposto incorpora elementos das análises realizadas em nível de projeto. Desta forma, o ponto de partida das análises agrega maior precisão, refletindo em todo o período analisado.

A compilação de diferentes conceitos em uma única análise procura incorporar os aspectos positivos de cada nível, para um objetivo comum, que é a seleção das melhores alternativas para atuação.

O nível de projeto incorporado permite uma orientação mais assertiva nos primeiros anos, pois o maior detalhamento requerido como elemento de entrada indica as condições efetivas dos pavimentos. É através do conhecimento das condições que se pode verificar e identificar a relação entre a performance de campo e os resultados de testes de monitoramentos, auxiliando na fixação de limites compatíveis, ou seja, é possível definir como os resultados de monitoramento das condições dos pavimentos traduzem seu desempenho.

Este exercício auxilia na definição de limites para todo o período analisado, além do período compreendido pelo nível de projeto, uma vez que as definições de desempenho do nível de rede são decorrências das definições no nível de projeto. Tais definições dependem da quantidade de informação disponível, mas dependem também das experiências dos técnicos envolvidos.

Os aspectos da análise em nível de rede são integralmente adotados neste modelo proposto. Primeiro no que se refere aos períodos de análise, estendidos tanto quanto desejável, considerando diversos ciclos de vida e respeitando as características das atividades de curto, médio e longo prazo, respectivamente. O prazo de análise naturalmente implica na consideração de diferentes conceitos. Na sequência, é igualmente relevante a abordagem sobre os cenários de análise em nível de rede. A definição dos cenários deve estar orientada para as condições possíveis mas principalmente para a otimização das estratégias em longo prazo.

Contudo, despeito da conjunção dos níveis de projeto e de rede, o modelo proposto está fundamentado em uma análise mais ampla que incorpore aspectos relacionados a conceitos econômicos (Figura 38).

Figura 38 - Elementos integrantes em cada nível de análise

Os resultados dos cenários fornecem informações cruciais para verificação dos impactos das alternativas e seleção de estratégias. Sobre os resultados das projeções de desempenho são obtidas variáveis suplementares relacionadas aos conceitos econômicos; tendo em vista que estas decorrem de análises e simulações prévias, neste trabalho serão chamadas de variáveis analíticas.

Desta forma, na análise em nível de rede macro, tanto as variáveis relacionadas ao desempenho dos pavimentos, quanto as variáveis analíticas são consideradas, embora de maneiras distintas e conforme a importância atribuída a cada uma. Convém neste ponto esclarecer as diferenças entre as variáveis citadas. As variáveis adotadas no início nas análises como medidas de desempenho dos pavimentos, tais como irregularidade longitudinal são parâmetros de desempenho; evidente que como tradução do desempenho dos pavimentos, estas são utilizadas nas análises em nível de rede macro. Entretanto, são as variáveis analíticas que efetivamente integram os cálculos para determinação dos valores das estratégias. As variáveis de desempenho compõem as variáveis analíticas.

Tal distinção é mandatória a partir deste ponto, pois as variáveis analíticas são largamente utilizadas na próxima etapa do procedimento proposto, tanto que doravante todas as menções serão sempre adequadamente descritivas, a ambas as variáveis.

3.3.1 Variáveis analíticas

Dois tipos de variáveis analíticas são apresentados neste trabalho: (i) variáveis analíticas obtidas diretamente dos resultados dos cenários analisados (VAD – Variáveis Analíticas Diretas) e (ii) variáveis analíticas não diretamente relacionadas aos cenários (VAI – Variáveis Analíticas Indiretas), obtidas em função de considerações adicionais ao procedimento inicial baseado nos cenários.

As variáveis analíticas obtidas diretamente dos cenários estão naturalmente relacionadas às variáveis de desempenho resultantes das medidas diretas adotadas para a análise, tais como irregularidade longitudinal, deflexão, entre outros.

Isto significa que a partir dos resultados dos cenários, os quais fornecem as condições dos pavimentos em cada segmento homogêneo nos termos das variáveis de desempenho adotadas, são obtidas variáveis analíticas.

A título da ilustração, considerando que a irregularidade longitudinal é uma variável de desempenho, e que cada cenário fornece a projeção da irregularidade longitudinal para cada ano, pode-se obter a quantidade de segmentos que atenda ao limite para este parâmetro. Assim, a variável analítica representa a soma de segmentos em determinadas condições, baseado nos resultados da variável de desempenho, conforme apresentados na tabela.

Este tipo de variável analítica pode estar orientado de diferentes formas, no entanto, os dados de origem estão sempre relacionados às variáveis de desempenho. A orientação da variável analítica dependente das variáveis de desempenho, que dependem do tipo de análise que se deseja proceder, ou ainda, dos tipos de limites que podem estar fixados.

Como exemplo de limites que podem ser estabelecidos, recorrentes em contratos, existem os limites máximos de irregularidade longitudinal a que os pavimentos devem atender, a partir dos quais podem ser emitidas penalizações. Ainda como exemplo, no sentido oposto, o atendimento a limites inferiores pode resultar em bonificações (Tabela 12).

Tabela 12 - Variáveis analíticas obtidas das variáveis de desempenho

Início da análise →		Condição inicial - detalhamento de projeto - janeiro/2015					Cenário 1			
Segmento		Df1	Df1-Df4	Df7	IRI	Área trincada	Solução proposta	IRI (reinício)	Df1 (reinício)	Custo
km Inicial	km final	[10 ⁻² mm]	[10 ⁻² mm]	[10 ⁻² mm]	[m/km]	[%]		[m/km]	[10 ⁻² mm]	[kR\$]
1,300	2,500	63,5	41,0	8,1	1,60	60	Reconstrução	1,35	30,00	147
2,500	3,000	43,0	12,7	5,5	2,30	10	Fresagem e recomp.	1,35	27,50	2
3,000	3,800	38,6	11,9	2,3	3,10	5	Microrrevestimento	2,60	37,50	24
3,800	4,900	55,3	29,5	2,0	2,20	35	Reforço estrutural	1,70	43,00	73
4,900	6,500	22,9	13,4	4,5	1,70	5	Conservação de rotina	1,70	22,90	5
(extensão % de cumprimento do parâmetro de desempenho)							(<2,5 m/km) / (<40 10 ⁻² mm)	84,62	78,85	
(extensão % sujeita a penalização por descumprimento)							(>2,5 m/km) / (>40 10 ⁻² mm)	15,38	21,15	
(extensão % de atendimento aos limites para bonificação)							(>1,5 m/km) / (>25 10 ⁻² mm)	32,69	30,77	
Variáveis analíticas obtidas diretamente das variáveis de desempenho										

As variáveis analíticas obtidas diretamente dos cenários analisados podem ainda ser resultantes de dados paralelos às variáveis de desempenho. Por exemplo, os custos de um conjunto de soluções que compõe um cenário, que naturalmente decorre da soma dos valores individuais para cada segmento, que decorre da condição verificada por meio das variáveis de desempenho e das matrizes de soluções estabelecidas inicialmente, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Variáveis obtidas da correlação de variáveis de desempenho

Cenário 1				
Solução proposta	IRI (reinício) [m/km]	Df1 (reinício) [10 ⁻² mm]	Custo [kR\$/segm.]	Projeg (após) [m/
Reconstrução	1,35	30,00	147.000,00	1,4
Fresagem e recomp.	1,35	27,50	2.500,00	1,4
Microrrevestimento	2,60	37,50	24.500,00	2,4
Reforço estrutural	1,70	43,00	73.500,00	1,4
Conservação de rotina	1,70	22,90	5.500,00	1,4
Custo total (R\$)			253.000,00	
Dados resultantes das variáveis de desempenho				

Por outro lado, as variáveis analíticas que não sejam diretamente relacionadas aos cenários dependem de considerações adicionais e procedimentos adicionais. Para tais variáveis analíticas é necessário estabelecer premissas específicas que estejam alinhadas com os objetivos da condução da análise.

As variáveis analíticas deste tipo agregam os conceitos econômicos mencionados anteriormente. Podem também agregar conceitos de outras naturezas como impactos sociais, ambientais, entre outros. Igualmente, deve-se considerar que os conceitos econômicos mencionados assim como qualquer outro elemento, conceito ou aspecto, devem ser integrados ao procedimento por meio e no formato de variáveis analíticas.

Uma comparação simples entre uma variável analítica obtida diretamente dos cenários e uma variável analítica não diretamente relacionada aos cenários é o descumprimento contratual de uma determinada variável de desempenho. Em outras palavras, o resultado obtido diretamente da simulação dos cenários é a extensão de rodovia que não atende o limite mínimo estipulado para a variável enquanto a possibilidade de penalizações é resultado de uma análise probabilística relacionada à

extensão de rodovia em desacordo com o limite, considerando por vezes características políticas e macroeconômicas.

Naturalmente todas as variáveis estão interligadas, exercendo maior ou menor influência nos resultados. O relativo grau de dependência das variáveis comporta a realização de análises de sensibilidade, especialmente úteis na definição da relevância das variáveis.

Cabe destacar que embora seja possível inserir um sem número de variáveis, é mais coerente manter a análise restrita a variáveis que de fato tenham implicação nas decisões de estratégias. Especialmente em virtude da dificuldade no estabelecimento de relações coerentes entre um número muito grande de variáveis. Embora possa ser vantajoso testar a sensibilidade das variáveis de modo amostral, é necessário considerar que algumas variáveis podem ter sua influência alterada em virtude do tamanho da população e em função da variação da própria variável.

Os efeitos do tráfego, como variável indireta é um bom exemplo que merece ser explorado. Primeiro porque a variação do tráfego pode ser muito significativa entre distintas vias ou distintos segmentos de via, tanto em relação ao volume como em relação à composição de frota. Depois pela associação aos valores de tarifas, quando imputados aos usuários. E ainda em relação à importância da via no sistema em que está inserido.

Em teoria, em rodovias pedagiadas, quanto maior o volume de tráfego, maior a importância da via e maiores são as receitas advindas da cobrança pelo uso. Entretanto, maior é o desgaste dos pavimentos, e maiores são os efeitos das características dos mesmos nos custos dos usuários. Isto significa que, em teoria, os investimentos deveriam respeitar esta proporcionalidade.

Mas quando são avaliadas vias em condições similares de tráfego, tanto em volume como em configuração de frota, as diferenças podem residir nas tarifas de pedágio, por exemplo. Da mesma forma, as diferenças podem se revelar quando se incluem custos de distâncias de transporte, que por sua vez podem ser associados às características da malha viária.

O exemplo deixa claro que a eleição das variáveis de interesse deve ser realizada previamente considerando os muitos aspectos que podem influenciar o processo de tomada de decisão. As variáveis devem estar alinhadas com as condições de contorno verificadas nas vias em análise.

3.3.2 Análise de riscos

Os riscos que cercam inúmeras estratégias para a gestão de pavimentos podem ter diversas fontes e impactos, independentemente do nível em que é procedida a análise. O modelo proposto neste trabalho, para análises em nível de rede macro, cujo elemento principal é a análise simultânea de distintas vias, agrega além dos riscos regulares de cada via, a interação entre os riscos de todas as vias em conjunto.

A seleção dos riscos abordados na análise deve considerar os aspectos relacionados aos contratos, como parâmetros de desempenho, critérios de penalização, critérios de bonificação e prazos executivos, assim como devem ser considerados investimentos necessários, cenários político, econômico, social e ambiental, entre outros.

O caso de redes de rodovias concessionadas à iniciativa privada em contratos de PPP's configura um exemplo repleto de detalhes de interesse. A situação política, macroeconômica e a relação com o órgão público concedente, nos quais o contrato está estabelecido são os elementos iniciais na análise de riscos. A determinação dos riscos assumidos no primeiro nível de análise de riscos define a abordagem dos demais. A Figura 39 ilustra um exemplo da divisão de riscos entre o parceiro público e o parceiro privado. Assim, o risco apontado e suas devidas implicações na gestão dos pavimentos se configuram como alvo de interesse, sendo necessária sua quantificação e determinação de probabilidade de ocorrência.

Figura 39 - Matriz de riscos para identificação dos responsáveis por cada risco

O exercício para a análise de riscos é necessário para a definição da presença ou exclusão de riscos nas análises específicas de gerência de pavimentos. Mesmo que alguns riscos tenham impacto significativo no contrato, estes podem não ter impactos diretos significativos e que mereçam ser considerados e mensurados em sistemas auxiliares como o caso dos sistemas de gerência de pavimentos. É conveniente que o mesmo exercício seja conduzido em diferentes níveis do contrato e etapas do projeto, considerando sub-riscos, a fim de indicar mais adequadamente o manejo para cada risco ou sub-risco.

Os riscos relacionados às estratégias para intervenções em pavimentos frequentemente são associados (i) ao tráfego que solicita os pavimentos, (ii) aos custos dos usuários que utilizam as vias, (iii) aos impactos ambientais decorrentes do consumo de materiais para recuperação dos pavimentos, e (iv) ao cumprimento de parâmetros de desempenho técnicos contratuais. Riscos de outras naturezas como financeiros e ambientais são equacionados no sistema de gerência de pavimentos sempre e quando se revelarem significativos e pertinentes.

Naturalmente a ocorrência de qualquer risco se apresenta como custo, seja para mitigar antes deste se materializar, seja para manejar as consequências quando acontecem.

Por esta razão é importante eleger adequadamente as variáveis consideradas nas análises dentro do sistema de gerência de pavimentos de modo a antecipar custos decorrentes de riscos conhecidos. Adicionalmente, reconhecer as interdependências entre os riscos incrementa a eficiência das análises, incorporando exclusivamente aspectos consistentes com os objetivos do procedimento, mantendo em perspectiva as condições gerais de um contrato e seus inúmeros desdobramentos.

A definição da amplitude dos riscos também auxilia neste tipo de análise; matrizes de riscos com estimativa de valores, bem como estimativa de probabilidade e consequência podem ser utilizadas de modo expedito durante o processo de definição dos riscos a serem incorporados ao sistema de gerência de pavimentos (Tabela 14).

Tabela 14 - Classificação dos riscos e mecanismos de manejo

Classificação de Risco - Efeito/Consequencia					
Probabilidade de ocorrência	Impacto possível				
	1 - Baixo	2 - Menor	3 - Moderado	4 - Maior	5 - Catastrófico
Extremo (16 a 25)	Improvável	Possível	Provável	Extremo	Extremo
Provável (11 a 15)	Improvável	Possível	Provável	Extremo	Extremo
Possível (7 a 10)	Raro	Improvável	Provável	Provável	Provável
Improvável (4 a 6)	Raro	Raro	Improvável	Possível	Possível
Raro (1 a 3)	Raro	Raro	Raro	Improvável	Improvável

Risco	Probabilidade	Consequencia	Nível de Risco	Mitigação
Alteração na demanda superior a 10%	Possível	Moderado	Provável	Aceitar
Penalização por descumprimento contratual	Provável	Maior	Provável	Planejamento de investimento
Ocorrência de passivos construtivos	Improvável	Moderado	Improvável	Seguro

A Tabela 14 mostra os resultados para cada risco identificado, sendo atribuídos os níveis de probabilidade de ocorrência e de impacto possível, baseados na experiência do avaliador. Sob os mesmos critérios, são sugeridas ações mitigatórias para cada risco identificado e ponderado, sendo que tais ações devem considerar os resultados das probabilidades obtidos.

3.3.3 Método de Monte Carlo

A variáveis analíticas obtidas indiretamente que dependem de considerações adicionais são avaliadas individualmente, até o momento em que é realizada sua inclusão nas análises totais do sistema de gerência. Para tanto, é necessário que cada variável seja representada em um formato específico, de modo que o sistema a reconheça e integre nos cálculos procedidos para proposição de estratégias.

O reconhecimento de que cada variável carrega uma carga de risco de ocorrência associada às consequências, negativas ou positivas, significa que o resultado direto de uma análise que informa o descumprimento de um determinado parâmetro contratual implica indiretamente no risco de penalizações como consequência. A determinação da probabilidade de ocorrência, por exemplo, de uma penalização é que deve ser avaliada individualmente e posteriormente representada em um formato reconhecido pelo sistema.

Neste trabalho são definidas as variáveis analíticas de interesse com base em matrizes de risco que permitem priorizar ou identificar os principais riscos no processo de gestão de pavimentos. A utilização de tais variáveis depende de uma análise prévia.

O procedimento para tais variáveis consiste essencialmente na determinação de probabilidades de ocorrência, sob uma série de considerações assumidas. A utilização do Método de Monte Carlo permite uma análise mais completa sobre a probabilidade de ocorrência de uma determinada situação, traduzida como variável analítica.

O método é aplicado em uma sequência imperiosa: definição dos elementos que compõem a variável em análise, com conseguinte definição de limites para o comportamento de cada elemento, entre máximos e mínimos, simulação aleatória de possibilidades para cada elemento considerando os limites estabelecidos, e análise da probabilidade de ocorrência. Etapas intermediárias ou paralelas podem ser necessárias como por exemplo análise de sensibilidade para a determinação do número de simulações aleatórias requeridas.

A variação no tráfego é um risco frequente e que pode ser analisado por meio do método. Contratos que preveem medidas específicas, como compartilhamento de riscos, para situações em que a variação na demanda ultrapasse um determinado percentual, cujo risco seria altamente taxado pela iniciativa privada, são comuns e servem como exemplo adequado às análises pretendidas neste trabalho.

Relacionando a variação no tráfego às mudanças no cenário macroeconômico e às alterações no modelo de transporte, por exemplo, a possibilidade de que ocorra uma redução de até 15% na demanda de tráfego pode ser obtida com a utilização do Método de Monte Carlo, conforme se verifica na Figura 40.

Figura 40 - Exemplo de simulação de riscos

Quanto maior o número de simulações, mais confiáveis são os resultados, ou mais próximos da realidade. Neste exemplo foram realizadas 1500 simulações resultando numa variação entre 22% e 28%. Caso as simulações fossem reduzidas em um outro exemplo a apenas 100, os resultados estariam variando entre 15% e 30%.

A utilização do método exige que sejam estabelecidos os elementos contribuintes para a ocorrência de um determinado risco, e que estes sejam relacionados matematicamente, pois estes critérios assumidos são cruciais na determinação dos impactos de uma variável.

Os resultados podem ser expressos como probabilidade percentual de ocorrência de um determinado risco por exemplo, de modo que este assume o papel de uma variável analítica que integra o conjunto de dados para subsidiar a tomada de decisão.

3.3.4 *Analytic Hierarchy Process* – AHP – Processo Analítico Hierárquico

O processo de tomada de decisão frente a diversas opções alternativas para intervenções em pavimentos apresenta elevada complexidade, diretamente proporcional ao número de variáveis incluídas nas análises. Eleger uma estratégia depende do conhecimento de um grande conjunto de informações, e da avaliação das consequências possíveis de cada estratégia.

Assim, os dados incluídos em um sistema de gerência de pavimentos representam um conjunto objetivo de informações, os quais recebem um procedimento lógico com resultado matemático. A partir destes resultados são apresentadas estratégias, classificadas em relação aos objetivos definidos.

O processo de tomada de decisão suportado por metodologias específicas enriquece os resultados, pois insere elementos racionais aos problemas mais complexos. Como mencionado anteriormente, a utilização de qualquer ferramenta para classificar as opções disponíveis em um processo que requer decisão não exime ou exclui a participação efetiva dos profissionais envolvidos, mas sim amplia sua participação na definição de parâmetros claros em todas as etapas, até o resultado final.

Nos sistemas de gerência de pavimentos, a experiência dos profissionais envolvidos tem extrema relevância, sendo que o resultado final é o resultado matemático de uma série de critérios assumidos previamente. Em nível de rede macro, tal afirmação é ampliada, em virtude da inclusão dos aspectos relacionados a riscos.

Diante do fato que as estratégias são avaliadas finalmente nesta etapa da análise, é lógico supor a necessidade de que todos os elementos construídos no sistema da gerência de pavimento sejam combinados em formato consistente com o processo de hierarquização. A ferramenta utilizada neste trabalho para hierarquização de estratégias é o método analítico AHP.

O método tem como principal vantagem o fato de requerer que a ponderação sobre os elementos avaliados seja realizada pelos profissionais envolvidos na análise, encerrando o procedimento com os mesmos critérios lógicos aportados pelos envolvidos em todas as fases. Nas análises em nível de rede macro para gerência de pavimentos, este requisito é indicado, muito embora, na resolução de outros tipos de problemas, este mesmo requisito pode ser considerado como uma desvantagem do método.

O método AHP tem uma limitação no número de variáveis que pode ser considerado na análise. Tal limitação pode inviabilizar sua utilização em análises que requerem a combinação de um número maior de variáveis. Neste trabalho, o método é considerado adequado, com número de variáveis suficientes para auxiliar na decisão sobre as estratégias disponíveis.

Adicionalmente, o procedimento de hierarquia e relação entre as variáveis dentro do método é adequado ao problema, uma vez que não se observam diferenças discrepantes na relação entre as variáveis. A Figura 41 lustra tal conceito, mostrando que as relações entre as variáveis analisadas neste trabalho atendem a ordem de grandeza proposta, sem discrepâncias evidentes. Quando houver a identificação de relações distintas das apresentadas, é conveniente considerar a adoção de outras ferramentas disponíveis para esta função.

Relação entre as variáveis		
Variáveis	Relações	Peso (1 a 9)
Custo de intervenções	Custo de intervenções X Df (Descumprimento)	8 x 7
IRI (Descumprimento)	Custo de intervenções X IRI (Descumprimento)	8 x 6
Df (Descumprimento)	Df (Descumprimento) X IRI (Descumprimento)	7 x 6

Deflexão considerada mais importante que IRI em virtude da extensão identificada, contudo similares. Por exemplo, uma variável não é 8 ou 20 vezes maior que a outra.

Figura 41 - Relação de importância entre as variáveis

Apesar da participação efetiva dos técnicos envolvidos, o método representa uma solução matemática para a ponderação racional multicritério. O método é utilizado na análise de cada ano da análise procedida, comparando os resultados de todas as variáveis de cada cenário e os resultados de cada simulação de variáveis indiretas. É também por meio deste método que são realizadas as comparações de estratégias anuais de cada via integrante da rede.

O objetivo é definir anualmente o cenário que atenda da melhor maneira os requisitos inseridos por meio das variáveis. Assim, todos os cenários são avaliados paralelamente em cada via, individualmente são avaliados em cada ano. O vínculo entre todas as vias é realizado por meio de variáveis analíticas específicas enquanto as características individuais de cada via são consideradas por meio de variáveis relacionadas aos cenários (Figura 42).

Figura 42 - Variáveis analíticas definidas a partir dos cenários e variáveis analíticas vinculativas

As variáveis analíticas obtidas diretamente dos cenários indicam os resultados de cada estratégia (ou cenário), para cada via. Estes resultados independem das condições de outras vias, e representam o resultado da aplicação de uma determinada estratégia baseada nas condições físicas exclusivas desta via. São a representação do desempenho dos pavimentos quando assumida uma estratégia para intervenção.

As variáveis analíticas obtidas indiretamente por simulação de probabilidades tendem a ser exclusivas para cada via, por se tratar justamente de elementos diferenciais entre as vias, que contribuem para a decisão mais assertiva na distribuição de recursos.

As variáveis analíticas específicas que vinculam todas as vias da rede analisada inserem um novo nível de abordagem ao procedimento, por meio da iteração. Simplificadamente e a título de exemplificação didática desta relação, o custo de cada cenário anual nos custos totais para uma via e posteriormente nos custos totais para todas as vias é um critério significativo para a definição por cada estratégia anual.

Iteração é um processo de repetição sucessiva de ações, cujas variáveis interferem entre si simultaneamente, de modo que o número de iterações convirja para a solução. Assim, neste processo, as variáveis interagem de forma a alterar outras variáveis, forçando o sistema a testar sucessivas combinações. O custo individual de cada cenário simulado no procedimento proposto afeta o custo total das análises, enquanto

o custo total determina a seleção ou não de um determinado cenário, estabelecendo assim uma referência circular. O processo de iteração dentro do sistema permite a interação entre as vias da rede em análise.

Neste trabalho o elemento principal de conexão entre as vias da rede é o custo total anual como variável analítica indireta, cujos resultados interferem de forma prioritária na decisão pelas estratégias para intervenção nos pavimentos. Esta variável é obtida naturalmente pelas somatórias de custos individuais de intervenções anuais, contudo está relacionada às possibilidades de penalizações por descumprimento contratual, as quais são inseridas por meio da simulação de probabilidades (Figura 43).

Figura 43 - Resultado da simulação pelo Método de Monte Carlo

Tendo em vista que as análises de todas as vias são procedidas paralelamente ao mesmo tempo em que são conjugadas, é fundamental assegurar que todas as vias sejam avaliadas sob a mesma ótica, não sendo possível inserir um risco em uma via sem inserir o mesmo risco nas demais. Existe sempre uma relação hierárquica entre as vias para os mesmos elementos; o risco na demanda de tráfego pode ser mais significativo para uma rodovia do que para as demais, contudo o risco deve ser avaliado para todas, permitindo a comparação de impacto.

Outro item que merece ser mencionado nesta etapa é a retroalimentação do sistema. A partir da definição de estratégias, pode-se identificar a necessidade de ajustes nas etapas iniciais do procedimento de análise em nível de rede macro. Identificar nesta etapa os elementos que contribuíram para a seleção de um conjunto de estratégias pode auxiliar na determinação mais eficiente dos critérios iniciais da análise.

A etapa de análise para tomada de decisão conjuga todos os resultados parciais de cada etapa, isto significa que a construção de todo o sistema está orientada para fornecer informações no formato requerido por esta etapa. Tal reconhecimento, independe da ferramenta matemática selecionada para o processo. Neste sentido, convém mencionar que se trata de uma relação biunívoca: a seleção da ferramenta matemática está alinhada com os objetivos da análise enquanto a estruturação do procedimento está orientada para cumprir os requisitos estabelecidos para o uso da definida ferramenta matemática.

4 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso apresentado neste trabalho tem o objetivo de testar o funcionamento do procedimento proposto, analisando a influência dos elementos mais representativos identificados durante a análise. Para tanto, o estudo inclui a análise de sensibilidade de algumas das variáveis propostas.

O caso explorado neste trabalho se refere a uma rede de rodovias concessionadas por meio de contratos de PPP. Cada via apresenta características particulares, incluindo variações entre os aspectos contratuais. A seleção deste caso se deve ao fato que este tipo de administração está geralmente fundamentado em análises mais amplas e complexas dos dados pertinentes. Entre os dados analisados, estão incluídos os riscos do parceiro privado em relação aos riscos gerais da PPP.

A análise de uma PPP permite também que sejam explorados conceitos de qualidade das vias por meio da delimitação de parâmetros de desempenho específicos para pavimentos, frequentemente encontrados em contratos desta natureza. Adicionalmente podem ser associados aspectos relativos às penalizações, sendo que estes são mais comuns em contratos de concessão do que se verifica na administração exclusivamente pública.

Os estudos conduzidos neste trabalho não esgotam as inúmeras possibilidades de análises em nível de rede macro, mas pretendem indicar os aspectos fundamentais para a condução de análises similares, bem como se pretende apresentar a flexibilidade do procedimento, permitindo que diferentes elementos sejam avaliados, tal como se mostrem relevantes aos interessados.

Os contratos de PPP podem assumir diversos formatos, os quais são adaptados aos objetivos dos administradores públicos em relação às aspirações da sociedade e ao contexto político e econômico da região em que estão inseridos. São mais comuns os contratos para manutenção, operação e expansão de vias existentes, com remuneração baseada na cobrança de tarifas de pedágio ao usuário.

Este tipo de contrato é visto com elevada frequência, facilmente alinhados com as exigências econômicas e sociais que demandam incrementos na qualidade das vias existentes, as quais também com elevada frequência apresentam condições precárias de manutenção, normalmente em virtude das dificuldades da administração pública.

Tal panorama é recorrente no Brasil, sendo que a maior parte das vias administradas pelo poder público apresentam deficiências significativas em termos de qualidade estrutural, funcional e de segurança, afetando diretamente os custos de transporte de bens e de pessoas. Soma-se ainda o fato de que os recursos públicos são escassos e insuficientes não só para a manutenção das vias existentes, mas também para a ampliação e atualização das vias e conexões, tendo como resultado, o transporte como gargalo no crescimento econômico.

Condições assim verificadas impulsionam os projetos de contratação no modelo de parcerias público privadas, que se iniciaram no país na década de 1990. Embora se constate a maturidade de muitos contratos firmados sob este modelo, é possível observar também falhas regulatórias e administrativas que merecem melhor desenvolvimento.

Embora não seja o escopo deste trabalho, nem se pretenda aprofundar o tema, é interessante pontuar que muitos contratos vigentes de PPP's todavia não estão alinhados com as demandas atuais da sociedade. Incluem-se demandas relativas à construção de elementos de interesse para comunidades lindeiras, à proteção do meio ambiente e à adaptação das vias a conceitos atuais de segurança viária, ao mesmo tempo em que se observa um maior nível de exigência da população e maior intolerância em relação ao descumprimento contratual por parte do parceiro privado, sem consequências proporcionais. Entre as informações mencionadas, é possível destacar que a melhor avaliação de riscos tem caráter mandatário na elaboração de novos contratos.

O estudo de caso apresentado neste trabalho propõe a consideração sobre alguns dos aspectos mencionados, a serem detalhada em seu momento, mantida a sequência proposta para o procedimento (Figura 44).

Figura 44 - Procedimento para análise em nível de rede macro

A sequência apresentada inclui uma série de passos, os quais foram adotados nas análises conduzidas neste trabalho.

1. Identificação das características gerais das rodovias para estruturação do banco de dados.
2. Coletânea de dados de monitoração dos pavimentos das rodovias, incluindo série histórica.
3. Compilação do histórico de intervenções realizadas em cada rodovia.

4. Segmentação homogênea de cada rodovia com base em suas condições e características individuais, associados aos dados disponíveis, identificados nos passos anteriores.
5. Determinação das variáveis de desempenho que possam ser utilizadas para projeção, associadas à disponibilidade de dados de monitoração.
6. Definição de matrizes de soluções, considerando as variáveis que serão projetadas.
7. Desenvolvimento de modelos de desempenho a partir dos dados históricos das condições monitoradas dos pavimentos e do histórico de intervenções.
8. Identificação dos parâmetros contratuais que tenham influência na definição de estratégias para manutenção dos pavimentos.
9. Identificação dos aspectos relativos às políticas institucionais que tenham influência na definição de estratégias para manutenção dos pavimentos.
10. Definição de políticas para a administração das vias, tais como atividades preventivas e atividades corretivas.
11. Definição de critérios para intervenção, classificando os segmentos com relação às suas condições, minimamente entre *bons*, *regulares* e *ruins*, e incluindo a definição dos devidos limites.
12. Definição dos cenários para simulação, limitando a um número razoável de cenários, mas garantindo diferenças entre eles que reflitam políticas e critérios distintos.
13. Elaboração de estudos qualitativos para identificação dos riscos de maior influência para a seleção de estratégias de manutenção.
14. Estudos quantitativos para definição dos impactos dos riscos identificados.
15. Determinação de procedimento para vinculação entre riscos e as demais variáveis analíticas.
16. Análise probabilística dos riscos identificados, com resultados diretamente empregados no processo de tomada de decisão.
17. Delimitação de aspectos financeiros tais como restrições e marcos econômicos.
18. Simulação de estratégias considerando todos os elementos construídos nos passos anteriores.
19. Análise lógica dos dados das simulações a partir de ferramenta de apoio à tomada de decisão.

20. Avaliação dos resultados das simulações, ponderados os riscos, os custos e as indicações do processo de tomada de decisão.

4.1 Características gerais de contrato de PPP

Este trabalho apresenta o caso de um grupo privado que administra três vias distintas, sob contratos de PPP com a administração pública. Cada via apresenta características próprias, conforme descrito na

Tabela 15.

Tabela 15 - Características gerais das rodovias avaliadas no estudo de caso

	Rodovia A	Rodovia B	Rodovia C
Data inicial da concessão	2012	2012	2000
Período de concessão	25 anos	25 anos	20 anos
Ano de construção	1985	1979	1960
Ampliações significativas	Duplicação (ano 2002)	Extensão 45 km (ano 2008)	Duplicação (1990)
Região	Zona Urbana/ Zona Rural (30%/70%)	Zona Rural	Zona Urbana/ Zona Rural (40%/60%)
Órgão concedente	Estadual	Estadual	Federal
Tráfego	80% Leves/ 20% Pesados	90% Leves/ 10% Pesados	30% Leves/ 70% Pesados
Extensão	210 km	145 km	350 km

Destacam-se aqui os elementos mais significativos para o tema central este trabalho, dentre os quais, alguns contribuem para a contextualização enquanto outros contribuem diretamente na construção do procedimento de análise.

- Rodovia A. – Contrato fixado com a administração pública do estado, a qual conduz um grande número de contratos, firmados em épocas distintas, maturidade tal que permitiu ao órgão regulador o refinamento dos contratos mais atuais, incluindo cláusulas específicas para o atendimento de uma série de anseios sociais, tais como penalização rigorosa por descumprimento contratual do parceiro privado, bonificação por desempenho comprovadamente

superior para estimular o parceiro privado a melhorar efetivamente condições das vias. Os reajustes tarifários são altamente regulados, contudo, verifica-se que as tarifas são relativamente elevadas na comparação do custo por quilômetro com outras vias sob concessão.

- Rodovia B. – Via secundária, cuja cobrança de tarifa está inserida na via principal sob contrato fixado para a via principal. A via atende região com fluxo de tráfego baixo, sem demandar ampliações significativas. O contrato inclui a penalização no caso do descumprimento contratual, muito embora os parâmetros de desempenho são mais permissivos em relação à via principal, sendo compatíveis com o tráfego atuante. A excelência no desempenho desta via secundária não contribui para a bonificação do parceiro privado.
- Rodovia C. – Via de grande importância para o país, concedida pela administração federal em contrato baseado na cobrança de tarifas ao usuário. O tráfego é composto em grande parte por veículos comerciais, atravessando áreas altamente urbanizadas. O contrato prevê a penalização no caso de descumprimento contratual. Contudo o órgão concedente dispõe de equipe limitada para fiscalização. O contrato apresenta maior enrijecimento técnico, que se observa pela fixação dos parâmetros de desempenho assim como pela dificuldade de incorporação de novos elementos de ampliação ou de atualização a conceitos de segurança viária.

Com base nos dados apresentados, estão identificados os riscos, apresentados na Figura 45. As informações estão orientadas para a análise de riscos sob o ponto de vista do parceiro privado, e ainda com o objetivo de fornecer elementos para a construção do sistema de gerência de pavimentos em nível de rede macro, incluindo todas as etapas do procedimento, conforme descrito nos itens a seguir.

Figura 45 - Mapa de riscos para as rodovias analisadas

4.2 Estruturação de banco de dados

Conforme mencionado, a estrutura do banco de dados deve estar orientada para preencher todas as etapas do procedimento de análise. Os dados disponíveis sobre as condições dos pavimentos podem ter dois enfoques: (i) a verificação do atendimento exclusivamente dos parâmetros de desempenho elencados em contrato, incluindo os requisitos contratuais de procedimentos de monitoração, e (ii) a ampliação dos mecanismos de verificação das condições dos pavimentos, voltados para a melhor gestão dos pavimentos, incluindo a monitoração de parâmetros não descritos em contrato.

Evidente que quanto maior o número de informações disponíveis, maior a precisão na determinação das condições dos pavimentos. No entanto é necessário avaliar e limitar a quantidade de dados ao coerente, uma vez que o exagero na coleta de informações pode não acrescentar precisão ao processo sob o risco de aumentar muito os custos de monitoração.

Em alguns casos, o contrato com o poder público já prevê número suficiente de indicadores para a adequada caracterização das condições dos pavimentos. Quando isso não acontece é necessário acrescentar elementos ao conjunto de monitorações procedida.

Para a análise em nível de rede macro, a qual contempla rodovias com contratos distintos, é importante destacar que a monitoração de critérios adicionais e distintos pode ser procedida para integrar as análises da etapa de nível de projeto, desde que a seleção de variáveis para análise na etapa do nível de rede assegure que sejam as mesmas variáveis.

Isto significa que no nível de projeto, os pavimentos podem ser analisados por (i) variáveis comuns a todos os contratos e (ii) variáveis específicas previstas em contratos individuais e que não estejam previstas nos demais contratos. O detalhamento dos dados no nível de projeto eleva a validade das análises em todos os níveis.

A consequência mais natural é que uma rodovia possa ser melhor detalhada do que outras. Também é natural supor que o procedimento de monitoração das vias com menor número de parâmetros de desempenho destacado em contrato possa receber incremento no procedimento de monitoração. É necessário avaliar se tal incremento se justifica, associando tais resultados às características de contrato.

Neste trabalho, as rodovias estaduais contam com o monitoramento de irregularidade longitudinal e de deflexões enquanto a rodovia federal é monitorada quanto ao trincamento em adição aos dois parâmetros contratuais das rodovias estaduais.

O banco de dados é portanto composto pelos dados de monitoramento destes parâmetros, atualizados em frequência anual; frequência compatível com as especificações de contrato e com a análise em procedimento. No que se refere ao detalhamento das monitorações, os dados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Requisitos contratuais e de gestão interna para as rodovias avaliadas

Parâmetros de Desempenho / Critérios		IRI		Deflexão		Área Trincada	
		Contratual	Gestão Interna	Contratual	Gestão Interna	Contratual	Gestão Interna
Periodicidade	Contrato Estadual (rodovias A+B)	Anual	Anual	Bienal	Anual	-	-
	Contrato Federal (rodovia C.)	Anual	Anual	Quinquenal	Anual	Bienal	Anual
Frequência do ensaio	Contrato Estadual (rodovias A+B)	200 metros	100 metros	100 metros	100 metros	-	-
	Contrato Federal (rodovia C.)	320 metros	100 metros	200 metros	100 metros	100 metros	20 metros
Área	Contrato Estadual (rodovias A+B)	Todas as faixas	Todas as faixas	Faixas Pesados	Todas as faixas	-	-
	Contrato Federal (rodovia C.)	Todas as faixas	Todas as faixas	Faixas Pesados	Todas as faixas	Faixas Pesados	Todas as faixas

O procedimento de monitoração foi realizado com equipamentos específicos para cada parâmetro, a saber: (i) medidas de deflexão obtidas por meio de equipamento FWD, com carga equivalente a semieixo de 4,1 tf, (ii) medidas de irregularidade longitudinal realizada por equipamento perfilômetro a laser, com medidas contínuas e lances de integração de 100 metros e (iii) medidas de trincamento realizadas com equipamento de escâner com laser, com medidas contínuas e lances de integração a cada 20 metros.

Com o objetivo de incrementar as análises conduzidas para gestão dos pavimentos neste caso, todos os levantamentos apresentados são realizados em todas as faixas de tráfego, com intervalos pormenorizados. Contudo, é importante ressaltar que uma vez identificado que as alterações anuais tendem à irrelevância ou ainda que as variações têm a mesma ordem de grandeza dos erros inerentes às medições, então a frequência de monitoramento detalhado pode ser reduzida, sem risco de prejudicar as análises.

Por último, mas não menos importante é assegurar que os dados coletados estejam alinhados com as informações necessárias para a etapa de desenvolvimento de modelos de desempenho, pois é com base nestes dados coletados anualmente que os modelos são atualizados, influenciando todos os resultados das análises.

4.3 Definição de variáveis de desempenho

As variáveis de desempenho propostas para a análise em nível de rede macro são divididas em dois grupos, conforme discutido no item 3. O primeiro grupo é composto pelo maior número de parâmetros que possam indicar com maior assertividade a real condição dos pavimentos a serem utilizados no nível de projeto do procedimento. O segundo grupo é composto pelas variáveis que servem ao nível de rede.

As variáveis para o nível de projeto podem ser obtidas pela correlação entre variáveis, ou correlações com outros levantamentos realizados, bem como dados históricos de construção e restauração, entre outros. O maior número de elementos conjugados contribui para o objetivo deste nível de análise.

É necessário observar que as variáveis selecionadas devem também ser compatíveis com a representatividade esperada para este nível. Isto significa que é possível inserir por exemplo, informações obtidas por meio de ensaios destrutivos, desde que estes resultados sejam realizados em espaçamentos coerentes com a efetiva variação dos pavimentos, impedindo erros adicionais advindos da utilização de caracterização em um dado segmento que em verdade não seja representado por este resultado.

Apesar das inúmeras possibilidades de combinação de dados para servir o nível de projeto, é crucial que dentre as variáveis selecionadas, estejam as variáveis a serem utilizadas no nível de rede.

Selecionadas para o nível de rede, as variáveis advindas do nível de projeto são associadas a modelos de desempenho e projetadas para todo o período da análise. Por esta razão é importante que as variáveis selecionadas para este nível estejam alinhadas com os parâmetros de contrato, de modo a permitir a comparação em relação ao cumprimento contratual.

Também é necessário observar que podem existir diferentes variáveis de desempenho entre rodovias com contratos distintos, por exemplo, neste caso em específico, no qual um contrato estabelece limites para os parâmetros IRI, deflexão e

área trincada, enquanto o outro estabelece a avaliação apenas por meio de IRI e de deflexão.

Para situações como esta, duas medidas são possíveis: (i) a primeira é descartar a variável excedente, sob o risco de reduzir a confiabilidade dos resultados da análise e (ii) prosseguir com todas as variáveis, garantindo um número equivalente de variáveis na etapa final da análise. Manter o mesmo número de variáveis na etapa final da análise assegura que todas tenham o mesmo peso na análise, ou seja, permite uma comparação justa entre os efeitos, uma vez que seria um despropósito comparar uma rodovia por meio de cinco variáveis enquanto uma outra é avaliada por um número maior de variáveis.

Neste trabalho optou-se por seguir com somente duas variáveis, IRI e deflexão. A compensação no número de variáveis também seria possível por se tratar de uma única variável excedente, já que quanto maior a diferença no número de variáveis, mais difícil se torna a compensação, especialmente se considerarmos que a compensação implica na exclusão de outras variáveis, conforme Figura 46 comparando a duas perspectivas distintas na seleção de variáveis.

Figura 46 - Equalização do número de variáveis em dois cenários distintos

A seleção das variáveis implica diretamente na segmentação homogênea para cada nível de análise. Neste trabalho, a segmentação homogênea considerou o volume de tráfego além das variáveis selecionadas para cada nível. Tal consideração se revelou importante em virtude da grande variação verificada ao longo das rodovias analisadas. Este elemento foi acrescentado à segmentação homogênea com o objetivo de diferenciar desempenhos e não no sentido de priorizar segmentos.

A segmentação homogênea para o nível de projeto foi realizada pelo mencionado método australiano, sem limitação de extensão mínima ou máxima. Para evitar segmentos muito curtos e pontuais, especialmente vinculados aos dados de trincamento, cujos lances de integração são de 20 metros. O procedimento para segmentação homogênea se utilizou da fixação dos seguintes limites (Figura 47):

- Limite superior = média + desvio padrão (recalculados para cada medida a ser incluída)
- Limite inferior = média – desvio padrão (recalculados para cada medida a ser incluída)
- Ocorrência de dado pontual discrepante = incluído no segmento (sem recálculo considerando o dado discrepante).

Figura 47 - Procedimento de segmentação homogênea

Conforme esperado, a segmentação homogênea para o nível de projeto resultaria em um número muito superior de segmentos em relação à segmentação para o nível de rede, caso ambas recebessem o mesmo procedimento. Contudo, neste trabalho a transição entre os dois níveis é realizada por meio de um procedimento distinto de segmentação homogênea para o nível de rede.

Supondo que em nível de rede as extensões dos segmentos, bem como sua identificação são elementos secundários, e no intuito de simplificar o tratamento de dados, o nível de rede é segmentado em classes de desempenho projetado, derivados inicialmente do nível de projeto preservados por todo período contemplado no nível de rede.

Assim, em nível de rede, foram definidas classes de desempenho com a combinação das variáveis selecionadas para este nível, incluindo o tráfego como variável, de modo que cada classe representa uma condição do pavimento nos termos das variáveis de desempenho, conforme ilustrado na Figura 48.

Figura 48 - Classes de desempenho para segmentação homogênea na etapa de análise em nível de rede

A segmentação de dados proposta para o nível de rede resultou no total de 16 classes. Por meio desta classificação se buscou diferenciar desempenhos de modo detalhado e coerente com o número de segmentos resultante da segmentação para o nível de projeto. É importante observar que os extremos devem contemplar os valores máximos assumidos como possíveis.

Naturalmente é possível utilizar a mesma segmentação homogênea do nível de projeto para o nível de rede. Rodovias com condições significativamente homogêneas em termos de desempenho são candidatas mais adequadas a segmentações continuadas entre os níveis de análise. Entretanto, cabe destacar que tais variações no procedimento de segmentação em nada interferem em relação aos conceitos técnicos aplicados. Este processo pode ser ajustado para atender a formatação requerida de relatório dos resultados, por exemplo.

4.4 Modelos de desempenho

Os modelos de desempenho utilizados em qualquer sistema de gerência de pavimentos exercem influência direta nos resultados. Projetar o desempenho futuro de um pavimento é uma tarefa complexa, que normalmente envolve um grande número de variáveis, incluindo a adoção de alguns critérios.

Os modelos de desempenho a serem utilizados no sistema de gerência de pavimentos deve estar associado obrigatoriamente às variáveis selecionadas, cabendo a diferenciação entre os níveis de rede e de projeto. Em nível de rede a associação entre as variáveis de desempenho e os modelos de desempenho é inequívoca. Em nível de projeto, no entanto, a projeção do desempenho depende de uma série de considerações, em relação às variáveis excedentes, que não estão contempladas no nível de rede.

O detalhamento de modelos de desempenho oriundos do nível de projeto pode representar complexidades não agregadoras às análises em nível de rede macro. O principal diferencial na integração do nível de projeto, no que se refere aos modelos de desempenho é a possibilidade da inclusão de modelos voltados ao desempenho estrutural, comumente restritos a este nível.

Apesar da adoção de conceitos dos níveis de projeto e de rede para desenvolvimento de modelos de desempenho, é importante ressaltar que neste trabalho tal desenvolvimento está orientado para o objetivo principal que é a condução de análises em nível de rede macro. Por esta razão, os conceitos dos níveis de projeto e de rede não são aplicados indistintamente.

No nível de projeto, a projeção de variáveis decorrentes de correlações ou de variáveis excedentes deve ser avaliada sob dois ângulos. Primeiro, a viabilidade da projeção de uma variável obtida por correlação, que normalmente implica na propagação de erros inerentes ao processo necessário para estabelecer tais correlações.

Em segundo lugar, para as variáveis excedentes é importante decidir sobre a sua projeção durante a construção do sistema de gerência de pavimento em nível de rede

macro. Isto porque é possível optar pela interrupção na utilização da variável excedente a partir do segundo ano, sendo naturalmente desnecessária sua projeção.

Por outro lado, quando se decide prosseguir com a utilização desta variável excedente por um período considerado como *período de projeto*, tal projeção se torna necessária. Cabe neste ponto, esclarecer o que é considerado período de projeto neste estudo.

O período inicial da análise, a qual está designada como etapa de nível de projeto, apresenta características muito particulares, conforme mencionado anteriormente, tanto no que se refere aos objetivos da etapa, quanto no que se refere aos dados associados e procedimentos para tratamento.

Levando-se em consideração que em nível de projeto o procedimento para determinação das necessidades de cada condição está baseado em um conjunto de informações mais detalhado, também é decorrente que a solução proposta seja mais eficiente. Assim, a projeção do desempenho das intervenções baseadas nestas informações apresenta maior confiabilidade, não pelas características dos modelos de desempenho, mas sim pelo procedimento de definição de soluções.

Os modelos de desempenho propostos nesta etapa devem estar, por sua vez, baseados no desempenho histórico, e também comparados com métodos de dimensionamento de restaurações e/ou projetos. Tal comparação é um elemento adicional de calibração dos modelos (Figura 49). Significa que um modelo de desempenho desenvolvido a partir de dados históricos não pode ser significativamente diferente dos resultados de um dimensionamento de restauração que esteja baseado nas mesmas informações acerca das condições do pavimento.

Figura 49 - Comparação entre método de dimensionamento e modelo de desempenho

Assim, durante o chamado período de projeto, associado ao prazo de durabilidade definido por método de dimensionamento de restauração, é possível proceder com a projeção de desempenho de variáveis excedentes, contribuindo para a maior assertividade dos resultados das análises. A decisão sobre a projeção de variáveis excedentes depende de uma ponderação entre (i) a complexidade no desenvolvimento de modelos para tais variáveis e eventual validade e (ii) sobre os incrementos qualitativos na determinação das condições dos pavimentos.

Também é possível desmembrar a utilização das variáveis excedentes de modo que elas possam ser utilizadas para definição das soluções, sem que sejam utilizadas no processo de tomada de decisão. Para tanto, é necessário desenvolver modelos específicos, que podem ser aplicados tanto em nível de projeto quanto em nível de rede.

Neste trabalho, a medida de trincamento como excedente não é projetada, em virtude da indisponibilidade de dados históricos, uma vez que tal medição se trata de uma inovação tecnológica recentemente adotada. É importante verificar a disponibilidade

de dados históricos para o desenvolvimento de modelos. As variáveis de desempenho projetadas aqui são deflexão e IRI.

Outro aspecto relevante em relação aos modelos de desempenho é a validade dos modelos desenvolvidos, ou seja, o período pelo qual ele deve ser utilizado. Evidente que cada tipo de intervenção terá um período de validade do modelo associado, contudo, é igualmente importante desenvolver um modelo de desempenho para ser aplicado quando os modelos associados às intervenções já não têm validade aceitável.

Os modelos devem ser aplicados para ambas as variáveis, pois as condições funcionais e estruturais traduzidas pelas medidas de IRI e de deflexão respectivamente, com frequência apresentam desempenhos distintos. Um segmento pode receber intervenção por apresentar defeitos funcionais, sem que as condições estruturais estejam afetadas.

Definidas as variáveis a serem projetadas, é necessário associá-las às intervenções propostas no procedimento. Assim, como etapa prévia são compostas matrizes de soluções a partir da qual se identificam todas as possibilidades de condições dos pavimentos e toda a variedade de serviços necessários para corrigir ou preservar os pavimentos.

O nível de projeto naturalmente requer maior adaptação das condições verificadas e das possíveis soluções empregadas. Além de uma matriz mais complexa para o nível de projeto, é necessário considerar soluções que atendam a todas as deficiências encontradas, seja de ordem funcional ou estrutural.

Entretanto, não se pode esquecer que o objetivo final é a análise em nível de rede, assim há que se restringir as soluções àquelas que efetivamente apresentam desempenho diferenciado, pois quanto maior o número de soluções, maior será o número de modelos.

Embora existam inúmeras combinações de soluções, muitas podem apresentar desempenhos similares, com variações coincidentes em uma única faixa de tolerância, por um período considerado razoável (Figura 50).

Figura 50 - Comparação de modelos de desempenho com características similares

Neste trabalho foram selecionadas soluções de natureza distintas, representativas para uma grande gama de soluções similares, e que fossem suficientes para corrigir ou prevenir defeitos em pavimentos em diversas condições (Tabela 17).

Tabela 17 - Soluções propostas para aplicação em matrizes de soluções

Tráfego (USACE)		Deflexão 10 ⁻² mm		IRI [m/km]		Solução proposta	
min	max	min	max	min	max		
≥1E+6	<1E+7	20,0	50,0	1,20	2,70	Conservação rotineira	Solução 1
≥1E+6	<1E+7	20,0	50,0	2,70	3,50	Microfresagem e Microrrevestimento	
≥1E+6	<1E+7	20,0	50,0	3,50	7,00	Microfresagem e Microrrevestimento	Solução 2
≥1E+6	<1E+7	50,0	65,0	1,20	2,70	Fresagem Funcional (5 cm - inlayer)	
≥1E+6	<1E+7	50,0	65,0	2,70	3,50	Fresagem Funcional (5 cm - inlayer)	Solução 3
≥1E+6	<1E+7	50,0	65,0	3,50	7,00	Fresagem Estrutural (15 cm - inlayer)	
≥1E+6	<1E+7	65,0	80,0	1,20	2,70	Fresagem Estrutural (15 cm - inlayer)	Solução 4
≥1E+6	<1E+7	65,0	80,0	2,70	3,50	Fresagem Estrutural (15 cm - inlayer)	
≥1E+6	<1E+7	65,0	80,0	3,50	7,00	Recuperação de base e revestimento	
≥1E+6	<1E+7	80,0	120,0	1,20	2,70	Recuperação de base e revestimento	Solução 5
≥1E+6	<1E+7	80,0	120,0	2,70	3,50	Recuperação de base e revestimento	
≥1E+6	<1E+7	80,0	120,0	3,50	7,00	Reconstrução integral	Solução 6

Conforme já mencionado, não faz parte do escopo deste trabalho discutir ou aprofundar o tema de desenvolvimento de modelos de desempenho. Todavia, foram desenvolvidos modelos de desempenho para este trabalho para deflexão (Figura 51) e IRI (Figura 52) como parâmetros de desempenho, associados às intervenções propostas e baseados em funções exponenciais, bem como foram determinados valores de reinício e período de validade.

Figura 51 - Modelos de desempenho desenvolvidos para o parâmetro de deflexão

Figura 52 - Modelos de desempenho desenvolvidos para o parâmetro de IRI

4.5 Definição de cenários

A estruturação de cenários para as análises em nível de rede macro devem cumprir dois critérios: (i) apresentar os resultados necessários para o processo de tomada de decisão e (ii) representar uma combinação de possibilidades realista para a comparação de estratégias. Para tanto é importante também considerar a estrutura sequencial do sistema em níveis, de projeto, de rede e de rede macro, mantendo os cenários alinhados com a disponibilidade cadenciada de dados.

No que se refere aos resultados necessários para o processo de tomada de decisão, é suficiente associar estes às variáveis de desempenho propostas. Neste trabalho, em que são utilizados os resultados de deflexão e de IRI, é lógica a inclusão destes como resultados dos cenários. Ainda apoiado na inclusão das variáveis de desempenho, é necessário que os resultados da simulação de cada cenário forneçam elementos para a sequência de simulações anuais, entre os quais se inclui: a solução proposta, a condição do pavimento após a proposição de uma determinada solução

com base na projeção por modelos de desempenho, o valor de reinício quando for o caso, bem como a indicação clara do modelo de desempenho utilizado (Tabela 18).

Tabela 18 - Sequência para simulações anuais

Classes de segmentação (IRI + Df)	Extensão total por classe de segmentação	Solução proposta	Df1 (reinício) [10 ⁻² mm]	IRI (reinício) [m/km]	Custo [kR\$/segm.]	Projeção Df1 (após 12m) [10 ⁻² mm]	Projeção IRI (após 12m) [m/km]	Modelo de desempenho
1,9 a 2,2 + 25 a 35	12	Conservação rotineira	30,0	2,10	60.000,00	32,0	2,30	Microfresagem e Microrrevestimento
1,9 a 2,2 + 35 a 45	21,1	Microfresagem e Microrrevestimento	37,0	1,70	1.367.280,00	28,1	1,80	Microfresagem e Microrrevestimento
1,9 a 2,2 + 45 a 55	5,3	Reforço estrutural	38,0	1,60	858.600,00	38,6	1,70	Reforço estrutural
1,9 a 2,2 + 55 a 65	7,5	Reforço estrutural	48,0	1,60	1.215.000,00	44,3	1,70	Reforço estrutural
2,2 a 2,5 + 25 a 35	6,8	Conservação rotineira	30,0	2,40	34.000,00	23,4	2,60	Conservação rotineira
2,2 a 2,5 + 35 a 45	9	Microfresagem e Microrrevestimento	37,0	2,00	583.200,00	28,1	2,10	Microfresagem e Microrrevestimento
2,2 a 2,5 + 45 a 55	18	Reforço estrutural	38,0	1,90	2.916.000,00	38,6	2,00	Reforço estrutural
2,2 a 2,5 + 55 a 65	18	Fresagem Estrutural (15 cm - inlayer)	30,0	1,60	9.720.000,00	44,3	1,65	Fresagem Estrutural (15 cm - inlayer)
2,5 a 2,8 + 25 a 35	21,6	Reforço estrutural	20,0	1,80	3.499.200,00	28,1	1,88	Reforço estrutural
2,5 a 2,8 + 35 a 45	6,4	Reforço estrutural	30,0	1,80	1.036.800,00	38,6	1,88	Reforço estrutural
2,5 a 2,8 + 45 a 55	6,3	Reforço estrutural	40,0	1,80	1.020.600,00	28,1	1,90	Reforço estrutural
2,5 a 2,8 + 55 a 65	11,9	Fresagem Estrutural (15 cm - inlayer)	30,0	1,60	6.426.000,00	38,6	1,65	Fresagem Estrutural (15 cm - inlayer)
2,8 a 3,1 + 25 a 35	28,2	Reforço estrutural	20,0	2,00	4.568.400,00	44,3	2,10	Reforço estrutural
2,8 a 3,1 + 35 a 45	21,4	Reforço estrutural	30,0	2,00	3.466.800,00	23,4	2,12	Reforço estrutural
2,8 a 3,1 + 45 a 55	14,4	Fresagem Estrutural (15 cm - inlayer)	20,0	1,60	7.776.000,00	38,6	1,66	Fresagem Estrutural (15 cm - inlayer)
2,8 a 3,1 + 55 a 65	2,1	Recuperação de base e revestimento	20,0	1,50	2.041.200,00	44,3	1,55	Recuperação de base e revestimento
			0%	0%	3.534.880,00	26%	3%	

Os dados necessários para a sequência analítica podem ser os mais completos possíveis, derivados das variáveis de desempenho, mesmo que nem todos os resultados dos cenários sejam inseridos na etapa de tomada de decisão. Portanto, valores decorrentes das estratégias assim como relações de atendimento contratuais entre outros podem ser apresentados como resultados das simulações de cenários.

A confecção de cenários, como representação de estratégias deve estar primeiramente alinhada com as políticas estratégicas da instituição e em coerência com as ações abrangidas no escopo de trabalho da instituição. Por certo, as estratégias devem ter em perspectiva as obrigações contratuais e os riscos decorrentes do cumprimento e do descumprimento dos parâmetros de contrato.

Como orientação para a elaboração de cenários é interessante identificar diferenças visíveis entre os cenários, que reflitam estratégias consistentemente distintas as quais permitam comparar abordagens agressivas, como corrigir parcialmente as deficiências por medidas paliativas, e abordagens conservadoras, como promover reconstruções inclusive em segmentos em condições intermediárias de desempenho. Entre cenários com abordagens extremas, é conveniente inserir cenários que reflitam políticas de atuação comuns de atuação preventiva e de atuação corretiva, e que estejam associadas as políticas de investimento financeiro.

Para a elaboração de cenários é essencial definir classificações adicionais qualitativas às condições dos pavimentos. A classificação das condições é uma medida auxiliar (Tabela 19), que pode funcionar como elemento adicional para a comparação de cenários, isso porque os limites para tais classificações podem ser alterados sempre e quando se mostrar relevante às análises. Tendo todos estes elementos em conta, os cenários elaborados para este estudo contemplam as combinações estratégicas apresentadas na Tabela 20.

Tabela 19 - Classificação das condições dos pavimentos

Classificação do segmento		Condição do segmento	
		IRI	Deflexão
Rodovia A Rodovia C	Deficiente - limites contratuais	$\leq 2,5$ [m/km]	≤ 50 [10^{-2} mm]
	Deficiente - limites preventivos	$\leq 2,3$ [m/km]	≤ 45 [10^{-2} mm]
	Regulares	$\leq 2,3$ [m/km]	≤ 45 [10^{-2} mm]
	Ruins/ Péssimos	$\geq 2,7$ [m/km]	≤ 65 [10^{-2} mm]
Rodovia B	Deficiente - limites contratuais	$\leq 2,7$ [m/km]	≤ 60 [10^{-2} mm]
	Deficiente - limites preventivos	$\leq 2,5$ [m/km]	≤ 50 [10^{-2} mm]
	Regulares	$\leq 2,5$ [m/km]	≤ 50 [10^{-2} mm]
	Ruins/ Péssimos	$\geq 2,9$ [m/km]	≤ 75 [10^{-2} mm]

Tabela 20 - Combinações entre os gatilhos de intervenções e as políticas de atuação

	Segmentos para atuação	Gatilho de intervenção	Matriz de soluções
Cenário 1	Todos os deficientes em relação ao gatilho	Limites contratuais	Cumprimento de parâmetros
Cenário 2	Todos os deficientes em relação ao gatilho	Limites preventivos estabelecidos para gestão interna	Correção definitiva
Cenário 3	Ruins/ Péssimos	Limites contratuais	Cumprimento de parâmetros
Cenário 4	Ruins/ Péssimos	Limites preventivos estabelecidos para gestão interna	Correção definitiva
Cenário 5	Regulares	Limites preventivos estabelecidos para gestão interna	Correção definitiva
Cenário 6	Ruins/ Péssimos	Limites contratuais	Cumprimento de parâmetros
	Regulares	Limites preventivos estabelecidos para gestão interna	Correção definitiva
Cenário 7	Ruins/ Péssimos	Limites preventivos estabelecidos para gestão interna	Correção definitiva
	Regulares	Limites contratuais	Cumprimento de parâmetros
Cenário 8	Todos os deficientes em relação ao gatilho	Limites preventivos estabelecidos para gestão interna	Cumprimento de parâmetros

4.6 Matriz de riscos

O estudo acerca dos riscos para a gestão de pavimentos é um dos elementos centrais das análises conduzidas neste estudo, isto porque a identificação e o decorrente manejo de riscos influenciam desde a formulação dos problemas até a decisão final por estratégias de atuação.

As matrizes de riscos orientam a alocação dos riscos em cada nível de análise do projeto, isto significa que um projeto de concessão de rodovias pode ser dividido em distintos níveis, desde os mais impactantes do ponto de vista estratégico da organização, aos mais detalhados e técnicos com impactos operacionais mais destacados. Reconhecer a interação entre os diversos níveis de uma instituição permite alocar os riscos internamente de modo mais eficiente (Figura 53).

Figura 53 - Interação entre os diversos níveis da instituição em relação aos riscos

Neste estudo, evidentemente foram considerados os riscos que possam afetar ou que possam serem afetados pelas estratégias para intervenção em pavimentos, em qual nível de uma companhia administradora de rodovias sob concessão. O elemento mais destacado para a construção da matriz de riscos deste estudo é a combinação dos efeitos de rodovias distintas em análise conjugada.

As relações contratuais têm um peso importante, na formulação das matrizes de riscos, uma vez que interferem nos procedimentos para o cumprimento contratual e que o descumprimento contratual por sua vez ameaça o acordo de concessão.

A formulação de matriz de risco orienta também a priorização no tratamento dos riscos, a partir da identificação do peso efetivo de cada risco. Para tanto a análise foi dividida em duas etapas interconectadas, sendo que na primeira etapa é realizada uma análise qualitativa das informações disponíveis, incluindo todos os aspectos concernentes em uma ordem lógica de dependência, enquanto a segunda etapa compreende uma análise quantitativa sobre os riscos identificados como prioritários na primeira etapa. A Figura 54 apresenta os resultados destas considerações.

Riscos financeiros - Penalização por descumprimento contratual			
	IRI	Deflexão	Área trincada
Parâmetro de desempenho/ Limite contratual	Limite razoável	Limite não razoável (difícil cumprimento)	Limite razoável
Condição atual e histórica	Condição ruim	Condição ruim	Condição regular
Extensão estimada em descumprimento	Média	Alta	Baixa
Mecanismos de medição/ Atuação da agência	Fácil verificação/ Atuação facilitada	Difícil verificação/ Atuação limitada	Fácil verificação/ Atuação facilitada
Custo de penalização	Elevado/ não proporcional	Elevado/ não proporcional	Baixo/ proporcional
Indicadores qualitativos de ocorrência de riscos			
Probabilidade de ocorrência	Extremo (16 a 25)	Provável (11 a 15)	Possível (7 a 10)
Impacto possível	3 - Moderado	4 - Maior	2 - Menor
Classificação do risco	Provável	Extremo	Improvável

Figura 54 – Procedimento de análise qualitativa de riscos

A análise quantitativa pode ser considerada como um refinamento da priorização de riscos. Este tipo de análise, com objetivos voltados para a gestão de pavimentos tem ainda o benefício adicional de direcionar a incorporação ou não de variáveis adicionais no procedimento, ou seja, as variáveis inseridas nas análises em nível de rede macro exercem impactos previamente reconhecidos na seleção de estratégias para intervenções.

É interessante observar que os riscos avaliados individualmente para cada rodovia diferem de uma avaliação composta para uma rede de rodovias, pois considera a interação entre as rodovias com impactos que devem ser considerados. Esse conceito é aplicável para qualquer rede administrada em conjunto, por instituições privadas ou públicas.

Neste trabalho, cujo objetivo principal é apresentar o procedimento de análise integrado para uma rede de rodovias administradas para atender a parâmetros individuais, o principal risco identificado é financeiro, com implicações nas estratégias de intervenções em todas as vias. Riscos financeiros podem incluir diversas fontes como custos de financiamento, variação na demanda de tráfego que afeta a receita, ocorrência de passivos construtivos requerendo maiores investimentos, dentre outros. O caso avaliado neste trabalho considera os riscos decorrentes de penalizações por descumprimentos contratuais.

A retroalimentação nas análises de risco figura como etapa final em um ciclo reconhecidamente iterativo, sendo oportuno posicionar os dados de cada análise em panoramas mais completos de riscos, de modo que possam servir em distintos níveis na administração de rodovias. Análises lógicas e consistentes de riscos e o decorrente manejo fundamentado na utilização de ferramentas específicas, como sistemas de gerência de pavimentos, são por exemplo, de grande auxílio na demonstração da capacidade técnica e administrativa das instituições. A comprovação da capacidade de gestão e de distribuição assertiva de recursos pode ser utilizada por exemplo para a obtenção facilitada de financiamento.

4.7 Definição de variáveis analíticas

A definição sobre quais variáveis analíticas serão incorporadas ao procedimento de análise em nível de rede macro está em verdade associada a duas etapas anteriores: (i) definição de variáveis de desempenho e resultados decorrentes e (ii) análise de riscos.

As variáveis analíticas definidas neste trabalho a partir da composição de cenários e devidas variáveis de desempenho são apresentadas na Figura 55. Tais variáveis são

o objeto de seleção em virtude dos impactos globais em termos de cumprimento contratual e em termos de comprometimento de investimento.

Figura 55 - Variáveis analíticas derivadas das variáveis de desempenho

As variáveis analíticas não diretamente relacionadas aos cenários estão relacionadas à composição de matrizes de riscos. Derivados da etapa prévia de avaliação de riscos, diversos riscos podem ser considerados para integrar as análises em nível de rede macro.

Neste sentido, e conforme mencionado anteriormente, é possível conduzir um estudo de sensibilidade paralelo para auxiliar na determinação da influência de cada risco na seleção de estratégias para intervenções. A experiência dos técnicos envolvidos também pode auxiliar para a filtrar os riscos mais efetivos. É mandatório que as variáveis analíticas tenham efeito real e mensurável na seleção de estratégias sob o castigo de incorrer em resultados de pouco significado.

Para este trabalho, os aspectos financeiros são considerados centrais, de modo que seja mantido o equilíbrio econômico durante os diferentes períodos de concessão das rodovias avaliadas, assegurado o cumprimento dos parâmetros contratuais.

Assim, o valor total do investimento é uma variável analítica, composta com o valor individual de cada cenário e com os possíveis custos decorrentes de penalizações contratuais por descumprimento dos parâmetros de desempenho, conforme apresentado na Figura 56.

Figura 56 – Resultado de variável analítica composta

Esta variável é o principal elemento de ligação entre as rodovias analisadas, pois agrega os dados de toda a análise enquanto permite a comparação individual com cada cenário. Neste caso, a seleção de uma variável analítica composta requer naturalmente um procedimento adicional para determinação da parte correspondente ao risco de penalizações.

As variáveis analíticas são de grande importância para as análises, assim, convém considerar estudos específicos para a formulação de variáveis combinadas quando houver grande disponibilidade de informações. Pode ser especialmente indicado para os casos em que houver diferenças significativas no número de variáveis de desempenho contratuais entre rodovias distintas.

A seleção de variáveis analíticas não está condicionada à realização de procedimentos adicionais ou tampouco aos riscos identificados na etapa anterior, contudo é importante estabelecer relações entre os fatores de influência na definição de estratégias de modo que as análises sejam conduzidas com a perspectiva mais ampla do negócio, considerando implicações de curto, médio e longo prazos.

4.8 Análise probabilística de riscos

Os riscos identificados em análise prévia e selecionados para integrar as análises em nível de rede macro na etapa de tomada de decisão são inseridos no procedimento como variáveis analíticas. Tais variáveis podem assumir os resultados de uma possibilidade de ocorrência de riscos ou podem ser uma combinação deste tipo de probabilidade com outros elementos.

Neste trabalho, o risco de penalizações por descumprimento de parâmetros de desempenho contratuais tido como significativo, requerendo avaliações específicas que possam indicar as probabilidades de ocorrência deste tipo de risco. Assim, conforme proposto, o procedimento de análise de pavimentos em nível de rede macro, é composto também pela etapa de análise probabilística de riscos.

O risco de descumprimento é obtido a partir da possibilidade de uma função que considera o percentual de descumprimento de cada variável de desempenho; neste estudo, adotadas como variáveis de desempenho o IRI e a Deflexão, são definidos valores mínimo e máximos para tais descumprimentos, conforme apresentado na Tabela 21. Considera-se para o estudo que as variáveis têm o mesmo peso na função.

Tabela 21 - Limites para a simulação de dados aleatórios para análise de probabilidades

	Variáveis	Variação	
		Mínimo (%)	Máximo (%)
Rodovia A	Percentual de descumprimento de IRI	0,00	25,00
	Percentual de descumprimento de Deflexão	0,00	10,00
Rodovia B	Percentual de descumprimento de IRI	1,00	15,00
	Percentual de descumprimento de Deflexão	1,00	5,00
Rodovia C	Percentual de descumprimento de IRI	5,00	25,00
	Percentual de descumprimento de Deflexão	2,00	15,00

A partir dos limites das variações, são geradas para cada variável, resultados aleatórios possíveis a partir dos quais é gerada a função que representa o risco. A distribuição dos resultados apresentados na Figura 57 indicam as probabilidades de ocorrência do risco em análise. Neste caso, adotada a confiabilidade de 10% se observa a possibilidade de 15%, 10% e 18% de ocorrência de penalizações por descumprimento contratual, respectivamente para as Rodovias A, B e C para o primeiro ano de análise. Os dados podem ser variados para cada ano da análise, conforme se observarem alterações nas tendências de penalização e nas condições dos pavimentos, para o exemplo apresentado.

Figura 57 - Resultados da simulação pelo método de Monte Carlo

O resultado da probabilidade de ocorrência é aplicado como variável analítica associada a cada cenário de análise, e correlacionado com a extensão de rodovia sob descumprimento dos parâmetros de desempenho. Cabe mencionar que apesar da utilização de uma função para a definição do risco, os dados de cada variável de desempenho podem ser avaliados individualmente e posteriormente associados à extensão de descumprimento de cada variável, nos cenários de análise (Tabela 22).

Tabela 22 - Relação entre os resultados de probabilidades e as variáveis de desempenho para indicação da variável analítica

Variáveis		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
Rodovia A	Probabilidade de penalização	15%							
	IRI (% descumprimento)	7%	1%	16%	12%	11%	9%	10%	8%
	Extensão de descumprimento sob penalização	2,205	0,315	5,04	3,78	3,465	2,835	3,15	2,52
Rodovia B	Probabilidade de penalização	10%							
	IRI (% descumprimento)	7%	1%	17%	12%	12%	10%	11%	8%
	Extensão de descumprimento sob penalização	1,015	0,0725	2,3925	1,74	1,6675	1,3775	1,5225	1,16
Rodovia C	Probabilidade de penalização	18%							
	IRI (% descumprimento)	9%	2%	19%	14%	14%	12%	13%	10%
	Extensão de descumprimento sob penalização (km)	5,67	1,26	11,97	8,82	8,82	7,56	8,19	6,3

4.9 Tomada de decisão

O processo de tomada de decisão dentro do sistema de gerência de pavimentos pode se valer de inúmeras ferramentas disponíveis com o propósito de propiciar lógica e metodologia. Neste trabalho, a ferramenta AHP foi selecionada para integrar o procedimento de análise em nível de rede macro.

A utilização da referida ferramenta está alinhada com a construção do procedimento e devidas definições conceituais. Esta etapa representa a conjugação de todos os elementos estabelecidos durante o processo, de modo que os resultados de cada etapa estão naturalmente relacionados à metodologia de análise por meio de AHP. A principal motivação para a utilização deste método é a relação dependente do julgamento dos técnicos envolvidos nas análises.

A aplicação do método AHP se baseia na definição da relação de importância entre as variáveis selecionadas. Neste ponto, convém destacar que apesar de requerida a diferenciação entre as variáveis, as relações entre estas são limitadas, em função das limitações do método, o que implica em relativo controle sobre o julgamento técnico, sendo impedidas disparidades nas relações. A Tabela 23 representa a relação definida entre as variáveis selecionadas para os cenários compostos. A tabela apresenta ainda a composição da estrutura para AHP para cada ano de cada rodovia.

Tabela 23 - Variáveis avaliadas por meio da ferramenta AHP

Variáveis analíticas	Custo por cenário	IRI (descumprimento contratual)	DF (descumprimento contratual)	IRI (condição excelente)	DF (condição excelente)	Extensão IRI	Extensão DF	Valor total
Custo por cenário	1,00	3,00	0,50	5,00	4,00	7,00	6,00	2,00
IRI (descumprimento contratual)	0,33	1,00	0,25	3,00	2,00	5,00	4,00	0,50
DF (descumprimento contratual)	2,00	4,00	1,00	6,00	0,20	8,00	7,00	3,00
IRI (condição excelente)	0,20	0,33	0,17	1,00	0,50	3,00	2,00	0,25
DF (condição excelente)	0,25	0,50	0,20	2,00	1,00	4,00	3,00	0,33
Extensão IRI	0,14	0,20	0,13	0,33	0,25	1,00	0,50	0,17
Extensão DF	0,17	0,25	0,14	0,50	0,33	2,00	1,00	0,20
Valor total	0,50	2,00	0,33	4,00	3,00	6,00	5,00	1,00

Tabela 24 – Resultado da análise pelo método AHP

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7
Custo por cenário	12.191.419,44	19.256.295,60	6.317.826,48	7.957.458,72	1.624.392,00	6.317.826,48	1.101.888,00
IRI (descumprimento contratual)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	16,00%	12,00%	0,00%
DF (descumprimento contratual)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	9,00%	17,00%	0,00%
IRI (condição excelente)	35,00%	16,00%	48,00%	9,00%	27,00%	9,00%	12,00%
DF (condição excelente)	28,00%	11,00%	43,00%	5,00%	25,00%	5,00%	9,00%
Projeção IRI	6,00%	12,00%	1,50%	26,00%	18,00%	28,00%	14,00%
Projeção DF	4,00%	10,00%	0,50%	3,00%	10,00%	26,00%	7,00%
Valor total VTC	50.996.677,61	58.061.553,77	45.123.084,65	46.762.716,89	40.429.650,17	45.123.084,65	39.907.146,17
Percentual para seleção (resultado AHP)	21,6	8,6	17,3	14,9	7,5	6,1	11,5
<i>Seleção: maior probabilidade de atendimento ao requisitos postulados na análise</i>							

Por meio deste procedimento é possível definir um ranking entre as estratégias analisadas (Tabela 24). O método apresenta a ponderação entre a importância de cada variável e seus respectivos resultados individuais. O método se assemelha ao processo racional de tomada de decisão, no entanto oferece uma base matemática para indicar os resultados com base nas relações estabelecidas previamente.

4.10 Análise de sensibilidade

O estudo de caso apresentado neste trabalho para ilustrar a construção do procedimento para análise em nível de rede macro revelou uma série de definições

para a efetiva condução da análise. Dentre os diversos elementos, premissas e limites estabelecidos, é possível observar que algumas variações podem levar a resultados significativamente distintos.

Para tais elementos, premissas ou limites, a realização de análises de sensibilidade pode incrementar significativamente a confiabilidade dos resultados obtidos. Além dos aspectos individuais, as análises de sensibilidade se aplicam também ao procedimento como um todo.

No que se refere aos aspectos individuais, neste trabalho foram conduzidas análises de sensibilidade a seguir relacionadas:

- Segmentação homogênea para o nível de rede, com variação no número de classes resultantes da combinação entre as variáveis, sendo que o resultado indicou que a delimitação de classes deve indicar comportamentos distintos entre as classes.
- Gatilhos de intervenção adotados para a classificação dos segmentos, com variação nos valores limites para as classes, cujos resultados indicaram que as classes de desempenho devem se distribuir de forma homogênea ao longo de toda a variação possível, evitando agrupar as classificações aos comportamentos extremos.
- Matrizes de soluções para intervenções seguem os mesmos princípios dos gatilhos de intervenções, sendo neste caso, relacionados às soluções propostas, por meio das quais é possível identificar classes com desempenho idêntico. Vale destacar no entanto, que também é importante associar as classes das matrizes de soluções aos modelos de desempenho.
- Riscos avaliados pelo Método de Monte Carlo a partir da variação dos limites propostos para cada variável. Além disso, foram variados os números de amostras para identificar as alterações na confiabilidade das análises, resultando da conhecida informação de que o maior número de simulações resulta na maior confiabilidade, apesar de que a partir de um determinado

número de simulações, a confiabilidade não aumenta. O teste é indicado para cada variável em análise.

Em relação à análise de sensibilidade do procedimento todo, os estudos foram conduzidos com o objetivo de se verificar alterações nos resultados decorrentes das variações nas características físicas das rodovias sob análise. Os resultados mostraram que o sistema é sensível a variações desta natureza, especialmente em relação às variações associadas as variáveis de desempenho.

Para este tipo de análise de sensibilidade é importante observar que os elementos devem ser variados em coerência com as variáveis analíticas que integram a etapa final do procedimento.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são discutidos os resultados do estudo de caso apresentado, bem como são comentados alguns dos conceitos expostos na revisão bibliográfica apresentada no capítulo dois deste trabalho e conceitos sobre o modelo proposto, apresentados no capítulo três e simulações do estudo de caso apresentados no capítulo 4.

5.1 Conclusões

O objetivo central deste trabalho é apresentar um procedimento de análise para a gestão de pavimentos que contemple um maior número de aspectos que tenham influência na seleção de estratégias de intervenções, servindo-se dos reconhecidos níveis de projeto e de rede em sistemas de gerência de pavimentos.

Com frequência, a manutenção de pavimentos de rodovias existentes representa um desafio que envolve riscos de diversas naturezas e com impactos em inúmeros aspectos, alguns dos quais foram sistematicamente relegados a segundo plano no passado. A combinação entre análises em nível de projeto e em nível de rede e ainda análises de riscos é denominada neste trabalho como macro análise ou nível de rede macro; tal nível de análise pode auxiliar instituições na administração mais eficiente de rodovias, considerando riscos inerentes que muitas vezes afetam significativamente os resultados.

A demanda por uma administração mais eficiente vem se tornando mais evidente com a participação da iniciativa privada na administração de rodovias públicas concedidas por meio de contrato restritivos e específicos, nos quais se verifica frequentemente um elevado nível de exigência em relação à qualidade dos serviços relacionados.

Não obstante, as instituições públicas também vêm sendo requeridas a elevar a qualidade das rodovias que administram. As pressões são exercidas pela sociedade mais exigente, especialmente em aspectos relacionados à segurança e conforto ao rolamento, enquanto os aspectos financeiros são atravessados por diversas áreas da economia, afetadas pelos custos de transporte. Somam-se ainda as pressões

orçamentárias dos estados, com demandas variadas e prioritárias, disputando os recursos disponíveis.

A presença da iniciativa privada tem notadamente adicionado valor ao setor, com a utilização de ferramentas para incrementar a eficiência, controlando os riscos e cumprindo os requisitos contratuais. Neste sentido é importante mencionar que os sistemas de gerência de pavimentos, consideram diversos ciclos de vida dos pavimentos na tentativa de garantir o cumprimento de parâmetros de contrato. Contudo, o que se verifica com frequência é a omissão em contratos sobre a consideração sobre ciclos de vida dos pavimentos e suas devidas implicações.

Cabe neste ponto mencionar que os requisitos contratuais fixados têm o objetivo de estabelecer condições adequadas para as rodovias, limitando os custos dos usuários a valores aceitáveis, ao mesmo tempo em que são preservadas as características físicas dos ativos. Assim, é natural concluir que os requisitos contratuais devem estar apropriados à economia efetiva propiciada aos usuários, não sendo coerente a definição de parâmetros em limites excessivos, que aumentam significativamente os custos de manutenção sem trazer benefícios proporcionais. Como sugestão, pode ser avaliada como solução viável para definição de parâmetros de desempenho, a utilização de requisitos ajustáveis aos ciclos de vida.

- **Análises de riscos:**

A inclusão da análise de riscos no processo de seleção de estratégias supre uma necessidade identificada por muitos autores que debatem o uso dos sistemas de gerência de pavimentos. Os riscos incluídos nas análises em nível de rede macro naturalmente são avaliados sob a perspectiva do administrador das rodovias, seja público ou privado. Além disso, cabe destacar que a avaliação prévia dos riscos permite a identificação clara daqueles que efetivamente têm impactos na seleção de estratégias de intervenções.

O procedimento apresentado permite a inclusão de riscos de diversas naturezas, como financeiros, sociais e ambientais. Cabe aos gestores a identificação dos riscos

e o devido manejo de tais riscos, sendo que os riscos retidos pelo administrador podem integrar as análises em nível de rede macro.

As análises de risco apresentadas neste trabalho foram conduzidas com a utilização de ferramenta matemática específica para o cálculo de probabilidades, por meio da simulação em larga escala para as variáveis selecionadas. O Método de Monte Carlo, amplamente difundido em diversas áreas, se mostrou adequado aos propósitos da análise de riscos, fornecendo resultados consistentes em faixas de tolerância coerentes com os limites definidos. Convém pontuar que existem diversas ferramentas para cumprir esta finalidade e que análises de sensibilidade podem auxiliar na seleção da ferramenta mais apropriada a cada caso.

A construção do procedimento mostrou também que é importante que a ferramenta selecionada para a análise de riscos esteja alinhada com os requisitos para as análises no sistema de gerência, fornecendo dados que permitam a condução de avaliações sobre os resultados para os riscos considerados.

- **Procedimento de análise:**

No que se refere à construção do procedimento, é necessário observar os benefícios obtidos a partir da utilização dos conceitos de análises em nível de projeto. Esta estruturação inicial é fundamental para reduzir os erros e propagação ou perpetuação dos erros ou mal julgamentos. Cabe destacar que a complexidade dos modelos de desempenho no nível de projeto não é o mais relevante elemento, enquanto que o detalhamento de levantamentos, e a inclusão detalhada de condições estruturais, comumente restritas ao nível de projeto, eleva consideravelmente a validade das análises nos demais níveis.

Entretanto é necessário assinalar a possibilidade de que o bem vindo detalhamento inicial pode se perder caso os pavimentos com deficiências identificadas não recebam intervenções devidas nos primeiros anos do período de análise. Isso porque com a redução do nível de detalhamento a partir do segundo ano, as condições dos pavimentos podem ser subjugadas quando avaliadas por um número menor de variáveis de desempenho.

Como solução para tal condição pode-se definir estratégias como “worst first” de modo a garantir que os segmentos deficientes recebam as devidas intervenções corretivas nos primeiros anos das análises. É possível ainda, manter apontadas as necessidades mínimas de intervenção para tais segmentos como orientação para as simulações dos anos seguintes.

Ainda em relação à estruturação do procedimento de análise é oportuno mencionar que a definição dos cenários é fundamental para que os resultados estejam alinhados com as políticas dos administradores. Os cenários traduzem as possibilidades de atuação que a administração aceita pôr em prática para atender os requisitos contratuais ou expectativas.

A segmentação homogênea em duas etapas, como parte do procedimento, vinculadas ao nível de projeto e ao nível de rede revelou, respectivamente, os benefícios na orientação de intervenções em curto prazo e os incrementos na qualidade eficiência no tratamento do volume de dados, resultando em um procedimento com faixas de incertezas menores.

No que se refere aos requisitos contratuais, os parâmetros de desempenho devem ser criteriosamente avaliados para integrar o sistema de gerência de pavimentos, de modo a permitir a identificação dos investimentos necessários para o cumprimento de contrato e sua verificação.

A adoção de variáveis de desempenho obtidas por correlação deve ser realizada com cautela, especialmente em relação à projeção de desempenho futuro para tais variáveis. Estas variáveis são utilizadas com maior segurança nas análises quando adotadas exclusivamente no primeiro ciclo de vida avaliado.

Os conceitos apresentados na revisão bibliográfica mostraram também que a seleção de variáveis obtidas por medidas diretas sobre o desempenho dos pavimentos é mais indicada, pois além de permitir a associação às condições das rodovias a qualquer tempo, também possibilitam a construção de uma base de dados apropriada para o desenvolvimento de modelos de desempenho.

O desenvolvimento de modelos de desempenho, elemento crucial para os sistemas de gerência de pavimentos é igualmente importante para este nível de análise. As projeções devem estar associadas às variáveis de desempenho selecionadas e aos diferentes tipos de intervenções propostas. Também é importante desenvolver modelos associados a uma deterioração genérica, desassociada de intervenções, a qual é utilizada sempre que o histórico de intervenções de um segmento é desconhecido ou quando os modelos associados às intervenções alcançaram o período de validade, período no qual os modelos apresentam confiabilidade adequada.

A adoção de variáveis adicionais na etapa proposta como nível de projeto do procedimento implica naturalmente no desenvolvimento de modelos específicos a serem utilizados somente durante o primeiro ciclo do período de análise.

A retroalimentação do sistema afeta a calibração dos modelos de desempenho, sendo altamente recomendável, em frequência compatível com as monitorações das condições dos pavimentos. Além disso, é interessante verificar a qualidade das intervenções executadas, no sentido de que os modelos de desempenho possam refletir soluções adequadamente executadas. É evidente que muitas são as variáveis executivas e que rastrear cada aspecto pode inviabilizar a atualização dos modelos, contudo é importante garantir que a qualidade das intervenções está sendo cumpridas, dentro de limites exequíveis razoáveis.

A retroalimentação do sistema também deve considerar os aspectos relativos aos riscos incorporados às análises em nível de rede macro. Embora a avaliação dos riscos seja paralela, os efeitos nos resultados são contundentes, requerendo portanto uma análise cíclica e continuada, tal como são realizadas para a calibração de modelos de desempenho. Assim, um risco que não se cumpre pode ter seus critérios para cálculo de probabilidades alterados.

Como etapa final no ciclo de retroalimentação do sistema, podem ser verificados os aspectos relativos à seleção de estratégias, associando os recursos utilizados às condições alcançadas e suas relações com os riscos considerados.

Ainda no que se refere à seleção de variáveis é importante destacar que o mesmo número de variáveis mantido para a análise conjugada das rodovias tem influência sobre os resultados, permitindo uma comparação justa e equivalente. Além disso, referências bibliográficas sugerem que é necessário limitar o número de variáveis ao razoável, em razão das dificuldades humanas na percepção de diferenças para um elevado número de variáveis em comparação simultânea.

O maior esforço em relação às variáveis no entanto deve estar voltado para a seleção de variáveis de conexão entre as rodovias, sendo que este elemento se revelou como sendo fundamental para a comparação entre rodovias distintas. Embora os custos sejam fonte de uma preocupação recorrente, outras variáveis podem figurar como elemento de ligação entre as rodovias analisadas, especialmente aquelas relacionadas a riscos significativos e comuns às rodovias sob análise.

- **Estudo de caso:**

Mesmo que o objetivo deste trabalho seja apresentar um procedimento para a condução de análises em nível de rede macro, o estudo de caso realizado fornece também algumas conclusões adicionais, além das correspondências com o procedimento por si.

O estudo de caso revela que quanto maior a capacidade de suporte das estruturas de pavimentos, menor o agravamento dos defeitos, inclusive de natureza funcional, afetando todos os ciclos de vida posteriores; em especial para rodovias altamente solicitadas por veículos comerciais. No mesmo sentido, a atuação preventiva se reflete em benefícios financeiros, não apenas pela redução na possibilidade de penalizações por descumprimentos de parâmetros de desempenho, mas também pela ampliação dos ciclos de vida.

Para a condução de análises em qualquer nível, é necessário adequar a importância de cada rodovia aos dados necessários para a condução das análises, de modo a se obter resultados consistentes. Quanto mais relevantes as rodovias se mostrarem, mais importante é a construção de uma base de dados apropriada, bem como a

elaboração de uma estrutura de análise que contemple políticas, estratégias, riscos em amplitude igualmente apropriada.

5.2 Recomendações

O trabalho apresentado propõe uma abordagem mais ampla para a análise estratégias de intervenções em pavimentos mas reconhece a amplitude do assunto central, que merece ser estudado com profundidade e em detalhe. Como recomendações para estudos futuros, e com base em aspectos importantes identificados durante a realização deste trabalho, são mencionados os seguintes temas:

- A incorporação dos custos dos usuários nas análises estruturais e funcionais, permitindo a definição de parâmetros de desempenho mais adequados, para o investimento em manutenção proporcional às economias nos custos operacionais de usuários.
- Análises de longo prazo com considerações acerca de aspectos financeiros, como por exemplo Valor Presente Líquido, permitindo a definição de estratégias associadas também aos custos de financiamentos.
- Avaliações direcionadas à definição de variáveis vinculativas entre as rodovias sob análise simultânea, incluindo aspectos relacionados aos riscos que envolvem a gestão dos pavimentos.
- Condução de análises de riscos em distintos níveis da administração de rodovias, observando as relações indiretas de riscos com a seleção de estratégias para intervenções em pavimentos.
- Análises de sensibilidades para variação no detalhamento dos bancos de dados para os diferentes níveis considerados.
- Análises de sensibilidade do modelo proposto em relação a sistemas convencionais.

Referências Bibliográficas

AASHTO. American Association of state Highway and Transportation Officials. Guide for design of pavement structures. 1993.

AHMED, M. U.; TAREFDER, R. A.; ISLAM, M. R. □ Effect of cross -anisotropy of hma modulus on fwd deflections and embedded sensor stress-strain. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2013.

ALAM, J.; GALAL, K.A.; DIEFENDERFER, B.K. Statistical determination of minimum testing intervals and number of drop levels for network level falling weight deflectometer testing on virginia's interstate system. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2007.

ALAM, M. M. Creating pro-poor transport. Connections transport&ICT. World Bank. 2015

ALDRETE, R.; BUJANDA, A.; VALDEZ, G.A. Valuing public sector revenue risk exposure in transportation public-private partnerships. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2297, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2012.

AMADOR, L.; MRAWIRA, Z. Performance modeling for asset management: what to do when you only have two data points? Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2008.

ASHLEY, D. Uncertainty in the context of highway appraisal. Transportation Research, Vol. 9, Springer. 1980.

ASTM D 4695. American Society for Testing Materials. Standard guide for general pavement deflection measurements. 2008.

AUSTROADS – AP – R276/05. Consistency in approaches to road network segmentation and data aggregation – review of current practice. 2005.

BALLESTEROS, J.; VASSALLO, J.M. Performance-based indicators for pavements in public private artnerships: case study in Spain. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2012.

BAYAT, A.; AKBARZADEH, H.A.; SOLEYMANI, H.R. Investigation of temperature dependency of asphalt concrete using laboratory dynamic modulus and field deflection testing. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2011.

BENEVIDES, S. A. S. Modelos de desempenho de pavimentos asfálticos para um sistema de gestão de rodovias estaduais do Ceará. Tese de doutorado. COPPE UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006.

BERNUCCI, L. B. ET AL. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica Para Engenheiros. Rio De Janeiro: Petrobrás, Abeda, 2007.

BRYCE, J.; KATICH, S.; FLINTSCH, G.W.; FERNE, B. Analyzing repeatability of continuous deflectometer measurements. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2012.

BYRNE, M.; PARRY, T. An investigation into a generalised framework for pavement data asset management. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2010.

BOYER, E. Knowledge Management and Public-Private Partnerships (PPP): How state transportation agencies manage knowledge for designing and implementing PPPs. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2013.

CARVALHO, L.R.; MUSTAFA, E.; STUBSTAD, R.N.; SELEZNEVA, O.; BRIGGS, R.C. Procedure for optimum pavement deflection test spacings 1 for network-level applications. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2012.

CARY, C.E.; ZAPATA, C.E. Evaluating the utility of existing pavement management system state deflection data for use in the implementation of the MEPDG for Arizona. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2009.

CROOK, A.L.; MONTGOMERY, S.R.; GUTHRIE, W.S. Using falling-weight deflectometer data for network-level flexible pavement management. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2012

DECORLA-SOUZA et al. A new tool to understand value for money analysis 3 concepts in evaluating public-private partnership options. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2013.

DECORLA-SOUZA, P.; MAYER, J.; JETTE, A; BUXBAUM, J. Key considerations for states seeking to implement public-private partnerships for new highway capacity. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2013.

DER IP-DE-P00/003 - Departamento de estradas de rodagem Avaliação funcional e estrutural de pavimento. 2003

DIEFENDERFER, B.K.; APEAGYEI, A.K. Structural evaluation of full-depth reclamation trials in Virginia. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2010.

DNER PRO 273. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)". 1996.

DNIT IPR 745. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual De Gerência De Pavimentos. 2011.

DONOVAN, P.; TUTUMLUER, E. Use of falling weight deflectometer testing to determine relative damage in asphalt pavement unbound aggregate layers. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2009.

EPEC – European PPP expertise centre. the non-financial benefits of PPPs – A review of concepts and methodology. 2011.

EUROPEAN COMMISSION. Guidelines for successful public-private partnerships. Brussels, Belgium, Mar. 2003.

JAVED, F.; FWA, T.F. Pavement maintenance prioritization using analytic hierarchy process. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2009.

FHWA – Federal Highway Administration. Public-private partnership concessions for highway projects: a primer, disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/ipd/p3/resources/primer_highway_concessions_p3.htm>. Acesso em 12/11/2015.

FHWA – Federal Highway Administration. Guidebook for risk assessment in public private partnerships. 2013

FHWA – Federal Highway Administration. Public-private partnership oversight: how FHWA reviews P3s. 2015

FHWA – Federal Highway Administration. User guidebook on implementing public-private partnerships for transportation infrastructure projects in the United States. 2007

FLINTSCH, G. W.; WU, Z.; CHEN, C.; MEDINA, A. Incorporating sustainability considerations into the transportation asset management process. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2009.

FLINTSCH, G., AND K. K. MCGHEE. National Cooperative Highway Research Program – Nchrp. Synthesis 401: Quality management of pavement condition data collection. Publication 401. 2009

FONSECA, J.L.G. Um método de retroanálise de bacias de deflexão de pavimentos, Coppe – Ufrj, 2002, Rio De Janeiro.

FUJIAN, N.; LAN, Z.; JUNFENG, D.; MAOSHENG, Z. Evaluation parameter of asphalt pavement with semi-rigid base based on deflection basin. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2010.

GAO, L.; ZHANG, Z.; TIGHE, S.L. Using Markov process and method of moments for optimizing management strategies of pavement infrastructure. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2007.

GEDAFA, D.S.; HOSSAIN, M.; MILLER, R. Relationship between flexible pavement cracking and surface deflections. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2012.

GRANSBERG, D.D. Life cycle cost analysis of surface retexturing with shotblasting as an asphalt pavement preservation tool. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2009.

HAAS, R., HUDSON, W.R., ZANIEWSKI, J. Modern Pavement Management. Malabar, Florida. 1994.

HAIDER, S.W.; CHATTI, K.; BALADI, G.Y.; SIVANESWARAN, N. The impacts of pavement monitoring frequency on pavement management system decisions. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2011.

HCM. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board. 1950.

HDM 4. Highway Development and Management. Modelling Road Deterioration And Works Effects – Volume 6, Hdm 4 Documentation. 2005.

HM TREASURY. United Kingdom's HM Treasury Value for Money assessment guide. 2004

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, VA. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2013.

HUANG, Y.H. Pavement analysis and design. Second Edition. 2004.

HUANG, Y.H.; GAO, O. A mechanism design approach to modeling, implementing and evaluating improved investment public-private partnership in a multi-leader-multi-follower stackelberg game. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2014.

HUDAK, J.; FLINTSCH, G.W.; MCGHEE, K.K. Quality management of network-level pavement condition data collection: current methods and practices. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2009.

HUDSON, W.R., HAAS, R. & PEDIGO, R.D. – Pavement Management System Development. NCHRP Report 215 – Washington, Dc. Usa. 1997.

HUDSON, W.R., HAAS, R., UDDIN, W. Infrastructure management. 1997.

IAM. Disponível em: < <https://theiam.org/what-is-asset-management>>. Acesso em: 21/04/2016.

LEA, J. D. A bootstrapping procedure to determine convergence in Monte Carlo simulations. Transportation Record Board. National Research Council, Washington,

D.C. 2013.

JOLLEY, N.P.; GARVIN, M.J. Alternative technical concepts in transportation public private partnerships: assessment of and recommendations for the process. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2014

KIM, M.Y.; KIM, D.Y.; MURPHY, M.R. Improved method to evaluate the pavement structural number using fwd deflections. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2013.

KUMLAI, S.; SANGPETNGAM, B.; CHALERMPONG, S. Development of equations for determining layer elastic moduli using pavement deflection characteristics. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2014.

KUTAY, M.E.; CHATTI, K.; LEI, L. Backcalculation of dynamic modulus ($|E^*|$) mastercurve from fwd surface deflections. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2011.

LACHTERMACHER, G. Pesquisa operacional na tomada de decisões: para cursos de administração, economia e ciências contábeis. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2004.

LOPES, F.M. Pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico - avaliação estrutural a partir dos parâmetros de curvatura da bacia de deformação. Dissertação De Mestrado. UNICAMP - Universidade Estadual De Campinas, Faculdade De Engenharia Civil, Arquitetura E Urbanismo. 2012.

MAMLOUK, M.; ZAPATA, C.E. The need to carefully assess the use of state pms data for use in the MEPDG calibration process. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2010.

MARCON, A.F. Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha estadual de Santa Catarina. Tese De Doutorado. Instituto Tecnológico De Aeronáutica.

MARTINEZ, S.E.; HALL, A.; WALTON, M.C.; MOSEBAR, M. Public-private partnerships in the U.S. transportation sector: stakeholder perceptions. In: Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2013.

MCQUEEN, J.M. AND TIMM, D.H. Statistical analysis of automated versus manual pavement condition surveys. In: Transportation Research Record: Journal Of The Transportation Research Board, No. 1940, National Research Council, Washington, D.C., 2005.

MORALLOS, D.; AMEKUDZI, A.; ROSS, C.; MEYER, M. Value for Money analysis in U.S. transportation public private partnerships. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2009.

NCPP - The National Center for Pavement Preservation. Disponível em: <<http://www.pavementpreservation.org/>>. Acesso em: 28/10/2015.

NCHRP 391. National Cooperative Highway Research Program – Synthesis 391. Public-sector decision making for public-private partnerships. 2009

NCHRP 381. National Cooperative Highway Research Program – Synthesis 381. Falling weight deflectometer usage. 2008.

NOURELDIN, A.S., K. ZHU, S. LI, AND D. HARRIS. Non-destructive estimation of pavement thickness, structural number and subgrade resilience along indot highways. Joint Transportation Research Program Report. Indiana Department Of Transportation. 2005.

O'BRIEN, J. A. Sistemas de informação e as decisões gerenciais na era da Internet. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2004.).

OECD – Organization for economic co-operation and development. Principles for private sector participation in infrastructure. 2007.

PEDIGO, R.D., HUDSON, W.R. AND ROBERTS, F.L. Pavement performance modeling for pavement management. In Transportation Research Record: Journal Of The Transportation Research Board, No. 814, Transportation Record Board, National Research Council, Washington, D.C., 1981.

PREUSSLER, L.A. Contribuição ao estudo da deformabilidade de camadas de pavimento. Dissertação de Mestrado. USP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2007.

POTHOLE. Disponível em: <<http://www.pothole.info/2010/01/pavement-preservation-a-proactive-approach-to-road-repairs/>>. Acesso em: 14/04/2015.

QUEIROZ, C.; RDZANOWSKA, B.; GARBARCZYK, R.; AUDIGE, M. Road user charges: current practice and perspectives in central and eastern Europe. The World Bank Group. Transport Sector Board. 2008.

RAHMAN, F.; THOMAS, J.; HOSSAIN, M. Structural characteristics of aged asphalt concrete pavements. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2014.

RANGEL, T.; VASSALLO, J.M. Do public private partnerships improve road safety? The case of toll concessions in Spain. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2013.

ROUMBOUTSOS, A.; SCIANCALEPORE, F. PPP tenders: optimizing on competition. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2013.

SAATY, 1991 – SAATY, T. L. Método de análise hierárquica. 1991. São Paulo: Makron, 1991. 367 p)

SALIMINEJAD, S.; GHARAIBEH, N.G. Impact of error in pavement condition data on the output of network level pavement management systems. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2012.

SAYERS, M.W.; KARAMIHAS, S.M. Interpretation of road roughness profile data. Report No. FHWA-Rd-96-101, Federal Highway Administration. 1996.

SCHMALZER, P.N.; THOMPSON, T.R.; SIMPSON, A.L. Impact of trends in deflection with repeated load application on deflection data averaging. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2008.

SCHROCK, S.D.; YOUNG, C.B.; CHELLAMANI, D.; FULLER, R. Evaluation of a maintenance quality assurance program using Monte Carlo simulation. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2010.

SEPPO, M.; PEKKA, P.; PEKKA, P. Results of Finland's first concluding public-private partnership road project. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2014.

SERIGOS, P.A.; KARKI, P.; ZHANG, Z.; PROZZI, J.A. Impact of upgrading the distresses measurement system on assessed pavement network condition. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2014.

SHEKHARAN, R.; FRITH, D.; CHOWDHURY, T.; LARSON, C.; MORIAN, D. The effects of a comprehensive QA/QC plan on pavement management. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2007.

SHEKHARAN, R.A.; WU, Z.; CHOWDHURY, T. Pavement management with a decentralized organizational structure. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2010.

TAOTHONG, S.; JIWATTANAKULPAISARN, P.; KANITPONG, K. An empirical analysis of success and failure factors for public-private partnerships in toll road investments. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2011.

TCHEMRA, A.H. Tabela de decisão adaptativa na tomada de decisão multicritério. Tese de Doutorado, EPUSP, São Paulo, 2009.

WORLD BANK. Public-Private Partnerships (PPP): How can PPPs help deliver better services?. Disponível em <<https://pt.coursera.org/worldbank>>. Acesso em 14/06/2015

WORLD BANK. PPP in Infrastructure Resource Center for Contracts, Laws and Regulations (PPPIRC). Disponível em <<http://www.worldbank.org/ppp>>. Acesso em 28/02/2015

WORLD BANK. Toolkit for Public-Private Partnership in roads & highways. Disponível em <<https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/overview/practical-tools/toolkits>>. Acesso em 07/05/2014.

WORLD ECONOMIC FORUM, Shaping the future of construction. A breakthrough in mindset and technology. 2016

WU, Z.; SHEKHARAN, R.A.; CHOWDHURY, T.; DIEFENDERFER, B.K. Development and implementation of network-level selection of pavement maintenance and rehabilitation strategy: Virginia practice. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2009.

WU, Z.; FLINTSCH, G.W. Performance-based network-level optimization for pavement management in public private partnerships. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2008.

YANG, J. Development of effective remaining-life prediction models for pavement management at the network level. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2009.

YIN, D.; MRAWIRA, D. Comparison between laboratory investigation and non-destructive testing methods for mechanistic characterization of asphalt pavement. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2009.

ZAGHLOUL, S.; CHOWDHURY, T.; HOLLAND, T. J. Enhancing pavement management system analyses through consideration of construction quality. Transportation Record Board. National Research Council, Washington, D.C. 2008.

Zimmerman, K. Preserving What You've Built Through Pavement Management. Roads & Bridges Live. 2010.