

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS A PARTIR DE UMA ABORDAGEM MECANICISTA-
EMPÍRICA

Raul Aita Artusi

Passo Fundo

2020



Raul Aita Artusi

ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS A PARTIR DE UMA ABORDAGEM MECANICISTA-
EMPÍRICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa.

Passo Fundo

2020

CIP – Catalogação na Publicação

A792a Artusi, Raul Aita

Análise do custo do ciclo de vida de pavimentos flexíveis a partir de uma abordagem mecanicista-empírica [recurso eletrônico] / Raul Aita Artusi. – 2020.

2.3 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, 2020.

1. Pavimentos flexíveis. 2. Pavimentos - Qualidade.
3. Método de estudo. 4. Pavimentos de asfalto - Manutenção e reparos. I. Dalla Rosa, Francisco, orientador. II. Título.

CDU: 625.85

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

Raul Aita Artusi

ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS A PARTIR DE UMA ABORDAGEM MECANICISTA-
EMPÍRICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Data da aprovação: 16 de abril de 2020.

Membros da banca examinadora:

Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa
Orientador

Prof. Dr. Márcio Felipe Floss
Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Pedro Domingues Marques Prietto
Universidade de Passo Fundo

Prof. Ph.D. Lélío Antônio Teixeira Brito
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Passo Fundo, 2020.

AGRADECIMENTOS

A parte dos agradecimentos é uma ocasião especial na composição de trabalhos acadêmicos. Talvez seja o único momento em que a parte passional vem antes do racional. Reconhecer e agradecer a quem nos cerca é sentimento muito marcante nas nossas vidas.

A obviedade faz com que as primeiras pessoas que remeta meus agradecimentos sejam meus pais, Cosme e Tania, essenciais em minha vida, além do sentido literal. Fico feliz por perceber, através deles, como vida pode ser simples e simplesmente prazerosa. A minha avó Alice, minha tia-avó Ia e minha tia-avó Ima, que nos acompanha a todos os lugares. Minhas três avós, responsáveis pela criação de nossa família, fonte do exemplo de carinho, honestidade e bravura. A estas pessoas, eternamente grato por permitirem eu ter objetivos e sempre me dar forças e condições para conquista-los.

A Marina, minha companheira, a quem partilho cumplicidade e afeto. Agradeço pelos momentos de compreensão, pelas preocupações e por sempre querer o nosso melhor.

Aos meus irmãos Elisa e Otávio, e ao Ricardo, pela amizade e parceria, certamente a vida é melhor na presença deles.

Ao Professor Francisco, pelas discussões dos assuntos que motivaram esta dissertação e contribuições que permitiram sua realização.

Ao pessoal do Laboratório de Pavimentação da UFRGS, que disponibilizou a ferramenta HDM-4, em especial ao pesquisador Me. Celso Romeiro Júnior, que também contribuiu com discussões sobre os itens estudados.

A todos que compartilharam momentos de amizade e coleguismo, que torceram e depositaram seu apoio nesta jornada.

RESUMO

A abordagem brasileira frente ao projeto e gerência de pavimentos carece de técnicas atualizadas. O método atual do DNIT, elaborado há aproximadamente 60 anos, possui preceitos empíricos e determinísticos, os quais não mais traduzem de maneira satisfatória as formas com que os pavimentos são solicitados. Está em processo desenvolvimento, pelo DNIT, o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos, chamado “MeDiNa”, o qual é programado com os avanços frente às técnicas, interpretando o pavimento de maneira mecanicista-empírica. Esta dissertação teve como objetivo analisar economicamente estruturas de pavimentos dimensionados com o MeDiNa, além de comparar os custos e desempenho de estruturas baseadas em métodos empíricos. Trabalhou-se com o conceito de Análise do Custo do Ciclo de Vida, avaliando os períodos de projeto e de utilização, em termos de custos de agência e custos de usuário. Para as previsões de desempenho, foram empregadas as metodologias do MeDiNa e HDM-4, avaliando a progressão da área trincada, irregularidade longitudinal, afundamento de trilha de roda e deflexões. Ainda, trabalhou-se com análise de confiabilidade para verificar custos relativos as operações de manutenção dos ativos. Observou-se que as estruturas que demandaram de mais recursos para sua implantação resultaram em um custo total mais barato. Quanto aos custos de usuário, as análises indicaram que a manutenção da rodovia em níveis adequados não representa um benefício, entretanto, permitir o avanço das deteriorações aumenta de forma considerável os custos aos usuários. Para a porcentagem de área trincada, as respostas do MeDiNa, comparadas as do HDM-4, foram mais conservadoras para o início da vida útil do pavimento. Porém, após este período, na fase de progressão das trincas, a taxa de área trincada estimada pelo HDM-4 foi maior. A estrutura dimensionada pelo método empírico se mostrou subdimensionada frente às situações de projeto propostas.

Palavras-chave: Análise financeira, Método de dimensionamento, Pavimento Asfáltico.

ABSTRACT

The Brazilian approach to pavement design and management has lacked updated techniques. The current DNIT method, developed approximately 60 years ago, has empirical and deterministic precepts, which no longer satisfactorily translate the ways in which the pavement are requested. The National Pavement Design Method, called “MeDiNa”, has being developed by DNIT, which is programmed with advances in terms of techniques, interpreting the pavement in a mechanistic-empirical way. This dissertation aimed to economically analyze pavement structures dimensioned with the MeDiNa, in addition to comparing the costs and performance of structures based on empirical methods. It was worked with the Life Cycle Cost Analysis concept, evaluating the project and usage periods, in terms of agency costs and user costs. For forecasts performance, the MeDiNa and HDM-4 methodologies were used, assessing the progression of the cracked area, IRI, rutting and deflections. In addition, reliability analysis was performed to verify costs related to asset maintenance operations. It was observed that the structures that demanded more resources for their construction resulted in a cheaper total cost. As for user costs, the analyzes indicated that maintaining the highway at adequate levels does not represent a benefit, however, allowing the advance of deteriorations considerably increases costs to users. For the percentage of cracked area, MeDiNa's responses, compared to HDM-4, were more conservative for the beginning of the pavement's useful life. However, after this period, in the crack progression phase, the cracked area rate estimated by HDM-4 was higher. The structure dimensioned by the empirical method proved to be undersized in face of the proposed design situations.

Keywords: Financial analysis, Pavement design, Asphalt pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma LCCA.	20
Figura 2 - Fluxograma Método "DNER".	23
Figura 3 - Configuração do Eixo Padrão.	28
Figura 4 - Fluxograma "MeDiNa".	29
Figura 5 - Patologias em pavimentos flexíveis.	32
Figura 6 - Representação do ciclo de vida.	32
Figura 7 - Fluxograma metodologia.	42
Figura 8 - Configuração padrão da estrutura.	43
Figura 9 - Concepção das estruturas avaliadas.	48
Figura 10 - Área trincada e IRI Estrutura 1.	63
Figura 11 - Afundamento de trilha de roda Estrutura 1.	63
Figura 12 - Área trincada e IRI Estrutura 2.	65
Figura 13 - Afundamento de trilha de roda Estrutura 2.	65
Figura 14 - Afundamento de trilha de roda Estrutura Método DNER.	67
Figura 15 - Área trincada e IRI Estrutura 3.	68
Figura 16 - Afundamento de trilha de roda Estrutura 3.	68
Figura 17 - Área trincada e IRI Estrutura 4.	70
Figura 18 - Afundamento de trilha de roda Estrutura 4.	70
Figura 19 - Custos de administração das estruturas.	76
Figura 20 - Percentual de cada componente de custo.	76
Figura 21 - Comparação da área trincada Estrutura 1.	81
Figura 22 - Comparação da área trincada Estrutura 2.	82
Figura 23 - Comparação da área trincada Estrutura 3.	82
Figura 24 - Comparação da área trincada Estrutura 4.	83
Figura 25 - Área trincada HDM-4 Estrutura 1.	84
Figura 26 - Área trincada HDM-4 Estrutura 2.	85
Figura 27 - Área trincada HDM-4 Estrutura 3.	85
Figura 28 - Área trincada HDM-4 Estrutura 4.	86
Figura 29 - Histograma do custo da rentabilidade do dinheiro da Estrutura 1.	87
Figura 30 - Histograma do custo da rentabilidade do dinheiro da Estrutura 2.	88
Figura 31 - Histograma do custo da rentabilidade do dinheiro da Estrutura 3.	89
Figura 32 - Histograma do custo da rentabilidade do dinheiro da Estrutura 4.	89

Figura 33 – Histograma dez mil valores para custo da rentabilidade do dinheiro da Estrutura 2.	90
.....	90
Figura 34 - Histograma dez mil valores para custo da rentabilidade do dinheiro da Estrutura 3.	90
.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhamento do tráfego.	44
Tabela 2 – Resumo do ciclo de vida Estrutura 1.	65
Tabela 3 – Resumo do ciclo de vida Estrutura 2.	66
Tabela 4 – Resumo do ciclo de vida Estrutura 3.	69
Tabela 5 – Resumo do ciclo de vida Estrutura 4.	71
Tabela 6 - Custo de implantação Estrutura 1.	72
Tabela 7 - Custo de manutenção Estrutura 1.	72
Tabela 8 - Custo de conservação Estrutura 1.	72
Tabela 9 - Custo de implantação Estrutura 2.	73
Tabela 10 - Custo de manutenção Estrutura 2.	73
Tabela 11 - Custo de conservação Estrutura 2.	73
Tabela 12 - Custo de implantação Estrutura 3.	74
Tabela 13 - Custo de manutenção Estrutura 3.	74
Tabela 14 - Custo de conservação Estrutura 3.	74
Tabela 15- Custo de implantação Estrutura 4.	75
Tabela 16 - Custo de manutenção Estrutura 4.	75
Tabela 17 - Custo de conservação Estrutura 4.	75
Tabela 18 - Custos de usuário.	78
Tabela 19 - Custos de usuário em diferentes composições de rodovia.	79
Tabela 20 - Custos de usuário em diferentes abordagens para manutenção.	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características da rede viária.....	43
Quadro 2 - Carregamento dos eixos.	44
Quadro 3 - Parâmetros do Revestimento Asfáltico.	46
Quadro 4 - Parâmetros dos Materiais Granulares.....	46
Quadro 5 - Parâmetros do Subleito.....	46
Quadro 6 - Dados Materiais.....	47
Quadro 7 - Quantificações climáticas.....	47
Quadro 8 – Soluções propostas.	50
Quadro 9 - Coeficientes de calibração HDM-4.	51
Quadro 10 - Parâmetros de ensaio FWD.	52
Quadro 11 - Distâncias de transporte.	53
Quadro 12 - Preço concreto asfáltico.	54
Quadro 13 - Preço brita graduada.	54
Quadro 14 - Preço imprimação.....	55
Quadro 15 - Preço pintura de ligação.	55
Quadro 16 - Preço microrrevestimento asfáltico.....	56
Quadro 17 - Preço fresagem contínua.	56
Quadro 18 - Serviços de conservação.....	57
Quadro 19 - Preço itens de consumo dos veículos.	59
Quadro 20 – Utilização dos veículos.....	59
Quadro 21 - Recursos do veículo.	59
Quadro 22 – Valor do tempo.	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Análise do Custo do Ciclo de Vida.....	18
2.2 Métodos de dimensionamento.....	22
2.3 Desempenho de pavimentos flexíveis.....	29
2.4 Análise de confiabilidade.....	38
3 METODOLOGIA.....	42
3.1 Caracterização dos dados de entrada.....	43
3.1.1 Tráfego.....	44
3.1.2 Materiais.....	45
3.1.3 Dados climáticos.....	47
3.2 Estruturas avaliadas.....	47
3.3 Análise do custo do ciclo de vida.....	52
3.3.1 Custos de administração.....	53
3.3.2 Custos de usuário.....	58
3.4 Análise de confiabilidade.....	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
4.1 Desempenho das estruturas.....	62
4.2 Custos.....	71
4.2.1 Custos de administração.....	71
4.2.2 Custos de usuário.....	78
4.3 Comparação das metodologias.....	80
4.4 Análise de confiabilidade.....	87
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
5.1 Conclusão.....	92
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	93

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICE	105

1 INTRODUÇÃO

Conforme Alam (2015), a qualidade dos sistemas de transporte é enfaticamente impactante aos conceitos econômicos e sociais de uma nação, já que influencia nos custos de compra e venda de bens de consumo, principalmente os de necessidade básica, e também para o acesso aos meios de auxílio e desenvolvimento pessoal, como saúde e educação. Iacono e Levinson (2008), Aragão, Yamashita e Pricinote (2010) e Andrade, Maia e Lima Neto (2015) discorrem sobre as respostas que estímulos ao progresso territorial fornecem em termos de desenvolvimento micro e macrorregional.

No contexto atual da infraestrutura rodoviária, em 2017, segundo CNT (2017a), o Brasil possuía em operação, entre rodovias de administração pública ou concessionadas, 1.563.391,30 km, dos quais 213.452,80 km são pavimentados e 1.349.938,50 km não possuem pavimentação, representando, os trechos pavimentados, a parcela de 15,81% em relação aos de leito natural. A quilometragem citada demonstra que a densidade de infraestrutura rodoviária pavimentada em relação a extensão territorial do país é de 0,0248 km/km². Ao comparar com países de extensão territorial semelhante, como Estados Unidos (0,438 km/km²) ou com um país com capacidade econômica semelhante, como a Rússia (0,0543 km/km²), percebe-se que, mesmo sendo o modal de transporte mais utilizado, a infraestrutura disponibilizada está em baixa quantidade.

Apesar de ser reconhecido que uma infraestrutura de transporte em extensão e condições de tráfego adequadas contribuiriam positivamente na dinamização econômica e social de um país, a realidade brasileira não condiz com esse preceito. Dados dispostos pela CNT (2017a), sobre as condições gerais dos ativos rodoviários (pavimento, sinalização e geometria da via) indicam que, no ano de 2017, 28,20% da extensão da malha pavimentada encontrava-se na indicação ruim ou péssimo, ou seja, 4,60 pontos percentuais a mais em relação ao ano de 2016. Focando nas condições dos pavimentos, também em 2017, 16% da extensão encontravam-se na condição ruim ou péssimo, ao passo que 50% possuíam demandas de reparo ou manutenção para adequação às condições apropriadas de serventia à trafegabilidade, número 1,70% maior que o ano anterior.

O desajuste entre a situação ocorrente e a desejada das rodovias brasileiras é principalmente motivado pela maneira administrativa e técnica com que o assunto é tratado. CNT (2017b) demonstra que o estado geral de rodovias federais, sob administração privada, classificado como “ótimo” ou “bom” é de 75,90%, enquanto para as de administração pública,

42,70%. Convergente a esse desempenho, os mesmos autores estimam que se investe, em períodos iguais, R\$ 354,46 mil/km nas rodovias concessionadas, ao passo que nas de administração pública, R\$ 159,60 mil/km.

Conhecidas as dificuldades de se implantar ações eficazes e duradouras, foca-se na tentativa de evolução técnica para atingir índices de serviço que sejam mais benéficos, viáveis dentro das diretrizes de custos e preconizadas para um longo prazo, para que não sejam prejudicadas por fatores não técnicos.

CNT (2017c) aponta quatro etapas do ciclo de vida de um pavimento responsáveis pelo abreviamento de sua durabilidade:

- método de dimensionamento: emprego de métodos empíricos, os quais não contemplam o comportamento elástico das camadas do pavimento, não prevendo ruptura por fadiga, deformações permanentes e os esforços do tráfego atual;
- tecnologias e processo construtivo: ausência de análise apurada sobre o ciclo de vida do pavimento, onde muitas vezes a tomada de decisão foca-se no custo inicial de implantação, priorizando as de custo menor e facilitando o vício construtivo, empregando uma mesma técnica para diferentes solicitações;
- manutenção e gerenciamento: a falta de um sistema de gerência de pavimento bem definido propicia a adoção de métodos de conservação inadequados (geralmente de maneira corretiva ou paliativa) ou são inexistentes, quando se mantêm o ativo em funcionamento até o fim de sua vida útil sem procedimentos de reabilitação, porém a única solução técnica será a reconstrução;
- fiscalização: falta de estabelecimento de padrões técnicos mínimos, para o período de obras, que assegurem que as decisões de projeto foram executadas. Durante a fase de operação da rodovia, aponta-se a necessidade de aprimorar as formas de pesagem de veículos, não permitindo o trânsito de veículos com sobrepeso.

Percebe-se a oportunidade de aprimorar a abordagem de projeto e gerência na operação das rodovias, buscando melhores níveis de desempenho aliados ao uso racional de recursos. Uma ferramenta que permite a avaliação dos esforços, em termos de custo para o órgão administrador e para os usuários, é a Análise do Custo do Ciclo de Vida (*Life Cycle Cost Analysis - LCCA*). Conforme visto em Yao *et al.* (2019), por meio de mecanismos de previsão de desempenho da infraestrutura e indicadores monetários, é possível contemplar financeiramente as fases de projeto, construção e manutenção do ativo, valorando e analisando técnica e economicamente toda sua vida útil.

O método de dimensionamento de pavimentos em desenvolvimento no Brasil, um notável avanço científico e tecnológico na abordagem brasileira à engenharia de pavimentação, auxilia o emprego de análises econômicas do tipo *LCCA*, tendo em vista todo o embasamento teórico e validação prática desenvolvidos para serem possíveis as previsões de desempenho das estruturas estudadas.

Sendo a “Gestão da Infraestrutura” um tema das linhas de pesquisas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, esta dissertação é estimulada pelos avanços do Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT) perante aos métodos de dimensionamento de estruturas de pavimentos flexíveis, e, ao abordar a temática econômica e financeira durante a vida útil de uma rodovia, tem a expectativa de contribuir com a discussão acerca do emprego do método mecanicista-empírico brasileiro. Este assunto se mostrou carente de informações técnicas e científicas, desta forma esta dissertação é interessante, principalmente, aos grupos que competem as decisões referentes ao emprego de recursos, públicos ou privados, em pavimentos.

Desta forma, o objetivo geral desta dissertação é avaliar o custo do ciclo de vida de estruturas de pavimentos flexíveis, considerando uma técnica mecanicista-empírica, visando critérios para a tomada de decisão quanto ao gerenciamento de rodovias.

Como objetivos específicos, colocam-se:

- quantificar os custos de administração e de usuário durante o ciclo de vida de estruturas de pavimentos flexíveis;
- comparar o custo do ciclo de vida de pavimentos flexíveis projetados e geridos com técnicas mecanicista-empírica com pavimentos projetados e geridos com base empírica;
- comparar a metodologia mecanicista-empírica nacional para previsão de desempenho com um método empírico;
- quantificar, em termos financeiros, a incerteza que incorre quanto ao desempenho de um pavimento flexível na abordagem mecanicista-empírica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Haas, Hudson e Falls (2015) relatam que os Sistemas de Gerência de Pavimentos começaram a serem desenvolvidos nos anos 1960, nos Estados Unidos, como consequência das precoces falhas dos pavimentos, construídos após um grande plano de expansão da malha norte-americana. Mesmo utilizando os mais profundos conhecimentos em projeto daquela época, foi concluído que a não consideração de efeitos do desempenho e, conseqüentemente, as atividades de manutenções e reforços ao longo do ciclo de vida, causaram a degradação precoce das rodovias. A partir disso, se reconheceu a necessidade de integrar as fases de projeto, construção e manutenção dentro do processo de tomada de decisão, a fim de elaborar estruturas capazes de possuírem serventia durante o tempo projetado, no caso mais de 30 anos.

Após o primeiro entendimento, passou-se compreender a importância da busca de dados representativos sobre as propriedades dos materiais, dos efeitos do tráfego e do meio ambiente, as manifestações patológicas, o comportamento histórico e atual da estrutura, assim como aspectos de análise econômica e modelos de previsão de desempenho. Paralelamente a isso e com o grande desenvolvimento do acesso a informática, várias agências de administração de rodovias no mundo passaram a trabalhar com conceitos de gerência de suas malhas, desenvolvendo metodologias próprias de análise.

Porém, Haas, Hudson e Falls (2015) comentam que muitas metodologias desenvolvidas ao redor do mundo são ferramentas para selecionar trechos que devem receber operações de manutenção, baseando em suas condições atuais e geralmente priorizando as de pior condição. Esse mecanismo de decisão não está de acordo com os princípios da gerência de ativos, não trazendo um tratamento racional e eficiente de recursos (Gao *et al.*, 2007).

Elencando as atividades de coleta de dados, da identificação das necessidades atuais e futuras, do desenvolvimento de programas de manutenção e reabilitação e da comparação entre os custos e benefícios de alternativas, as quais, quando executadas coordenadamente, definem um plano de gerência de rodovias (Haas, Hudson e Falls, 2015), a revisão bibliográfica trata de quatro temáticas pertinentes aos objetivos do trabalho: Análise do Custo do Ciclo de Vida, Métodos de Dimensionamento, Previsão de Desempenho e Análise de Confiabilidade.

2.1 Análise do Custo do Ciclo de Vida

A importância de estudar os teores econômicos de projetos está na possibilidade de identificar a compatibilidade entre os benefícios e esforços (ou impactos) de diferentes alternativas, sendo uma maneira de medir a eficiência do objeto em estudo. A *Airfield Asphalt Pavement Technology Program* (2006) aponta para a década de 1950 as primeiras considerações em análises econômicas como ferramentas auxiliares à tomada de decisão na engenharia rodoviária, através da razão entre benefício e custo de diferentes projetos de pavimentação. Posteriormente, na década de 1960, são concebidos os princípios da Análise do Custo do Ciclo de Vida (*Life-Cycle Cost Analysis-LCCA*) pela *American Association of State Highway Transportation Officials* (AASHTO).

Hoje, as estratégias de administração da infraestrutura viária são baseadas em análises econômicas, sendo o mecanismo *LCCA* utilizado com frequência para comparar alternativas a longo prazo. Exemplifica-se com os estudos de: Santos e Ferreira (2012) e Kim *et al.* (2015), que introduziram ferramentas computacionais para o auxílio no emprego análises *LCCA*; Ding, Sun e Chen (2013) que trabalharam com os conceitos de manutenção preventiva; Guo e Sultan (2016) que avaliaram financeiramente o tema “pavimento perpétuo”; Lu e Xin (2018) que propuseram um modelo de previsão de desempenho, avaliando as alternativas em termos econômicos e de impacto ambiental.

Zimmerman, Smith e Grogg (2010) definiram o termo “*Life-Cycle Cost Analysis*” como uma avaliação de todos os custos previstos que incorrem durante a vida útil desejada do ativo, de modo que diferentes cenários possam ser comparados e avaliados através de parâmetros equivalentes, geralmente em termos monetários, onde a alternativa mais vantajosa economicamente é a que resultar no menor montante financeiro. Para Kim *et al.* (2015) através de uma análise *LCCA* é possível equilibrar o custo inicial de construção e presumir o custo futuro de um projeto.

Analogamente, Hasan, Whyte e Al Jassmi (2018) relatam que a Análise do Custo do Ciclo de Vida é o procedimento convencional para estimar os benefícios financeiros de algum investimento, verificando os gastos iniciais e futuros. Quando operado adequadamente, esse método resulta em significativa aplicação em projetos e manutenção de pavimentos (Lamprey, Labi e Sinha, 2004), se mostrando uma ferramenta eficaz de comparação de necessidade-custo-benefício, mas não necessariamente com poder de decisão final.

Biroli (2003) estudou os custos envolvidos durante o ciclo de vida de pavimentos flexíveis e rígidos. Abordou os dimensionamentos das estruturas com metodologias brasileiras

e norte americanas e empregou a ferramenta *Highway Development and Management* (HDM-4) para gerência das alternativas. Verificou que os custos para implantação de um pavimento rígido são maiores em relação aos flexíveis, em uma ordem de 40% e 60%, porém os custos de manutenção e reabilitação dos pavimentos flexíveis são menores, assim como os custos de operação dos veículos, fatos que permitiram concluir que os custos totais dos pavimentos flexíveis estudados fossem maiores que os custos dos pavimentos rígidos. Ainda, constatou que para o dimensionamento dos pavimentos flexíveis e rígidos, a metodologia norte-americana resulta em custos de construção maiores.

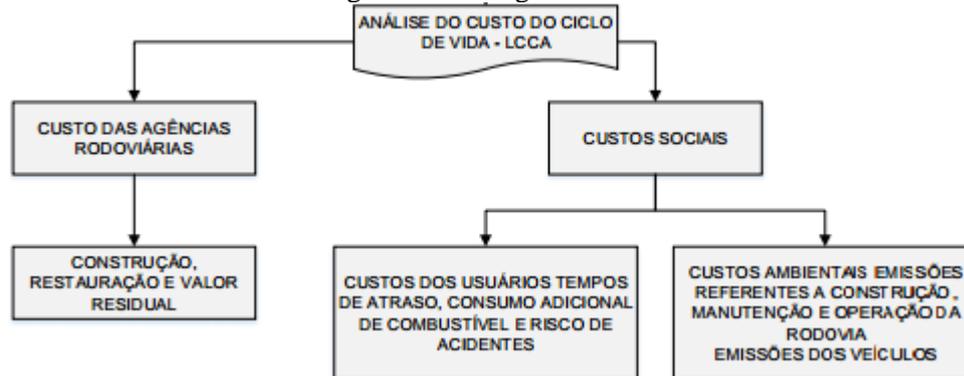
Rodrigues Filho (2006) utilizou o mecanismo *LCCA* para comparar alternativas de projeto de pavimento flexível e rígido, em função do nível de tráfego, da capacidade de suporte do subleito e da taxa de amortização. Concluiu que, sob ponto de vista do investidor, levar em conta apenas os custos iniciais pode não ser a melhor opção ao longo do ciclo de vida, em função do custo do dinheiro disponível no mercado. Também, demonstrou que a análise do custo do ciclo de vida é a que melhor reflete o momento em que uma alternativa se torna mais, ou menos, interessante em relação a outra.

Mesmo que já seja uma técnica difundida, a Análise do Custo do Ciclo de Vida demanda de dados representativos acerca das etapas que o constituem. Mizardeh *et al.* (2014) relatam a necessidade de considerar todas as variáveis que resultam em diferenças econômicas entre as alternativas. Comentam que ao não computar de maneira adequada as atividades, tem-se o risco de comprometer a análise econômica, em virtude de subestimar ou superestimar os custos iniciais e futuros. Babashamsi *et al.* (2016) destacam que a abordagem probabilística para vem sendo cada vez mais empregada na engenharia de pavimentos, a fim de dirimir erros em função da quantificação dos valores.

Segundo Babashamsi *et al.* (2016), os principais momentos de dispêndio econômico de uma rodovia podem ser resumidos em: projeto e execução, extração e transporte de materiais, equipamentos de construção, estratégias de manutenção e reabilitação e operações durante toda a vida útil do ativo.

Essas operações representam os custos dos três principais agentes: o administrador, onde seus custos podem ser discriminados nos momentos de implantação, manutenção, reabilitação e valor residual; os usuários, com os custos gerados na operação dos veículos, no tempo de percurso e em acidentes; e o ambiental, nos termos de consumo de energia, teores de gás carbônico e emissões poluentes liberadas. Os custos ao meio ambiente não serão abordados nesta dissertação. A Figura 1 apresenta uma esquematização típica de um *LCCA*.

Figura 1 - Fluxograma LCCA.



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2007).

Conforme visto em Mandapaka *et al.* (2012), o processo da Análise do Custo do Ciclo de Vida inicia ao definir diferentes alternativas de projeto e programação. Estabelecendo níveis mínimos de funcionamento do objeto de estudo e através de métodos de previsão de desempenho, é possível programar atividades de manutenção para suprir determinada demanda, estabelecendo o calendário de operação do ativo e avaliando suas consequências no seguimento da vida útil. Newcomb, Willis e Timm (2010) descrevem que o período de análise do objeto de estudo deve ser longo o suficiente para refletir as diferenças de custo associadas as estratégias das alternativas de projeto. Mello *et al.* (2016) citam os períodos de projeto de pavimentos rodoviários comumente variando entre 20 e 30 anos.

Para comparar as alternativas de investimento, é necessário utilizar princípios da matemática financeira. Santos (2011) cita os conceitos de Valor Presente Líquido, Valor Anual Líquido, Custo Anual, Relação Benefício-Custo e a Taxa Interna de Retorno, como as metodologias comumente empregadas. Ao descrever as principais características e funções de cada método, afirma que o procedimento do Valor Presente Líquido (VPL) é o que fornece respostas mais adequadas para serem empregadas em Análises de Custo do Ciclo de Vida.

De maneira geral, a bibliografia desta temática recomenda o método VPL para tal, por ser uma ferramenta que permite a quantificação do valor temporal do dinheiro, ao transferir para o presente todos os custos e benefícios que são previstos para ocorrer ao longo da vida do ativo. De acordo com Eisenberger e Remer (1977), para considerar o valor do dinheiro no tempo é necessário considerar uma taxa de desconto, composta pela taxa de juros e inflação, a fim de atualizar o poder de compra do dinheiro, de acordo com o contexto econômico ao qual está inserido, geralmente em âmbito nacional.

Wu, Yuan e Liu (2017) relatam sobre a importância que a taxa de desconto exerce sobre os resultados de uma Análise do Custo do Ciclo de Vida, considerando que as variações

econômicas refletem diretamente nos índices que compõe a taxa de desconto. Mizardeh *et al.* (2014) verificaram a consideração de uma taxa de desconto específica para os custos relativos aos derivados de petróleo, tendo em vista que o comportamento do valor destes materiais não compete apenas à economia nacional do país em questão.

De acordo com Galí (2015), devido às incertezas políticas e econômicas, a disponibilidade do dinheiro e a credibilidade do projeto, o comportamento do valor futuro do dinheiro é de difícil determinação e, para Wu, Yuan e Liu (2017), possui grande influência no resultado da Análise do Custo do Ciclo de Vida.

A experiência internacional nesse assunto aponta, conforme investigado por Hasan, Whyte e Al Jassmi (2018), que a maior parte dos estudos abordando custos em infraestrutura rodoviária levam em consideração as despesas de construção ou aquisição da rodovia e de operações de manutenção e reabilitação, sendo, comumente, melhores detalhados os custos de construção, justificado por representar a maior parte dos custos de administração, conforme Santos (2011).

Os custos de usuário são estudados, mas com menos frequência. Wimsatt *et al.* (2009), em um trabalho investigando o estado-da-prática, verificaram que em aproximadamente 60% dos departamentos de transportes dos estados norte-americanos, os custos dos usuários não são contemplados na análise. Wennström e Karlsson (2014) atribuem aos usuários os maiores custos ao longo do ciclo de vida de uma rodovia.

No Brasil, a avaliação econômica de alternativas de pavimento é condicionada pelo custo de implantação da rodovia e, em casos de rodovias de maior tráfego, inclui-se na análise os custos de manutenção da infraestrutura (Santos, 2011). Os custos de usuário geralmente não são considerados, segundo Goh e Yang (2009), pela dificuldade de obter dados para essa quantificação. Mesmo assim, não é recente o reconhecimento da importância desses custos, conforme visto em Severi (1997) e Biroli (2003). Uma metodologia de cálculo dos custos de usuário voltada ao cenário brasileiro foi abordada por IPEA e ANTP (1999) e segue sendo utilizada em estudos atuais, como Santos (2012) e Souza (2017).

É válido destacar a contribuição que a ferramenta computacional *Highway Development and Management* (HDM) proporciona para análises econômicas em nível de planejamento estratégico, programação e análise de projeto direcionadas para este tipo de infraestrutura.

Esta metodologia de gerência de pavimentos foi desenvolvida pelo Banco Mundial entre os anos de 1960 e 1970, focando sua aplicação em países em desenvolvimento, correlacionando os custos de construção, manutenção e operação dos veículos. Com o avançar dos anos, o modelo teórico do programa foi sendo aprimorado, visando maior acurácia na presunção dos

progressos de deterioração das estruturas e na quantificação dos custos. A versão mais recente do *software* é o HDM-4, lançada no ano 2000 e atualizada periodicamente com versões complementares.

Para a determinação dos custos de agência e de usuário, é necessário informar ao *software* uma série de dados relativos a rede viária, no que diz respeito a sua geometria, aspectos e condições do pavimento, a composição do tráfego e características dos veículos e passageiros, as atividades de manutenção e reabilitação, além da quantificação monetária envolvida em cada parcela.

O montante financeiro que compete para o administrador da rodovia é a resultante do somatório dos custos de implantação, de conservação, de manutenção e o valor residual, parcelas usualmente consideradas nestas análises, como já citado anteriormente. As equações matemáticas e parâmetros considerados para o computo dos custos de administração da rodovia são detalhados na Parte D do Volume 4 do manual do programa HDM-4, conforme Odoki e Kerali (2006).

Para os valores relativos aos usuários, são ponderados nos cálculos: a velocidade de tráfego dos veículos em diferentes situações (livre ou em congestionamento), as quantidades de insumos consumidos, em termos de combustível, óleo lubrificante, pneus e peças, os custos de manutenção dos veículos, do capital, dos passageiros e das cargas. Estes custos estão relacionados com as condições da via, sendo levado em conta que o decréscimo na qualidade da rodovia aumenta o custo relativo aos usuários. Odoki e Kerali (2006) detalham esta composição de custo na Parte E do Volume 4 do manual do programa.

2.2 Métodos de dimensionamento

Balbo (2007) traz o avanço histórico das técnicas de pavimentação, enfatizando a evolução durante as décadas iniciais dos anos 1900, em especial as abordagens norte-americanas, as quais produziram avanços importantes no entendimento da mecânica dos solos. Também, os engenheiros da *California Division of Highways*, destacando Porter, criam a primeira curva de dimensionamento de estruturas de pavimento asfáltico, um modelo empírico com base na resistência ao cisalhamento do subleito, obtida, de maneira indireta, com o ensaio do *California Bearing Ratio (CBR)*.

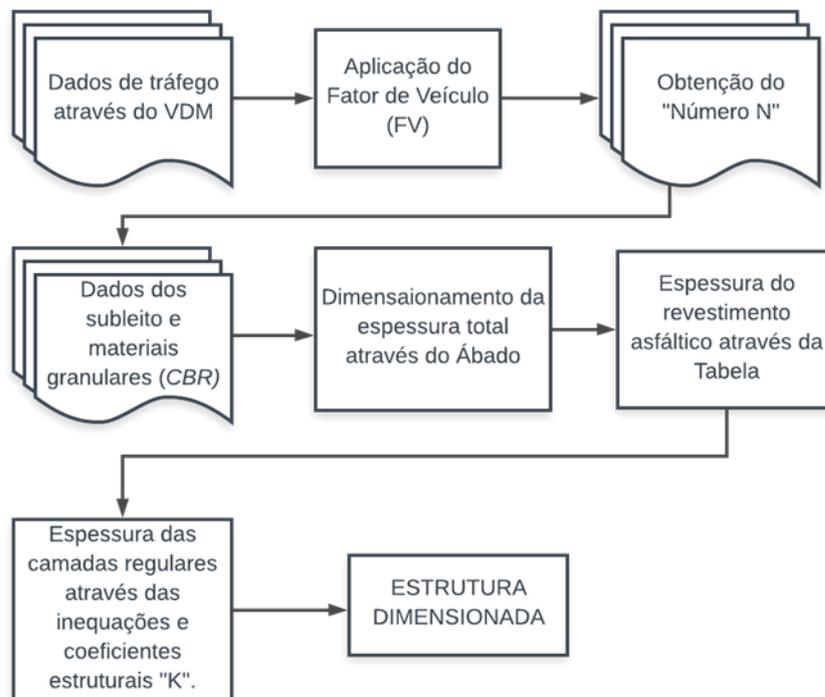
DNIT (2006a) cita que, objetivando a manutenção da integridade do subleito e das camadas granulares, a fim de evitar o surgimento de deformações permanentes (afundamento de trilha de roda) ou rupturas plásticas no subleito por tensões de cisalhamento, o método *CBR*

foi muito bem aceito na comunidade técnica, servindo como base para adaptação de outros métodos desenvolvidos na sequência, inclusive o Método do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atual DNIT, elaborado em 1966 pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza, através de adaptações dos trabalhos de Turnbull, Foster e Ahlvin (1962) e análises dos resultados da pista experimental da *AASHTO*.

As principais variáveis de entrada necessárias ao dimensionamento do pavimento pelo Método do DNER são: dados geotécnicos, através da capacidade de suporte do subleito, quantificada pelo *CBR*, e as solicitações provenientes do tráfego de um eixo de rodado duplo, tido como padrão, com a carga de 8,2 t (número N), caracterizado com a ponderação de três fatores: Fator de composição do tráfego (FE), Fator climático regional (FR) e Fator de equivalência (FC), sobre o valor do Volume Diário Médio (VDM).

A resposta será em termos da espessura total de materiais granulares para a estrutura e revestimento, onde através de coeficientes de equivalência estrutural, dimensiona-se cada espessura das camadas, com os respectivos materiais a serem empregados, conforme as indicações de cálculo e ábacos de DNIT (2006a). Na Figura 2 é representado o processo sequencial da metodologia citada.

Figura 2 - Fluxograma Método "DNER".



Souza Júnior (2018) relata que o comportamento estrutural esperado de um pavimento flexível, de acordo com os preceitos do Método do DNER, é que o revestimento constitua a parcela de maior capacidade de suporte, já que é a camada que absorve as maiores tensões atuantes e distribui para as camadas adjacentes, as quais, na medida com que se aumenta a profundidade em relação a superfície do pavimento, são projetadas com menores valores de rigidez. Desta forma, o subleito seria a camada de menor rigidez, logo, a mais suscetível às deformações elásticas e plásticas, devendo, como já citado, ser dimensionada uma estrutura de materiais capaz de evitar com que se atuem tensões no subleito maiores que o mesmo é capaz de suportar.

Contudo, Costa, Pereira e Deon (2017) e Souza Júnior (2018), através de retroanálises em pavimentos brasileiros, observaram que o subleito não tem constituído a parte mais sensível de um pavimento. Tal constatação já fora verificada por Cardoso (1995), que explica esta situação devido a configuração do carregamento e da estrutura do pavimento, onde, em alguns casos, a camada de base pode estar sendo submetida a esforços de tração, e os materiais que a compõe não possuem capacidade de suportar tensões quando são tracionados.

O fenômeno descrito por Cardoso (1995) não é previsto na metodologia de cálculo do Método do DNER, e constitui importante parcela na diminuição da rigidez da estrutura do pavimento, facilitando assim, a ocorrência de rupturas localizadas, atenuando sua vida útil.

O Método do DNER resulta em quantificações determinísticas, não levando em conta as variações de cada parâmetro durante o processo de projeto, dificultando, ao relatar os coeficientes estruturais, o dimensionamento de estruturas com materiais diferentes daqueles preconizados. Embora existam alguns esforços para adequar a referida metodologia frente à caracterização dos materiais, um modelo de dimensionamento deve possibilitar a variação do maior número de fatores possíveis, buscando a reprodução da variabilidade de ocorrência em campo (Santos, 2011).

Também, neste método, admite-se o conceito de dano linear da estrutura, porém é sabido que a degradação obedece a uma curva exponencial, o que tende a abreviar o desempenho durante a vida útil do projeto. O Método DNER publicado em 2006 (DNIT, 2006a) orienta a complementação do dimensionamento de Murillo Lopes de Souza, através de análise por modelo mecanístico-empírico de previsão de desempenho, sendo uma ferramenta que permite avaliar o conceito funcional do pavimento.

Ferri *et al.* (2016) comentam que os valores obtidos no ensaio de *CBR* não têm relação direta com o comportamento da fadiga de misturas asfálticas, esta que é uma das principais causadoras de danos em pavimentos. Coutinho (2011) afirma que ao utilizar modelos

generalistas, analisa-se de forma superficial as peculiaridades das inúmeras variáveis que influenciam no desempenho estrutural e funcional de um pavimento. Ainda, diz que a metodologia *CBR* utiliza o método de Boussinesq, o qual considera o pavimento como uma estrutura de apenas uma camada, linearmente elástica, homogênea e isotrópica.

Bezerra Neto (2004), Balbo (2007) e Motta (2017) relatam que apesar de o modelo de base empírica seja de fácil empregabilidade, não necessite de equipamentos sofisticados para o levantamento de dados e tenha apresentado respostas de desempenho satisfatórias durante muitos anos, a modificação das solicitações, estimuladas pelo aumento progressivo do tráfego, as evoluções nas características dos veículos e o frequente uso de materiais diferentes na configuração da estrutura e revestimento do pavimento, estimularam buscas por maiores entendimentos e emprego de novos métodos. Além disso, Monismith (2004) acrescenta o conhecimento sobre as tensões e deflexões, o desenvolvimento de ensaios não destrutivos e com tráfego acelerado, além das experiências durante as décadas, como fatores que também motivaram o mesmo objetivo citado.

Neste sentido, Balbo (2007) retoma para o ano de 2002, onde a *AASHTO* publicou um novo método de projeto, com base mecanicista, que utiliza de modelos constitutivos de fadiga e de deformação permanente nos materiais, abordando o conceito de dano incremental e possibilitando a variação dos parâmetros durante o período de análise, permitindo verificar o comportamento do material em vias do módulo de elasticidade, módulo de resiliência e nível de degradação.

Em uma abordagem mecanicista, para Franco (2007), o comportamento mecânico do pavimento é avaliado através de seu carregamento e da resistência dos materiais, semelhante ao que se trabalha com estruturas de aço, concreto ou madeira.

Para Carvalho e Schwartz (2006), um método mecanístico-empírico (M-E) tem por fundamento que o pavimento é uma estrutura em camadas, sendo necessário compatibilizar a resposta do pavimento frente ao carregamento e a deformabilidade dos materiais (parte mecanicista) e ajustar critérios do método com fatores observados em campo (parte empírica). Fritzen (2016) diz que um método de dimensionamento é dito mecanicista quando são previstas as tensões e deformações causadas pelos esforços do tráfego e do clima na estrutura do pavimento através da utilização de um embasamento teórico.

Motta (2017) relata que deve ser garantida que as camadas sejam espessas o suficiente para minimizar os efeitos de afundamento da trilha de roda, causado pelo acúmulo excessivo de deformação permanente nas camadas de revestimento e estruturais, e que a repetição da carga aplicada não cause trincamento excessivo no revestimento, caracterizada pelo fenômeno

da fadiga. Do ponto de vista mecânico, o afundamento de trilha de roda acontece com tensões e deformações de compressão em todas as camadas do pavimento e o fenômeno de fadiga é ocasionado pelas tensões e deformações de tração na fibra inferior da camada de revestimento.

Como a metodologia mecanicista é apoiada nos preceitos da elasticidade de múltiplas camadas, os conceitos de Módulo de Resiliência (MR) são utilizados para medir relações de tensões-deformações, onde, após sofrer a solitação mecânica por cargas repetidas, verificam-se as deformações elásticas e plásticas dos materiais, sendo uma maneira de representar como os esforços mecânicos acontecem nas rodovias (de maneira cíclica). Seu entendimento é fundamental no emprego de análises mecânicas do pavimento (Coutinho, 2011). De acordo com Medina e Motta (2015), o termo “resiliência” conceitua a energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, a qual é liberada quando as tensões causadoras das deformações são interrompidas. Em laboratório, o MR é obtido através da razão entre a tensão desvio e a deformação resiliente.

Sintetizando as informações de Haas, Hudson e Falls (2015), as principais diferenças entre os métodos empíricos e os que usam bases mecanicistas, acontecem em:

- consideração de um espectro de cargas ao invés da tradução do tráfego em uma quantificação, por meio da carga de eixo equivalente;
- observação da variação lateral do tráfego, apontando quanto canalizada é a rodagem dos eixos, e conseqüentemente a concentração das cargas;
- influência do clima no módulo de resiliência dos materiais, tanto em termos de altas temperaturas, quanto dos efeitos da umidade no interior da estrutura, resultando em variações sazonais nas propriedades;
- atributos da performance do pavimento, no sentido do desempenho funcional, frequentemente medido pelo conforto ao tráfego através do International Roughness Index (IRI), e estrutural, avaliado a partir da análise de deformações permanentes;
- atributos de confiabilidade no projeto, pautando as variações inerentes de cada parâmetro de entrada.

Fritzen (2016) comenta brevemente os métodos de dimensionamento de pavimentos de outros países. Estados Unidos (*AASHTOWare Pavement ME Design*), Portugal (*MACOPAV*), França (*Conception et dimensionnement des structures de chaussée*), África do Sul (*SAMDM*), Austrália (*AUSTROADS*) e México (*IMT - PAVE*) são exemplo de países que empregam métodos M-E no dimensionamento de estruturas rodoviárias.

No Brasil, ao acompanhar a migração internacional de metodologias empíricas para abordagens M-E, está sendo elaborado o Método de Dimensionamento Nacional de

Pavimentos, denominado “MeDiNa”, a fim de suprir a lacuna de não haver um método nacional padronizado com base mecanicista. É importante ressaltar que os primeiros trabalhos brasileiros com foco em dimensionamentos mecanicista são datados do início dos anos 1990. Paralelamente a concepção teórica da metodologia M-E, foi lançado pelo DNIT, em versões de testes, no ano de 2018, uma ferramenta computacional para automatizar os cálculos de dimensionamento e previsão de desempenho de estruturas de pavimento com a abordagem mecanicista proposta.

O método MeDiNa é um avanço ao tratamento desenvolvido por Franco (2007), por ter validado e calibrado a metodologia que considera o revestimento asfáltico um material elástico, sendo caracterizado pelos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de carga repetida. Vale ressaltar que Franco (2007) também introduziu abordagem considerando a mistura asfáltica como viscoelástica, caracterizando-a pelo módulo dinâmico e fadiga por tração direta com tensão controlada, ponderando ainda a velocidade dos veículos e as variações de temperatura; tais preceitos representam um avanço aos citados no parágrafo anterior, porém ainda carecem de validação e calibração às solicitações brasileiras.

Conforme visto em Franco e Motta (2018), as principais hipóteses levadas em conta no método “MeDiNa” são:

- os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- os módulos de tração e compressão são semelhantes;
- nos cálculos de tensões e deformações, as camadas não têm peso, são ilimitadas horizontalmente e possuem espessura finita (com exceção do subleito, que é considerado semi-infinito);
- superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada, onde ocorrem apenas tensões normais;
- a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- em grandes profundidades, as tensões e deformações são nulas;
- as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderidas para sem aderência.

As equações do modelo foram obtidas através de dados de ensaios em laboratório para o comportamento dos materiais frente as solicitações específicas, simulando os esforços em uma rodovia. A calibração e validação dos danos por fadiga é baseada nos modelos apresentados por Fritzen (2016). Em relação ao comportamento estrutural, traduzido nos conceitos de Afundamento de Trilha de Roda (ATR), avaliam-se os materiais conforme

metodologia proposta por Guimarães (2009) e fazem-se correlações entre os fatores de deslocamento das seções e o dano médio de fadiga, também se baseando nos estudos de Fritzen (2016).

Destaca-se que a deformação permanente da camada asfáltica não é considerada no cálculo de ATR, assim como os materiais granulares, solos finos, siltsos e argilosos, constituintes de camadas estruturais ou do subleito, não são avaliados quando a fadiga. A verificação do critério de deformação permanente da camada de revestimento se dá pelo atendimento do *flow number* (FN), que é o ciclo onde a taxa de deformação plástica é mínima e a partir da qual, inicia-se o fenômeno de cisalhamento a volume constante (Medina e Motta, 2015).

Necessita-se informar a composição do tráfego atuante, onde é medida a ação do trânsito de cada grupo de eixos através da consideração da equivalência com o Eixo Padrão, de maneira similar ao “Método DNER”. Utilizam-se as ponderações de Fator de Veículo, preconizadas pelo DNIT, para tradução dos variados tipos de eixos com padrão, a fim de obter o Número Equivalente. É considerada a variação lateral da passagem do rodado, carregamento e pressão de inflação nos pneus e previsão da taxa de crescimento ao longo da vida de operação. A configuração do Eixo Padrão é apresentada na sequência.



Fonte: MeDiNa (2018).

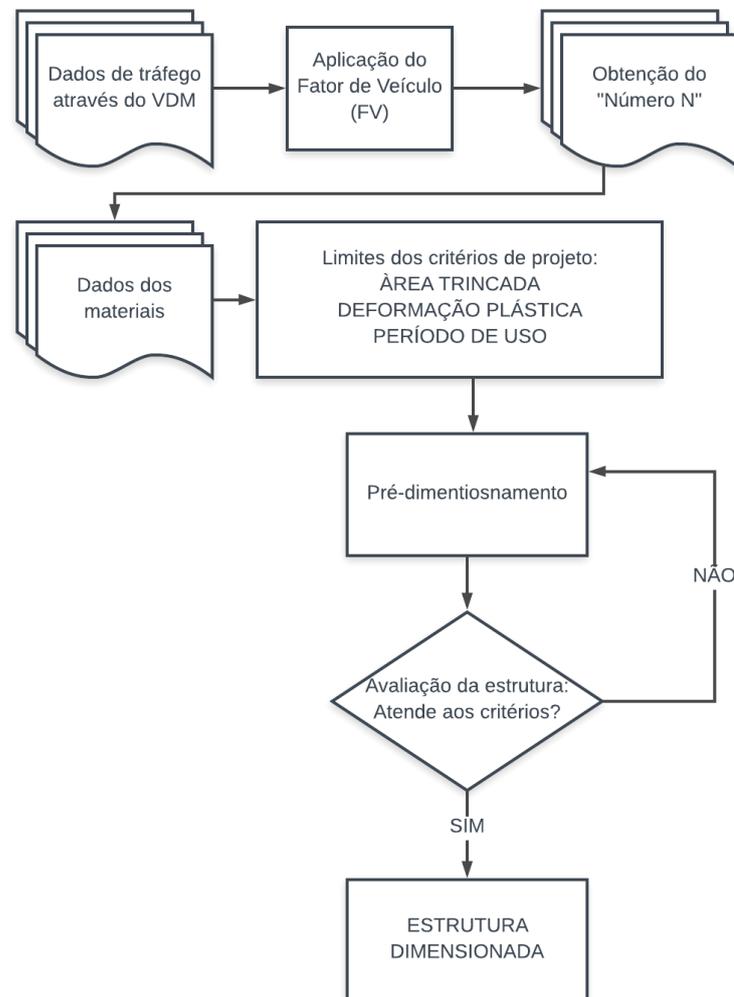
Ao projetar a estrutura do pavimento, o método é fundamentado em parâmetros mecânicos dos materiais, em termos de módulo de resiliência, coeficiente de Poisson, condições de aderência, massa específica aparente seca, deformações específicas e estados de tensões, variando com a tipologia do material em questão. Fritzen (2016) trabalhou com a consideração de que revestimento asfáltico possui comportamento elástico-linear. As camadas constituídas por materiais granulares e solos podem ser consideradas de comportamento linear ou não-linear.

Após informados os aspectos de tráfego e do comportamento dos materiais, propõe-se uma composição estrutural ao pavimento, pré-determinando suas espessuras. Conjugando todas

as informações, através da modelagem de previsão de desempenho, é possível estimar a área trincada e deformação permanente durante a sua vida útil.

Paralelamente, permite-se dimensionar a estrutura, variando a espessura da camada determinada. Nesta opção, indicam-se os critérios de deformação permanente e área trincada desejadas ao pavimento, assim modificam-se as espessuras pré-determinadas, na ordem de 0,50cm para camadas asfálticas e 1,00cm nas demais, até que sejam atingidos os parâmetros desejados, dentro do período de uso informado. O processo de dimensionamento pode ser descrito em etapas, representado no fluxograma a seguir.

Figura 4 - Fluxograma "MeDiNa".



2.3 Desempenho de pavimentos flexíveis

Franco (2007) define que o conhecimento do comportamento do pavimento asfáltico frente às suas solicitações é essencial durante a fase de projeto. O autor justifica afirmando que

as definições dos critérios de ruptura devem ser bem esclarecidas, tendo em vista que influenciam diretamente nos custos de uma rodovia: ao subdimensionar as camadas do pavimento, custos extras para reparação poderão ser necessários e ao superdimensionar, uma parte do investimento inicial poderia ser economizada.

De acordo com Fonseca (2013), ao longo do ciclo de vida de um pavimento, a perda de desempenho funcional e estrutural impacta na capacidade e qualidade de rodagem da rodovia. A condição funcional é retratada pelo conforto e segurança de rodagem que o pavimento permite ao usuário, ao passo que o aspecto estrutural diz respeito a capacidade de suporte de cargas propriamente dita. Tais conceitos já são consagrados na avaliação de pavimentos (Yoder e Witczak, 1975).

Bock (2016) relata que o processo de degradação dos pavimentos acontece em função do tráfego, das propriedades dos materiais e técnicas construtivas, das características do solo de subleito, das políticas de manutenções, das condições de drenagem e aspectos ambientais, progredindo de maneira não linear. Coloca que a ação do tráfego (através do número e magnitude das cargas atuantes) e aspectos climáticos (influenciados pelos índices de precipitação, umidade e radiação solar), são os principais causadores de patologias, principalmente ao tratar de trincamento por fadiga e afundamento de trilha de roda. O mesmo autor quantifica o avanço do desgaste dos pavimentos conforme se aumentam os valores das cargas trafegáveis.

Franco (2007) aponta que as passagens de cargas impostas pelo tráfego representam a principal forma de degradação do pavimento, tanto em aspectos funcionais, quanto estruturais. Explica que cada passagem de eixo contribui com uma parcela na deterioração do pavimento, a qual é denominada como “dano unitário”. Com as sucessivas solicitações do tráfego, têm-se o acúmulo de “danos unitários”, ocasionando a perda das características funcionais e estruturais do pavimento.

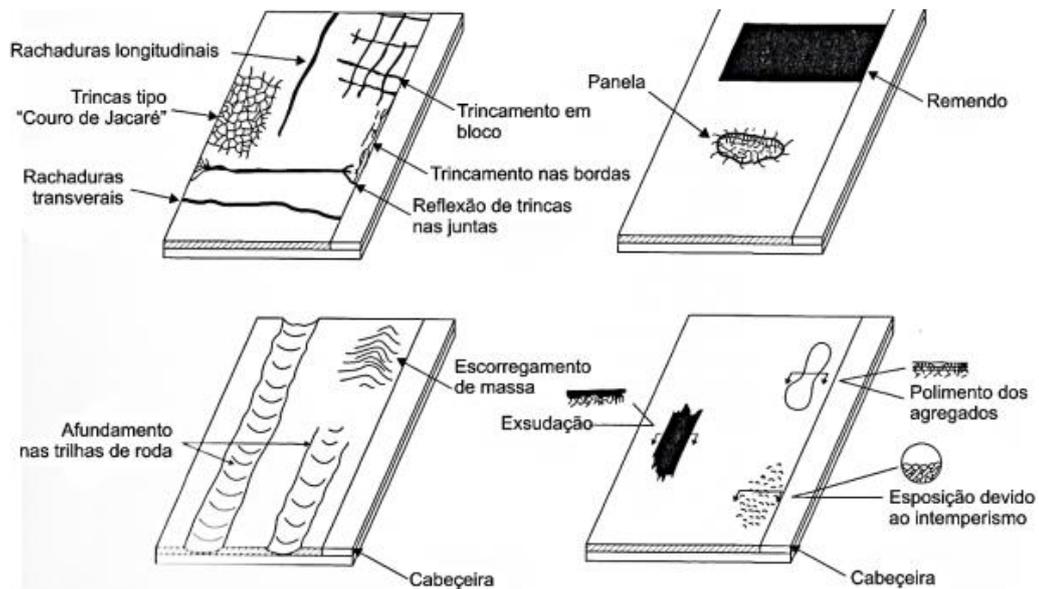
Medina e Motta (2015) afirmam que a variação da temperatura influencia significativamente as propriedades dos materiais de todas as camadas, mas principalmente no revestimento, onde seu desempenho possui significativa importância na performance da estrutura. Rossato (2015) observou como o Módulo de Resiliência se comporta ao longo do ano devido as variações das condições climáticas, verificando como a oxidação do ligante impacta na rigidez da camada asfáltica e conseqüentemente, sua resistência frente a deformações plásticas e trincamento por fadiga. Com um elevado grau de trincamento, existe a tendência de o revestimento passar a funcionar como blocos e não como camada íntegra (Souza Júnior, 2018).

A forma como a degradação ocorre também pode ser explicada através da relação entre tráfego e clima. Bock (2016) comenta que temperaturas elevadas e velocidade de trânsito baixa facilitam os efeitos de deformação permanente, ao passo que temperaturas baixas e velocidades elevadas são fatores que aceleram o surgimento de trincas por fadiga. A velocidade de tráfego está correlacionada ao tempo de atuação da carga na estrutura do pavimento.

Os principais tipos de manifestações patológicas que contribuem para redução da integridade de pavimentos flexíveis foram descritos em DNIT (2006b), os quais são sintetizados a seguir. Na Figura 5, são representadas ilustrações dos defeitos descritos.

- trincamentos no revestimento: são causados, na maior parte, por carregamento sucessivo (onde submete o material a tensões e deformações), envelhecimento do concreto asfáltico, trincas ou recalques nas camadas inferiores, umidade excessiva ou deficiências dos materiais utilizados para pavimentação; podem ser quantificados através da porcentagem de área trincada.
- deformações permanentes: apontadas como afundamentos nas trilhas de roda, deformações plásticas no revestimento e depressões, podendo ser causadas por carregamento em excesso, de longa duração, muito frequente e canalizado, deficiências no subleito, camadas mal compactadas, dosagem do concreto asfáltico ou seleção do tipo de ligante inadequados; os métodos mais empregados para quantificar deformações são o Falling Weight Deflectometer (FWD) e a viga Benkelman.
- desagregação: perda de adesão entre o ligante asfáltico e o agregado, acarretando fratura mecânica, comumente ocorrendo com o envelhecimento do ligante;
- interação entre as manifestações patológicas: o processo de deterioração é controlado pela magnitude de deformações específicas de tração na face inferior da camada do revestimento e pelas deformações específicas de compressão no topo do subleito. O avanço do trincamento e desagregação pode tornar-se um meio de comunicação do interior da estrutura com o ambiente, facilitando o acesso de água nas camadas granulares, provocando defeitos adicionais na estrutura ao reduzir a resistência ao cisalhamento dos materiais não tratados com ligantes, intensificando as deformações estruturais do pavimento. É possível avaliar a interação dos defeitos através da quantificação da irregularidade longitudinal (International Roughness Index – IRI).

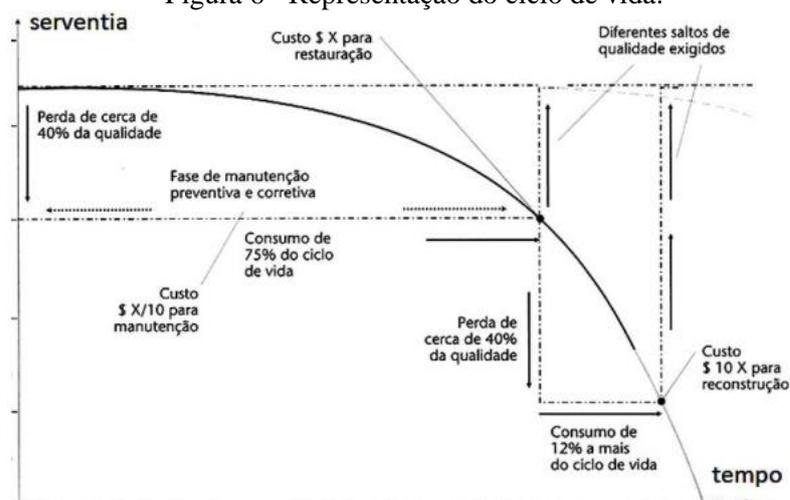
Figura 5 - Patologias em pavimentos flexíveis.



Fonte: Papagiannakis e Masad (2008), adaptado por Ribas (2014).

A avaliação desse iminente processo de degradação faz parte de um sistema de gestão, onde a partir das condições atuais e prevendo as futuras, se decide sobre intervenções para adequação do nível de serventia, sendo essas em operações de manutenção ou de recuperação, que resultarão em incremento de qualidade na condição do pavimento. Na Figura 6, é apresentada uma representação típica da evolução da vida de um pavimento.

Figura 6 - Representação do ciclo de vida.



Fonte: Haas e Hudson (1978), adaptado por Balbo (2007).

Para isso, desenvolveram-se os modelos de previsão de desempenho, onde avaliam-se as respostas futuras do pavimento, em termos de decréscimo de performance funcional e estrutural, frente as solicitações de tráfego e climáticas que atuam sobre ele. Através de um modelo de previsão de desempenho, é possível estimar a vida restante do ativo (quando se determina uma condição limite), otimizar combinações de projeto, avaliar os impactos de vários cenários e auxiliar na projeção dos custos do ciclo de vida do pavimento (FHWA, 2006).

Chen *et al.* (1995) comentaram sobre a etapa de previsão de desempenho ser de difícil elaboração em um programa de gerenciamento de uma infraestrutura rodoviária, devido ao número de variáveis incidentes no mecanismo de perda de qualidade e suas quantificações incertas.

Haas *et al.* (1994) classificam os modelos em: puramente mecanicista, mecanístico-empíricos (M-E), empíricos e subjetivos, onde, para todos, é necessário: um banco de dados adequado às condições e interesses do sistema planejado; a inclusão de todas as variáveis que afetem o desempenho; uma formulação funcional adequada; e critérios estatísticos conveniente ao modelo (FHWA, 2006). O modelo M-E é o mais empregado, onde a resposta estrutural ou funcional é relacionada a deterioração medida, sendo obtida através de equações de regressão (Haas *et al.*,1994).

FHWA (2006) também classifica os modelos em determinísticos e probabilísticos, citando o potencial de inserir as incertezas e particularidades do pavimento no processo de análise probabilística, aproximando o método da realidade. Complementa, afirmando que os procedimentos determinísticos são suscetíveis a erros devido a não consideração de variações regionais que ocorrem nos pavimentos, colocando que tal situação pode ser aprimorada através da calibração do modelo.

Os modelos de desempenho devem traduzir as condições reais de onde são implantados, focando esforços para que tal reprodução seja da maneira mais apurada possível. Desta forma, Albuquerque (2007) relata que modelos abrangentes, geralmente desenvolvidos com base de dados de outros países, podem não ser sensíveis às condições atuantes no local da análise. Para contornar a problemática, destaca o desenvolvimento e utilização de modelos regionalizados, conforme exemplos a seguir.

Marcon (1996) desenvolveu curvas de tendência para previsão da progressão de irregularidade longitudinal, deflexão e afundamento de trilha de rodas, relacionando o avanço das patologias com o tráfego urbano e rodoviário atuantes na malha viária do estado de Santa Catarina. O autor apresentou três equações, destinadas a regiões do estado, de forma com que se contemplasse condições de contorno semelhantes para cada uma delas. Evidencia-se o fato

de que o autor considerou apenas a idade do pavimento como variável nas equações e os coeficientes de determinação relativamente baixos.

Lerch (2002) propôs um modelo empírico de previsão da evolução da irregularidade longitudinal de pavimentos asfálticos após serviços de recape, em função da irregularidade antes da execução dos serviços e da espessura da camada de reforço ou recomposição. Além disso, apresentou valores para calibração dos modelos de progressão de irregularidade longitudinal do HDM-4. Echeverria (2011) verificou que o modelo proposto por Lerch (2002) apresentou os melhores resultados para prever a redução da irregularidade longitudinal quando o IRI antes da operação de manutenção estava contido dentro do intervalo entre 2,7m/km e 3,5m/km.

Yshiba (2003) estudou modelos estatísticos para previsão de desempenho frente a irregularidade longitudinal e deflexão com viga Benkelman, com base em um banco de dados composto por informações de idade, tráfego e estrutura de pavimentos asfálticos de rodovias do estado do Paraná. O autor considerou ser possível prever o desempenho com um banco de dados formado por um curto período de coleta de informações.

Nakahara (2005) estudou o desempenho de reforços, frente a irregularidade longitudinal e área trincada, em pavimentos asfálticos de vias urbanas submetidos a um tráfego elevado. Propôs modelos empíricos de previsão de desempenho ao empregar modelagem matemática que consideram efeitos aleatórios entre as variáveis. Ao comparar os resultados das equações propostas com os do HDM-4, percebeu que seu método era mais conservador em relação a evolução da área trincada e fornecia resposta semelhante para a previsão de irregularidade.

Espíndola (2014) propôs modelos empíricos de previsão de desempenho para a deflexão e a irregularidade de pavimentos flexíveis, utilizando dados da malha rodoviária do Rio de Janeiro. A autora salientou a importância da necessidade de empregar um banco de dados robusto e representativo, a fim de minimizar erros nas modelagens matemáticas, além de que as equações de previsão de desempenho devem possuir as variáveis independentes que de fato influenciam na resposta pretendida.

Prediger (2016) estudou modelos empíricos para a deformação permanente em trilha de rodas e para a irregularidade longitudinal. Através de análises de regressão e a técnica estatística *bootstrapping*, desenvolveu equações para uma rodovia do estado do Rio Grande do Sul. Verificou que o modelo de IRI, mesmo sendo simples, se mostrou adequado para representar o pavimento estudado, apresentando resultados melhores que outros modelos conhecidos. O mesmo fato não foi constatado para a previsão de afundamento de trilha de rodas. A autora

salientou a importância de se utilizar modelos desenvolvidos no local analisado para a previsão de desempenho do pavimento.

Bueno (2019) propôs um modelo empírico-mecanicista para previsão da irregularidade longitudinal, verificando também seus impactos em termos financeiros. O autor compara os resultados da metodologia desenvolvida com os do HDM-4, observando similaridade dos valores, desde que procedida a calibração dos parâmetros da estrutura simulada no HDM-4. Por mais que sejam necessários maiores testes para validar e calibrar sua metodologia, seu trabalho contribui significativamente para os avanços brasileiros na abordagem mecanicista de pavimentos

Além destes, também merecem destaque o modelo empírico para previsão da irregularidade longitudinal elaborado por Queiroz (1981), dado seu pioneirismo em âmbitos nacionais e significativo emprego no Brasil, tendo em vista que serviu como referencial para o modelo regulamentado pelo DNER (159/1985); e de Paterson (1987), que estudou a evolução de irregularidade longitudinal, trincamento, desgaste e afundamento da trilha de roda em função das condições atuais, de fatores estruturais, ambientais e de tráfego, serviu como base para o modelo de deterioração incorporado ao HDM-3 e HDM-4.

No HDM-4, para pavimentos com revestimento asfáltico, é possível simular o surgimento e a progressão de área trincada (estruturais e térmicas), desgaste, trinca nos bordos, painelas, deformação permanente, irregularidade longitudinal (em função de deformação dos materiais, trincamento da superfície, afundamento de trilha de roda, painelas, precipitação, temperatura e umidade) e aspectos relacionados a micro e macrotextura do revestimento.

Nas equações, são levadas em considerações parâmetros relacionados ao clima, tráfego, idade do pavimento, geometria da rodovia, características estruturais do pavimento e aspectos das propriedades dos materiais de pavimentação, assim como fatores de calibração, que modelam as equações para situações específicas, visando maior precisão nas respostas do método.

As equações consideradas no HDM-4 para as previsões de desempenho, assim como os significados de cada um dos fatores de calibração podem ser vistas na Parte C do Volume 4 do manual do programa, elaborado por Odoki e Kerali (2006) ou em Nascimento (2005), na língua portuguesa. Quanto aos fatores de calibração, Arango (2018), em um estudo em conjunto com o DNIT, apresenta valores para os coeficientes, ponderados para situações ocorrentes no Brasil. Nunes (2012) destaca a importância dos fatores de calibração ao concluir, em uma análise econômica nesta metodologia, entre os doze itens mais impactantes no valor presente líquido, seis são fatores de calibração.

A abordagem proposta por Franco (2007) também representa um avanço científico no âmbito brasileiro. Através dos parâmetros de calibração laboratório-campo estudados por Fritzen (2016), referenciou o processo de previsão de desempenho empregado no MeDiNa, que trabalhou com ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de cargas repetidas de misturas asfálticas. Os danos por fadiga, são expressos em termos de área trincada no revestimento asfáltico, que com a evolução do tráfego solicitante, assimila uma curva “Sigmoidal”, definida matematicamente por:

$$AT (\%) = \frac{e^{-A} \cdot e^{-B}}{1 - e^{-B}}, \text{ sendo: } A = (N' - 1/Z - 1)^n; \text{ e } B = (-1/Z - 1)^n \quad (1)$$

Onde:

AT (%) = área trincada em percentual;

Z e n = parâmetros da curva Sigmoidal;

N' = Número Equivalente deslocado.

Trabalha-se com o deslocamento horizontal do início da curva “sigmoidal” para minimizar o erro entre a AT lida em campo com a curva sigmoide padrão. A leitura da AT em campo é feita em faixas de 20,00 metros de largura, onde secciona-se a área em três partes longitudinais e dez partes transversais, totalizando 30 quadrantes. A operação de deslocamento também foi usada por Nascimento (2015), e utiliza uma taxa variável de crescimento do dano, definida por:

$$N' = (N \cdot fS) \cdot 10^{-10} \quad (2)$$

Onde:

N = Número Equivalente de repetições do eixo padrão quando foi medida a AT;

fS = Fator de deslocamento.

Orienta-se a utilizar os parâmetros “Z” e “n” iguais a 0,25 e 5,00, pois esses coeficientes resultaram no melhor ajuste da curva sigmoide, tendo um coeficiente de determinação $r^2=0,82$.

Para correlacionar os danos de Área Trincada com informações estruturais das camadas do pavimento, trabalha-se com o conceito de Dano Médio (Equação 3) em 20 pontos da camada de revestimento, distribuídos verticalmente em duas posições (na superfície e na face inferior da camada asfáltica) e horizontalmente em 10 posições divididas igualmente entre o centro do carregamento (ponto 0) até o ponto 32,85cm, considerando o eixo padrão rodoviário. O Dano

médio é calculado para cada um dos pontos observados. Fritzen (2016) adaptou a sequência de cálculos de Análise Elástica de Múltiplas Camadas - AEMC, desenvolvido por Franco (2007), para quantificar essa etapa.

$$D_{\text{médio}} = \frac{1}{20} \sum \left(\frac{P}{N} \right) \quad (3)$$

Onde:

P = Uma aplicação do eixo da carga padrão;

N = Número permissível de aplicação de eixo de carga.

Por fim, o Fator de deslocamento, é obtido através do produto de duas constantes e do $D_{\text{médio}}$, definido por:

$$fS = C1 \cdot (D_{\text{médio}})^{C2} \quad (4)$$

Onde:

C1 e C2 = constantes do método, pelo melhor ajuste, quantificadas, respectivamente, por 1993,7 e 0,3737.

Fritzen (2016) define o erro padrão em função da evolução da área trincada prevista, sendo assim, conforme prevê-se maiores porcentagens de área trincada, trabalha-se com maiores índices de erro. Não são considerados efeitos de fadiga nas camadas subjacentes ao revestimento.

A previsão de deformação permanente total da camada estrutural, expressa em termos de Afundamento de Trilha de Roda (ATR) é realizada através da modelagem proposta por Guimarães (2009), avaliada através de ensaios triaxiais de cargas repetidas de longa duração.

A previsão de deformação plástica considera pontos nas camadas granulares e no subleito, verticalmente posicionadas no eixo do rodado e no centro do conjunto de rodas. Não são consideradas deformações plásticas na camada de revestimento, sendo esta afirmação válida quando a mistura atende aos critérios de *Flow Number* para a classe de solicitação imposta.

O programa ainda fornece as bacias de deflexões medidas no topo de cada uma das camadas e do subleito. As bacias são calculadas com os parâmetros (tráfego e materiais) informados, simulando os equipamentos Viga Benkelman e *Falling Weight Deflectomete*, não

sendo quantificado o comportamento das deflexões ao longo do período avaliado. Dalla Roza (2018) cita que estes resultados são úteis para controle construtivo da rodovia.

Serigos *et al.* (2014) relatam a necessidade de constante monitoramento e atualização da metodologia de previsão de desempenho, principalmente quando a análise acontece durante vários anos, pois as incertezas podem ser cumulativas ao longo da vida do pavimento. De acordo com Zaghoul *at al.* (2007), o desempenho dos pavimentos se altera significativamente durante o ciclo de vida, assim como os aspectos solicitantes da estrutura e a própria composição das camadas do pavimento, tendo em vista as rotinas de manutenção e reabilitação executadas ao longo da vida da rodovia.

As atividades de recondicionamento da performance de uma rodovia são estratégias para mantê-la em funcionamento adequado pelo mais longo período, até que operações de conserva e restauração não resultem em acréscimos significativos na qualidade de rodagem, julgando seus custos financeiros. A não realização de rotinas de manutenção ocasiona em uma degradação acelerada dos índices de serviço do pavimento e das camadas estruturais inferiores.

Entende-se por conservação: correção rotineira de defeitos pontuais, que não representam acréscimo nas condições funcionais do pavimento, tais como limpezas dos arredores e das obras de drenagens, selagem de trincas e tapa buracos; DNIT (2005) apresenta as diretrizes destas tarefas. Já os serviços de restauração representam maiores esforços, onde o objetivo é melhorar a capacidade de carga da estrutura do pavimento e sua condição funcional, sendo executado em apenas alguns determinados períodos durante a vida útil do ativo; exemplifica-se com os reforços estruturais do pavimento e microrrevestimentos, orientados por DNIT (2006b).

2.4 Análise de confiabilidade

De modo que a maior parte dos parâmetros considerados na concepção e avaliação de um pavimento, tanto na parte de engenharia de tráfego, quanto na mecânica dos materiais, possuem variações em suas quantificações, podendo o valor estimado não representar o comportamento de todo o objeto em estudo, é pertinente verificar o impacto que essas incertezas podem gerar no desempenho do ativo e, conseqüentemente, nos montantes financeiros. Para isso, desde o desenvolvimento do guia de dimensionamento da *AASHTO*, em 1993, uma abordagem de projeto baseada em confiabilidade foi recomendada para um tratamento racional das incertezas existentes no projeto (Alhasan *et al.*, 2018).

De acordo com Huang (2004), em uma metodologia determinística, geralmente são atribuídos fatores de segurança para os parâmetros que possuem sua quantificação incerta e que podem ter efeito significativo no dimensionamento. Tal consideração pode resultar em estruturas superdimensionadas ou subdimensionadas, dependendo da magnitude dos fatores de segurança aplicados.

Em um método probabilístico, cada parâmetro de projeto é descrito por uma distribuição de probabilidade (através de valores médios e desvios padrões), e a confiabilidade do projeto pode ser avaliada, estimando uma distribuição para o dimensionamento através de métodos de simulação (Luo *et al.*, 2018). Ao comparar abordagens determinísticas e probabilísticas, pode-se afirmar que a segunda é mais realista e representativa da natureza variável e incerta dos pavimentos (Rose *et al.*, 2018).

A definição de confiabilidade pode ser vista em Franco (2007), sendo a probabilidade de a serventia do pavimento permanecer em nível de serviço adequado durante a vida de operação. Hall *et al.* (2012) a descrevem como a probabilidade de cada indicador de desempenho ser menor que um nível crítico pré-definido. Sua avaliação possui correlação com a variabilidade dos parâmetros que caracterizam o tráfego solicitante e o admissível, considerando os possíveis modos de ruptura da estrutura em questão. Os autores ainda afirmam que a conceituação de confiabilidade é baseada no pressuposto que a diferença entre o desempenho previsto e medido é resultado de todas as variações e incertezas.

Hall *et al.* (2012) indicaram que o tráfego, a espessura e as propriedades dos materiais da camada de revestimento são os fatores mais importantes, ao relatar os efeitos que as considerações probabilísticas podem resultar na análise do desempenho dos pavimentos.

Suzuki *et al.* (2004) relata que em função da confiabilidade estatística e dos resultados colhidos em campo, é possível estimar o acréscimo ou redução da vida útil do pavimento, podendo ser um mecanismo de penalização ou bonificação para os projetistas e executores de obras de pavimentação. Os mesmos autores apontaram a necessidade de majoração das camadas granulares em até 20%, ao aplicar procedimentos probabilísticos, nos parâmetros de entrada do “Método DNER”. Ao tratar dos modelos de dimensionamento, Alhasan *et al.* (2018) afirmam que os métodos M-E podem incorporar uma gama mais ampla de variáveis.

Conforme Fritzen (2016), o método M-E brasileiro (MeDiNa) teve sua abordagem a confiabilidade baseada na metodologia de NCHRP (2004) e Nascimento (2015), onde a variabilidade dos parâmetros de projeto é levada em conta em modelos de previsão de erros ou de desvio padrão dos danos a serem estimados que, por considerar um intervalo de interesse e que a previsão dos danos possui distribuição normal, possibilita a determinação de um nível de

confiabilidade para a análise, dispensando a necessidade de simular o estudo diversas vezes para encontrar resultados em quantidade suficiente para realizar testes probabilísticos.

O erro da previsão é quantificado comparando os dados medidos na pista com os calculados através do método em questão, nos processos de calibração da metodologia. Na pesquisa de Fritzen (2016), o erro padrão médio foi calculado para diferentes índices de dano, sendo constatado que o erro previsto aumenta na medida em que o dano médio também progride.

Ao determinar um nível de confiabilidade para a análise no MeDiNa, calcula-se a área trincada e aplica-se o erro médio padrão como um fator de ajuste (quantificado na calibração) para a área trincada prevista através dos dados de entrada médios, que são considerados com a confiabilidade de 50%. Franco (2007) e Santos (2011) também comentam que utilizar valores determinísticos durante o projeto, na condição de valores médios, as previsões de desempenho possuem a probabilidade de 50% de a seção projetada trabalhar adequadamente sob as solicitações pertinentes.

No desenvolvimento das análises de confiabilidade, são necessários métodos matemáticos para consideração das variações das grandezas, sendo os mais utilizados: simulação de Monte Carlo, método da estimativa pontual, métodos de confiabilidade de primeira ordem (*FORM*) ou de segunda ordem (*SORM*). No entanto, Alhasan *et al.* (2018) e Hall *et al.* (2012) indicam que o Método de Monte Carlo tem sido amplamente utilizado na análise de risco e confiabilidade, tendo em vista sua capacidade de produzir estimativas precisas para este fim, sendo apontado pelos autores como a melhor metodologia dentre as citadas.

A técnica Monte Carlo trabalha com o objetivo de formar uma amostra significativa do comportamento de um sistema pelo sorteio aleatório de situações, a fim de avaliar o valor médio dos parâmetros e deduzir seu comportamento (Franco, 2007). Silva (2017) comenta que o método, no viés matemático, se baseia em processos determinísticos e estocásticos mesclados. Seu emprego é visto com frequência em trabalhos com o escopo em pavimentos: Ayres (1997), Ozbay *et al.* (2004), Franco (2007), Wimsatt *et al.* (2009), Santos (2011), Ferri (2013) e Silva (2017).

Para executar a simulação, é necessário estimar o valor médio dos parâmetros e seus intervalos de variação possíveis, através de valores de desvio padrão. A iteração aleatória e independente dos valores e suas variações, quando repetida inúmeras vezes, permite criar um histograma e determinar a distribuição de frequências do modelo estudado. A distribuição dos parâmetros físicos dos materiais geralmente assume caráter normal, enquanto os termos financeiros apresentam distribuição log-normal.

Sendo o Método de Monte Carlo uma técnica de amostragem, seus resultados estão sujeitos a erros. O número elevado de iterações necessárias justifica-se pela ordem de valores para a quantificação do erro das estimativas das variáveis aleatórias. Santos (2011) trabalhou com o valor de 2%, ao passo que Ferri (2013), 3%.

Quanto maior o número de simulações, menores serão os erros da técnica de amostragem, por isso, Santos (2011) afirma que a Simulação de Monte Carlo exige um número grande de análises determinísticas para chegar-se a uma solução adequada. Timm, Newcomb e Galambos (2000) realizaram 5.000 simulações para cada cenário avaliado; Alhasan *et al.* (2018), 8000 simulações; e Luo, Xiao, Sharma (2014), 10.000 simulações. O elevado número de simulações necessárias para o emprego do método representa o seu maior ponto negativo.

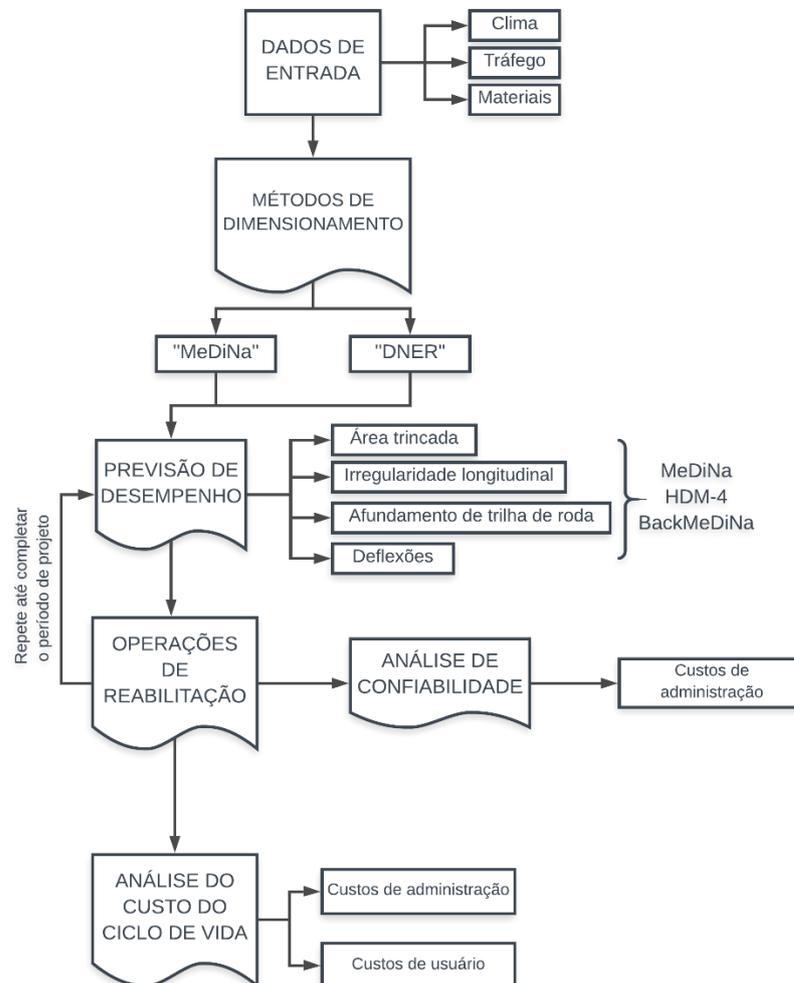
Em uma análise que contemple o âmbito econômico, também é possível avaliar de maneira probabilística os termos financeiros. Para tal, cita-se o trabalho desenvolvido por Sanchez-Silva *et al.* (2005), onde foi empregado um modelo baseado em confiabilidade para otimizar o projeto de pavimentos flexíveis, sendo considerados os custos de construção e reabilitação, bem como fatores financeiros (taxas de desconto), que são relevantes para o processo de tomada de decisão. Para Rajbongshi (2014), em abordagens de pavimento economicamente eficiente, são mais adequados os modelos de dimensionamento em que a confiabilidade é avaliada.

3 METODOLOGIA

Este capítulo é explicativo e demonstrativo em relação aos procedimentos que foram realizados para ser possível quantificar e analisar o custo do ciclo de vida de pavimentos flexíveis. Contêm a caracterização dos dados de entrada, informações sobre as estruturas avaliadas, técnicas para previsão de desempenho das estruturas, emprego de procedimentos para condicionamento de desempenho, levantamento de custos e análise de confiabilidade.

Buscou-se avaliar as estruturas em termos funcionais e estruturais ao longo do período analisado. Para ser possível realizar as previsões de desempenho, foram empregadas as metodologias do MeDiNa e do HDM-4, com auxílio das respectivas ferramentas computacionais, os quais forneceram dados quanto a área trincada, a irregularidade longitudinal, as deflexões e o afundamento de trilha de roda. O processo sequencial da execução dos trabalhos desta dissertação pode ser sintetizado em etapas, conforme fluxograma da Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma metodologia.



3.1 Caracterização dos dados de entrada

Neste item, serão apresentados os dados do tráfego solicitante, dos materiais que compõem a estrutura do pavimento e do clima local. Delimitou-se uma composição para a seção analisada, sendo: revestimento de concreto asfáltico, base e sub-base de materiais granulares e o subleito com o solo local, resultando em uma estrutura semelhante à Figura 8. Além disso, foram pré-estabelecidos os padrões de tráfego e aspectos geométricos da rede viária, conforme Quadro 1. A determinação prévia dos parâmetros citados se faz necessária para possibilitar a comparação de situações de natureza similar.

Figura 8 - Configuração padrão da estrutura.



Quadro 1 - Características da rede viária.

Extensão	1,00 km
Largura da via	7,20 m
Largura do acostamento	2,50 m
Direção do tráfego	Dois direções
Tipo de velocidade de fluxo	Padrão para duas pistas
Padrão de fluxo de tráfego	Livre
Classe da rodovia	Primária
Geometria	Plana
Velocidade máxima	110 km/h
Número de vias e de acostamento	2

Nas simulações com a ferramenta HDM-4, para o modelo de velocidade e padrão de tráfego, foram consideradas as quantificações padrões do programa, o que influencia na distribuição do tráfego durante o dia, a capacidade de tráfego da via e os níveis de interações entre os veículos. Além disso, as condições de geometria da via, que faz consideração aos

aclives e declives, a superelevação e as curvaturas, também foram considerados os valores da configuração padrão do programa.

3.1.1 Tráfego

As informações relativas à composição da frota foram baseadas em um conjunto de tráfego genérico. Levou-se em conta a classificação dos veículos de DNIT (2006c), assim como o carregamento por eixo permitido pelo CONTRAN (1998). Foi necessário quantificar o carregamento em função das metodologias para tradução do tráfego em eixo padrão abordadas nesta dissertação. Na Tabela 1 são informados os “Fatores de Veículos” resultantes das equações de *USACE*, método utilizado pelo DNIT, e do *Equivalent Standard Axle Load Factor (ESALF)*, forma que é denominada a tradução do carregamento em números de eixos equivalentes no HDM-4.

Tabela 1 - Detalhamento do tráfego.

Caracterização	Classe	VDM	FV (USACE)	FV (ESALF)
Passeio	-	1600	-	-
Ônibus	2CB	35	3,57	2,94
Ônibus trucado	3CB	10	8,83	3,90
Caminhão	2C	165	3,57	2,94
Caminhão trucado	3C	58	8,83	3,90
Caminhão simples	4C	35	9,58	5,30
Caminhão trator + semi reboque	2S3	40	12,87	7,56
Caminhão trator trucado + semi reboque	3S2	5	17,38	7,11
Caminhão trator trucado + semi reboque	3S3	95	18,13	8,52
Caminhão trator trucado + semi reboque	3I3	5	18,7	10,66
Caminhão trator trucado + dois semi reboques	3D4	12	25,92	10,32
Caminhão trator trucado + dois semi reboques	3T6	8	34,47	13,54

Quadro 2 - Carregamento dos eixos.

Eixo	Carga (t)
 ESRS	6,00
 ESRD	10,00
 ETD	17,00
 ETT	25,50

Adaptado de CONTRAN (1998).

Para cada uma das faixas de rodagem, o VDM foi quantificado em 2068 veículos, sendo o somatório relativo ao “N_{USACE}” resultando em 1,70E+06 passagens do eixo padrão para o primeiro ano, ao passo que o “YE4”, forma que o HDM-4 denomina o número de passagens do eixo padrão, para o primeiro ano foi 9,05E+05. O VDM total, levando em conta as duas pistas, foi de 4136 veículos. Para estimar o tráfego futuro atribuiu-se uma taxa de crescimento anual de 3,00%. Não foi considerada a existência de tráfego não motorizado.

3.1.2 Materiais

A seleção dos materiais se deu pela forma com que eles foram caracterizados, sendo as misturas asfálticas definidas como elásticas-lineares, com o Módulo de Resiliência obtido pelo ensaio de compressão direta, tendo a curva de fadiga expressa na Equação 5.

$$N = k_1 \cdot e_t^{k_2} \quad (5)$$

Onde:

k_1, k_2 = constante dos materiais obtidas em laboratório;

e_t = deformação específica resiliente de tração.

Para os materiais granulares e os solos, selecionaram-se amostras onde o módulo de resiliência fosse caracterizado pelo modelo composto, proposto por Macedo (1996), descrito na Equação 6, e a deformação permanente pela Equação 7, além de também ter o índice *CBR* conhecido, para possibilitar as comparações entre os métodos de dimensionamento.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (6)$$

Onde:

σ_3 = tensão confinante;

σ_d = tensão desvio;

k_1, k_2, k_3 = constante dos materiais obtidas em laboratório.

$$\epsilon_{p}^{esp} = \Psi_1 \cdot (\sigma_3)^{\Psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\Psi_3} \cdot (N)^{\Psi_4} \quad (7)$$

Onde:

ϵ_{p}^{esp} = Deformação permanente;

$\Psi_{1, 2, 3 \text{ e } 4}$ = constantes dos materiais obtidas em laboratório;

N = tráfego solicitante.

Para o concreto asfáltico, por serem conhecidos os valores dos coeficientes “k1” e “k2” da curva de fadiga, utilizaram-se os dados de Fritzen (2016), o qual se baseou no trabalho de Santos (2015). No Quadro 3 são apresentados tais valores.

Quadro 3 - Parâmetros do Revestimento Asfáltico.

MR (MPa)	Fadiga	
	k1	k2
4901	4,00E-05	-1,999

Para os materiais granulares, foram utilizados os dados de Malysz (2009), para uma brita graduada basáltica. Seu módulo de resiliência seguiu um modelo não-linear, a partir do modelo de Macedo (1996), já apresentado. No Quadro 4 são apresentados os valores médios dos materiais em questão.

Quadro 4 - Parâmetros dos Materiais Granulares.

Material	Módulo de Resiliência			CBR (%)	Deformação Permanente			
	k1	k2	k3		Ψ1	Ψ2	Ψ3	Ψ4
Brita basáltica	3193,00	0,3516	0,6442	170	0,04262	-0,9946	1,082	0,04502

Para o subleito, foram utilizados os valores obtidos por Zago (2016). Da mesma forma que os materiais granulares, empregou-se o comportamento não-linear, também podendo ser regido pelo modelo constituinte proposto por Macedo (1996). Neste ponto, ressalta-se a recomendação de Ramos (2003) e Bezerra Neto (2004) para utilizar o modelo composto em solos e materiais granulares. Os valores médios relativos para os solos são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Parâmetros do Subleito.

Material (Classificação MCT)	Módulo de Resiliência			CBR (%)	Deformação Permanente			
	k1	k2	k3		Ψ1	Ψ2	Ψ3	Ψ4
Solo - LG'	171,01	0,32	-0,53	11	0,385	-0,861	1,523	0,075

Para os parâmetros de Poisson e massa específica aparente seca dos materiais, foram atribuídos os valores conforme Quadro 6.

Quadro 6 - Dados Materiais.

Material	Massa específica (g/cm ³)	Coefficiente de Poisson
Concreto asfáltico	2,43	0,30
Material granular	2,47	0,35
Subleito natural	2,7	0,45

3.1.3 Dados climáticos

Os dados climáticos são levados em consideração nas simulações no HDM-4. As informações climáticas fazem referência a região sul do Brasil, classificadas para um local de clima subtropical, com índices de umidade “subúmido”, conforme segue no Quadro 7.

Quadro 7 - Quantificações climáticas.

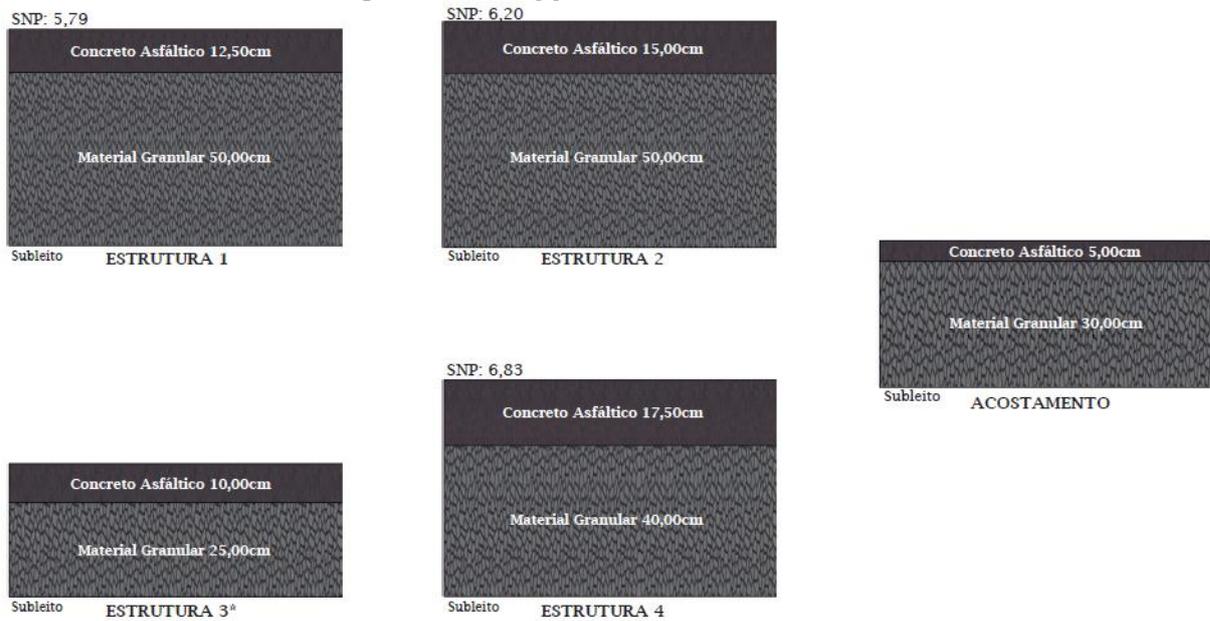
Duração da estação seca por ano	5 meses
Precipitação mensal média	157 mm
Temperatura média anual	19 °C
Faixa de temperatura ambiente mensal média	15 °C
Tempo em que a temperatura é maior que 32 °C	60 dias
Tempo com a rodovia coberta por neve	0%
Tempo com a rodovia coberta por água	10%

3.2 Estruturas avaliadas

Para comparar diferentes composições de pavimentos, foram estudadas alternativas com variações nas espessuras de concreto asfáltico e de brita graduada, criando cenários para análise de custo de ciclo de vida em função das alterações nas composições dos pavimentos.

Foram avaliadas estruturas pré-dimensionadas através da metodologia MeDiNa e uma composição obtida com base na metodologia de DNIT (2006a). A Figura 9 apresenta as estruturas trabalhadas. A Estrutura 3 representada diz respeito àquela dimensionada pelo Método DNER (DNIT, 2006a) que, durante as simulações, constatou-se necessidade de modificação nesta concepção, o que será comentado no Item 4.1 Desempenho das estruturas. Para as faixas de acostamento, foi prevista uma composição conforme representado na Figura 9, estabelecendo que fosse resguardada uma diferença de nível máxima de 3,00 cm para a pista de rodagem.

Figura 9 - Concepção das estruturas avaliadas.



Ao longo do ciclo de vida da estrutura, foram planejadas operações de manutenção e reabilitação para o condicionamento das condições de tráfego. Para tanto foi preciso definir os limites de desempenho funcional e estrutural, os quais configuram os momentos para se executar a reabilitação do pavimento, condição também denominada como “gatilho”.

Definiu-se como cenário limite de degradação funcional do pavimento em função da porcentagem de área trincada, o valor de 20%, o que representa que o revestimento asfáltico da área em que o tráfego está concentrado já apresenta sinais de fadiga, conforme DNIT (2006b). Nas simulações no HDM-4, informou-se que a condição inicial do pavimento era caracterizada pela porcentagem zero de área trincada.

Para deformação permanente da estrutura, o valor de 10mm foi definido como limite para recuperação das áreas afetadas pelo afundamento de trilha de roda, adotando a abordagem de DAER (2017). Salienta-se que a metodologia do MeDiNa não avalia a deformação da camada de revestimento, condicionando este fato ao atendimento do número de ciclos no ensaio de *Flow Number*, para as condições de tráfego no trecho em estudo. O que possibilitou assumir a condição proposta no MeDiNa foram os resultados obtidos por Faccin (2018), que avaliou uma composição de concreto asfáltico semelhante com a utilizada nas simulações desta dissertação.

Para a irregularidade longitudinal, atribuiu-se em 3,6m/km o valor limite para deflagrar uma operação de manutenção. Conforme ASTM (2008), tem-se um tráfego confortável, para as velocidades entre 100km/h e 120km/h, quando a irregularidade longitudinal do pavimento

está contida entre 2m/km e 4m/km. O valor de IRI inicial foi estimado em 1,8m/km, simulando uma rodovia bem executada. Os valores iniciais e de limite da irregularidade longitudinal foram quantificados levando em conta a classificação de DNIT (2006b), que indicam um pavimento excelente e regular, respectivamente.

Para a previsão do desempenho das estruturas avaliadas, foram procedidas as rotinas de cálculos demonstradas anteriormente e realizadas com o auxílio do *software MeDiNa*, para a área trincada e afundamento de trilha de roda, e HDM-4, para a irregularidade longitudinal. Quando o ativo ultrapassasse a porcentagem limite de área trincada, planejaram-se atividades de fresagem do revestimento e recomposição de 5,00 centímetros de concreto asfáltico. Como incremento para as condições do revestimento, estimou-se que a área trincada do pavimento volta para a porcentagem zero, e a irregularidade longitudinal, também afetada neste serviço, tendo o decréscimo quantificado de acordo com a Equação 8, proposta por Lerch (2002).

$$IRI = IRI_A - (0,31 \cdot hR + 0,87 \cdot IRI_A) \quad (8)$$

Onde:

IRI = Irregularidade longitudinal após o recape (m/km);

IRI_A = Irregularidade longitudinal antes do serviço de manutenção (m/km);

hR = Espessura do recape (cm).

Para atenuar os efeitos de irregularidade longitudinal, quando não fossem observados efeitos de fadiga e de deformação estrutural, programou-se a execução de microrrevestimento de 2,50cm. Quantifica-se o decréscimo da irregularidade longitudinal conforme a equação proposta por Lerch (2002). Considerou-se que esta atividade não confere melhoria estrutural ao pavimento, não representando decréscimo no somatório de áreas trincadas, tendo em vista a espessura desta camada.

Caso o afundamento de trilha de roda implique em uma operação de manutenção, projeta-se a execução de reforço estrutural em concreto asfáltico, dimensionado conforme a magnitude das depressões na pista. Esta atividade também resulta em um novo ciclo de fadiga, levando a porcentagem de área trincada para zero e a irregularidade longitudinal para o valor pós-construção da rodovia. O Quadro 8 sintetiza as soluções propostas para os gatilhos considerados.

Quadro 8 – Soluções propostas.

		IRI \geq 3,6 m/km
ATR < 10mm	AT < 20%	Microrrevestimento 2,50cm
	AT \geq 20%	Fresagem 5cm + recomposição
ATR \geq 10mm	AT < 20%	Reforço estrutural
	AT \geq 20%	

Para a modelagem no *software* HDM-4, além do lançamento das informações já descritas, foram ajustados os coeficientes de calibração com os valores propostos por Arango (2018) para o subgrupo “9-SN-A-TM”, conforme Quadro 9, visto que é o conjunto que possui as características mais semelhantes com os parâmetros utilizados neste trabalho. Além, disso, para o cálculo do Número Estrutural do Pavimento (SNP), foi informada a deflexão no ponto zero (D_0) calculada pelo MeDiNa, que simula a utilização da Viga Benkelman para o controle executivo das obras.

Quadro 9 - Coeficientes de calibração HDM-4.

Coeficiente	Sigla	Valor
Início de trincas totais	Kcia	0,90
Progressão de trincas totais	Kcpa	1,50
Início de trincas largas	Kciw	1,00
Progressão de trincas largas	Kcpw	1,40
Início trincas térmicas	Kcit	1,00
Progressão trincas térmicas	Kcpt	1,00
Início do desgaste	Kvi	1,00
Progressão do desgaste	Kvp	0,80
Início de panelas - trincamento	Kpic	1,00
Progressão de panelas - trincamento	Kpir	1,00
Progressão de panelas	Kpp	1,00
Progressão da textura	Ktd	1,00
Trincas de bordo	Keb	1,00
Resistência a derrapagem	Ksfc	1,00
Início do afundamento	Krid	1,00
Progressão do afundamento estrutural	Krst	0,40
Progressão do afundamento plástico	Krpd	0,00
Desvio padrão do afundamento	Krds	0,42
Progressão de IRI - ambiente	Kgm	1,00
Componente estrutural do IRI	Kgs	1,00
Componente de trincamento do IRI	Kgc	1,00
Componente de afundamento do IRI	Kgr	1,40
Componente de panelas do IRI	Kgp	1,00
Defeitos de construção da capa	CDS	1,00
Defeitos de construção da base	CDB	1,00
Retardo do desgaste devido a manutenção	RRF	0,00
Retardo do trincamento devido a manutenção	CRT	0,00

Para simular os efeitos que a progressão do tráfego causa nas propriedades dos materiais que constituem a estrutura do pavimento, informação necessária para dimensionar e prever o desempenho das estruturas após as atividades de reabilitação, foi utilizada a metodologia de retroanálise do *BackMeDiNa*.

Nesta ferramenta são informados parâmetros característicos da seção em análise, tais como: a bacia de deflexão medida com o aparelho FWD, as espessuras das camadas, os materiais constituintes e um valor de módulo de resiliência aproximado. Além destes, são informados valores de características do ensaio, conforme Quadro 10. A partir destes dados, o programa realiza uma sequência de cálculos, de forma iterativa, variando os valores do módulo de resiliência, a fim de encontrar uma bacia teórica próxima com aquela medida em campo.

Quadro 10 - Parâmetros de ensaio FWD.

Temperatura do ar	28 °C
Temperatura do pavimento	55 °C
Carga aplicada pelo FWD	4000 Kgf
Raio do carregamento aplicado	15 cm

Este processo matemático resulta em um erro, que representa a diferença entre a bacia medida e a teórica. Nas análises, buscou-se retroanalisar as estruturas até o momento que este erro fosse menor que 5 μm , indicando que a bacia calculada atingiu uma boa correlação com aquela medida, conforme exposto em Franco (2018).

Para prever o avanço da bacia de deflexão, foi utilizado o valor de SNP informado pelo HDM-4 e aplicada a Equação 9, proposta na elaboração teórica do HDM-4, para correlacionar o Número Estrutural de a deflexão no ponto central. Comparando o D_0 do início das operações de tráfego e o resultante da Equação 9, e assumindo que a bacia de deflexão segue o comportamento de evolução do ponto central, foi possível estimar a bacia deflectométrica futura, sendo esta, lançada no *BackMeDiNa*, simulando a bacia medida em campo.

$$D_0 = 6,5 \cdot \text{SNP}^{-1,6} \quad (9)$$

3.3 Análise do custo do ciclo de vida

Para os cálculos econômicos foi utilizado o método do Valor Presente Líquido (VPL), possibilitando observar todos os movimentos de caixa em um determinado tempo referencial. As parcelas do custo do ciclo de vida foram valoradas com o preço dos itens baseados em uma mesma época, evitando que a variação do preço das composições interferisse no estudo.

Desta forma, quando foi necessário deslocar os custos de uma operação em um período, adotou-se a taxa de rentabilidade do dinheiro de 4,50% a.a., sendo possível considerar este valor ao levar em conta as taxas de juros recorrentes ao cenário econômico brasileiro nos últimos anos e projeções para um futuro de médio prazo, baseando-se nos valores do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (Selic). Tighe (2001) recomenda este procedimento.

Foram considerados nos cálculos, parâmetros que configuram sensível variabilidade entre os cenários avaliados, sendo assim, os montantes relativos a serviços preliminares, terraplenagem, drenagem e sinalização não foram levados em conta nas simulações. Os custos de acidentes também não foram computados, tendo em vista a grande influência antrópica que esta parcela possui.

3.3.1 Custos de administração

Para os custos da administração rodoviária, foram utilizadas como referência as composições contidas nas planilhas do Sistema de Custos Referências de Obras – SICRO, elaboradas pelo DNIT e Fundação Getúlio Vargas – FGV, com os preços do Rio Grande do Sul para o mês de abril de 2019, conforme DNIT (2019). Optou-se por utilizar as composições de custo sem desoneração. Os preços dos materiais betuminosos (cimento asfáltico, asfalto diluído e emulsão asfáltica) foram quantificados conforme ANP (2019), haja vista que seus valores monetários não são quantificados nas composições do SICRO.

Para quantificar os custos de transporte, foram adotadas as distâncias e as condições da superfície de tráfego informadas no Quadro 11, as equações e considerações de DNIT (2017) para o transporte dos materiais betuminosos, assim como o acréscimo de 18,00% relativo ao Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) para a movimentação de mercadorias dentro do estado do Rio Grande do Sul. As parcelas relativas os Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) foram valorados conforme DNIT (2019b) e para os derivados de petróleo conforme DNIT (2012).

Quadro 11 - Distâncias de transporte.

Descrição	Origem	Destino	DMT (km)	Condição da superfície
Material Betuminoso	Refinaria	Usina	300	Pavimentada
Material Granular	Jazida	Usina	10	Não pavimentada
Concreto Asfáltico	Usina	Pista	30	Revestimento primário
Material Granular	Jazida	Pista	20	Não pavimentada
Material Fresado	Pista	Bota-fora	10	Revestimento primário

Os custos unitários para cada item que compõem a parcela financeira do administrador, para os trabalhos de execução da via e do acostamento e a manutenção da faixa de rodagem são apresentados no Quadro 12 ao Quadro 17.

Quadro 12 - Preço concreto asfáltico.

Concreto asfáltico - SICRO: 4011459		
Etapa	Componente de custo	Custo unitário (R\$/t)
A	Material Betuminoso (aquisição)	R\$ 151,65
B	Equipamentos	R\$ 4,75
C	Mão de obra	R\$ 1,73
D	Atividades auxiliares (6416143)	R\$ 100,98
E	Tempo fixo	R\$ 6,36
F	Transporte (materiais granulares)	R\$ 5,75
G	Transporte (material betuminoso)	R\$ 8,33
H	Transporte (Concreto asfáltico)	R\$ 14,99
	Preço unitário (A) BDI: 15,00%	R\$ 174,40
	Preço unitário (B+C+D+E) BDI: 22,49%	R\$ 139,42
	Preço transporte (F) BDI: 22,49% ICMS: 18,00%	R\$ 8,32
	Preço transporte (G+H) BDI: 15,00% ICMS: 18,00%	R\$ 31,66
	Preço unitário (R\$/t)	R\$ 353,79
	Preço unitário (R\$/m³)	R\$ 859,71

Quadro 13 - Preço brita graduada.

Brita graduada - SICRO: 4011276		
Etapa	Componente de custo	Custo unitário (R\$/m³)
A	Equipamentos	R\$ 5,21
B	Mão de obra	R\$ 0,17
C	Atividades auxiliares (6416040)	R\$ 94,90
D	Tempo fixo	R\$ 3,50
E	Transporte materiais granulares	R\$ 26,84
	Preço unitário (A+B+C+D) BDI: 22,49%	R\$ 127,12
	Preço transporte BDI: 22,49% ICMS: 18,00%	R\$ 38,79
	Preço unitário (R\$/m³)	R\$ 165,92

Quadro 14 - Preço imprimação.

Imprimação - SICRO: 4011351		
Etapa	Componente de custo	Custo unitário (R\$/m ²)
A	Material Betuminoso (aquisição)	R\$ 4,96
B	Equipamentos	R\$ 0,20
C	Mão de obra	R\$ 0,03
D	Transporte (material betuminoso)	R\$ 0,18
	Preço unitário (A) BDI: 15,00%	R\$ 5,70
	Preço unitário (B+C) BDI: 22,49%	R\$ 0,29
	Preço transporte (D) BDI: 15,00% ICMS: 18,00%	R\$ 0,24
	Preço unitário (R\$/m ²)	R\$ 6,23

Considerou-se que deveriam ser executadas uma pintura de ligação a cada 6,50cm de espessura de concreto asfáltico, assim como nas camadas existentes que forem receber outra camada de concreto asfáltico.

Quadro 15 - Preço pintura de ligação.

Pintura de ligação - SICRO: 4011353		
Etapa	Componente de custo	Custo unitário (R\$/m ²)
A	Material Betuminoso (aquisição)	R\$ 0,87
B	Equipamentos	R\$ 0,17
C	Mão de obra	R\$ 0,02
D	Transporte (material betuminoso)	R\$ 0,07
	Preço unitário (A) BDI: 15,00%	R\$ 1,00
	Preço unitário (B+C) BDI: 22,49%	R\$ 0,24
	Preço transporte (D) BDI: 15,00% ICMS: 18,00%	R\$ 0,09
	Preço unitário (R\$/m ²)	R\$ 1,32

O material betuminoso que compõem o microrrevestimento, diferentemente dos demais itens, teve seu preço quantificado no mês de agosto de 2018, tendo em vista ser a informação mais recente no banco de dados utilizado.

Quadro 16 - Preço microrrevestimento asfáltico.

Microrrevestimento 2,50 cm - SICRO: 4011414		
Etapa	Componente de custo	Custo unitário (R\$/m ²)
A	Material Betuminoso (aquisição) - Ago/2018	R\$ 8,57
B	Equipamentos	R\$ 1,52
C	Mão de obra	R\$ 0,45
D	Tempo fixo	R\$ 0,04
E	Material granular	R\$ 1,41
F	Transporte (materiais granulares)	R\$ 0,46
G	Transporte (material betuminoso)	R\$ 0,55
	Preço unitário A (BDI: 15,00%)	R\$ 9,86
	Preço unitário (B+C+D) BDI: 22,49%	R\$ 2,46
	Preço transporte (F) BDI: 22,49% ICMS: 18,00%	R\$ 0,66
	Preço transporte (G) BDI: 15,00% ICMS: 18,00%	R\$ 0,75
	Preço unitário (R\$/m ²)	R\$ 13,73

Para esta composição, não foi considerado o valor residual que o material fresado possui, apenas a operação de fresagem e seu transporte até uma área de bota-fora.

Quadro 17 - Preço fresagem contínua.

Fresagem contínua - SICRO: 4011479		
Etapa	Componente de custo	Custo unitário (R\$/m ³)
A	Equipamentos	R\$ 19,81
B	Mão de obra	R\$ 2,33
C	Tempo fixo	R\$ 3,48
D	Material	R\$ 8,49
E	Transporte (material fresado)	R\$ 11,76
	Preço unitário (A+B+C+D) BDI: 22,49%	R\$ 41,78
	Preço transporte (E) BDI: 22,49% ICMS: 18,00%	R\$ 17,00
	Preço unitário (R\$/m ³)	R\$ 58,77

A rotina de conservação da faixa de rodagem e do acostamento, expressa em um custo anual para os serviços informados no Quadro 18, foi quantificada anualmente, baseando-se na metodologia empregada por Souza (2017). A contagem inicia partir do segundo ano de uso, crescente até o momento em que for executada uma operação de manutenção ou reabilitação, e após retornando a valores semelhantes aos do período inicial.

Quadro 18 - Serviços de conservação.

Atividade	Código SICRO
Tapa buraco com pintura de ligação e demolição com serra corta piso (m³)	4915757
Selagem de trincas mecanizada (m)	4915626
Remendo profundo com imprimação e demolição mecânica (m³)	4915746
Reparos superficiais (m²)	4011414

Para o primeiro ano em que há necessidade de despesas com conservação, estimou-se o valor de R\$ 5.000,00. Este montante teve um acréscimo anual de 15,00% até o momento em que uma operação de manutenção foi executada. Nos anos em que foram realizadas atividades de manutenção ou reabilitação, não foram computados os custos de conservação da via.

O valor residual é considerado como um montante positivo, descontando no somatório de custos do fluxo de caixa, visto que representa um ativo que ainda pode ser utilizado após o período de análise. A quantificação deste representa uma porcentagem do custo da implantação do pavimento, em função da sua condição técnica naquele período e a depreciação das condições estruturais e funcionais ocorridas anualmente.

Considerou-se que as camadas granulares, após o período de 20 anos, têm sua vida útil esgotada, recebendo uma valoração em função da possibilidade de reaproveitamento deste material. O valor residual deste componente foi atribuído em 15,00% do custo inicial de implantação.

Para o concreto asfáltico, seu montante financeiro residual foi estimado pela previsão de tempo faltante para o final da vida útil do último serviço de manutenção, conforme Equação 10, acrescido da parcela de 10,00% do custo inicial de implantação do revestimento asfáltico, justificado pela possibilidade de reaproveitamento deste material.

$$VR_{rev} = C_M \cdot (1 - C_T) + 0,10 \cdot C_{IR}; \text{ Sendo: } C_T = \frac{p1}{p2} \quad (10)$$

Onde:

VR_{rev} = Valor residual do revestimento (R\$);

C_M = Custo manutenção (R\$);

C_T = Condição Técnica;

C_{IR} = Custo de implantação do revestimento (R\$);

p_1 = período de vida da manutenção já consumido (meses);
 p_2 = período total de vida da manutenção (meses).

Desta forma, o valor residual da estrutura será estimado conforme a Equação 11.

$$VR = VR_{rev} + 0,15 \cdot C_{IG} \quad (11)$$

Onde:

VR = Valor residual (R\$);

C_{IG} = Custo de implantação dos materiais granulares (R\$).

3.3.2 Custos de usuário

Para possibilitar as análises econômicas relativas aos custos de usuário, foi necessário quantificar os níveis de utilização dos veículos, os custos relacionados aos componentes dos veículos e valorar o tempo dos passageiros, parâmetros que configuram os custos de operação dos veículos e o custo do tempo de viagem.

Trabalhou-se com a metodologia de cálculo do HDM-4, tendo o auxílio da respectiva ferramenta computacional para o desenvolvimento da série de equações matemáticas. Mantiveram-se os valores da configuração “padrão” do programa, relativo aos níveis de consumo de combustível e lubrificante dos veículos, o grau do avanço da deterioração dos pneus e das peças dos veículos e os efeitos da variação da velocidade de rodagem em função do padrão de tráfego da rodovia.

Os quantitativos relativos a cada tipo de veículo estão apresentados no Quadro 20 ao Quadro 22. Itens comuns a mais de um grupo de veículo foram quantificados financeiramente através dos preços praticados em mercado, com o mês de dezembro de 2019 como referência, conforme segue no Quadro 19.

Quadro 19 - Preço itens de consumo dos veículos.

Item	Preço (R\$/L)
Gasolina	R\$ 4,50
Diesel	R\$ 3,40
Óleo lubrificante veículos pesados	R\$ 25,00
Óleo lubrificante veículos leves	R\$ 25,00

Quadro 20 – Utilização dos veículos.

Caracterização	Passageiros	Tempo de trabalho (hora/ano)	Velocidade média (km/h)
Passeio	2	367	110
Ônibus - 2CB	23	750	90
Ônibus trucado - 3CB	30	1375	80
Caminhão - 2C	1	750	90
Caminhão trucado - 3C	1	750	90
Caminhão simples - 4C	1	750	80
Caminhão trator + semi reboque - 2S3	1	1375	80
Caminhão trator trucado + semi reboque - 3S2	1	1375	80
Caminhão trator trucado + semi reboque - 3S3	1	1375	80
Caminhão trator trucado + semi reboque - 3I3	1	1375	80
Caminhão trator trucado + dois semi reboques - 3D4	1	1760	80
Caminhão trator trucado + dois semi reboques - 3T6	1	1760	80

Quadro 21 - Recursos do veículo.

Caracterização	Custo do veículo (R\$)	Custo de pneu (R\$)	Custo de manutenção (R\$/h)	Salário da tripulação (R\$/h)	Custos fixos anuais (R\$/h)	Taxa de juros para aquisição (veículo novo)
Passeio	R\$ 45.500,00	R\$ 250,00	R\$ 2,73	R\$ 25,93	R\$ 2.500,00	9,00%
Ônibus - 2CB	R\$ 294.780,00	R\$ 1.400,00	R\$ 22,45	R\$ 223,74	R\$ 5.500,00	6,50%
Ônibus trucado - 3CB	R\$ 650.000,00	R\$ 650,00	R\$ 28,47	R\$ 272,37	R\$ 6.500,00	6,50%
Caminhão - 2C	R\$ 127.564,00	R\$ 1.400,00	R\$ 11,25	R\$ 12,97	R\$ 4.000,00	6,50%
Caminhão trucado - 3C	R\$ 306.000,00	R\$ 1.400,00	R\$ 19,71	R\$ 12,97	R\$ 4.000,00	6,50%
Caminhão simples - 4C	R\$ 319.478,00	R\$ 1.400,00	R\$ 20,53	R\$ 12,97	R\$ 5.000,00	6,50%
Caminhão - 2S3	R\$ 501.000,00	R\$ 1.400,00	R\$ 35,59	R\$ 13,33	R\$ 5.000,00	6,50%
Caminhão - 3S2	R\$ 493.000,00	R\$ 1.400,00	R\$ 33,19	R\$ 13,33	R\$ 5.000,00	6,50%
Caminhão - 3S3	R\$ 525.000,00	R\$ 1.400,00	R\$ 35,62	R\$ 13,33	R\$ 5.000,00	6,50%
Caminhão - 3I3	R\$ 525.000,00	R\$ 1.400,00	R\$ 35,62	R\$ 13,33	R\$ 5.000,00	6,50%
Caminhão - 3D4	R\$ 732.000,00	R\$ 1.400,00	R\$ 45,22	R\$ 13,50	R\$ 7.500,00	6,50%
Caminhão - 3T6	R\$ 828.000,00	R\$ 1.400,00	R\$ 57,00	R\$ 13,50	R\$ 7.500,00	6,50%

Os custos de veículo, de pneu, fixos (seguro e impostos anuais) e a taxa de juros para aquisição de veículos novos foram valoradas a partir de preços praticados em mercado, com o mês de dezembro de 2019 como referência. O custo de manutenção foi quantificado através do Relatório de Equipamentos sem desoneração da Tabela SICRO, com os preços do Rio Grande

do Sul para o mês de abril de 2019, considerando os custos para veículos de porte semelhante aos abordados neste estudo.

Para o salário da tripulação, considerou-se a remuneração mensal de R\$ 2.282,18, para uma carga horária de 176 horas por mês.

Quadro 22 – Valor do tempo.

Caracterização	Passageiro (R\$/h)	Passageiro em trabalho (R\$/h)	Custo do atraso da carga (R\$/h)
Passeio	R\$ 12,97	R\$ 25,93	R\$ -
Ônibus - 2CB	R\$ 12,97	R\$ 25,93	R\$ -
Ônibus trucado - 3CB	R\$ 12,97	R\$ 25,93	R\$ -
Caminhão - 2C	R\$ -	R\$ 23,16	R\$ 41,93
Caminhão trucado - 3C	R\$ -	R\$ 23,16	R\$ 43,90
Caminhão simples - 4C	R\$ -	R\$ 25,93	R\$ 44,76
Caminhão trator + semi reboque - 2S3	R\$ -	R\$ 26,65	R\$ 67,38
Caminhão trator trucado + semi reboque - 3S2	R\$ -	R\$ 26,65	R\$ 60,85
Caminhão trator trucado + semi reboque - 3S3	R\$ -	R\$ 26,65	R\$ 64,04
Caminhão trator trucado + semi reboque - 3I3	R\$ -	R\$ 26,65	R\$ 64,04
Caminhão trator trucado + dois semi reboques - 3D4	R\$ -	R\$ 27,00	R\$ 83,72
Caminhão trator trucado + dois semi reboques - 3T6	R\$ -	R\$ 27,00	R\$ 93,25

O valor do tempo do passageiro foi expresso na sua remuneração horária. Quando estivesse em horário de trabalho, este custo seria acrescido de 100,00% em relação ao valor de quando não está na condição “em trabalho”. Esta porcentagem é relativa aos encargos sociais incidentes ao posto de trabalho. Levou-se em conta que estão em trabalho: 0,50 passageiro por veículo de passeio, 16 passageiros nos ônibus 2CB, 21 passageiros nos ônibus 3CB e todos os motoristas dos caminhões.

Para o valor do tempo dos motoristas dos caminhões, creditou-se um montante maior conforme a classe de caminhão conduzida. Para o custo do atraso da carga, foi considerado o “custo improdutivo” informado no Relatório de Equipamentos sem desoneração da Tabela SICRO, com os preços do Rio Grande do Sul para o mês de abril de 2019

3.4 Análise de confiabilidade

O sistema viário utilizado nas simulações do MeDiNa impõe o nível de 85% de confiabilidade, conforme Franco (2018). Conhecendo este valor, buscou-se avaliar as possíveis variações econômicas, sob ótica do administrador, que podem resultar com a incerteza no momento em que as operações de recondicionamento da estrutura ocorrem. Este momento está

relacionado com o desempenho da via estudada, ou seja, leva em consideração variações nos fatores de solicitação (tráfego) e de suporte (espessura e propriedades dos materiais) do pavimento.

Considerando que os valores relativos ao mês em que a manutenção ocorre obedecem uma distribuição normal de probabilidade e o valor de desvio padrão de 15 meses para a previsão do desempenho das estruturas, número estimado em função da porcentagem de área trincada limite deste estudo (20%) e dos valores obtidos por Fritzen (2016) na calibração da metodologia MeDiNa, aplicou-se a metodologia de Monte Carlo para gerar os números aleatórios em que as manutenções podem ocorrer.

Os períodos de manutenção e seus relativos custos para execução do serviço e da rentabilidade do dinheiro, foram inseridos em planilhas de Excel e calculados conforme demonstrado nos itens anteriores deste capítulo. Através de ferramenta específica do *software*, foram gerados os conjuntos de números aleatórios, em análises compostas por 1.000 e 10.000 valores, sendo possível verificar de maneira probabilística, o período em que as operações de reabilitação poderão ocorrer e conseqüentemente os valores financeiros que irão competir à rentabilidade monetária.

O conjunto de valores permite definir intervalos de frequência, verificando a probabilidade de ocorrência de determinados valores e comparar com aqueles calculados através de valores médios, identificando o comportamento deste perante os grupos de valores simulados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos e as respectivas discussões são apresentados em quatro itens, para uma melhor organização deste capítulo. Inicialmente, são demonstrados os ciclos de vida das estruturas avaliadas, detalhando os momentos de recondicionamento da via, os serviços executados e suas análises de desempenho. Posteriormente, são expostos os resultados para as análises de custo, discriminando os valores para o administrador e para o usuário. Em um terceiro momento, este capítulo foca na comparação das metodologias de previsão de desempenho. Ao final, são comentados os resultados para a análise de confiabilidade.

4.1 Desempenho das estruturas

Inicialmente, procederam-se avaliações até o período final da análise (20 anos) para a previsão de desempenho, a fim de verificar o primeiro momento que se fez necessário alguma atividade de manutenção. Após constatar esta data e analisando as condições do pavimento, foram definidas as atividades a serem executadas para recondicionar a via de tráfego, prevendo suas contribuições ao pavimento e seu desempenho pós-manutenção, fazendo com que se inicie outro ciclo de vida da estrutura abordada. Este processo foi repetido até o fim do período em estudo.

Os resultados das avaliações técnicas são apresentados e comentados na sequência, iniciando com o progresso da área trincada, da irregularidade longitudinal e do afundamento de trilha de roda da Estrutura 1, que podem ser vistos na Figura 10 e Figura 11.

Figura 10 - Área trincada e IRI Estrutura 1.

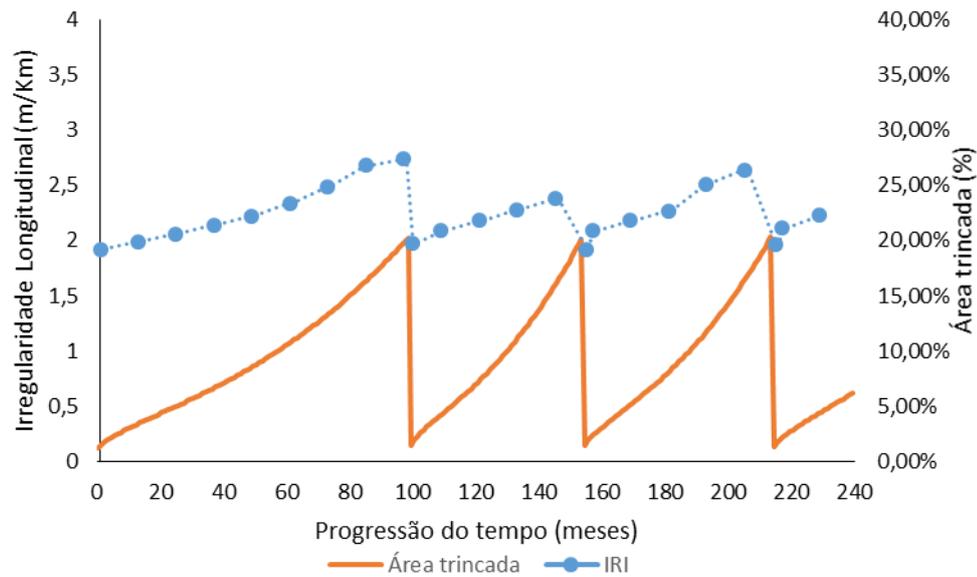
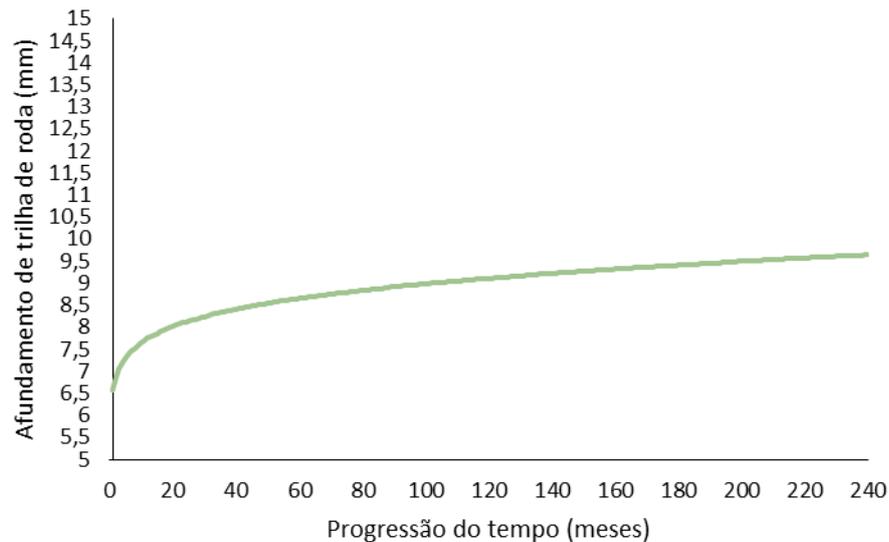


Figura 11 - Afundamento de trilha de roda Estrutura 1.



Identifica-se que o pavimento irá operar com desempenho satisfatório até o mês 99, período onde a área trincada atinge o valor de 20%, configurando a primeira operação de manutenção. Levando em conta que a irregularidade longitudinal foi quantificada em 2,74 m/km e a deflexão do ponto central foi quantificada em 47×10^{-2} mm, optou-se pela fresagem e recomposição de 5,00cm da camada de revestimento, em 60% da pista, o que resultou em um novo ciclo de vida para a área trincada (iniciando em 0%) e na redução da irregularidade longitudinal para o valor de 1,97m/km.

Vale ressaltar que para simular o desempenho que o pavimento possui após a atividade de manutenção, foi necessário assumir que a fresagem e recomposição aconteceu em toda a

área da pista, tendo em vista que o MeDiNa não procede simulações para a condição de fresagem parcial da área de tráfego. Além disso, para a camada de recomposição, foram consideradas as mesmas características do concreto asfáltico utilizado para a implantação da pista.

A análise do desempenho da primeira operação de manutenção indicou que o pavimento atinge o parâmetro de 20% de área trincada no mês 154, período em que a irregularidade longitudinal está em 2,38m/km e a deflexão no ponto central 55×10^{-2} mm. Optou-se por proceder a fresagem e recomposição de 5,00cm em toda a área da pista, além de executar uma camada de reforço em 5,00cm de concreto asfáltico. Para manter o desnível entre a pista de rodagem e a área de acostamento, a espessura de reforço também foi prevista no acostamento. Após estas obras, a área trincada voltou para seu nível inicial e a irregularidade longitudinal para o valor de 1,92m/km.

As execuções destes serviços conferiram ao pavimento as condições de tráfego adequadas até o mês 214, onde novamente a área trincada ultrapassou o limite definido e foi deflagrada outra atividade de reabilitação. Neste momento, a irregularidade longitudinal foi quantificada em 2,64 m/km e a deflexão no ponto D_0 , 51×10^{-2} mm. Optou-se por fresar a camada de revestimento em 5,00cm e recompor esta espessura com concreto asfáltico, o que resultou em um novo ciclo para a área trincada e em um decréscimo da irregularidade longitudinal para o valor de 1,96 m/km.

O último serviço de reabilitação possibilitou que o pavimento concluísse o período de 20 anos de análise com suas condições adequadas para o tráfego. Além disso, as previsões de desempenho indicaram que por mais 55 meses o pavimento teria a qualidade mínima para rodagem de veículos, configurando um valor residual.

Frente ao afundamento de trilha de roda, avaliou-se a estrutura dentro do período de 20 anos, sem ponderar os efeitos das operações de manutenção. Esta consideração foi necessária porque o MeDiNa, em seu módulo de análise de reforço de pavimentos, avalia apenas o critério de fadiga, assumindo que as camadas já se estabilizaram na deformação permanente e já atingiram o limite de fadiga.

Desta forma, foi possível perceber que logo após a abertura ao tráfego prevê-se o valor de 6,57 mm e progredindo de maneira rápida nos meses iniciais do pavimento. O progresso é estabilizado por volta do mês 27, onde avança de maneira menos vertical. Ao final dos 20 anos, observa-se ATR total de 9,64 mm, menor que o limite máximo estimado para o afundamento de trilha de roda, sendo possível assumir que esta patologia não deflagra um serviço de

recondicionamento da pista. A Tabela 2 apresenta de forma resumida as informações referentes ao ciclo de vida da Estrutura 1.

Tabela 2 – Resumo do ciclo de vida Estrutura 1.

Atividade executada	Período (meses)	Gatilho	AT antes	IRI antes (m/km)	Deflexão D0 (10 ⁻² mm)	AT depois	IRI depois (m/km)
Fresagem e recomposição (5cm) - 60%	99	Área trincada	20%	2,74	47	0%	1,97
Fresagem e recomposição (5cm)+ Reforço 5cm	154	Área trincada	20%	2,38	55	0%	1,92
Fresagem e recomposição (5cm)	214	Área trincada	20%	2,64	51	0%	1,96

O ciclo de vida do pavimento, em função da área trincada, da irregularidade longitudinal e do afundamento de trilha de roda para a Estrutura 2 podem ser vistos na Figura 12 e Figura 13.

Figura 12 - Área trincada e IRI Estrutura 2.

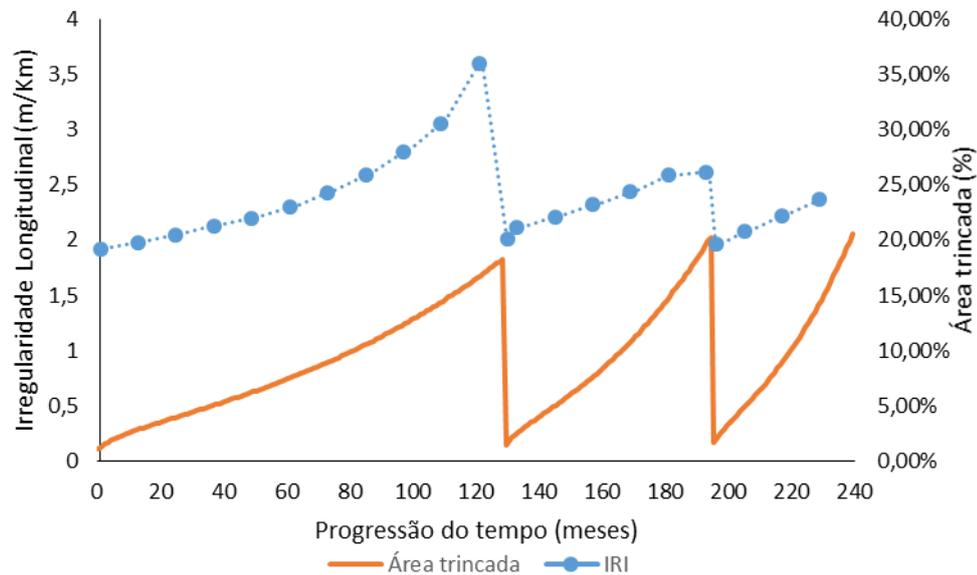
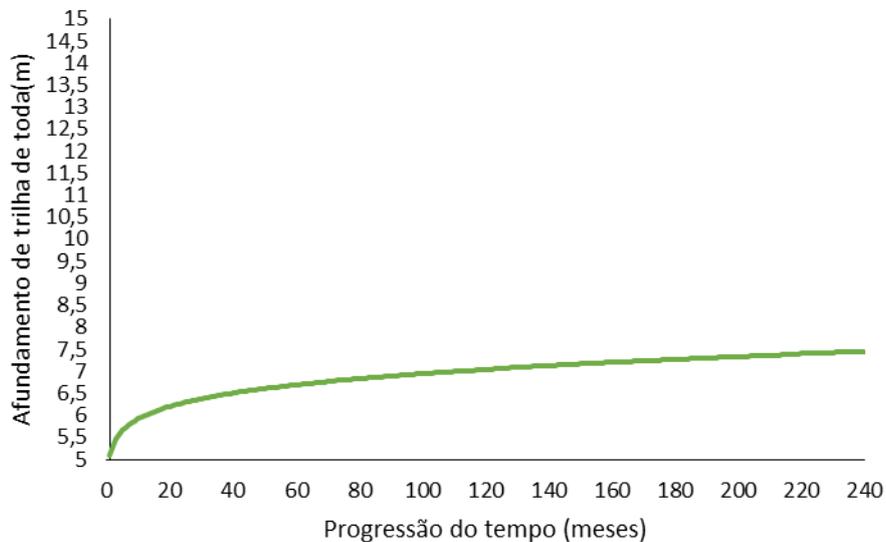


Figura 13 - Afundamento de trilha de roda Estrutura 2.



Foi previsto que o pavimento irá operar com desempenho adequado até o mês 129, período onde a irregularidade longitudinal atinge o valor de 3,60m/km, configurando a primeira operação de manutenção. Inicialmente, quando o gatilho para uma atividade de recuperação da pista fosse o IRI, seria executado um microrrevestimento asfáltico de 2,50cm de espessura, porém, levando em conta que no mês 129 a área trincada estava quantificada em 18,27% e a deflexão no ponto central em 48×10^{-2} mm, foi preferível a fresagem e recomposição de 5,00cm, em toda a área de rodagem, o que resultou em um novo ciclo de vida para a área trincada e na redução da irregularidade longitudinal para o valor de 2,01m/km.

A primeira operação de manutenção ocorreu quando, na simulação do HDM-4, o pavimento já estava com elevada área de trincamento. Tal fato impactou o valor de SNP e conseqüentemente nas bacias de deflexão e no desempenho da estrutura após as operações de reabilitação.

A análise do desempenho desta manutenção indicou que o pavimento atinge o parâmetro de 20% de área trincada no mês 195, período em que a irregularidade longitudinal está em 2,62m/km e a deflexão no ponto central 59×10^{-2} mm. Optou-se por fresar 5,00cm de 60% da pista e recompor a mesma espessura com concreto asfáltico. Após estas obras, a área trincada voltou para seu nível inicial e a irregularidade longitudinal para o valor de 1,96m/km.

A previsão do desempenho da segunda manutenção indicou que o pavimento chega ao final do período de análise com 20,53% de área trincada, não restando valor residual proveniente deste serviço.

Para o afundamento de trilha de roda, após a abertura ao tráfego foi estimado o valor de 5,09 mm, progredindo de maneira rápida nos meses iniciais do pavimento e estabilizado por volta do mês 28, passando a avançar de maneira mais lenta. Ao final dos 20 anos, observa-se ATR total de 7,45 mm, menor que o limite máximo estimado para o afundamento de trilha de roda, e, da mesma forma que a Estrutura 1, sendo possível assumir que não será motivo para uma atividade de melhoria da pista. A Tabela 3 resume as informações referentes ao ciclo de vida da Estrutura 2.

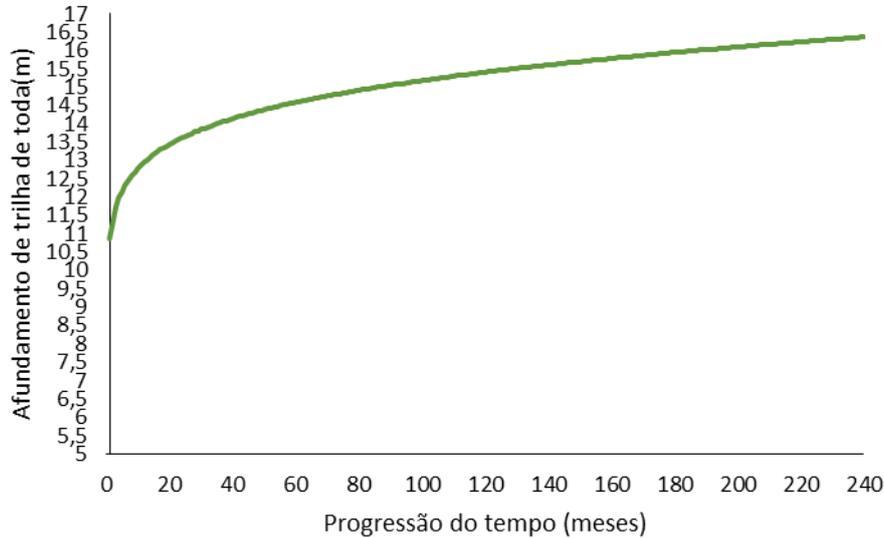
Tabela 3 – Resumo do ciclo de vida Estrutura 2.

Atividade executada	Período (meses)	Gatilho	AT antes	IRI antes (m/km)	Deflexão D0 (10^{-2} mm)	AT depois	IRI depois (m/km)
Fresagem e recomposição (5cm)	129	IRI	18%	3,6	48	0	2,01
Fresagem e recomposição (5cm) - 60%	195	área trincada	20%	2,62	59	0	1,96

A simulação para a estrutura dimensionada pelo Método DNER indicou um excessivo afundamento de trilha de roda, conforme visto na Figura 14. Logo no início da simulação, a

metodologia de previsão de desempenho já estima o ATR em 10,86mm e ao final dos 20 anos estudados, 16,37mm.

Figura 14 - Afundamento de trilha de roda Estrutura Método DNER.



Considerando que o limite máximo para o afundamento de trilha de roda estimado neste estudo é de 10mm e que níveis maiores de afundamento passam a configurar riscos importantes para a segurança dos usuários, exemplificando com situações de aquaplanagem, optou-se por modificar as espessuras das camadas de material granular, possibilitando com que a estrutura receba o carregamento, sem prejudicar as análises quanto os danos que incorrem a camada de revestimento.

Desta forma, fez-se o acréscimo de 30,00cm na camada granular, resultando em um pavimento composto o 10,00cm de revestimento asfáltico e 55,00cm de material granular, o que caracteriza, nos termos da metodologia descrita em DNIT (2006a), uma estrutura de pavimento sobreposta em um subleito de menor capacidade de suporte. Esta composição teve o Número Estrutural quantificado em 5,37. O progresso da área trincada, da irregularidade longitudinal e do afundamento de trilha de roda podem ser vistos na Figura 15 e Figura 16.

Figura 15 - Área trincada e IRI Estrutura 3.

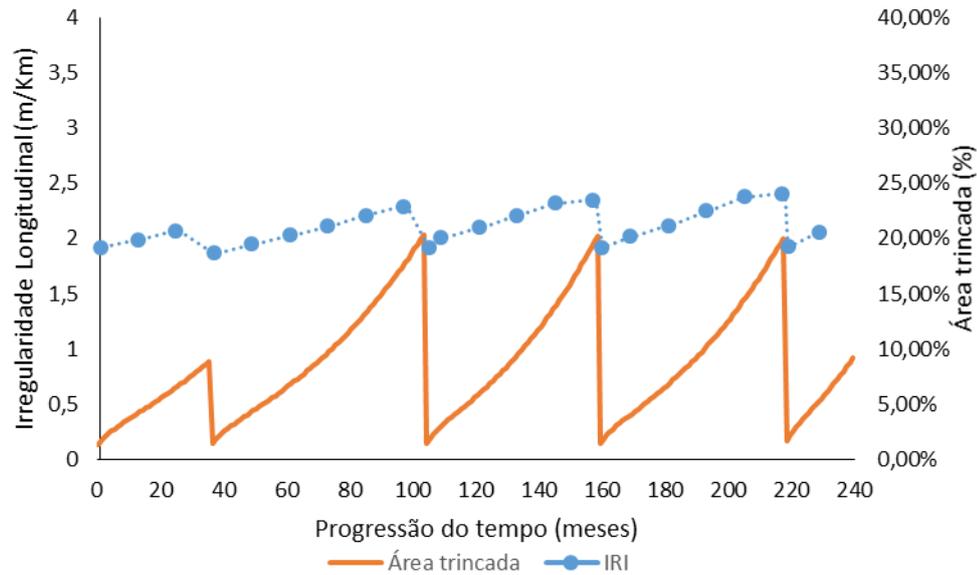
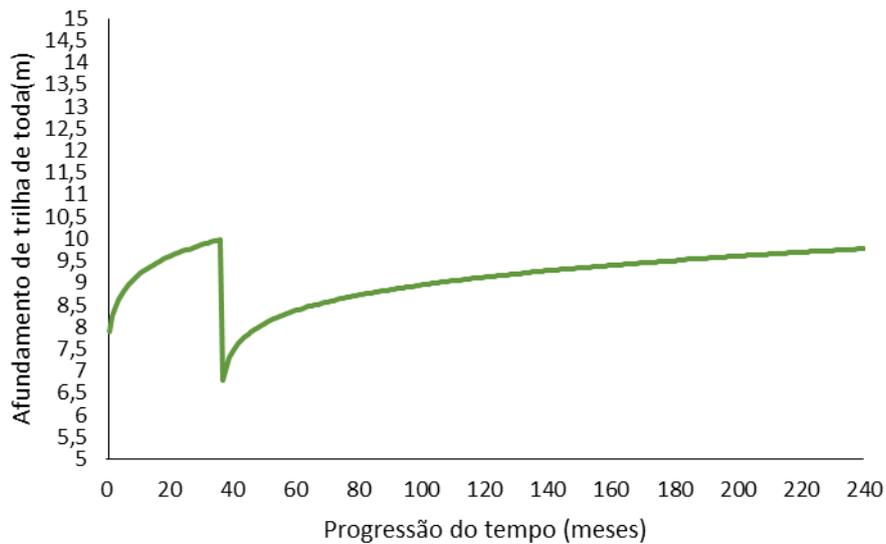


Figura 16 – Afundamento de trilha de roda Estrutura 3.



Foi identificado que o pavimento oferece condições aceitáveis para o tráfego até o mês 36, onde o afundamento de trilha de roda atinge o limite máximo de 10mm, sendo necessário seu condicionamento. Neste momento, a área trincada foi quantificada em 8,86% e a irregularidade longitudinal em 2,07m/km, representando um pavimento no início de sua vida útil. Para atenuar o afundamento de trilha de roda, optou-se por executar uma nova camada de concreto asfáltico, com 3,00cm de espessura. Isso fez com que a área trincada voltasse para seu valor inicial, a irregularidade longitudinal para 1,87m/km e o ATR iniciasse um novo comportamento de evolução, não sendo, até o final do tempo avaliado, um fator de gatilho para

novas manutenções, conforme visto na Figura 16. Para manter o desnível entre a pista de rodagem e a área de acostamento, a espessura de reforço também foi prevista no acostamento.

A análise do desempenho do reforço indicou que o pavimento chega ao valor de 20% de área trincada no mês 104, momento em que a irregularidade longitudinal está em 2,29m/km e a deflexão no ponto central 49×10^{-2} mm. Foi escolhida a fresagem e recomposição de 5,00cm em 60,00% da área da pista. Após estas obras, a área trincada voltou para seu nível inicial e a irregularidade longitudinal para o valor de 1,92m/km.

Até o mês 159 a via teve condições adequadas para o tráfego, tendo a área trincada ultrapassado o limite definido e sendo configurada outra atividade de manutenção. Neste momento, a irregularidade longitudinal foi quantificada em 2,35 m/km e a deflexão no ponto D_0 , 58×10^{-2} mm. Optou-se por fresar a camada de revestimento em 5,00cm e recompor esta espessura com concreto asfáltico, em toda a área da pista, o que resultou em um novo ciclo para a área trincada e em um decréscimo da irregularidade longitudinal para o valor de 1,92 m/km.

Os serviços citados no parágrafo anterior conferiram um acréscimo nas características do pavimento até o mês 218, onde novamente a área trincada atingiu o limite de 20%. Considerando que a irregularidade longitudinal estimada foi de 2,41m/km, a deflexão medida no ponto central 61×10^{-2} mm, e a proximidade com o final do período de vida do pavimento, foi procedida a fresagem e recomposição em concreto asfáltico de 5,00cm em toda a faixa de rodagem, fazendo com que a área trincada voltasse para o patamar de 0% e a irregularidade longitudinal para 1,93m/km. As previsões de desempenho indicaram que, após a execução desta fresagem e recomposição, o pavimento preserva a qualidade mínima para rodagem de veículos por mais 20 meses, configurando um valor residual. A Tabela 4 apresenta o resumo do ciclo de vida da Estrutura 3.

Tabela 4 – Resumo do ciclo de vida Estrutura 3.

Atividade executada	Período (meses)	Gatilho	AT antes	IRI antes (m/km)	Deflexão D_0 (10^{-2} mm)	AT depois	IRI depois (m/km)
Reforço 3cm	36	ATR 10mm	9%	2,07	49	0	1,87
Fresagem e recomposição (5cm) - 60%	104	Área trincada	20%	2,29	49	0	1,92
Fresagem e recomposição (5cm)	159	Área trincada	20%	2,35	58	0	1,92
Fresagem e recomposição (5cm)	218	Área trincada	20%	2,41	61	0	1,93

Na Figura 17 e Figura 18 são apresentados os comportamentos da Estrutura 4, em função da área trincada, da irregularidade longitudinal e do afundamento de trilha de roda, ao longo do seu ciclo de vida.

Figura 17 - Área trincada e IRI Estrutura 4.

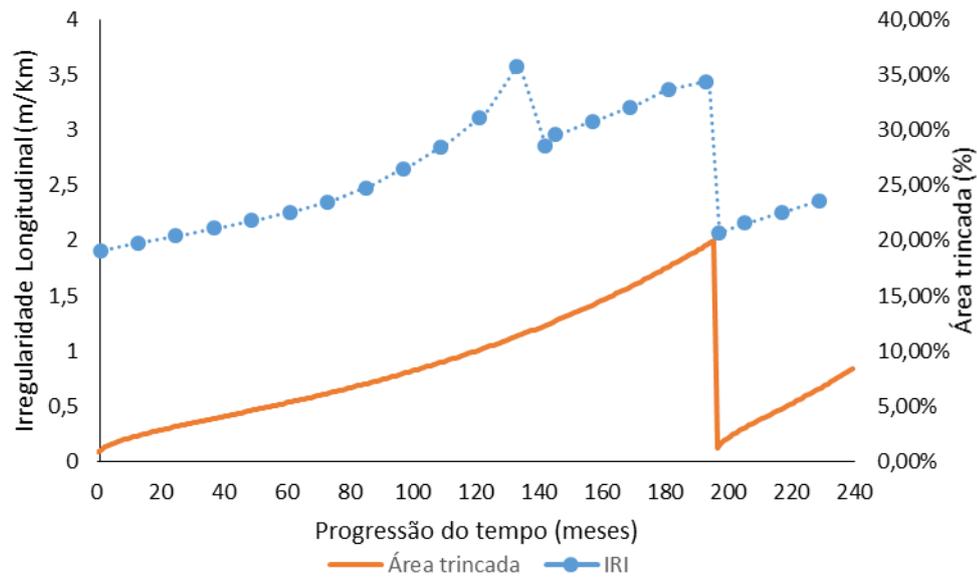
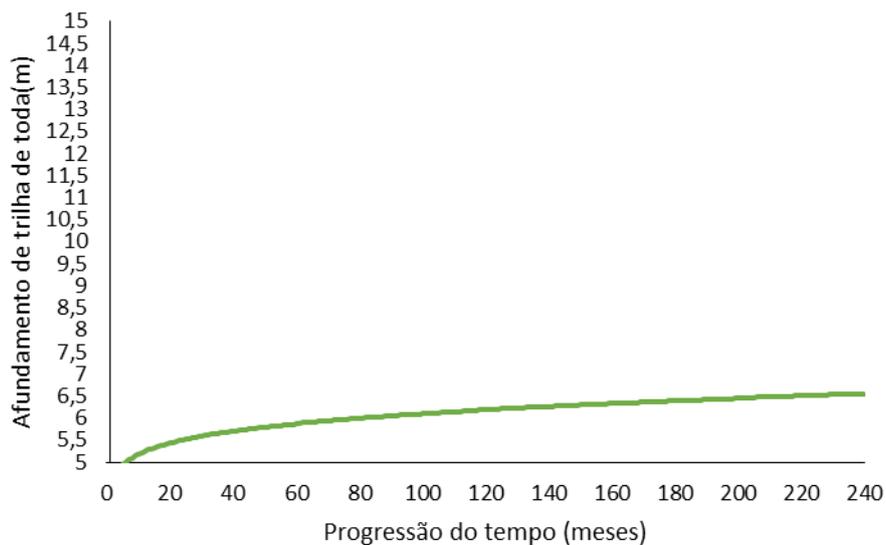


Figura 18 – Afundamento de trilha de roda Estrutura 4.



Para Estrutura 4, inicialmente projetada com uma espessura de concreto asfáltico mais espessa, foi previsto que o pavimento irá operar com desempenho adequado até o mês 142, período onde a irregularidade longitudinal atinge o valor de 3,60m/km, configurando a primeira operação de manutenção. A execução de microrrevestimento de 2,50cm de espessura permitiu que continuasse o ciclo de vida do pavimento, conferindo para o IRI o valor de 2,86m/km.

Da mesma forma que na Estrutura 2, na simulação do HDM-4, o pavimento já estava com elevada área de trincamento, impactando o valor de SNP, nas bacias de deflexão e no desempenho da estrutura após as operações de reabilitação. Contudo, haja vista a espessura de concreto asfáltico desta estrutura, a influência nos parâmetros citados foi menor.

A análise do desempenho desta manutenção indicou que o pavimento atinge o parâmetro de 20% de área trincada no mês 196, momento em que a irregularidade longitudinal está em 3,44m/km e a deflexão no ponto central 40×10^{-2} mm. Optou-se por fresar 5,00cm e recompor a mesma espessura com concreto asfáltico, em 60% da área de tráfego. Após estas obras, a área trincada voltou para seu nível inicial e a irregularidade longitudinal para o valor de 2,07m/km.

As previsões de desempenho indicaram que após o término do período de estudo, o pavimento ofereceria conformidade ao tráfego por mais 45 meses, fato que restou como um valor residual.

Para o afundamento de trilha de roda, após a abertura ao tráfego foi estimado o valor de 4,44 mm, apresentando comportamento semelhante as demais estruturas, onde no mês 27 foi observado que o progresso do ATR obedece um padrão de crescimento menos vertical, até chegar no mês 240, sendo quantificado em 6,55mm e não configurando uma operação de manutenção ao longo da vida desta estrutura. A Tabela 5 sintetiza as informações relativas ao ciclo de vida da Estrutura 4.

Tabela 5 – Resumo do ciclo de vida Estrutura 4.

Atividade executada	Período (meses)	Gatilho	AT antes	IRI antes (m/km)	Deflexão D0 (10^{-2} mm)	AT depois	IRI depois (m/km)
Microrrevestimento 2,5cm	142	IRI	12%	3,6	40	12	2,86
Fresagem e recomposição (5cm) - 60%	196	Área trincada	20%	3,44	40	0	2,07

4.2 Custos

4.2.1 Custos de administração

A composição dos custos ao administrador é discriminada em cinco momentos distintos: implantação, manutenções, conservação, custo da rentabilidade do dinheiro e o valor residual, que representa uma remuneração ao administrador em função dos valores que os ativos ainda possuem após o final da vigência do período analisado. Tendo em vista que as quantificações financeiras foram feitas com o preço atual como referência e os resultados apresentados são em função do valor presente, não foi necessário descontar o valor da inflação para os gastos ocorridos ao longo da vida útil do ativo.

Os quantitativos de materiais e os custos de implantação, manutenção e conserva da Estrutura 1 podem ser vistos na Tabela 6 a Tabela 8. O custo da rentabilidade do dinheiro, considerando uma taxa de 4,5%a.a. e o momento que as manutenções ocorreram foi de R\$

996.350,26, ao passo que se estimou valor residual em R\$ 416.820,16. O montante financeiro total para a Estrutura 1 foi estimado em R\$ 3.906.688,03.

Tabela 6 - Custo de implantação Estrutura 1.

Material	Quantidade	Custo
Concreto asfáltico (m ³)	1150	R\$ 988.666,50
Material granular (m ³)	5100	R\$ 846.192,00
Imprimação (m ²)	12200	R\$ 76.006,00
Pintura de ligação (m ²)	19400	R\$ 25.608,00
Total		R\$ 1.936.472,50

Tabela 7 - Custo de manutenção Estrutura 1.

Material / atividade	Quantidade	Custo
Fresagem (m ³)	792	R\$ 46.545,84
Pintura de ligação (m ²)	23040	R\$ 30.412,80
Concreto Asfáltico (m ³)	1402	R\$ 1.205.313,42
Total		R\$ 1.282.272,06

Tabela 8 - Custo de conservação Estrutura 1.

Período	Custo	Período	Custo
Ano 1	-	Ano 11	R\$ 5.750,00
Ano 2	R\$ 5.000,00	Ano 12	R\$ 6.612,50
Ano 3	R\$ 5.750,00	Ano 13	-
Ano 4	R\$ 6.612,50	Ano 14	R\$ 5.000,00
Ano 5	R\$ 7.604,38	Ano 15	R\$ 5.750,00
Ano 6	R\$ 8.745,03	Ano 16	R\$ 6.612,50
Ano 7	R\$ 10.056,79	Ano 17	R\$ 7.604,38
Ano 8	R\$ 11.565,30	Ano 18	-
Ano 9	-	Ano 19	R\$ 5.000,00
Ano 10	R\$ 5.000,00	Ano 20	R\$ 5.750,00
Total		R\$ 108.413,37	

Os quantitativos de materiais e os custos de implantação, manutenção e conserva da Estrutura 2 podem ser vistos na Tabela 9 a Tabela 11. O custo da rentabilidade do dinheiro foi de R\$ 419.053,21 e o valor residual, R\$ 241.270,23. O custo total para a Estrutura 2 foi estimado em R\$ 2.957.761,78.

Tabela 9 - Custo de implantação Estrutura 2.

Material	Quantidade	Custo
Concreto asfáltico (m ³)	1330	R\$ 1.143.414,30
Material granular (m ³)	5100	R\$ 846.192,00
Imprimação (m ²)	12200	R\$ 76.006,00
Pintura de ligação (m ²)	26600	R\$ 35.112,00
Total		R\$ 2.100.724,30

Tabela 10 - Custo de manutenção Estrutura 2.

Material / atividade	Quantidade	Custo
Fresagem (m ³)	576	R\$ 33.851,52
Pintura de ligação (m ²)	11520	R\$ 15.206,40
Concreto Asfáltico (m ³)	576	R\$ 495.192,96
Total		R\$ 544.250,88

Tabela 11 - Custo de conservação Estrutura 2.

Período	Custo	Período	Custo
Ano 1	-	Ano 11	-
Ano 2	R\$ 5.000,00	Ano 12	R\$ 5.000,00
Ano 3	R\$ 5.750,00	Ano 13	R\$ 5.750,00
Ano 4	R\$ 6.612,50	Ano 14	R\$ 6.612,50
Ano 5	R\$ 7.604,38	Ano 15	R\$ 7.604,38
Ano 6	R\$ 8.745,03	Ano 16	R\$ 8.745,03
Ano 7	R\$ 10.056,79	Ano 17	-
Ano 8	R\$ 11.565,30	Ano 18	R\$ 5.000,00
Ano 9	R\$ 13.300,10	Ano 19	R\$ 5.750,00
Ano 10	R\$ 15.295,11	Ano 20	R\$ 6.612,50
Total		R\$ 135.003,62	

Os quantitativos de materiais e os custos de implantação, manutenção e conserva da Estrutura 3 podem ser vistos na Tabela 12 a Tabela 14. O custo da rentabilidade do dinheiro foi de R\$ 656.652,71 e o valor residual, R\$ 347.933,39. O custo total para a Estrutura 3 foi quantificado em R\$ 3.322.923,69.

Tabela 12 - Custo de implantação Estrutura 3.

Material	Quantidade	Custo
Concreto asfáltico (m³)	970	R\$ 833.918,70
Material granular (m³)	5460	R\$ 905.923,20
Imprimação (m²)	12200	R\$ 76.006,00
Pintura de ligação (m²)	19400	R\$ 25.608,00
Total		R\$ 1.841.455,90

Tabela 13 - Custo de manutenção Estrutura 3.

Material / atividade	Quantidade	Custo
Fresagem (m³)	792	R\$ 46.545,84
Pintura de ligação (m²)	28040	R\$ 37.012,80
Concreto Asfáltico (m³)	1158	R\$ 995.544,18
Total		R\$ 1.079.102,82

Tabela 14 - Custo de conservação Estrutura 3.

Período	Custo	Período	Custo
Ano 1	-	Ano 11	R\$ 5.750,00
Ano 2	R\$ 5.000,00	Ano 12	R\$ 6.612,50
Ano 3	-	Ano 13	R\$ 7.604,38
Ano 4	R\$ 5.000,00	Ano 14	-
Ano 5	R\$ 5.750,00	Ano 15	R\$ 5.000,00
Ano 6	R\$ 6.612,50	Ano 16	R\$ 5.750,00
Ano 7	R\$ 7.604,38	Ano 17	R\$ 6.612,50
Ano 8	R\$ 8.745,03	Ano 18	R\$ 7.604,38
Ano 9	-	Ano 19	-
Ano 10	R\$ 5.000,00	Ano 20	R\$ 5.000,00
Total		R\$ 93.645,66	

Por fim, na Tabela 15 a Tabela 17 são apresentados os quantitativos de materiais e os custos de implantação, manutenção e conserva da Estrutura 4. O custo da rentabilidade do dinheiro foi de R\$ 324.327,88 e o valor residual, R\$ 342.019,19. O custo total para a Estrutura 4 foi quantificado em R\$ 2.649.870,34.

Tabela 15- Custo de implantação Estrutura 4.

Material	Quantidade	Custo
Concreto asfáltico (m ³)	1510	R\$ 1.298.162,10
Material granular (m ³)	4380	R\$ 726.729,60
Imprimação (m ²)	12200	R\$ 76.006,00
Pintura de ligação (m ²)	26600	R\$ 35.112,00
Total		R\$ 2.136.009,70

Tabela 16 - Custo de manutenção Estrutura 4.

Material / atividade	Quantidade	Custo
Microrrevestimento 2,5cm (m ²)	12200	R\$ 167.506,00
Pintura de ligação (m ²)	16520	R\$ 21.806,40
Fresagem (m ³)	216	R\$ 12.694,32
Concreto Asfáltico (m ³)	216	R\$ 185.697,36
Total		R\$ 387.704,08

Tabela 17 - Custo de conservação Estrutura 4.

Período	Custo	Período	Custo
Ano 1	-	Ano 11	R\$ 17.589,38
Ano 2	R\$ 5.000,00	Ano 12	-
Ano 3	R\$ 5.750,00	Ano 13	R\$ 5.000,00
Ano 4	R\$ 6.612,50	Ano 14	R\$ 5.750,00
Ano 5	R\$ 7.604,38	Ano 15	R\$ 6.612,50
Ano 6	R\$ 8.745,03	Ano 16	R\$ 7.604,38
Ano 7	R\$ 10.056,79	Ano 17	-
Ano 8	R\$ 11.565,30	Ano 18	R\$ 5.000,00
Ano 9	R\$ 13.300,10	Ano 19	R\$ 5.750,00
Ano 10	R\$ 15.295,11	Ano 20	R\$ 6.612,50
Total		R\$ 143.847,97	

Na Figura 19 são apresentados todos os custos de administração envolvidos no ciclo de vida das estruturas, possibilitando uma comparação visual entre eles. Na Figura 20 se demonstram os preceituais de cada componente de saída de dinheiro no fluxo de caixa, considerando os valores residuais como desconto no momento em que se originou este gasto, ou seja, descontou-se a parcela proveniente da vida útil remanescente do montante das operações de manutenção e do valor residual dos materiais para o a quantia de recursos necessários para a construção da rodovia.

Figura 19 - Custos de administração das estruturas.

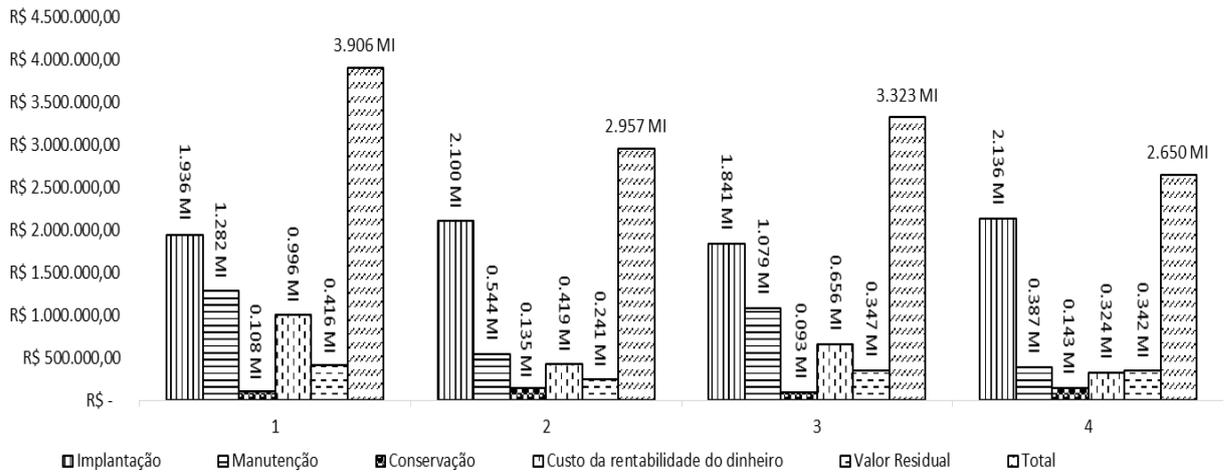
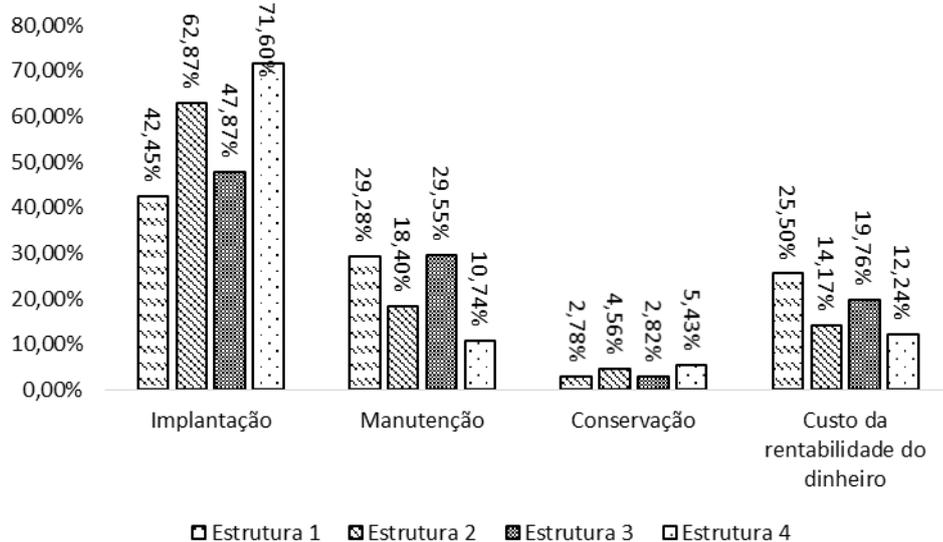


Figura 20 - Percentual de cada componente de custo.



Analisando as duas Figuras, é possível perceber como o valor de implantação impacta no custo total da estrutura. A Estrutura 4, que teve o maior valor para implantação, tanto em termos absoluto, quanto em relativo, resultou na alternativa mais vantajosa economicamente para o agente administrador, considerando que este possui o quantitativo para sua implantação disponível.

Isso aconteceu pela elevada capacidade de suporte que esta estrutura foi projetada, o fez com que se demandassem menos recursos para as atividades de manutenção e, conseqüentemente, um menor dispêndio com o custo da rentabilidade do dinheiro.

A Estrutura 2, ordenada como a segunda com maior valor de investimento inicial, ocupa a mesma posição quando se observa os custos totais. Isso pode ser entendido como um

comportamento tendencial, onde respeitando valores limites, mínimos e máximos, os custos totais tendem a ser menores ao passo que se aplica uma quantia maior inicialmente.

Comparando o custo inicial e o total, já descontando os valores residuais, observou-se que a Estrutura 4 possui o custo de implantação maior em cerca de 14% que a primeira alternativa, 2% maior que a Estrutura 2 e 19% maior que a Estrutura 3. Em contrapartida, levando em conta os valores totais, a Estrutura 4 custa cerca de 32% a menos que a primeira composição, 10% a menos que a Estrutura 2 e 20% a menos que a terceira estrutura.

É relevante salientar como a diferença na composição dos materiais da Estrutura 2 e 4, que resultou em valores monetários de construção da pista próximos, impactou no somatório de custos da estrutura. Isso é um demonstrativo de como as metodologias adotadas neste trabalho são sensíveis ao comportamento da estrutura, mais precisamente na espessura do revestimento asfáltico.

Outro ponto a ser comentado são os resultados técnico e financeiro da alternativa 3, que teve seu dimensionamento baseado no Método DNER. Seu ciclo de vida foi o que demandou de mais trabalhos de manutenção, quatro no total, sendo um para reforço estrutural devido o afundamento de trilha de rodas, única estrutura que teve operações de recondicionamento motivada por essa patologia. Ainda assim, essa alternativa foi menos onerosa que a Estrutura 1, fato motivado por ser a composição mais barata, em termos de custos de implantação.

Também pode-se perceber que executar camadas de reforços na pista não se mostraram interessantes sob ponto de vista financeiro, pois oneraram as fases de manutenções devido a necessidade de empregar a mesma espessura de concreto asfáltico no acostamento para manter o desnível para a pista, sem que esta parcela de custo seja ocupada de forma efetiva, ou seja, as condições técnicas do acostamento não demandavam do investimento daquela ordem de valor.

Como o acostamento não é uma faixa de utilização frequente, visando economia de recursos, é possível, dentro do planejamento estratégico daquela rodovia, que suas espessuras de materiais sejam reduzidas e seu nível de assentamento ajustado. Porém, caso haja a necessidade de majorar a espessura do revestimento, para manter a segurança da via, a única alternativa é sobrepor camadas de material sobre esta parte do pavimento. Este dispêndio não eficiente de recursos pode ser evitado na etapa de projeto da rede viária.

Os custos de conservação se mostraram mais relevantes para as estruturas de maior capacidade de carga, haja vista a menor necessidade de serviços de manutenção e o conseqüente crescimento nos valores para sua conservação.

O custo relativo à rentabilidade do dinheiro foi significativo em todas as alternativas, especialmente para a Estrutura 1 e Estrutura 3, tendo em vista o número de manutenções

necessárias e os momentos em que ocorreram durante o ciclo de vida. A ponderação desta parcela na composição dos gastos é necessária para avaliações financeiras onde se trabalha com investimentos futuros.

4.2.2 Custos de usuário

Os custos aos usuários da rodovia, contabilizados ano a ano em função das despesas relativas a operação dos veículos e o tempo dos passageiros são demonstrados na Tabela 18. Da mesma forma com que se procederam os custos ao administrador, foram utilizados valores do tempo presente para proceder as análises. Neste momento, os efeitos das variações da velocidade de tráfego, em função dos níveis de fluxo de tráfego, não foram levados em consideração.

Tabela 18 - Custos de usuário.

	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3	Estrutura 4
Ano 1	R\$ 2.973.000,00	R\$ 2.973.000,00	R\$ 2.973.000,00	R\$ 2.973.000,00
Ano 2	R\$ 3.064.000,00	R\$ 3.064.000,00	R\$ 3.064.000,00	R\$ 3.064.000,00
Ano 3	R\$ 3.157.000,00	R\$ 3.156.000,00	R\$ 3.157.000,00	R\$ 3.156.000,00
Ano 4	R\$ 3.252.000,00	R\$ 3.252.000,00	R\$ 3.246.000,00	R\$ 3.252.000,00
Ano 5	R\$ 3.351.000,00	R\$ 3.351.000,00	R\$ 3.344.000,00	R\$ 3.351.000,00
Ano 6	R\$ 3.453.000,00	R\$ 3.453.000,00	R\$ 3.445.000,00	R\$ 3.452.000,00
Ano 7	R\$ 3.559.000,00	R\$ 3.558.000,00	R\$ 3.550.000,00	R\$ 3.557.000,00
Ano 8	R\$ 3.669.000,00	R\$ 3.668.000,00	R\$ 3.658.000,00	R\$ 3.666.000,00
Ano 9	R\$ 3.784.000,00	R\$ 3.782.000,00	R\$ 3.770.000,00	R\$ 3.779.000,00
Ano 10	R\$ 3.885.000,00	R\$ 3.902.000,00	R\$ 3.883.000,00	R\$ 3.896.000,00
Ano 11	R\$ 4.003.000,00	R\$ 4.056.000,00	R\$ 4.001.000,00	R\$ 4.022.000,00
Ano 12	R\$ 4.125.000,00	R\$ 4.121.000,00	R\$ 4.123.000,00	R\$ 4.179.000,00
Ano 13	R\$ 4.250.000,00	R\$ 4.246.000,00	R\$ 4.249.000,00	R\$ 4.268.000,00
Ano 14	R\$ 4.374.000,00	R\$ 4.376.000,00	R\$ 4.379.000,00	R\$ 4.401.000,00
Ano 15	R\$ 4.507.000,00	R\$ 4.510.000,00	R\$ 4.499.000,00	R\$ 4.541.000,00
Ano 16	R\$ 4.645.000,00	R\$ 4.649.000,00	R\$ 4.637.000,00	R\$ 4.690.000,00
Ano 17	R\$ 4.787.000,00	R\$ 4.793.000,00	R\$ 4.779.000,00	R\$ 4.847.000,00
Ano 18	R\$ 4.934.000,00	R\$ 4.924.000,00	R\$ 4.926.000,00	R\$ 4.926.000,00
Ano 19	R\$ 5.069.000,00	R\$ 5.075.000,00	R\$ 5.078.000,00	R\$ 5.076.000,00
Ano 20	R\$ 5.225.000,00	R\$ 5.232.000,00	R\$ 5.220.000,00	R\$ 5.232.000,00
Total	R\$ 80.066.000,00	R\$ 80.141.000,00	R\$ 79.981.000,00	R\$ 80.328.000,00

Julga-se que, levando em conta todo o período de simulação de 20 anos, os custos totais para os usuários foram semelhantes para as alternativas estudadas. Por mais que ano a ano os

valores sejam distintos, haja vista as diferentes formas de comportamento das estruturas, estes números tendem a se aproximar, progredindo de maneira similar.

Isso se deve a programação das rotinas de manutenção terem os gatilhos para momentos relativamente iniciais na degradação das condições do pavimento, fazendo com que o estado da rodovia não possuísse um impacto acentuado nos custos aos usuários. Outra explicação é que o crescimento do número de veículos que trafegam neste espaço corresponde a uma parcela significativa na progressão dos custos de usuário.

A maior diferença acontece entre a Estrutura 3 e a Estrutura 4, que são, respectivamente, a que teve as operações de manutenção acontecendo de maneira mais corriqueira e a opção que teve os serviços de reabilitação menos necessários. As estruturas com valores intermediários também seguiram o comportamento de ter menos custos na medida em que as reabilitações aconteceram com mais frequência.

Buscando confrontar os valores obtidos com outras condições de malha viária, fez-se a simulação para os custos de usuário em um trecho de quatro e de duas pistas, dentro de um período de dez anos, com a composição de materiais da Estrutura 2 e considerando os efeitos da variação da velocidade. Os resultados são demonstrados na Tabela 19.

Tabela 19 - Custos de usuário em diferentes composições de rodovia.

	Quatro pistas	Duas pistas
Ano 1	R\$ 3.062.000,00	R\$ 3.081.000,00
Ano 2	R\$ 3.155.000,00	R\$ 3.174.000,00
Ano 3	R\$ 3.251.000,00	R\$ 3.270.000,00
Ano 4	R\$ 3.349.000,00	R\$ 3.370.000,00
Ano 5	R\$ 3.451.000,00	R\$ 3.472.000,00
Ano 6	R\$ 3.556.000,00	R\$ 3.577.000,00
Ano 7	R\$ 3.664.000,00	R\$ 3.687.000,00
Ano 8	R\$ 3.775.000,00	R\$ 3.800.000,00
Ano 9	R\$ 3.891.000,00	R\$ 3.918.000,00
Ano 10	R\$ 4.011.000,00	R\$ 4.043.000,00
Total	R\$ 35.165.000,00	R\$ 35.392.000,00

Observa-se que a diferença monetária entre as alternativas foi mais impactante em relação aos cenários estudados na Tabela 18. Isso é tido pelo fato de que o acréscimo de área de rodagem diminui a solicitação de cargas ao pavimento, fazendo o mesmo efeito para as degradações, além de aumentar a capacidade de tráfego da via, atenuando a interação entre os veículos.

Também foi simulada uma situação em que não fossem desenvolvidas operações de manutenções, permitindo tráfego em um pavimento com elevados índices de degradação. Neste cenário, quantificaram-se os custos de usuário para a composição de materiais e operação de manutenção da Estrutura 4, para o período de tempo de 15 anos, conforme Tabela 20.

Tabela 20 - Custos de usuário em diferentes abordagens para manutenção.

	Com manutenção	Sem manutenção
Ano 1	R\$ 2.973.000,00	R\$ 2.973.000,00
Ano 2	R\$ 3.064.000,00	R\$ 3.064.000,00
Ano 3	R\$ 3.156.000,00	R\$ 3.156.000,00
Ano 4	R\$ 3.252.000,00	R\$ 3.252.000,00
Ano 5	R\$ 3.351.000,00	R\$ 3.351.000,00
Ano 6	R\$ 3.452.000,00	R\$ 3.452.000,00
Ano 7	R\$ 3.557.000,00	R\$ 3.557.000,00
Ano 8	R\$ 3.666.000,00	R\$ 3.666.000,00
Ano 9	R\$ 3.779.000,00	R\$ 3.779.000,00
Ano 10	R\$ 3.896.000,00	R\$ 3.896.000,00
Ano 11	R\$ 4.022.000,00	R\$ 4.022.000,00
Ano 12	R\$ 4.179.000,00	R\$ 4.179.000,00
Ano 13	R\$ 4.268.000,00	R\$ 4.430.000,00
Ano 14	R\$ 4.401.000,00	R\$ 5.024.000,00
Ano 15	R\$ 4.541.000,00	R\$ 6.959.000,00
Total	R\$ 55.557.000,00	R\$ 58.760.000,00

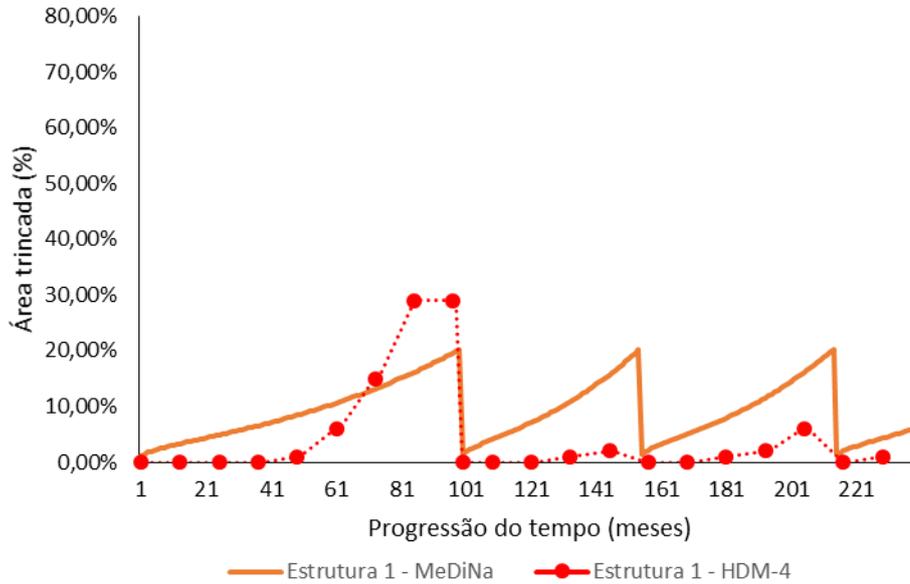
Observa-se que, enquanto as estruturas tiveram condições técnicas adequadas para o tráfego, os custos foram similares. A diferença na abordagem referente a manutenção das estruturas simuladas refletiu nos valores monetários a partir do ano 13 e, entre os conjuntos de simulações referentes a custos de usuário, esta foi a que demonstrou maiores discrepâncias, reforçando a ideia de que não realizar as operações de manutenção e permitir o tráfego em condições de degradação avançada impacta de forma importante aos usuários.

4.3 Comparação das metodologias

Para as análises apresentadas e comentadas no Item 4.1, levou-se em conta a quantificação da área trincada fornecida como resposta pelo MeDiNa para os momentos que configuraram o início de atividades de manutenção, quanto o trincamento foi o parâmetro de solicitação. Contudo, nas simulações em que se usou o HDM-4, a área trincada calculada através deste método foi levada em conta, impactando nos resultados que são influenciados pela

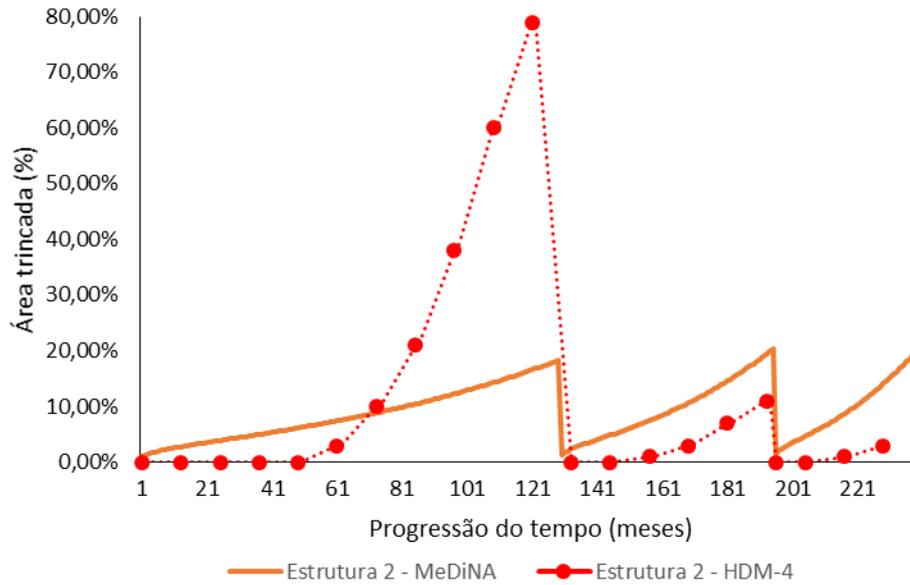
área trincada do revestimento. Desta forma, fizeram-se comparações entre as respostas do MeDiNa e do HDM-4 para o avanço do trincamento do pavimento, conforme demonstrado e comentado na sequência.

Figura 21 - Comparação da área trincada Estrutura 1.



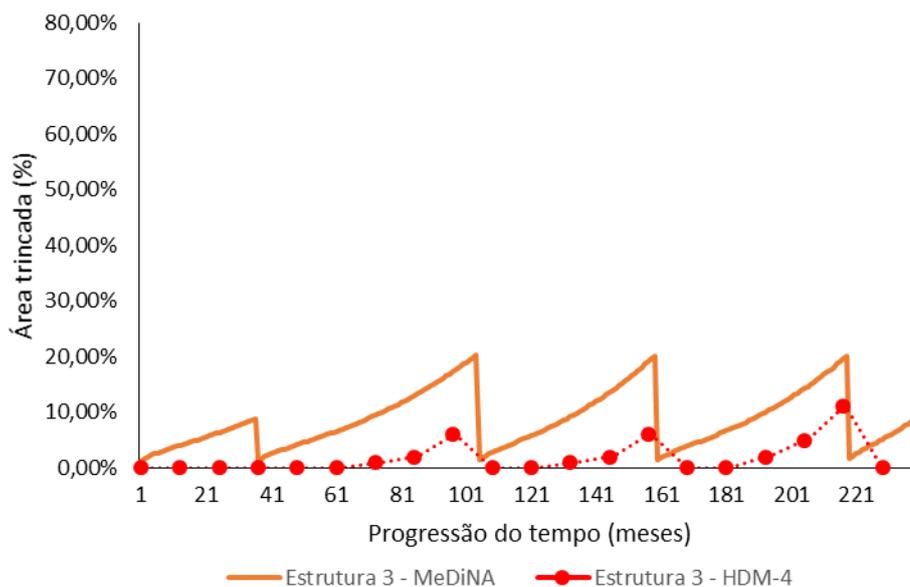
Para a Estrutura 1, o trincamento previsto pelo HDM-4 ficou próximo do nível de degradação zero em boa parte do período de avaliação. Isso aconteceu pela rotina de manutenção com atividades temporalmente próximas em que esta alternativa foi submetida. Apenas no período entre os meses 40 e 80 a resposta do HDM-4 foi superior numericamente à do MeDiNa. O trincamento estimado pelo MeDiNa atingiu o valor de área trincada em três momentos.

Figura 22 - Comparação da área trincada Estrutura 2.



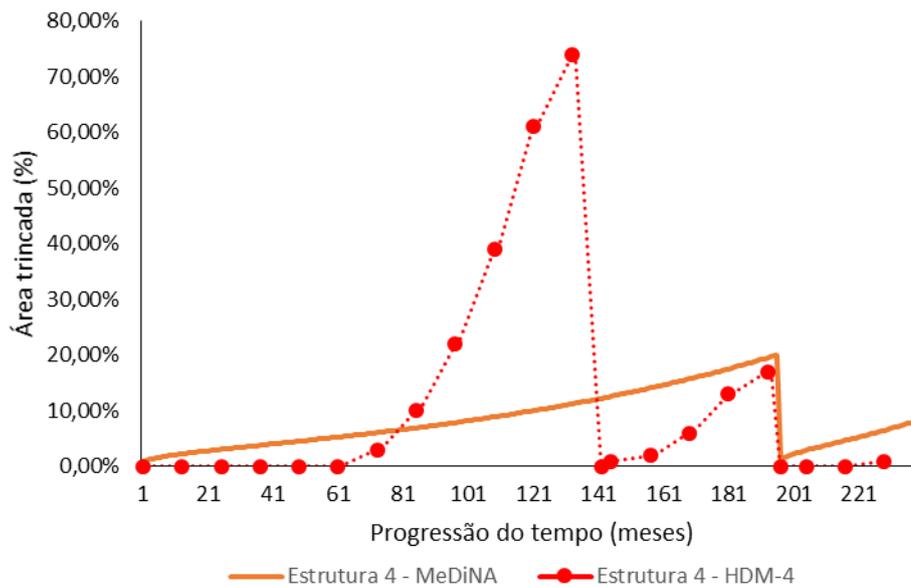
Na Estrutura 2, o trincamento previsto pelo HDM-4 teve o nível de degradação zero até aproximadamente 4 anos decorridos do início do tráfego. Depois que se iniciou o processo de degradação, a área trincada atingiu o valor de 80% em aproximadamente 70 meses, quando foi procedido uma operação de manutenção. Após isso, os dois métodos apresentaram padrão de avanço semelhante, tendo o MeDiNa estimado valores maiores.

Figura 23 - Comparação da área trincada Estrutura 3.



Semelhante com o ocorrido na Estrutura 1, em boa parte do período estudado a área trincada estimada pelo HDM-4 para a Estrutura 3 permaneceu em níveis baixos. A explicação para este acontecimento é a mesma relatada anteriormente, no que diz respeito as rotinas de manutenções. Nos intervalos de tempo entre manutenções, a estimativa de área trincada seguiu padrão de avanço semelhante para ambos os métodos.

Figura 24 - Comparação da área trincada Estrutura 4.



Para a Estrutura 4, a área trincada calculada pelo HDM-4 esteve com nível zero até o mês 61, e após o início de sua progressão, atingiu o valor de aproximadamente 70% no mês 140, quando foi procedida uma operação de manutenção. A operação de manutenção conferiu condições de tráfego até aproximadamente o mês 200, onde as duas metodologias quantificaram a porcentagem de trincamento em aproximadamente 20%.

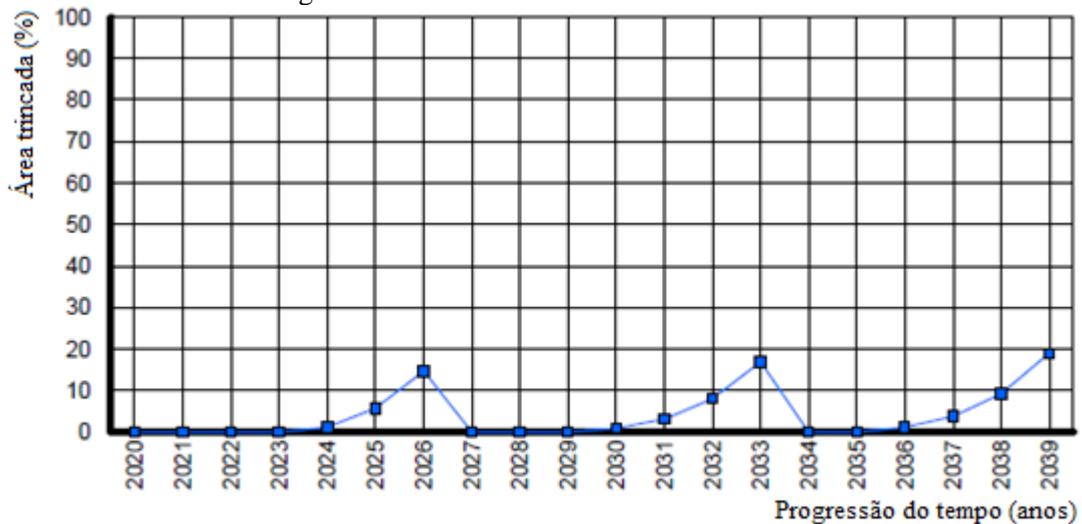
Puderam-se perceber tendências de comportamento para a evolução das áreas trincadas. No MeDiNa, a área trincada logo após o início das operações de tráfego, já apresenta um índice de degradação, seja qual for a capacidade de suporte do pavimento, diferente do HDM-4, onde durante um período de tempo a área trincada permanece com nível zero, porém após o início do trincamento, a ascensão progride de maneira mais vertical. Para porcentagens de trincamento baixas, percebe-se que o MeDiNa é mais conservador que o HDM-4, visto que apresenta valores maiores para os momentos iniciais do ciclo de vida do pavimento.

Após as operações de manutenção, os métodos calcularam valores semelhantes, porém em intervalos de tempo curtos (menos que 5 anos), a área trincada estimada do MeDiNa é

superior, novamente dando conta de que o HDM-4 possui uma metodologia mais arrojada, haja vista que ao informar porcentagens de trincamento baixas, conclui que o pavimento possui maior condições de suportar as ações que originam esta patologia.

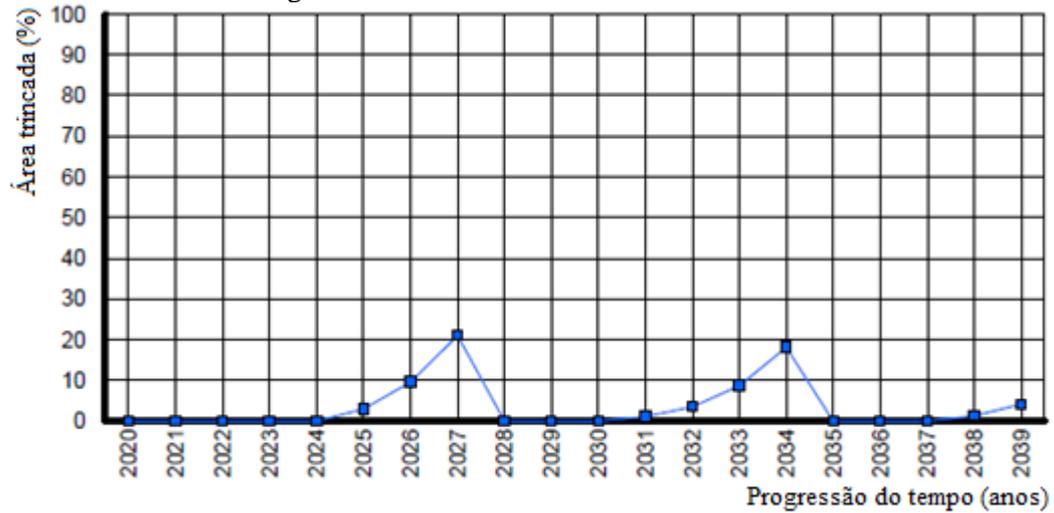
Buscando analisar o ciclo de vida como um todo, entre a Figura 25 e a Figura 28 são demonstrados os comportamentos da evolução da área trincada para as composições estudadas, levando em conta apenas os critérios do HDM-4. As estruturas foram modeladas de forma que fosse realizada uma atividade de fresagem de 5,00cm e recomposição desta espessura em concreto asfáltico quando o pavimento atingisse o máximo de 20% de área trincada.

Figura 25 - Área trincada HDM-4 Estrutura 1.



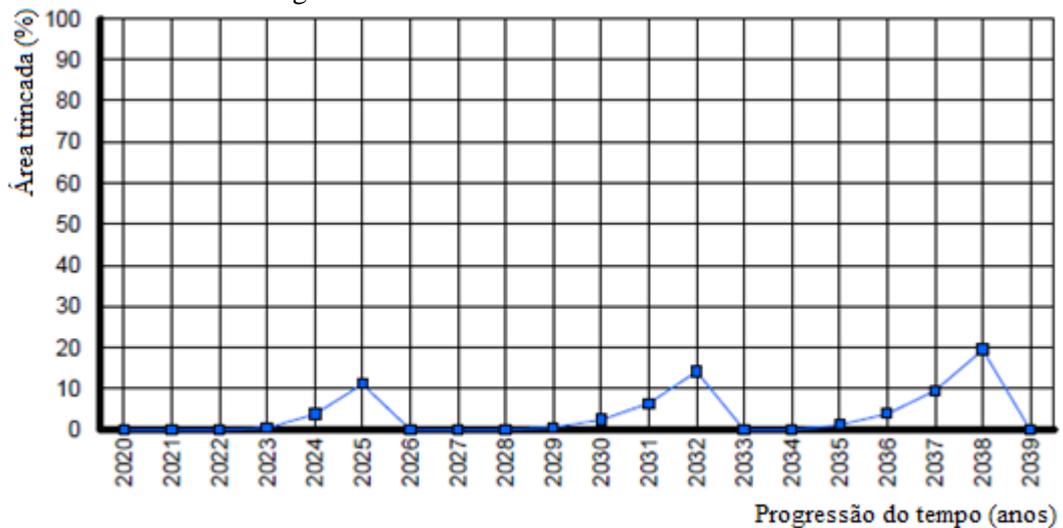
A Estrutura 1 demandou de duas atividades de manutenção, porém chegando ao final do último ano analisado com a área trincada de 20%. Comparando com a avaliação que teve a resposta do MeDiNa como gatilho para a operação de manutenção, percebe-se que o HDM-4 adiantou a primeira operação de manutenção e postergou as demais, dando conta de que as reabilitações possuem uma vida útil maior. Neste ponto, relava-se o fato de que na análise baseada com o MeDiNa, na segunda reabilitação, foi empregado um reforço de 5,00cm de concreto asfáltico, além da fresagem e recomposição, evidenciando ainda mais que o HDM-4 assume maior resistência ao pavimento depois das obras de restauração.

Figura 26 - Área trincada HDM-4 Estrutura 2.



Na Estrutura 2 foram necessárias duas atividades de manutenção, como na análise com o MeDiNa. Identificou-se que o HDM-4 adiantou as duas operações de recondicionamento, porém o intervalo entre a primeira e a segunda foi maior que no MeDiNa e também conferiu maior vida útil ao pavimento no momento final de estudo.

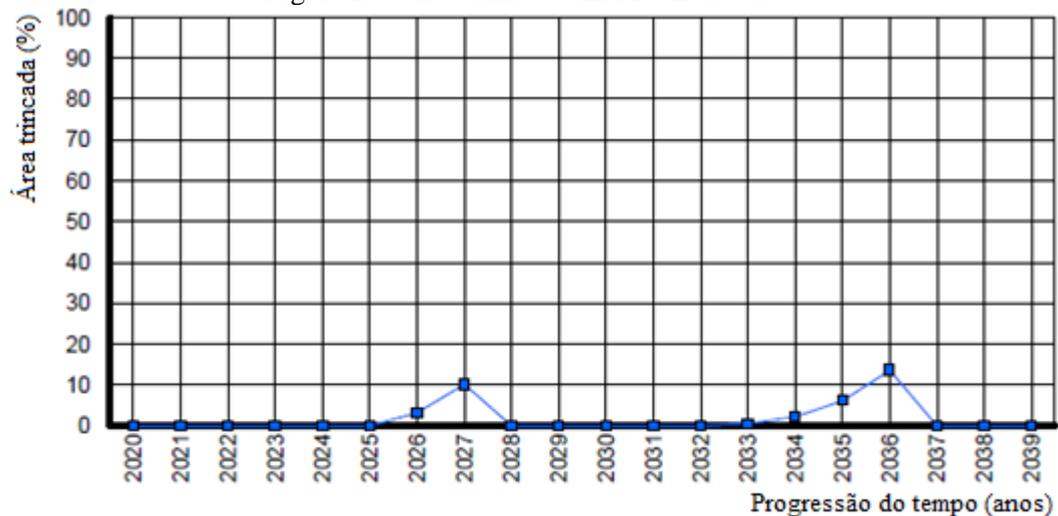
Figura 27 - Área trincada HDM-4 Estrutura 3.



Na terceira análise, foram necessárias três atividades de manutenção, mesmo número de operações estimado pelo MeDiNa quando teve a área trincada como gatilho. A primeira manutenção no HDM-4 foi mais precoce, proporcionalmente, que nas demais estruturas, fato motivado pelo acréscimo de 3,00cm de espessura na simulação do MeDiNa, ocasionado pelo afundamento de trilha de roda. O período de vida entre a segunda e a terceira manutenções foi semelhante (cerca de 60 meses) para os dois testes. Novamente, o HDM-4 resultou maior valor

residual que no MeDiNa, isso porque a última manutenção ocorreu mais tardia na linha do tempo.

Figura 28 - Área trincada HDM-4 Estrutura 4.



A quarta estrutura demonstrou que o HDM-4 foi mais conservador, tendo em vista que, considerando apenas a área trincada, seria necessária uma operação de reabilitação a mais que na simulação do MeDiNa. Enquanto que para a simulação no HDM-4 duas atividades de fresagem e recomposição já haviam sido executadas, o MeDiNa ainda não havia constatado a necessidade de recondicionamento, ou seja, não havia atingido o valor de 20% de área trincada.

Em alguns momentos, como pode ser lido nos gráficos anteriores, a estrutura não chegou ao valor de 20% de área trincada e foi executada uma manutenção. Isso acontece porque o HDM-4 avalia as estruturas anualmente, informando as condições do pavimento para o momento final do ano. Então, durante o próximo ano, a área trincada chegaria aos 20% e caso não fosse executado o serviço de manutenção nos momentos demonstrados, seria permitido o avanço da área trincada além do valor de 20%, já que a operação de manutenção seria iniciada apenas no próximo período de avaliação.

Outra diferença observada foi que o novo ciclo de evolução da área trincada no HDM-4 inicia apenas no ano posterior ao serviço de manutenção, ou seja, a área trincada demora 12 meses para voltar ao patamar 0% e iniciar uma nova progressão. No MeDiNa, logo no momento posterior em que foi deflagrada a operação de recondicionamento, foi considerado um novo avanço para a área trincada.

A análise das composições mais robustas, reiteram o que fora constatado anteriormente, que o período de início das trincas é mais lento no HDM-4, sendo mais arrojado que o MeDiNa. Porém quando as trincas começam a evoluir, o progresso é muito mais rápido, caracterizando

então, ser mais cauteloso que a metodologia M-E. Observando todo o período de vida deste estudo, o MeDiNa tende a ser mais arrojado em comparação com o HDM-4, para estruturas com maior capacidade de carga.

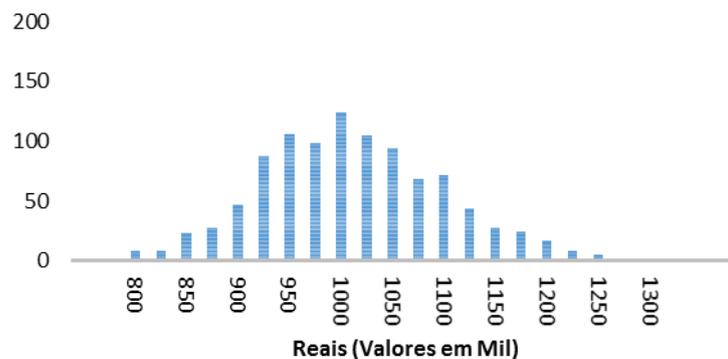
4.4 Análise de confiabilidade

Anteriormente, quando foram desenvolvidas as simulações através do valor médio dos parâmetros, para a Estrutura 1, ocorreram três manutenções, nos meses 99, 154 e 214, o que resultou em um montante de R\$ 1.282.272,06 para a execução dos serviços e R\$ 996.350,26 como remuneração para a rentabilidade do dinheiro.

Empregando a metodologia de Monte Carlo para simular o comportamento dos custos de manutenção, variando o período em que elas ocorrem, o que impacta no custo da rentabilidade do dinheiro, foi obtido, para um cenário de mil simulações, o valor médio de R\$ 999.642,34, com o desvio padrão para a simulação de R\$ 88.753,38.

O histograma dos custos da rentabilidade do dinheiro é apresentado na Figura 29 e na sequência, os comentários deste.

Figura 29 - Histograma do custo da rentabilidade do dinheiro da Estrutura 1.

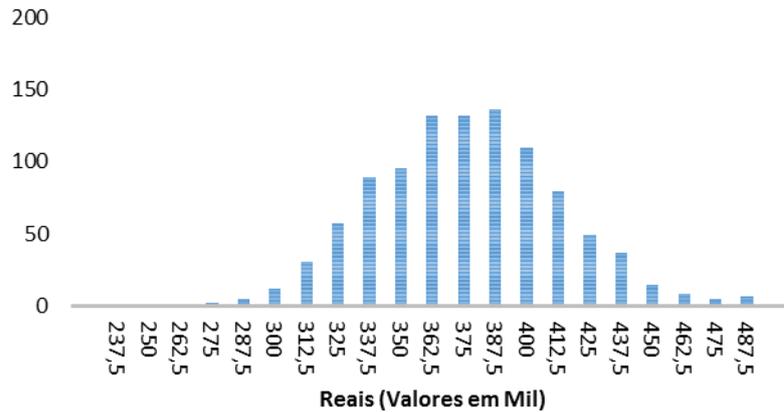


As simulações deram conta de que 80% dos resultados estão contidos entre os valores de R\$ 925.000,00 e R\$ 1.125.000,00, sendo que este intervalo (R\$ 200.000,00) representa cerca de 20% do custo da rentabilidade do dinheiro calculado de forma determinística; e que 95% dos resultados estão entre R\$ 875.000,00 e R\$ 1.225.000,00, diferença de valores que forma um intervalo de R\$ 350.000,00, ou, aproximadamente 35% da parcela do custo estimado deterministicamente.

Para a Estrutura 2, foram necessárias duas operações de manutenção, estimadas para os meses 129 e 195, sendo calculados R\$ 544.250,88 para a execução dos serviços e R\$

419.053,21 como custo para a rentabilidade monetária. Para um cenário de mil simulações, gerados através do Método de Monte Carlo, obteve-se, para a rentabilidade monetária, o valor médio de R\$ 369.949,22, com o desvio padrão de R\$ 36.577,68. O histograma dos custos da rentabilidade do dinheiro é apresentado na Figura 30.

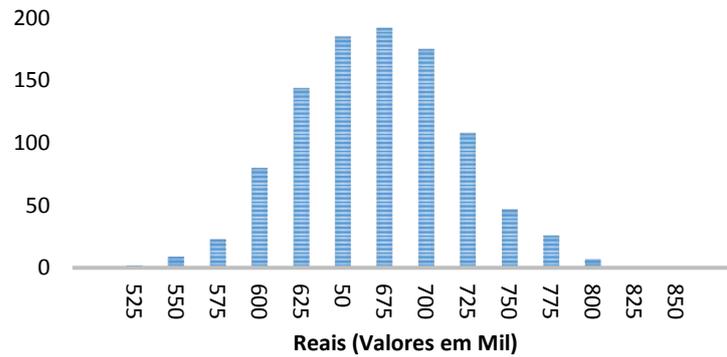
Figura 30 - Histograma do custo da rentabilidade do dinheiro da Estrutura 2.



Cerca de 80% dos resultados estão contidos entre os valores de R\$ 337.500,00 e R\$ 425.000,00, um intervalo de R\$ 87.500,00, ou 21% do custo da rentabilidade do dinheiro quantificado de forma determinística; e que 95% dos resultados estão entre R\$ 312.500,00 e R\$ 437.500,00, o que forma um intervalo de R\$ 125.000,00, ou, aproximadamente 30% da parcela do custo estimado através dos valores médios.

Para a Estrutura 3, quatro operações de manutenção foram necessárias ao longo da vida útil, ocorridas nos meses 36, 104, 159 e 218, o que gerou um montante financeiro de R\$ 1.079.102,82 e R\$ 656.652,71 como custo para a rentabilidade do dinheiro. Nas mil simulações estudadas para a rentabilidade monetária, encontrou-se o valor médio de R\$ 658.065,24, com o desvio padrão de R\$ 48.588,07. O histograma dos custos da rentabilidade do dinheiro é apresentado na Figura 31.

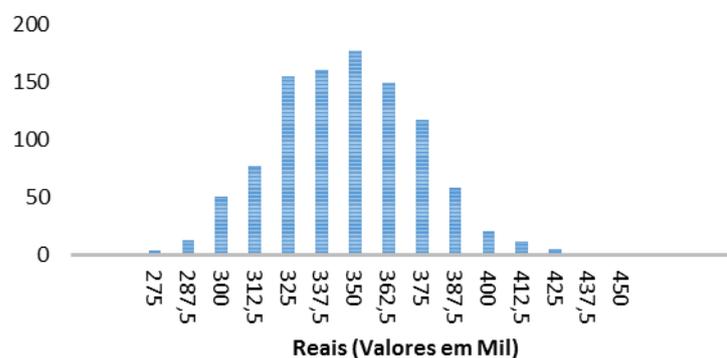
Figura 31 - Histograma do custo da rentabilidade do dinheiro da Estrutura 3.



O intervalo de R\$ 625.000,00 e R\$ 725.000,00, que representa cerca de 15% da rentabilidade do dinheiro calculada de maneira determinística, comporta 80% dos valores da simulação, e 95%, aparecem no intervalo de R\$ 575.000,00 e R\$ 750.000,00, que representa a fração de aproximadamente 27% do custo para a rentabilidade do dinheiro.

Por fim, a Estrutura 4 demandou de duas operações de manutenção, necessárias nos meses 142 e 196, o que resultou um montante financeiro de R\$ 387.704,08 e R\$ 324.327,88 como custo para a rentabilidade do dinheiro. Na série de mil avaliações, simuladas para verificar o comportamento da rentabilidade monetária, calculou-se o valor médio de R\$ 340.808,22, com o desvio padrão de R\$ 27.231,69. O histograma dos custos da rentabilidade do dinheiro é apresentado na Figura 32.

Figura 32 - Histograma do custo da rentabilidade do dinheiro da Estrutura 4.



As simulações sinalizaram que 80% dos resultados estão contidos entre os valores de R\$ 325.000,00 e R\$ 387.500,00, sendo que este intervalo representa cerca de 20% do custo da rentabilidade do dinheiro calculado anteriormente; e que 95% dos resultados estão entre R\$ 300.000,00 e R\$ 387.500,00, diferença que forma um intervalo de R\$ 87.500,00, ou, aproximadamente 27% da parcela do custo estimado deterministicamente.

A fim de verificar se a quantia de números aleatórios gerados através da metodologia de Monte Carlo resulta em diferenças significativas nas análises, procederam-se testes com dez mil simulações, para a Estrutura 2 e a Estrutura 3, que resultaram nos histogramas da

Figura 33 e Figura 34.

Figura 33 – Histograma dez mil valores para custo da rentabilidade do dinheiro da Estrutura 2.

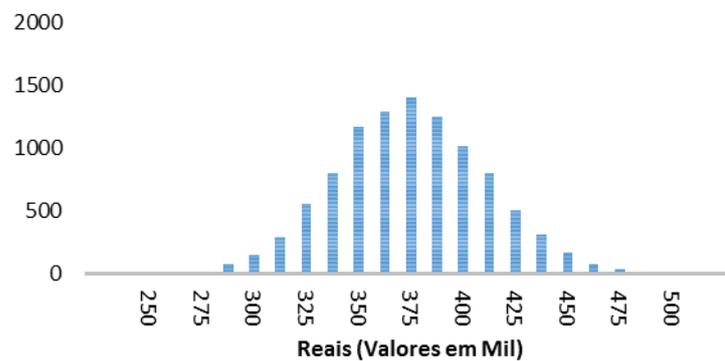
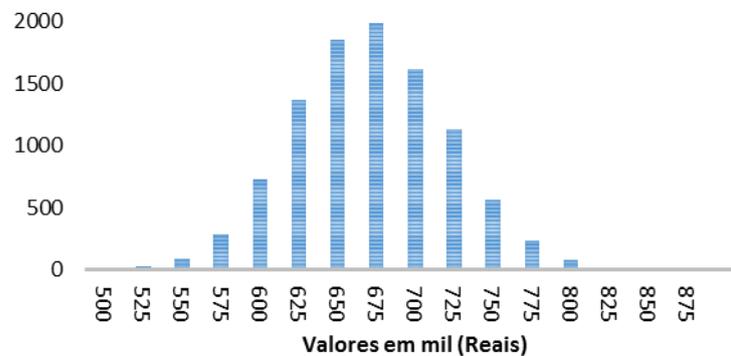


Figura 34 - Histograma dez mil valores para custo da rentabilidade do dinheiro da Estrutura 3.



Analisando os números simulados, verificou-se que, para Estrutura 2, 80% dos resultados estão contidos no intervalo de R\$ 325.000,00 e 412.500,00 e que 95% dos valores estão entre R\$ 300.000,00 e R\$ 437.500,00. Para a Estrutura 3, 80% dos resultados estão contidos no intervalo de R\$ 625.000,00 e 725.000,00 e que 95% dos valores estão entre R\$ 600.000,00 e R\$ 775.000,00. Mesmo que, para as duas estruturas os intervalos não sejam os mesmos que aqueles das mil simulações, é possível identificar compatibilidade entre os valores estudados.

Observando os números descritos nos últimos parágrafos, é possível verificar que os valores para o custo da rentabilidade do dinheiro, calculados de forma determinística, para todas as estruturas, estão contidos nos intervalos de frequência de resultados, ratificando a

possibilidade de sua ocorrência. As exceções são para a Estrutura 4 e a simulações com dez mil variações da Estrutura 2, onde o valor determinístico, embora muito próximo do limite inferior e superior, respectivamente, não estavam contidos no intervalo de 80% de frequência.

Quanto maior a chance de ocorrência dos valores, maior será o intervalo verificado e também a diferença para o valor estimado deterministicamente. Ao analisar os valores monetários com 80% de frequência, observou-se que o intervalo representa entre 15% e 21% do custo determinístico da rentabilidade do dinheiro; e que para a frequência de 95%, o intervalo representa de 27% a 35% do custo da rentabilidade monetária calculada através dos parâmetros médios. Não considerar a variação desta componente de custo pode ocasionar em assumir um montante financeiro com possibilidade ser diferente daquele que venha ocorrer, nas ordens dos valores mencionados.

Vale ressaltar que ao trabalhar com uma rodovia de menor importância (em virtude da sua classe de utilização), onde seja assumido um grau de incerteza maior em seu projeto, a variação do montante financeiro necessário ao longo do ciclo de vida será maior, logo, o estudo que oferece previsibilidade ao que pode ser gasto, se mostra ainda mais interessante.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

Esta dissertação teve como principal objetivo avaliar os custos do ciclo de vida decorrentes em diferentes estruturas de pavimentos flexíveis. Em função disso, também foram verificados aspectos relativos ao dimensionamento e previsão de desempenho de diferentes metodologias. Considerando as modelagens das estruturas abordadas e os resultados obtidos, avalia-se que os objetivos propostos foram atingidos e que as principais conclusões relativas ao estudo foram:

Observou-se que as composições mais onerosas em um primeiro momento resultaram em menos dispêndios até o final de sua vida útil. Na comparação entre os custos da Estrutura 2 e Estrutura 4 ficou evidente a importância que as decisões de projeto podem refletir na vida útil do ativo, haja vista que os custos de implantação destas alternativas foram próximos e o custo total foi cerca de 10% menor para a Estrutura 4.

Como visto, o custo da rentabilidade do dinheiro assume uma parcela importante dos gastos. As análises procedidas neste estudo consideraram que o valor para implantação era líquido, ou seja, a disposição do órgão administrador da rodovia. Em uma situação em que isso não seja o caso, deve ser levado em consideração as taxas de juros e os períodos de amortização dos valores financiados. Isso pode fazer com que se modifique o comportamento citado no início do parágrafo anterior.

Quanto aos custos de usuário, pode ser visto que manter a rodovia em níveis adequados de tráfego não representa necessariamente um benefício ao usuário. O que se pode afirmar é que postergar as operações de manutenção, permitindo que a rodovia atinja níveis elevados de degradação, resulta em penalização aos usuários, tendo em vista o acréscimo na parcela de custo destinadas para eles.

Comparando os custos ao administrador e aos usuários, percebe-se que a parcela aos usuários é muito maior, evidenciando o fato de que este componente de custo deve ser analisado criteriosamente em um sistema de gerência de pavimentos, tendo peso importante no processo de tomada de decisão.

O MeDiNa se mostrou mais conservador nas previsões de desempenho em situações de início da vida útil do pavimento, isso porque informa valores maiores de trincamento que o

HDM-4. Porém quando as trincas começam a evoluir, o progresso é muito mais rápido no HDM-4, caracterizando então, ser mais cauteloso que a metodologia M-E.

Leva-se a crer que o Método DNER não está adequado para solos com capacidade de suporte superior, haja vista que a esbeltes da espessura de materiais que seu dimensionamento resultou ocasionou que a estrutura tivesse elevado afundamento de trilha de roda, indicando que a capacidade de carga daquela estrutura era insuficiente para o carregamento atuante.

A consideração de mecanismos de confiabilidade pode otimizar a gerência do ativo, visto que confere uma série de possibilidades frente ao seu desempenho, possibilitando que os agentes que o administram preparem estratégias adequadas ao longo do seu ciclo de vida. É possível afirmar que considerar a incerteza dos valores que competem aos esforços e capacidade de carga de estruturas de pavimentos, torna a abordagem mais próxima da situação real.

A análise do custo do ciclo de vida se mostrou uma ferramenta interessante para o processo gerencial de uma rodovia, embora complexa sob o ponto de vista de coleta, computação e validação de dados, observados e previstos. Em um caso real, tendo em vista a inevitável variabilidade das condições estruturais e funcionais e principalmente dos esforços que incidem sobre o pavimento, o acompanhamento e atualização constante das premissas consideradas serão importantes para a boa gerência do ativo.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo do trabalho, temas compatíveis com este levantaram questionamentos que podem servir como escopo para outras pesquisas, conforme comentado na sequência.

- A sequência dos cálculos poderia ser programada de forma a tornar o processo automatizado, fato que auxiliaria na busca pela otimização do projeto, ao considerar diferentes situações de solicitação ao pavimento e de capacidade de suporte.
- Estudar como a variação dos preços dos insumos relativos aos serviços de pavimentação impacta nos custos de administração, tendo em vista que estes itens podem ter o comportamento de variação dos seus valores diferente dos índices de preços médios.
- O método brasileiro que possui abordagem mecanicista ainda está em desenvolvimento. Foi necessário empregar técnicas empíricas para as previsões de desempenho abordadas

neste estudo. Futuramente, o ciclo de vida dos pavimentos poderá ser avaliado empregando apenas técnicas mecanicistas.

- A parcela relativa aos custos ambientais não foi valorada nesta dissertação. Um estudo focado neste aspecto, relacionando as respostas MeDiNa, seria de contribuição para esta área.
- Com o avanço do MeDiNa, outros estudos focados em gerência de recursos financeiros para rodovias podem ser desenvolvidos, tais como: validação de cobrança aos usuários para trafegar na via, mecanismos de bonificação ou penalização para executores de obras rodoviárias ou ainda a validação de parcerias entre órgãos públicos e privados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Preços de distribuição de produtos asfálticos**. 2019. Disponível em <http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-distribuicao>. Acesso em jan. 2020.

AIRFIELD ASPHALT PAVEMENT TECHNOLOGY PROGRAM - APTP. **Final Report, 277 Technology Parkway**. Auburn, 2006.

ALAM, M. M. **Creating Pro-Poor Transport Connecting the Dots: Transport, Growth, and Poverty Reduction. Connections Transport & ICT**. 2015. Disponível em: <http://www.worldbank.org/en/topic/transport/brief/connections-note-24>. Acesso em: 22 ago. 2018.

ALBUQUERQUE, F. S. **Sistema de Gerência de Pavimentos para Departamentos de Estradas do Nordeste Brasileiro**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2007.

ALHASAN, A.; ALI, A.; OFFENBACKER, D.; SMADI, O.; LEWIS-BECK, C. Incorporating spatial variability of pavement foundation layers stiffness in reliability-based mechanistic empirical pavement performance prediction. **Transportation Geotechnics**. V. 17, p. 1-13, 2018.

ANDRADE, M. O.; MAIA, M. L. A.; LIMA NETO, O. C. C. Impactos de investimentos em infraestruturas rodoviárias sobre o desenvolvimento regional no Brasil - possibilidades e limitações. **Revista Transportes**. V. 23, n. 4, p. 90-99, 2015.

ARANGO, L. F. **Resultados do projeto de calibração e aferição do modelo HDM-4 para as condições da rede de rodovias do Brasil**. 2018. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/planejamento-e-pesquisa/2a-semana-do-planejamento/1-calibracao-hdm-4-dnit-luisa-fernanda-arango.pdf>. Acesso em: nov. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements (E1926/08)**. West Conshohocken (EUA), 2008.

AYRES, JR. M. **Development of a rational probabilistic approach for flexible pavement analysis**. 1997. Ph. D. Dissertation (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) - University of Maryland, College Park, 1997.

BABASHAMSI, P.; YUSOFF, N.; CEYLAN, H.; NOR, N.; SALARZADEH JENATABADI, H. Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis. **International Journal of Pavement Research and Technology**. V. 9, n. 4, p. 241-254, 2016.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. 1 ed. São Paulo - SP: Oficina de Textos, 2007.

BEZERRA NETO, R. S. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de**

pavimentos para a região de Campo Grande (MS). 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

BIROLI, F. C. Comparação dos custos de pavimentos flexíveis e rígidos com base em conceitos de gerência de pavimentos. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BOCK, A. L. Pesagem em movimento de cargas atuantes em rodovias e seu impacto no desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BUENO, L. D. Contribuição para a previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

CARDOSO, S. H. Faixas de Módulos Dinâmicos (elásticos) Obtidos por Retroanálise Durante Sete Anos”. In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, MT. **Anais da 29ª Reunião Anual de Pavimentação**, 1995.

CARVALHO R.; SCHWARTZ C. Comparisons of flexible pavement designs: AASHTO empirical versus NCHRP Project 1–37 A mechanistic-empirical. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. V.1947, p. 167–74, 2006.

CERATTI, J. A. P.; NÚÑEZ, W. P. Estudo e desempenho de pavimento experimental com objetivo de validar método racional de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Projeto de Pesquisa CONCEPA/LAPAV 2010. Porto Alegre, 2011.

CHEN, X.; HUDSON, S.; CUMBERLEDGE, G.; PERRONE, E. Pavement performance modeling program for Pennsylvania. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. V.1508, p. 1-8, 1995.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial. Brasília, 2017(a).

_____. **Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos.** Brasília, 2017(b).

_____. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?.** Brasília, 2017(c).

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO - CONTRAN. Resolução nº 12/98. 1998. Disponível em <http://www.guiadotrc.com.br/lei/res1298.asp> . Acesso em set. 2019.

COSTA, T. C.; PEREIRA, D. A.; DEON, K. C. A. Retroanálise das Bacias Deflectométricas para Obtenção dos Módulos de Resiliência das Camadas de Pavimentação da Rodovia BR-163/PA, Brasil. In: VIII Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia / V Congresso de

Engenharia de Moçambique, Maputo, Moçambique. **Anais do VIII Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia**, 2017.

COUTINHO, J. C. P. **Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM - DAER. **Instrução de Serviço para Estudos e Projetos CREMA**. 2017. Disponível em <https://www.daer.rs.gov.br/upload/arquivos/201709/19132737-is-112-crema.pdf>. Acesso em fev. 2020.

DALLA ROZA, A. E. **Contribuição para projeto mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos na região norte do estado do Mato Grosso**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de conservação rodoviária. Publicação IPR- 710**. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2005. p. 568.

_____. **Manual de pavimentação. Publicação IPR-719**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006a. p. 274.

_____. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos. Publicação IPR- 720**. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006b. p. 310.

_____. **Manual de Estudo de Tráfego. Publicação IPR- 723**. 1. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006c. p. 384.

_____. **Memorando Circular nº 12/2012/DIREX**. 2012. Disponível em http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-1/copy_of_MemorandoCircularn122012DIREX.pdf. Acesso em jan. 2020.

_____. **Norma DNIT 172: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. Brasília, 2016.

_____. **Portaria Nº 1977**. 2017. Disponível em <http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-1/Portaria1977.2017DGProdutosasflticos.pdf>. Acesso em jan. 2020.

_____. **Norma DNIT 134: Pavimentação – Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **Norma DNIT 179: Pavimentação – Solos - Determinação da deformação permanente – Instrução de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **Custos e pagamentos - Sistema de Custos Referências de Obras – SICRO (Abril de 2019)**. 2019. Disponível em <http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/sicro/sul/rio-grande-do-sul/2019-1/abril/abril-2019>. Acesso em nov. 2019.

_____. **Ofício Circular nº 4746/2016/ACE – DPP.** 2019b. Disponível em http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-1/copy_of_SEI_DNIT4700968OficioCircularReformulaoBDI.pdf. Acesso em jan. 2020.

DING, T.; SUN, L.; CHEN, Z. Optimal Strategy of Pavement Preventive Maintenance Considering Life-Cycle Cost Analysis. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. V. 96, p. 1679-1685, 2013.

ECHEVERRIA, J. A. S. **Avaliação do efeito de restaurações com fresagem e recapeamento nas condições funcional e estrutural de pavimentos com volume de tráfego médio.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

EISENBERGER, I.; REMER, D. The role of interest and inflation rates in life-cycle cost analysis. **Deep Space Network Progress Report**. V. 42–43, p. 105–109, 1977.

ESPÍNDOLA, A. C. **Modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis para uma rodovia no Rio de Janeiro.** 2014. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

FACCIN, C. **Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: Comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Status of the Nation's Highways, Bridges, and Transit: Conditions & Performance.** U.S. Department of Transportation, 2006.

FERRI, S.; SUZUKI, C. Y.; KABBACH, F.; SANTOS, C. R.; VALLEJO, F. M. Proposição de metodologia para análise de risco em estruturas de pavimentos asfálticos flexíveis. **Revista Transportes**. V. 25, n. 1, p. 93-101, 2017.

FONSECA, L.F.S. **Análise das soluções de pavimentação do programa CREMA 2ª etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FRANCO, F. A. C. de P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F. A. C. de P.; MOTTA, L. M. G. da. **Guia para utilização de Método Mecanístico-Empírico.** 2018. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manual-de-utilizacao-medina.pdf>. Acesso em mar. 2019.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

GALÍ, J. **Monetary policy, inflation, and the business cycle: an introduction to the new Keynesian framework and its applications**. 2ed. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2015.

GAO, L.; ZHANG, Z.; TIGHE, S.; Using Markov Process and Method of Moments for Optimizing Management Strategies of Pavement Infrastructure. In: 86th Annual TRB Meeting, Washington, DC. **Anais do 86th Annual TRB Meeting**, 2007.

GOH, K. C.; YANG, J. Developing a life-cycle costing analysis model for sustainability enhancement in road infrastructure project. In: Rethinking Sustainable Development : Planning, Infrastructure Engineering, Design and Managing Urban Infrastructure, Queensland, 2009.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecânico-Empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GUO, Z.; SULTAN, S. A. Feasibility of perpetual pavement stage construction in China: A life cycle cost analysis. **International Journal of Transportation Science and Technology**. V. 5, p. 239-247, 2016.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; FALLS, L. C. **Pavement asset management**. 1 ed. Beverly, MA: Scrivener Publishing, 2015.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. **Modern pavement management**. Malabar, FL: Krieger Publishing Company, 1994.

HALL, K. D.; XIAO, D. X.; POHL, E. A.; WANG, K. C. P. Reliability-Based Mechanistic-Empirical Pavement Design with Statistical Methods. **Journal of the Transportation Research Board**. V. 2305, p. 121-130, 2012.

HASAN, U.; WHYTE, A.; AL JASSMI, H. Critical review and methodological issues in integrated life-cycle analysis on road networks. **Journal of Cleaner Production**. V. 206, p. 541-558, 2018.

HDM-4: Highway Development and Management. Versão 2.10.: The World Road Association (PIARC), 2005.

HUANG, Y. H. **Pavements analysis and design**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004.

IACONO, M.; LEVINSON, D. Review of Methods for Estimating the Economic Impact of Transportation Improvements. **SSRN Electronic Journal**. 2008.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA; ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES PÚBLICOS – ANTP. Redução das deseconomias urbanas com a melhoria do transporte público. **Revista dos Transportes Públicos –ANTP**. p. 35-92, 1999.

KIM C.; LEE, C.; HARVEY, J.; FONG, A.; LOTT, R. Automated Sequence Selection and Cost Calculation for Maintenance and Rehabilitation in Highway Life-Cycle Cost Analysis (LCCA). **International Journal of Transportation Science and Technology**. V. 4, n. 1, p. 61-75, 2015.

LAMPTEY, G.; LABI, S.; SINHA, K. C. Development of Alternative Pavement Rehabilitation and Maintenance Strategies for Pavement Management. In: 83rd Annual TRB Meeting, Washington, DC. **Anais do 83rd Annual TRB Meeting**, 2004.

LERCH, R. L. **Previsão de Irregularidade Pós-recape em Rodovias do RS: Ajuste do Modelo HDM-4**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LU, Q.; XIN, C. **Pavement rehabilitation policy for reduced life-cycle cost and environmental impact based on multiple pavement performance measures**. 2018. Disponível em: https://cpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.coecis.cornell.edu/dist/6/132/files/2019/02/USF_YR2_LU_FINAL_PAVEMENT_REHABILITATION-1vx67vp.pdf. Acesso em dez. 2019.

LUO, Z.; KARKI, A.; PAN, E.; ABBAS, A.; AREFIN, M. S.; HU, B. Effect of uncertain material property on system reliability in mechanistic-empirical pavement design. **Construction and Building Materials** V. 172, p. 488–498, 2018

LUO, Z.; XIAO, F.; SHARMA, R. S. Efficient reliability-based approach for mechanistic-empirical asphalt pavement design. **Construction and Building Materials**. V. 64, p. 157–165, 2014.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis – A experiência com o FWD no Brasil**. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1996.

MALYSZ. **Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2009.

MANDAPAKA, V.; BASHEER, I.; AHASKI, K.; ULLIDTZ, P.; HARVEY, J. T.; SIVANESWARAN, N. Mechanistic-Empirical and Life-Cycle Cost Analysis for Optimizing Flexible Pavement Maintenance and Rehabilitation. **Journal of Transportation Engineering**. V. 138, n. 5, p. 625-633, 2012.

MARCON, A. F. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. 1996. Tese (Doutorado em Infraestrutura Aeronáutica). Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 1996.

MELLO, L. G. R. de; FARIAS, M. M. de; PRESULER, E. S.; PREUSLER R. Análise do impacto do período de projeto de pavimentos no custo global de obras rodoviárias. **Revista Transportes**. V. 24, n. 4. 2016.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3 ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2015.

MEDINA: Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos. Versão 1.0: DNIT, 2018.

MICHIGAN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – MDOT. **Standard specifications for construction**. Ann Arbor: MDOT, 2003.

MIRZADEH, I.; BUTT, A. A.; TOLLER, S.; BIRGISSON, B. Life cycle cost analysis on the fundamental cost contributors for asphalt pavements. **Structure and Infrastructure Engineering**. V. 10, n. 12, p. 1638-1647, 2014.

MONISMITH, C. L. Evolution of long-lasting Asphalt Pavement Design methodology: A perspective. In: International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements, Alabama. **Anais do International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements**. 2004.

MOTTA, L M. G. Aspectos dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos de alguns países comparados aos critérios propostos para o novo método brasileiro. **Revista Estradas**. V. 22, p. 12-23, 2017.

NAKAHARA, S. M. **Estudo do Desempenho de Reforços de Pavimentos Asfálticos em Via Urbana sujeita a Tráfego Comercial Pesado**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NASCIMENTO, D. M. **Análise comparativa de modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil**. 2015. Degree of Ph. D. Graduate Faculty of North Carolina State University. Raleigh – North Carolina. USA. 2015.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM – NCHRP. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures: Program 1-37A**. Washington, 2004.

NEWCOMB, D.; RICHARD, W.; TIMM, D. **Perpetual Asphalt Pavements – A Synthesis**. 2010. Disponível em: http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/Perpetual_Pavement_Synthesis.pdf. Acesso em: abr. 2019.

NUNES, D. F. **Procedimento para análise de sensibilidade do programa HDM-4**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

ODOKI, J. B.; KERALI, H. G. R. **Analytical framework and model descriptions (Highway Development and Management - HDM-4)**. Highway Development and Management Series, versão 2.0, v.4. Birmingham (Reino Unido), 2006.

OZBAY, K.; JAWAD, D; PARKER, N.A.; HUSSAIN, S. Life-cycle cost analysis: state-of-the-practice vs. state-of-the-art. In: 83rd Annual meeting of transportation research board, 2004, Washington D.C. **Anais do 83rd Annual TRB Meeting**, 2004.

PATERSON, W. D. Road deterioration and maintenance effects. **World Bank Publications**. Washington D.C., 1987.

PREDIGER, P. W. **Desenvolvimento de modelos de irregularidade longitudinal e afundamento em trilhas de roda para um trecho da BR 285**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.

QUEIROZ, C. A. V. **Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil**. 1981. Dissertation (Degree of Philosophy Doctor), University of Texas, Austin – Texas, USA, 1981.

RAJBONGSHI, P. Reliability based cost effective design of asphalt pavements considering fatigue and rutting. **International Journal Pavement Research and Technology**. V.7, p. 153-158, 2014.

RAMOS, C. R. **Estudo para o desenvolvimento de um catálogo de pavimentos flexíveis do município do RJ**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

RIBAS, J. **Parâmetros elásticos típicos de materiais de pavimentação flexíveis do Rio Grande do Sul e sua aplicação em uma análise de custo/benefício**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

RODRIGUES FILHO, S. **Estudo econômico comparativo entre tipos de pavimentos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

ROSE, S.; MATHEW, B. S.; ISAAC, K. P.; ABHAYA, A. S. Risk based probabilistic pavement deterioration prediction models for low volume roads. **International Journal Pavement Engineering**. V.19, p. 88–97, 2018.

ROSSATO, F. P. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SANCHEZ-SILVA, M.; ARROYO, O.; JUNCA, M.; CARO, S.; CAICEDO, B. Reliability based design optimization of asphalt pavements. **International Journal Pavement Engineering**. V. 6, p. 281–294, 2005.

SANTOS, C. C. dos. **O valor do tempo na avaliação de projetos de transporte**. 2012. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SANTOS, C. R. G. **Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística**. 2011. 295 f. Tese (Doutorado Engenharia de transportes), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SANTOS, M. S. dos. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria -RS**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SANTOS, J.; FERREIRA, A.; Life-Cycle Cost Analysis System for Pavement Management. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. V. 48, p. 331-340, 2012.

SERIGOS, P.A.; KARKI, P.; ZHANG, Z.; PROZZI, J.A. Impact of upgrading the distresses measurement system on assessed pavement network condition. In: 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC. **Anais do 93rd Annual TRB Meeting**, 2014.

SEVERI, A. A. **Considerações sobre os custos de pavimentos rígidos com base em conceitos de gerência de pavimentos**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

SOUZA, L. P. de. **Uso integrado das ferramentas de análise do ciclo de vida e de análise do custo do ciclo de vida em pavimentação**. 2017. Dissertação (Mestre em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SOUZA JÚNIOR, J. G. de. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

SILVA, A. H. M. da. **Proposta de procedimento para análise de alternativas de manutenção em sistemas de gerência de pavimentos**. 2017. Tese (Doutor em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SUZUKI, C. Y.; KABBACH JUNIOR, F. I.; AZEVEDO, A. M.; PEREIRA, A. C. O.; VICENTE, P. R. F. Introdução do Conceito de Confiabilidade nos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis utilizados no Brasil. In: 35ª Reunião Anual de Pavimentação, 2004, Rio de Janeiro. **Anais do 35ª Reunião Anual de Pavimentação**, 2004.

TIMM, D.; NEWCOMB, D.; GALAMBOS, T. Incorporation of reliability into mechanistic empirical pavement design. **Journal of Transportation Research Board**. V. 1730, p. 73–80, 2000.

TIGHE, S. Guidelines for Probabilistic Pavement Life CycleCost Analysis. **Journal of Transportation Research Board**. V. 1769, p. 28–38, 2001.

TURNBULL, W. J.; FOSTER, C. R.; AHLVIN, R. G. Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volume. In: International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement. Ann Arbor, MI. 1962.

WENNSTRÖM, J.; KARLSSON, R. Possibilities to reduce pavement rehabilitation cost of a collision-free road investment using an LCCA design procedure. **International Journal of Pavement Engineering**. V. 17, n. 4, p. 331-342, 2016.

WIMSATT, A. J.; CHANG-ALBITRES, C. M.; KRUGLER, P. E.; SCULLION, T.; FREEMAN, T. J.; VALDOVINOS, M. B. **Considerations for rigid vs. flexible pavement designs when allowed as alternate bids: Technical report**. FHWA/TX-09/0-6085-1, Federal Highway Administration, Washington DC. 2009.

WU, D.; YUAN, C.; LIU, H. A risk-based optimisation for pavement preventative maintenance with probabilistic LCCA: a Chinese case. **International Journal of Pavement Engineering**. V. 18, p. 11-25, 2017.

YAMASHITA, Y.; PRICINOTE, M. A.; ARAGÃO, J. J. G. de. **Engenharia territorial: problemas e territórios programáticos**. 2010. Disponível em: http://www.academia.edu/4787200/Engenharia_Territorial_Problemas_e_Territ%C3%B3rios_Program%C3%A1ticos. Acesso em: ago. 2018.

YAO, L.; DONG, Q.; NI, F.; JIANG, J.; LU, X.; DU, Y. Effectiveness and Cost-Effectiveness Evaluation of Pavement Treatments Using Life-Cycle Cost Analysis. **Journal of Transportation Engineering**. V. 145, 2019.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2 ed, New York: John Wiley & Sons, 1975.

YSHIBA, J. K. **Modelo de desempenho de pavimentos: estudo de rodovias do estado do Paraná**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ZAGHLOUL, S.; CHOWDHURY, T.; HOLLAND, T. J. Enhancing pavement management system analyses through consideration of construction quality. In: 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC. **Anais do 87th Annual TRB Meeting**, 2008.

ZAGO, J. P. **Estudo da deformação permanente de três solos típicos de subleitos rodoviários de Santa Maria – RS**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

ZHANG, H.; KEIOLEIAN, G. A.; LEPECH, M. D. Dynamic life cycle modeling of pavement overlay systems: capturing the impacts of users, construction and roadway deterioration. **Journal of infrastructure systems ASCE**. p.299-309. 2007.

ZIMMERMAN, K.; SMITH, K.; GROGG, M. Applying economic concepts from an LCCA to a pavement management analysis. In: 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC. **Anais do 89th Annual TRB Meeting**, 2010.

APÊNDICE**Apêndice I: Dimensionamento Estrutura DNER.**

		Espessuras adotadas	
Período (anos)	20	Revestimento (cm)	10,00
N	4,57E+07	Base (cm)	10,00
CBR subleito	11	Sub base (cm)	15,00
CBR granular	20	Ref. Sub leito (cm)	0,00
Hm (cm)	43,32		
Hn (cm)	43,32		
H20 (cm)	30,30		



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br