

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA
OTIMIZAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO E
REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Luana Caroline Girardi Basso

Passo Fundo

2021



CIP – Catalogação na Publicação

B322a Basso, Luana Caroline Girardi

Aplicação de algoritmos genéticos na otimização de estratégias de manutenção e reabilitação de pavimentos flexíveis / Luana Caroline Girardi Basso. – 2021.

83 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa.

Coorientador: Prof. Dr. Moacir Kripka.

Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade de Passo Fundo, 2021.

Catalogação: Bibliotecário Luís Diego Dias de
S. da Silva – CRB 10/2241

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA OTIMIZAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Luana Caroline Girardi Basso

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

Orientador: Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa

Coorientador: Prof. Dr. Moacir Kripka

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Fernando Silva Albuquerque - UFS

Prof. Dr. Márcio Felipe Floss - UPF

Prof. Dr. Pedro Domingues Marques Prietto - UPF

Passo Fundo, RS

2021

AGRADECIMENTOS

Minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para que a realização dessa dissertação fosse possível.

Agradeço a Deus, primeiramente, por iluminar meus caminhos e me dar forças em todos os momentos de adversidade, de forma que eu nunca desistisse de cumprir meus objetivos.

À minha mãe, Ieda por sempre me encorajar a estudar e me aperfeiçoar e por sempre estar ao meu lado em todos os momentos com palavras de incentivo. Ao meu pai, Jorimar, por todo apoio.

Ao João Carlos, pelas inúmeras horas de ajuda e por toda a paciência e compreensão em todos os momentos em que precisei deixar de fazer algo para poder concluir esse trabalho.

Ao professor Francisco, pelas inúmeras discussões e contribuições que motivaram a realização dessa dissertação.

Ao professor Moacir, por todas suas contribuições.

Aos meus queridos colegas do Programa de Pós-Graduação por todos os momentos que compartilhamos, mesmo à distância no último ano devido a pandemia.

A todos que acreditaram em mim e na concretização dessa jornada, meu muito obrigada!

RESUMO

O Brasil possui o modal rodoviário como sendo o principal meio para transporte de cargas e pessoas, porém grande parte das rodovias existentes no país apresentam algum, ou diversos, tipos de defeitos, o que faz com que seus usuários sejam os maiores prejudicados. Parte desse problema pode ser atribuído ao fato de que, em grande parte das vezes, apenas os custos de implantação sejam considerados quando do seu planejamento, não se considerando os custos que ocorrerão ao longo de seu ciclo de vida, como os de manutenção ou reabilitação do pavimento, os quais podem consumir investimentos significativos. Sabendo-se da iminente publicação, pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, de um novo método de dimensionamento, o MeDiNa, que se encontra em consulta pública desde 2018, acredita-se que uma análise dos custos que compõem as obras rodoviárias durante seu ciclo de vida possa ser de grande serventia para os tomadores de decisões. Dessa forma, essa dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta, utilizada em conjunto com o MeDiNa, para realização da análise de custo do ciclo de vida de estruturas lá dimensionadas e otimização das estratégias de manutenção do pavimento. Primeiramente desenvolveu-se um módulo para análise de custo do ciclo de vida de forma probabilística, com uso da simulação de Monte Carlo, para os custos de implantação da rodovia. Um segundo módulo foi desenvolvido para otimização das estratégias de manutenção e reabilitação com uso de algoritmos genéticos. Após desenvolvimento da ferramenta, uma estrutura foi avaliada e validada através da comparação de resultados. Observou-se que os resultados obtidos em ambas as metodologias tiveram pouca variabilidade, destacando-se que, na ferramenta desenvolvida, os custos de conservação foram maiores, o que acarretou redução dos custos de manutenção da via, quando em comparação com a metodologia comparada. Os custos aos usuários representam importante parcela dos custos totais e a adequada manutenção da via contribui para o não aumento dessa parcela, além de diminuir a necessidade intervenções mais onerosas.

Palavras-chave: custo do ciclo de vida, pavimentação, algoritmos genéticos, método Monte Carlo, Medina.

ABSTRACT

Brazilian highways have been the main form of freight and people transportation. However, most part of the highways in the country present some type of deterioration, what makes their users to be the most damaged. Part of this problem can be assigned to the fact that, mostly of the times only the implementation costs are considered when a road is being projected, putting aside the costs that will occur during its lifetime, as the ones of maintenance or rehabilitation, costs that can consume significant part of the investment. In the imminent publication of a new design method, MeDiNa, by the National Department of Transportation Infrastructure, that is under public consultation since 2018, it is believed that a cost analysis of road projects can be of great value for decision makers. Therefore, this paper aimed the development of a tool, to be used together with MeDiNa, to make the life cycle cost analysis of structures dimensioned there and optimization of maintenance strategies of the pavement. Firstly, a module to life cycle cost analysis was developed, using Monte Carlo simulation, for the road implementation costs. A second module was made for the optimization of maintenance and rehabilitation strategies making use of genetic algorithms. After the tool development, one structure was evaluated and validated through results comparison. It was observed that the results obtained in both methodologies had little variability, needing to be emphasized that, in the developed tool, the conservation costs were higher, what resulted in maintenance costs reduced, when confronted to the compared methodology. Users costs represent an important fraction of total costs and the appropriate maintenance of the road contributes to the no increase of this portion, besides reducing the need of more costly interventions.

Keywords: life-cycle cost, pavement, genetic algorithms, Monte Carlo method, Medina.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos para projeto de pavimentos flexíveis	15
Figura 2 - Fluxograma MeDiNa	18
Figura 3 - Estrutura básica de um AG	22
Figura 4 - Fluxograma de AG.....	23
Figura 5 - Técnica da roleta	24
Figura 6 - Métodos de <i>crossover</i>	26
Figura 7 - Operação de mutação.....	26
Figura 8 - Passos da LCCA	28
Figura 9 - Fluxograma de metodologia	36
Figura 10 - Fluxograma de desenvolvimento simplificado	37
Figura 11 - Fluxograma de desenvolvimento completo	38
Figura 12 - Tela inicial Medina	39
Figura 13 - Fluxograma do AG proposto	46
Figura 14 - Demonstração de uma solução do AG.....	47
Figura 15 - Recombinação de indivíduos	54
Figura 16 - Curvas das alternativas A e B do ciclo de vida de um pavimento.....	57
Figura 17 - Tela de entrada do software	58
Figura 18 - Importação dos dados de custos	59
Figura 19 – Inserção de novo projeto	60
Figura 20 - Materiais de construção utilizados nas análises.....	62
Figura 21 - Custos de construção utilizados nas análises	63
Figura 22 - Materiais sujeitos à transporte	63
Figura 23 - Custo de transporte avaliados nas análises	64
Figura 24 - Resumo das estratégias propostas na alternativa 4.300	65
Figura 25 - Área trincada prevista na estrutura de análise	65
Figura 26 - Afundamento de trilha de roda previsto na estrutura de análise.....	66
Figura 27 - Irregularidade longitudinal prevista na estrutura de análise	66
Figura 28 - VPL ao longo do período de projeto.....	67
Figura 29 - Distribuição de custos	67
Figura 30 - Distribuição do VPL	68
Figura 31 - Distribuição de custos para a solução de Artusi (2020).....	70

Figura 32 - Comparação entre os resultados obtidos de custos no ciclo de vida	71
Figura 33 - Área trincada prevista para tráfego leve	73
Figura 34 - Afundamento de trilha de roda previsto para tráfego leve.....	73
Figura 35 - Irregularidade longitudinal prevista para tráfego leve	74
Figura 36 - VPL previsto ao longo do projeto de tráfego leve	74
Figura 37 - Área trincada prevista para tráfego médio.....	75
Figura 38 - Afundamento de trilha de roda previsto para tráfego médio	75
Figura 39 - Irregularidade longitudinal prevista para tráfego médio.....	76
Figura 40 - VPL previsto ao longo do projeto de tráfego médio.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AG	Algoritmos Genéticos
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AT	Área Trincada
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
BDI	Benefícios e Despesas Indiretas
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
LCA	<i>Life-Cycle Analysis</i>
LCC	<i>Life-Cycle Cost</i>
LCCA	<i>Life-Cycle Cost Analysis</i>
MEDINA	Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos
MEPDG	<i>Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide</i>
IP	Instrução de Projeto
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	<i>International Roughness Index</i>
SGBD	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SQL	<i>Structured Query Language</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivos.....	12
1.1.1 Objeto Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 Estrutura da Dissertação	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis	14
2.1.1 Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa	16
2.2 Otimização de Estratégias	20
2.2.1 Mecanismos de seleção.....	23
2.2.2 Elitismo.....	25
2.2.3 Recombinação (<i>crossover</i>)	25
2.2.4 Mutação	26
2.3 Análise de Custo do Ciclo de Vida	27
2.3.1 Análise de Risco	30
3 METODOLOGIA.....	36
4 DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i>	37
4.1 Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados	38
4.1.1 Coleta de Dados no Medina.....	39
4.1.2 Coleta de Dados de Custos	40
4.1.3 Coleta de Dados Informados pelo Usuário	40
4.2 Desenvolvimento da Ferramenta.....	41
4.2.1 Cálculo dos Custos de Construção e Transporte	41
4.2.2 Análise de Custo do Ciclo de Vida.....	44
4.2.3 Otimização de Alternativas.....	45
4.2.4 Priorização de Alternativas	57
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58

5.1 Configurações Iniciais.....	58
5.2 Estrutura analisada	60
5.2.1 Resultados obtidos na ferramenta proposta neste estudo.....	62
5.2.2 Resultados obtidos em Artusi (2020).....	68
5.2.3 Comparação entre as metodologias	70
5.2.4 Análise de estruturas de tráfego leve e médio	71
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
6.1 Conclusão	77
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

1 INTRODUÇÃO

A expansão da malha viária no Brasil e o crescimento constante de sua importância na economia exigem que seja imprescindível sua adequada manutenção. Em um século, o volume de obras de pavimentação no país evoluiu para centenas de quilômetros por ano. No entanto, sua gestão e conservação não seguiram na mesma velocidade (CNT, 2017).

Segundo pesquisa da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2018), entre 2001 e 2017, o modal rodoviário teve participação superior a 75% nos desembolsos totais da União para infraestrutura de transporte. Em 2018, os investimentos das empresas concessionárias, responsáveis pela administração de 9,1% das rodovias pavimentadas no Brasil, chegou a R\$ 6,21 bilhões. Já em 2019, os investimentos públicos federais em rodovias brasileiras somaram R\$ 6,20 bilhões, sendo que desses 57,7% foram investidos em manutenção e recuperação, 28,6% em adequação e 13,7% em construção (CNT, 2019).

Considerando que a maior parte dos investimentos em infraestrutura é direcionado às rodovias, é natural questionar-se por que elas apresentam tantos problemas extemporâneos e o que pode ser feito para melhorar a performance dos pavimentos dentro de orçamentos limitados.

Uma das hipóteses possíveis para a deterioração precoce de nossas rodovias é a de o Brasil ainda ter como seu método oficial de dimensionamento de pavimentos um método totalmente empírico, proveniente da década de 1960, que não leva em consideração conceitos de mecânica dos pavimentos. Esse cenário poderá mudar em breve, visto que o novo método oficial de dimensionamento de pavimentos, Medina, se encontra em consulta pública, de forma que as previsões são de que substitua o antigo método do DNER em breve.

No entanto, mesmo com a substituição para um novo método, mecanístico-empírico, um fator importante que ainda não será contemplado no Medina é a avaliação dos custos que incidem em uma obra de pavimentação, desde sua implantação até o fim de sua vida útil, incluindo-se aqui os custos relacionados à manutenção preventiva e à reabilitação do pavimento, que muitas vezes são desprezados no momento do planejamento dessas obras.

Tendo-se os Estados Unidos como principal modelo internacional na gestão de pavimentos para o Brasil, o *Federal Highway Administration* (FHWA), principal órgão regulador das práticas rodoviárias dos Estados Unidos, demonstra, há diversos anos, interesse na correta aplicação das técnicas de *Life-Cycle Cost Analysis* (LCCA) no país, de forma a otimizar os custos despendidos nessa modalidade de obras e mantendo os pavimentos com níveis de serventia adequados. O principal método para dimensionamento de pavimentos lá

adotado atualmente, o *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) traz o conceito da LCCA de forma clara, sendo essa uma das etapas anteriores à seleção da melhor estratégia de projeto do pavimento.

Nesse contexto, justifica-se a importância da análise de custo do ciclo de vida em obras rodoviárias de pavimentação no Brasil. Com a iminente publicação e adoção oficial do novo método de dimensionamento de pavimentos, uma análise mais aprofundada dos custos que compõem essas obras durante todo seu ciclo de vida, logo em sua etapa de planejamento, é de grande valia para que as melhores alternativas dos pontos de vista técnico e econômico sejam adotadas.

Dessa forma, o presente estudo foi realizado por meio do desenvolvimento de uma ferramenta que possa ser utilizada conjuntamente ao programa Medina, de forma a responder à seguinte questão: Qual o impacto da análise de custo do ciclo de vida na escolha de alternativas em projetos de pavimentação?

O estudo condiz com a linha de pesquisa de Planejamento Territorial e Gestão da Infraestrutura do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng) da Universidade de Passo Fundo (UPF), uma vez que propõe um método de auxílio para o planejamento e gestão de projetos de infraestrutura, de forma a qualificar os investimentos realizados em parte desse setor.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objeto Geral

O objetivo geral do trabalho é o de contribuir para a tomada de decisão gerando informações para o gerenciamento de pavimentos asfálticos através do desenvolvimento de uma ferramenta com base na análise de custo do ciclo de vida sob a abordagem probabilística.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- a) realizar a análise de custo do ciclo de vida de pavimentos flexíveis sob uma abordagem probabilística;
- b) desenvolver um algoritmo genético para realizar a otimização de estratégias de manutenção e reabilitação.

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo é composto pela introdução do trabalho, problema de pesquisa, sua justificativa e seus objetivos. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, que aborda a análise de custo do ciclo de vida e a otimização de pavimentos flexíveis através de algoritmos genéticos. O terceiro capítulo traz a metodologia utilizada para realizar o trabalho. O quarto capítulo apresenta todas as etapas realizadas no desenvolvimento do *software* proposto na dissertação. O quinto descreve os resultados encontrados através das etapas de validação e análise da ferramenta e traz a discussão acerca dos mesmos. Por fim, o sexto e último capítulo é composto pelas considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse item apresenta uma síntese dos tópicos necessários para a compreensão do tema proposto. Os itens foram buscados em livros de referência sobre os temas e nos artigos científicos publicados a partir de 2015, com palavras-chave definidas relacionadas ao tema em estudo.

2.1 Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis

Pavimento é, segundo o DNIT (2006a), “a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas sobre um semiespaço considerado infinito, denominado subleito”. De acordo com Balbo (2007), o objetivo de se pavimentar uma via é trazer uma melhoria operacional para o tráfego, pois se cria uma superfície mais regular e menos ruidosa diante da ação dinâmica dos pneumáticos, trazendo maior conforto ao usuário.

Balbo (2007) afirma que, longe de estarmos próximos da criação de critérios universais, cada critério apresenta suas vantagens e desvantagens próprias da consideração de diferentes parâmetros físicos e numéricos, campo de aplicação e simplicidade de utilização. Portanto, métodos totalmente satisfatórios ou absolutamente válidos universalmente não existem.

Segundo Franco (2007), a importância do dimensionamento adequado de pavimentos se dá pela necessidade de assegurar que a repetição da passagem dos veículos não irá causar trincamento excessivo da camada de revestimento por fadiga, além de garantir que as espessuras das camadas e suas características sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda.

De acordo com Balbo (2007), os métodos de projetos existentes podem ser divididos em três modelos distintos:

- Métodos empíricos: criados a partir da modelagem estatística da evolução de parâmetros físicos observados nos pavimentos em serviço;
- Métodos semiempíricos: criados a partir da extrapolação e expansão de resultados empíricos com base em uma teoria analítica consistente;
- Métodos empírico-mecanicistas: criados a partir da calibração de modelos teóricos com dados experimentais obtidos em campo e em laboratório.

Dentre os principais métodos de dimensionamento de pavimento flexíveis está o método da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), criado

em 1993, fundamentado, principalmente, nos resultados da Pista Experimental da AASHO (*AASHO Road Test*). O método de 1993 foi desenvolvido com base na avaliação estatística dos dados de performance obtidos na pista experimental (FWA, 2006). As equações para dimensionamento do método são baseadas na relação presente entre serventia e desempenho, sendo serventia uma medida de habilidade de um pavimento cumprir suas funções em dado momento no tempo, e desempenho a medida da história de serventia de um pavimento no decorrer do tempo (BALBO, 2007).

Devido às diversas limitações apresentadas no método de 1993, em 2004, a AASHTO JTFP (*Joint Task Force on Pavements*), ou Força-Tarefa Conjunta para Pavimentação da AASHTO, em cooperação com a FHWA e o NCHRP (*Nation Cooperative Highway Research Program*) lançou o *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – MEPDG* (Guia de Dimensionamento Mecanístico-Empírico). O novo método é auxiliado pelo guia e por um programa computacional, com interface orientada ao usuário, baseado nos procedimentos estabelecidos pelo guia (CNT, 2017). A Figura 1 mostra o fluxograma de processos para projeto de pavimentos flexíveis.

Figura 1 - Processos para projeto de pavimentos flexíveis



Fonte: NCHRP apud CNT (2017).

De acordo com a AASHTO (2008), o MEPDG fornece um conjunto de procedimentos para análise e planejamento de pavimentos flexíveis e rígidos, novos ou rehabilitados. O guia

emprega parâmetros de projeto para tráfego, materiais, subleito, clima e confiabilidade para todos os tipos de pavimentos e pode ser utilizado para desenvolver alternativas de projetos usando grande variedade de materiais e procedimentos de construção. Desde sua primeira versão, disponibilizada em 2004, o método já recebeu duas atualizações, em 2008 e 2015 (CNT, 2018).

No Brasil, o método do extinto DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), elaborado com base no trabalho desenvolvido por W. J. Turnbull, C. R. Foster e R. G. Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*United States Army Corps of Engineers – USACE*) em 1962 e nas conclusões obtidas na Pista Experimental da AASHTO, é, atualmente, o método oficialmente adotado. Parte integrante da última versão do Manual de Pavimentação do DNIT, de 2006, desenvolvido pelo engenheiro e professor Murilo Lopes de Souza, do Instituto Militar de Engenharia, no Rio de Janeiro, na década de 60, tendo sua última revisão em 1981.

De acordo com o método, é possível obter a espessura total necessária para um determinado tipo de tráfego e, a partir da espessura total, determinar a espessura das camadas que irão compor o pavimento, utilizando um fator de equivalência estrutural “k”, que relaciona a espessura que a camada deve possuir de material padrão com a espessura equivalente do material que a irá compor (DNIT, 2006a).

Segundo o DNIT (2006a), o método tem como objetivo a proteção do subleito contra a geração de deformações plásticas excessivas durante o período de projeto. Contudo, é um método mecanístico-empírico, com base experimental referente a condições climáticas e de solos de fundação nos EUA, por isso, deve ser complementado por análises que permitam que, no dimensionamento, seja considerado o trincamento por fadiga das camadas asfálticas.

Devido à necessidade de um novo método, que venha a atender as necessidades tecnológicas vigentes, outros métodos foram criados no Brasil em substituição ao método do DNER, da década de 1960, como é o caso do Método da Prefeitura de São e do novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos, o MeDiNa, que será abordado a seguir.

2.1.1 Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa

Franco (2007), em sua tese de doutorado desenvolveu um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos, fazendo uso da teoria da elasticidade para análise elástico linear e não-linear, estimando os danos através de modelos de previsão de fadiga, deformação permanente e deformação máxima admitida no topo do subleito. A consolidação desse método

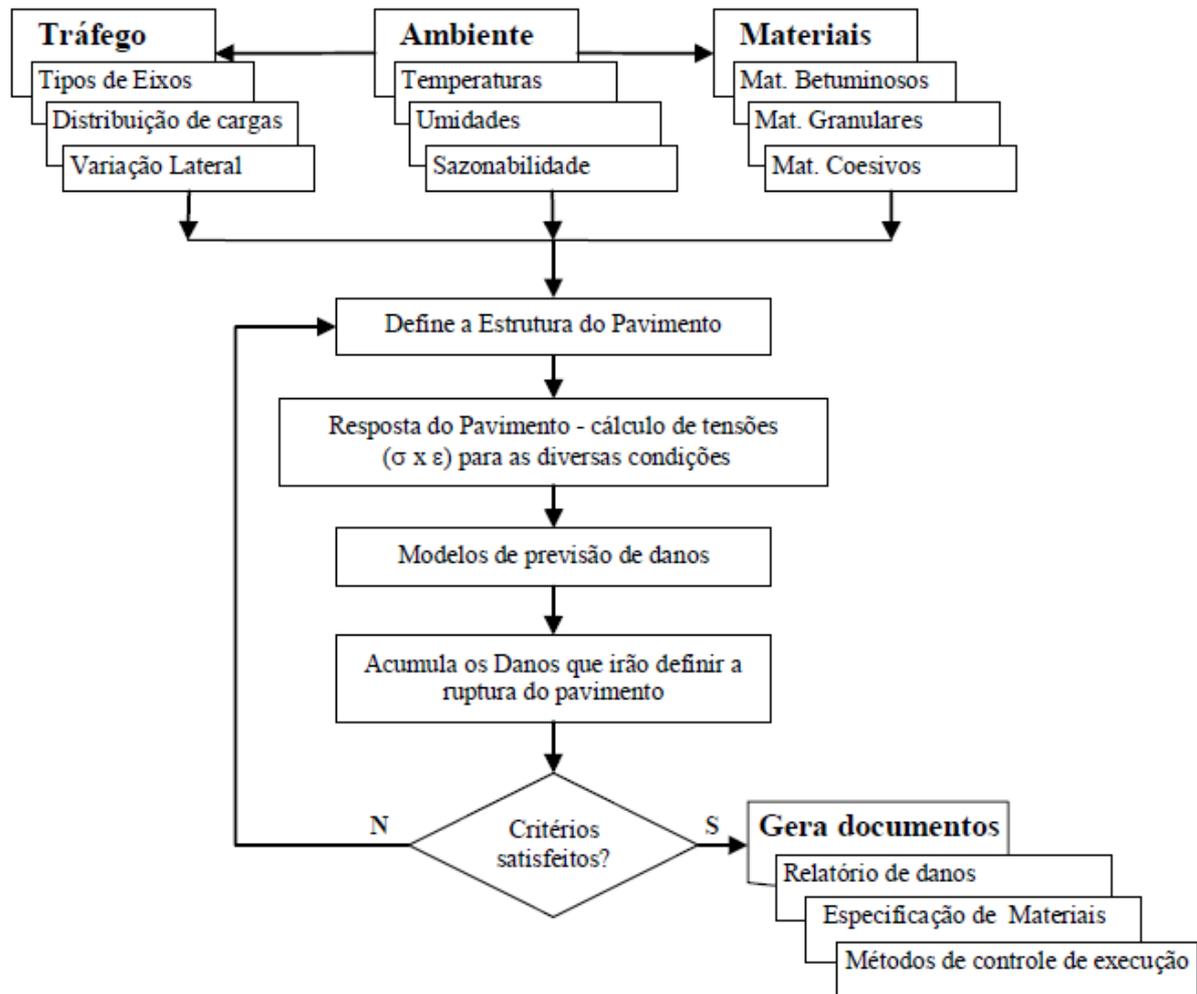
se deu através de um *software* denominado SisPav, desenvolvido na linguagem C++, com duas opções de análise disponíveis: dimensionamento da estrutura e verificação dos dados definidos pelo projetista, informando a vida de projeto que a estrutura pode suportar.

Uma versão atualizada do *software* foi lançada em 2013, denominada SisPavBR e, por meio do Termo de Execução Descentralizada celebrado entre 2015 e 2018 entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, o programa foi denominado Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa – em homenagem ao professor Jacques de Medina (JÚNIOR, 2018).

Desde 2014 o programa está em consulta pública e, através do Projeto DNIT/TED nº 682/2014, o plano de trabalho tem por objetivo geral desenvolver pesquisas, metodologias e procedimentos visando a implantação do novo método de dimensionamento pelo DNIT, de forma que projetos de estruturas de pavimento sejam realizados de forma mais adequada às condições de solicitação do tráfego e do clima, também melhorando os processos de avaliação dos projetos contratados e a confiabilidade de estimativa da vida útil (IPR, 2014). A última versão disponível para *download* é a MeDiNa Versão Beta 1.1.4.0, de julho de 2020.

O MeDiNa foi desenvolvido de forma que o tempo total de vida de serviço do pavimento seja dividido em subperíodos, em que são consideradas as variações relacionadas ao tráfego, clima e parâmetros dos materiais. Cada cálculo de estado de tensões determina um dano no pavimento que considera o efeito da variação lateral dos veículos na rodovia e então, os danos são acumulados, obtendo-se o dano total na estrutura do pavimento para comparação com os limites máximos pré-definidos dos critérios de ruptura. Para efeito de dimensionamento do pavimento, os danos considerados são a deformação permanente no topo do subleito, a deflexão máxima na superfície do pavimento e o dano de fadiga da cama asfáltica ou cimentada. Sucessivamente à verificação dos danos da estrutura, novas espessuras são selecionadas, caso as iniciais não sejam adequadas, repetindo-se esse processo até que os danos fiquem dentro dos limites aceitáveis de tolerância (FRANCO, 2007). Esse procedimento é representado no fluxograma ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma MeDiNa



Fonte: Franco (2007).

Destaca-se no método a utilização de características brasileiras de ensaios de laboratório, de clima, de materiais de pavimentação e tráfego, além de outras especificações, conforme elucidado por Franco (2007):

- análise do tráfego para os diversos eixos com variação lateral;
- variação sazonal do tráfego ao longo do período de projeto;
- materiais com comportamento elástico linear e não linear;
- modelos de previsão de danos desenvolvidos a partir da base de dados de resultados de ensaios brasileiros;
- parâmetros dos materiais de pavimentação e bacias de deformação calculadas para controle de execução no campo;
- análise de confiabilidade.

A rotina AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas – é utilizada no programa para realizar a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos. Suas hipóteses fundamentais são baseadas naquelas consideradas na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos.

De acordo com Franco e Motta (2018), a base de todo o projeto é a clara definição da estrutura do pavimento e dos materiais das camadas que o compõem. O *software* permite a inserção de, no mínimo três e no máximo oito camadas, incluindo o subleito. Ao inserir as camadas, o projetista pode optar por utilizar qualquer material pertencente à base de dados do programa ou por incluir seus próprios dados, obtidos a partir de ensaios de laboratórios, tendo especial atenção no módulo de resiliência e parâmetros k_1 e k_2 , dado que os fatores críticos do dimensionamento estão relacionados à qualidade do material asfáltico empregado.

Diversas são as informações requeridas para que os resultados obtidos no programa sejam considerados confiáveis. Dentre os dados solicitados, destaca-se a necessidade do conhecimento do subleito, a partir de seu módulo e curva de deformação permanente. A definição do Número Equivalente de Eixos, ou número N , é outra informação primordial para o correto funcionamento do programa, pois os modelos utilizados se mostram sensíveis a pequenas variações desse parâmetro (FRANCO; MOTTA, 2018). Esse valor pode ser informado diretamente pelo usuário ou calculado automaticamente pelo programa a partir do Volume Médio Diário (VMD) e do Fator de Veículo (FV).

Franco (2007) informa que as manifestações do dano utilizadas no dimensionamento proposto em sua tese são relativas à ruptura estrutural do pavimento asfáltico. Dessa forma, a fadiga do revestimento asfáltico (ou das camadas cimentadas) é o critério obrigatório que norteia o dimensionamento. Adicionalmente, mais três critérios podem ser utilizados, ficando sua seleção a livre escolha do usuário: a tensão limite no topo do subleito, a deflexão máxima na superfície do pavimento e o afundamento de trilha de roda (deformação permanente).

O modelo utilizado por Franco (2007) para previsão de vida de fadiga dos materiais asfálticos foi obtido através do banco de dados de ensaios da COPPE para misturas com asfaltos tradicionais, sendo os ensaios de fadiga realizados à compressão diametral com aplicação de carga repetida e tensão controlada, além da caracterização das misturas asfálticas com parâmetros de resiliência.

Para implementar a análise de confiabilidade e contemplar a incerteza das variáveis relativas ao dimensionamento de pavimentos, Franco (2007) implantou no programa o procedimento de análise probabilística apresentado no Guia de Projeto da AASHTO, em que toda a variabilidade dos parâmetros de entrada é considerada em modelos de previsão de erros

ou de desvio padrão dos danos a serem estimados. Dessa forma, os alvos da análise de confiabilidade são os modelos de previsão de fadiga, tensão limite no topo do subleito e deflexão admissível do pavimento. Os graus de confiabilidade das análises realizadas no programa foram definidos de acordo com a hierarquia dos sistemas funcionais dos tipos de vias publicadas pelo DNIT, assim como os critérios de parada do dimensionamento, conforme pode ser visualizado na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Tipos de vias e critérios

TIPO DE VIA	CONFIABILIDADE	ÁREA TRINCADA	DEFORMAÇÃO PERMANENTE
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Local	65%	30%	20mm

Fonte: Franco e Motta (2018).

2.2 Otimização de Estratégias

Cancian (2015) define otimização como o processo de atribuir valores às variáveis de uma função objetivo de forma que o valor da função seja minimizado ou maximizado. A otimização de estratégias de manutenção e reabilitação de pavimentos consiste em determinar o tipo correto de tratamento, no momento certo e com o menor custo do ciclo de vida. Problemas de otimização são baseados em três pontos principais: a codificação do problema, a função objetivo que se deseja maximizar ou minimizar e o espaço de soluções associado (MIRANDA, 2007).

Técnicas de otimização podem ser categorizadas em determinísticas ou estocásticas. As determinísticas, por serem exaustivas em natureza, fornecendo-se o mesmo conjunto de condições iniciais, irão gerar a mesma solução sempre. Já as técnicas estocásticas são probabilísticas por natureza, incorporam aleatoriedade na sua geração de soluções e, dessa forma, não garantem encontrar sempre a mesma solução (CANCIAN, 2015). Dentre as técnicas

de otimização empregadas, pode-se citar a programação matemática, lógica difusa, redes neurais e computação evolucionária (CASTRO, 2001). Algoritmos heurísticos de otimização buscam por soluções viáveis para otimizar problemas em circunstâncias em que a complexidade do problema ou o tempo limitado para encontrar uma solução não permitem o encontro de uma solução exata (RARDIN; UZSOY, 2001).

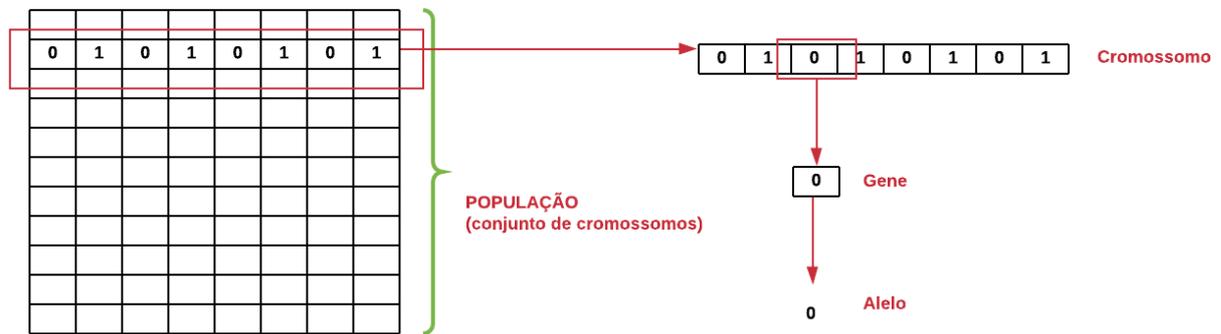
Algoritmos genéticos (AG) são uma família de modelos computacionais evolucionários inspirados pela evolução humana, em que uma solução potencial para um dado problema é codificada em uma estrutura de dados, chamada cromossomo, e operadores de recombinação são aplicados a essa estrutura, preservando sua informação crítica (WHITLEY, 1994). Nesse método, o algoritmo de solução consiste na geração iterativa de genótipos filhos baseados no genótipo pai até que um critério de parada estabelecido seja satisfeito (LEE; MADANAT, 2015). Nesses algoritmos, os indivíduos mais aptos são o que têm maior probabilidade de se reproduzirem gerando descendentes, simulando, assim, o mecanismo evolucionário dos sistemas biológicos naturais (MIRANDA, 2007).

AG têm sido empregados há bastante tempo para resolver o problema de otimização de pavimentos e, com o progresso computacional, têm se provado uma técnica de otimização robusta e eficiente (JAWAD; OZBAY, 2006).

Dentre as vantagens do uso de AG na otimização de problemas robustos, podem ser citadas: 1) AG possuem boa robustez para muitas aplicações; 2) AG possuem habilidades notáveis de busca global para problemas convexos e não-convexos; 3) AG possuem capacidades intrínsecas de processamento paralelo; e 4) AG são relativamente fáceis de implementar (TRB apud SANTOS et al., 2017).

Burke e Kendall (2014) explicam as terminologias associadas aos algoritmos genéticos. As variáveis de decisão de um problema são codificadas em sequências de comprimento finito de alfabetos de certa cardinalidade. As *strings*, que são soluções candidatas ao problema, são chamadas de **cromossomos**, os alfabetos são chamados de **genes** e os valores dos genes, de **alelos**. A estrutura básica de um AG pode ser visualizada na Figura 3:

Figura 3 - Estrutura básica de um AG



Fonte: Adaptado de Tutorials Point (2016).

Para desenvolver boas soluções e implementar a solução natural, é necessário fazer a distinção entre soluções boas e ruins. Para isso, a avaliação pode ser realizada através de uma função objetivo, representada por um modelo matemático ou uma simulação de computador. A medida *fitness* deve determinar a avaliação relativa de uma solução candidata, que subsequentemente será utilizada pelo AG para guiar a evolução de boas soluções.

Outro conceito importante é o de população. De acordo com Castro (2001), cada indivíduo na população representa uma possível solução para um dado problema; o AG procura a solução que seja muito boa ou a melhor para o problema analisado através da criação genética de populações de indivíduos cada vez mais aptos ao alcance do objetivo. O tamanho da população é um fator extremamente importante, que pode afetar a escalabilidade e desempenho do AG.

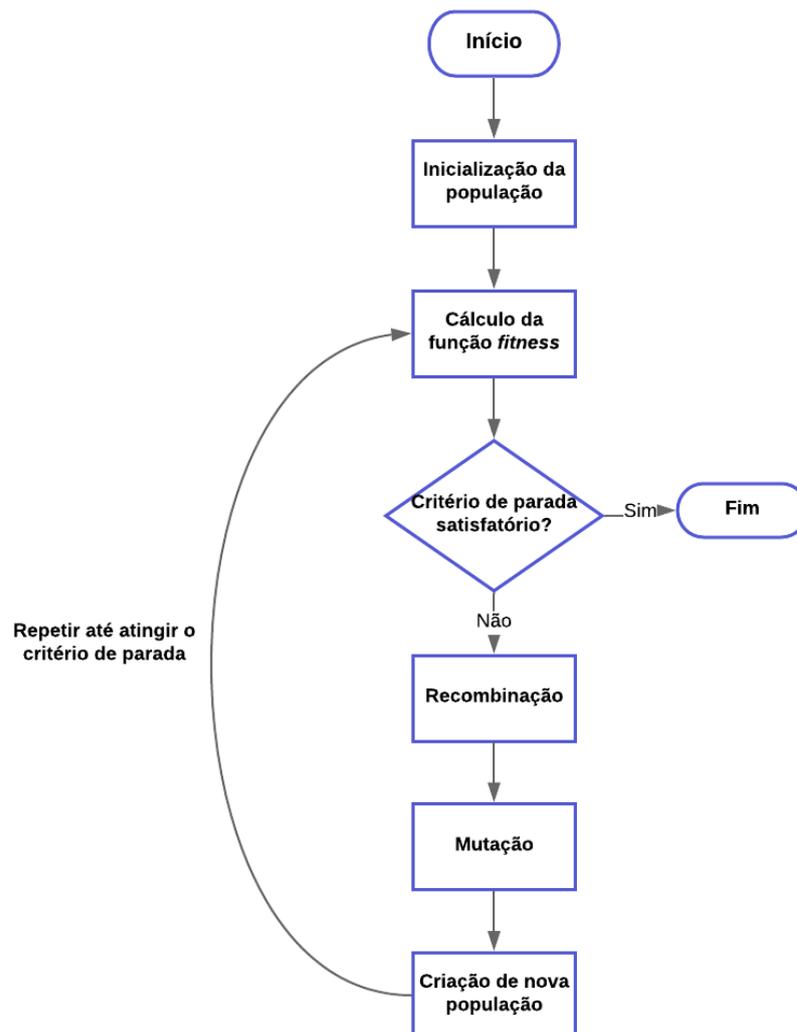
Após a codificação do problema em cromossomos e a discriminação da medida *fitness* para fazer a distinção entre soluções boas e ruins, é possível iniciar o desenvolvimento das soluções para o problema. Esse desenvolvimento pode ser realizado de acordo com os seguintes passos (BURKE; KENDALL, 2014):

1. **Inicialização:** a população inicial de soluções candidatas é gerada de forma randômica;
2. **Avaliação:** após a população ser inicializada, os valores de *fitness* para cada solução candidata são avaliados;
3. **Seleção:** a seleção distribui mais cópias para soluções com valores *fitness* melhores e então impõe o mecanismo de sobrevivência do mais apto nas soluções candidatas;
4. **Recombinação:** a recombinação combina *bits* e partes de duas ou mais soluções parentais para criar soluções novas e, possivelmente, melhores;
5. **Mutação:** enquanto a recombinação atua em dois ou mais cromossomos parentais, a mutação, localmente, mas randomicamente, modifica uma solução;

6. **Substituição:** a população descendente criada por seleção, recombinação e mutação substitui a população parental original;
7. Os passos 2 a 6 devem ser repetidos até que um ou mais critérios de parada sejam atingidos.

A Figura 4 mostra o fluxograma genérico de aplicação de AG.

Figura 4 - Fluxograma de AG



Fonte: Própria autora (2021).

2.2.1 Mecanismos de seleção

Os mecanismos de seleção funcionam de forma a escolher, preferencialmente, os indivíduos com maior aptidão, embora não exclusivamente, a fim de preservar a diversidade da população. Dessa forma, a seleção objetiva enfatizar a aptidão individual dentro da população.

Por outro lado, seleções muito estritas podem elevar o valor de aptidão de alguns indivíduos, reduzindo a diversidade necessária para o progresso do AG (OLIVEIRA, 2015).

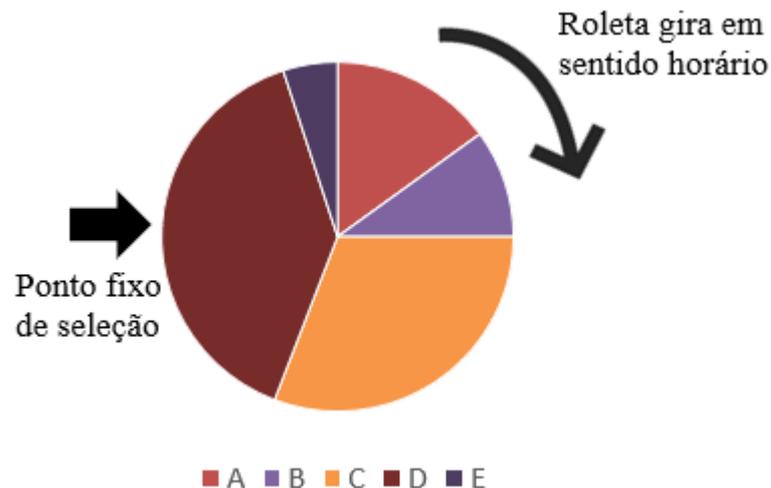
Dentre os diversos mecanismos de seleção existentes, um dos mais utilizados é o método da Roleta. Nesse método, considera-se um círculo dividido em n regiões, sendo n o tamanho da população e cada região é proporcional à aptidão do indivíduo (CANCIAN, 2015). Dessa forma, boas soluções possuem uma “fatia” maior da roleta do que aquelas menos aptas (BURKE; KENDALL, 2014). Os passos necessários para implementar essa técnica estão descritos abaixo e representados na Tabela 2 e Figura 5.

Tabela 2 - Técnica da roleta

Cromossomo	<i>Fitness</i>	Probabilidade
A	90	15
B	60	10
C	185	31
D	235	39
E	30	5
Total	600	100

Fonte: Própria autora (2021).

Figura 5 - Técnica da roleta



Fonte: Própria autora (2021).

- Calcular o valor de S , sendo S a soma de todas as aptidões;
- Gerar um número aleatório entre 0 e S ;
- Iniciando do topo da população, incrementar as aptidões à soma parcial P , enquanto P for menor que S ;

- O indivíduo em que P exceder S é o indivíduo selecionado.

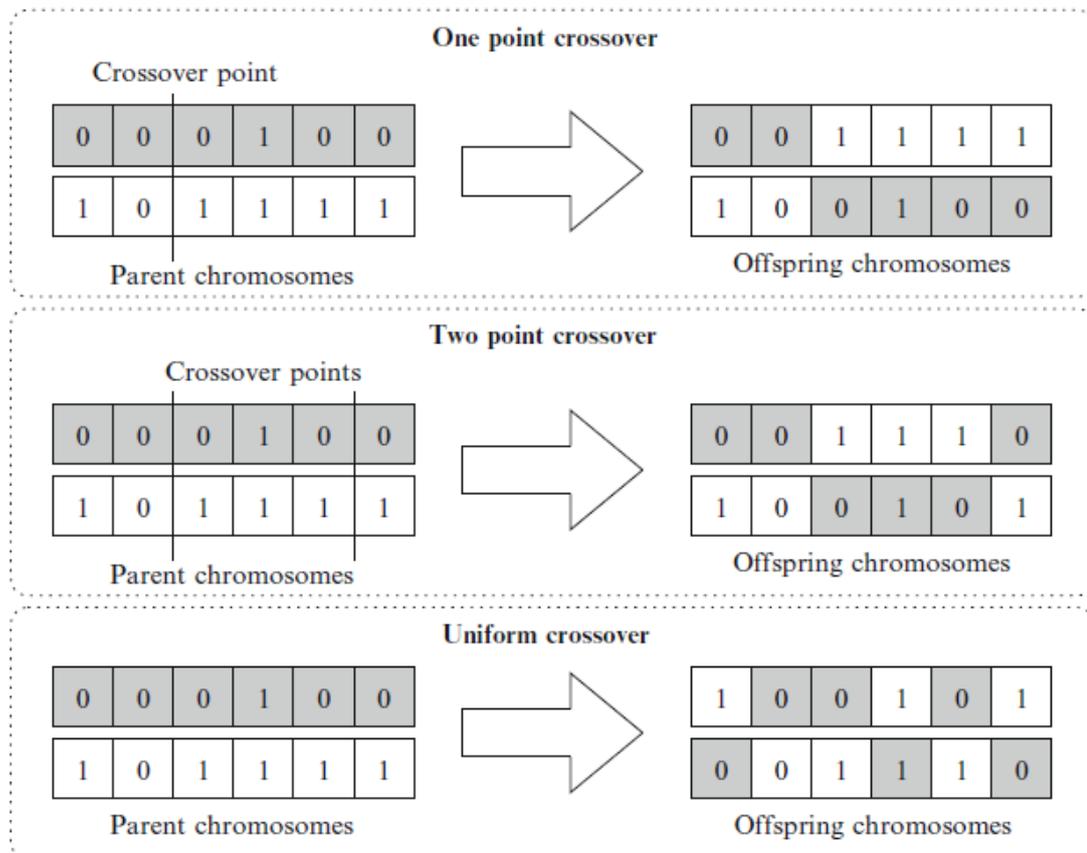
2.2.2 Elitismo

O elitismo é considerado uma técnica de sobrevivência em que o indivíduo (ou os indivíduos) com aptidão mais elevada é sempre propagado para as próximas gerações (OLIVEIRA, 2015). Essa técnica é utilizada para que, durante o processo de seleção, indivíduos com aptidão muito alta não sejam perdidos.

2.2.3 Recombinação (*crossover*)

A operação de recombinação (ou *crossover*) é análoga à reprodução e recombinação de material genético entre seres vivos, sendo que os pais gerarão descendentes que possuirão material genético de ambos os genitores (OLIVEIRA, 2015). Essa é a principal característica dos algoritmos genéticos, pois através do cruzamento de soluções que se aumenta o espaço de solução do algoritmo, até que a melhor solução seja encontrada.

A maioria das operações de recombinação funcionam de forma que dois indivíduos sejam escolhidos randomicamente, através de métodos de seleção como o da roleta, e recombinados com uma probabilidade p_c , chamada de taxa ou probabilidade de *crossover*. Ou seja, um número aleatório é gerado e se esse número for menor ou igual à taxa de *crossover*, os dois indivíduos selecionados irão sofrer a recombinação. Caso contrário, se o número aleatório for maior que a probabilidade, os dois indivíduos-filhos serão apenas cópias de seus pais. Alguns dos métodos de *crossover* mais comuns estão demonstrados na Figura 6 abaixo (BURKE; KENDALL, 2014).

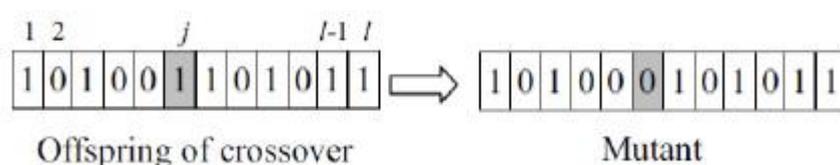
Figura 6 - Métodos de *crossover*

Fonte: Burke e Kendall (2014).

2.2.4 Mutação

A técnica de mutação, demonstrada na Figura 7, é utilizada a fim de trazer diversidade à população e permitir que outros possíveis pontos ótimos locais sejam descobertos (OLIVEIRA, 2015). De forma geral, é selecionada uma posição em um cromossomo e o valor do seu gene é alterado aleatoriamente para outro valor possível. Esse processo é geralmente controlado por um parâmetro fixo, que pode ser uma probabilidade de mutação, p_m , cujo valor costuma ser baixo (BURKE; KENDALL, 2014).

Figura 7 - Operação de mutação



Fonte: Cancian (2015).

2.3 Análise de Custo do Ciclo de Vida

Análise de Custo do Ciclo de Vida, ou LCCA, do inglês *Life-Cycle Cost Analysis*, segundo Walls III e Smith (1998), é uma técnica de avaliação baseada nos princípios da análise econômica. Nesse tipo de estudo, são avaliados os itens de eficiência econômica de longo prazo dentre todas as alternativas competitivas de investimento. Seu objetivo é identificar o custo mais baixo a longo prazo que satisfaça o alvo pelo qual foi adquirido. Dhillon (2010) define o custo do ciclo de vida como a soma de todos os custos incorridos durante a expectativa de vida do item/sistema.

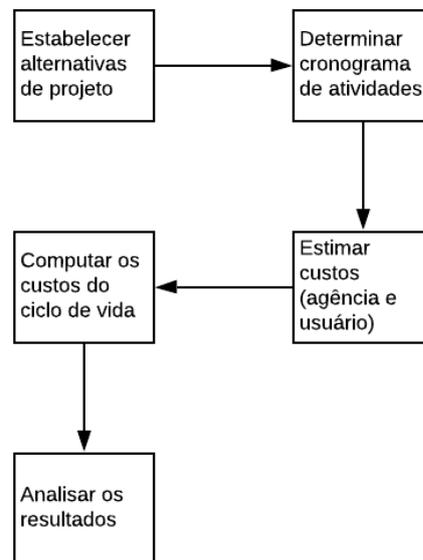
O termo custo do ciclo de vida foi usado pela primeira vez em 1965 (DHILLON, 2010) e desde então vem ganhando cada vez mais espaço em diversas áreas. Na área de pavimentação, começou-se a discutir o assunto em 1991, através do *Intermodal Surface Transportation Equity Act*, que sugeriu a consideração da LCCA no planejamento de pontes, túneis e pavimentos. No Brasil, o DNIT (2006b) define os custos do ciclo de vida como:

Os custos de ciclo de vida referem-se a todos os custos (e no sentido mais amplo a todos os benefícios) envolvidos em um ciclo completo de vida do pavimento. Isto inclui custos de construção, de conservação, de restauração, e de operação.

Walls III e Smith (1998) informam que a LCCA deve ser realizada tão logo quanto possível e, em projetos de pavimentos, o momento apropriado para se realizar a análise é durante sua etapa de planejamento. Deve-se atentar para que o nível de detalhamento da análise seja consistente com o nível de investimento.

Segundo a FHWA (2002), o processo de análise do custo do ciclo de vida inicia-se com a elaboração de alternativas que satisfaçam os objetivos estruturais e de performance do projeto. Então, o analista deverá definir o cronograma inicial e de atividades futuras necessárias para implementação de cada alternativa de projeto. Por fim, os custos (diretos e, preferencialmente, indiretos) relativos às atividades devem ser estimados para que possam, então, serem analisados. O fluxograma com os passos listados pode ser visualizado na Figura 8:

Figura 8 - Passos da LCCA



Fonte: Adaptado de FHWA (2002).

A LCCA deve ser realizada em alternativas que possuam o mesmo período de análise para que as diferenças de custos entre as alternativas possam ser comparadas, o que não ocorre de forma correta se houver variação de período entre as alternativas em estudo. Esse período deve ser longo o suficiente para que sejam incluídas em cada alternativa, no mínimo, a construção inicial do pavimento, uma ação de reabilitação principal e ao menos uma ação de reabilitação subsequente. Deve-se atentar que cada alternativa não necessita ter a mesma quantidade de ações de manutenção ou reabilitação durante o período de análise (FHWA, 2002).

O DNIT (2006b) lista os principais custos iniciais e subsequentes que devem ser levados em consideração no momento de se avaliar o custo do ciclo de vida de pavimentos:

- Custos para o órgão rodoviário:
 - Custos iniciais de construção;
 - Custos de restauração;
 - Custos de conservação rotineira;
 - Valor residual ao final do período de projeto;
 - Custos de engenharia e administração;
 - Custos de controle de tráfego e operação da rodovia.
- Custos para o usuário:
 - Tempo de viagem;

- Operação do veículo;
- Acidentes;
- Desconforto;
- Tempo de espera e custos suplementares da operação dos veículos durante as operações de restauração do pavimento.

De acordo com Walls III e Smith (1998), as comparações entre LCCA são sempre realizadas entre alternativas mutuamente exclusivas. Dessa forma, a análise só deverá considerar os custos que forem diferentes entre as opções. Custos que sejam comuns a todas as alternativas são geralmente cancelados da análise.

Os principais métodos de avaliação de alternativas de investimentos, fundamentados em conceitos elementares da matemática financeira, são descritos em DNIT (2006b) e podem ser vistos abaixo:

- Método do Valor Presente Líquido (VPL): se caracteriza pela transferência de todos os benefícios e custos, previstos para ocorrer ao longo do período de projeto, para o momento presente, descontando-se a taxa mínima de atratividade. Para que o método seja aplicável, é necessário que todos os benefícios e custos associados às alternativas em consideração sejam quantificáveis em unidades monetárias. Um projeto será viável apenas se $VPL > 0$.
- Método do Valor Anual Líquido (VAL): nesse método, as regras de decisão são análogas às do valor presente líquido. Todos os valores anuais de benefícios e custos são calculados e combinados. A análise requer que todos os benefícios e custos sejam convertidos em quantidades anuais equivalentes. Sua maior desvantagem é a de considerar que os benefícios e custos individuais são repetidos. Um projeto será viável se $VAL > 0$.
- Método do Custo Anual: é uma derivação dos métodos anteriores, particularizado para a situação de comparação entre alternativas em que ocorrem apenas variações nos custos, mantendo-se iguais os benefícios para todas as alternativas em consideração. Nesse caso, a melhor alternativa será a que apresentar o menor custo.
- Método da Relação Benefício-Custo: esse método objetiva a obtenção de valores presentes de custos e benefícios e o cálculo do quociente entre eles. Um projeto será economicamente viável se o quociente não for inferior à unidade.

- Método da Taxa Interna de Retorno (TIR): o método visa determinar a taxa de juro para a qual o módulo do valor presente dos benefícios torna-se igual ao módulo do valor presente dos custos. Para que um projeto seja considerado viável, a taxa interna de retorno não pode ser inferior à taxa mínima de atratividade.

Dentre os métodos apresentados, o mais utilizado e o mais recomendado segundo o DNIT (2006b) é o método do valor presente líquido, em virtude de sua simplicidade de aplicação. Esse método também é o recomendado pela FHWA, nos Estados Unidos (WALLS III e SMITH, 1998).

2.3.1 Análise de Risco

Análise de risco é definida por Walls III e Smith (1998) como uma combinação da descrição probabilística da variação de cada parâmetro de entrada da análise com simulações para caracterizar o risco associado aos possíveis resultados. É uma análise fortemente endossada pela FHWA devido às inerentes variações que podem ocorrer nos parâmetros envolvidos em projetos dessa natureza. Santos (2011) afirma que quantificar os efeitos da variabilidade e poder avaliar seus efeitos em projeto e no desempenho de uma estrutura de pavimentação assume grande importância na tomada de decisão.

A análise se preocupa em responder três questões básica relacionadas ao risco: 1) O que pode ocorrer? 2) Qual a probabilidade de ocorrer? 3) Quais são as consequências relacionadas à ocorrência? Essas questões podem ser respondidas combinando descrições probabilísticas de parâmetros de entrada incertos juntamente com simulações computacionais que caracterizam o risco associado com eventos futuros (WALLS III; SMITH, 1998).

Walls III e Smith (1998) recomendam a simulação computacional das variáveis incertas utilizando o método Monte Carlo, de forma a se obter a distribuição probabilística dessas variáveis.

Diversos *softwares* para gerência de pavimentos possuem incorporada a técnica de LCCA, dentre eles o HDM-4, desenvolvido pelo Banco Mundial, e o RealCost, desenvolvido pela FHWA, que possuem grande relevância a nível global. Além deles, diversas outras ferramentas têm sido desenvolvidas nos últimos anos a fim de difundir e facilitar o uso dessa técnica pelos tomadores de decisão da área de pavimentação.

Santos (2011), em sua tese de doutorado, abordou a importância de se considerar a variabilidade inerente aos elementos necessários para a implantação e desempenho de um

pavimento através de análise probabilística. Dessa forma, propôs procedimentos para a determinação de confiabilidade da estrutura de um pavimento, com base nos métodos do DNIT e da AASHTO. Também propôs modelos computacionais para análise de custo do ciclo de vida com base na equação de desempenho da AASHTO. Em todos os seus modelos fez uso do método Monte Carlo possibilitando determinar o risco de falha para o dimensionamento do pavimento. No entanto, os custos dos usuários não foram contemplados nos modelos e todos eles restringiam-se às análises de estruturas novas.

Apesar de serem recomendadas por permitirem conclusões mais robustas, análises probabilísticas de LCC são raramente implementadas na prática, o que levou Wu, Yuan e Liu, em 2015, a proporem uma metodologia de otimização sistemática, baseada em risco para manutenção preventiva de pavimentos. De acordo com os autores, a abordagem padrão de uma análise baseada em risco possui três fases principais: 1) documentar todas as fontes identificadas de incerteza, 2) avaliar todas elas, no mínimo, qualitativamente e 3) quantificá-las para a tomada de decisão.

Como, segundo os autores, é inviável quantificar todas as fontes de variabilidade e incerteza, eles selecionaram três fatores principais no estudo para quantificar seus efeitos de incerteza: taxa de crescimento do tráfego anual, taxa de desconto e custo de manutenção. Dessa forma, os autores conduziram as análises na rodovia Qinglian, na China, com uma extensão total de 215,25 km. Assim, procederam a LCCA determinística e probabilística para duas estratégias de manutenção preventiva. Após realizarem as duas análises puderam concluir que, apesar de a primeira estratégia ter apresentado melhores resultados na análise determinística, quando levaram em consideração os riscos dos parâmetros de interesse, a segunda estratégia se mostrou a melhor.

Swei, Gregory e Kirchain (2015), com o objetivo de compreenderem quais parâmetros são relevantes em um contexto de incerteza, considerando uma circunstância específica, implementaram um modelo de LCCA em diferentes cenários, variando localização, condições de tráfego, vida de projeto, período de análise, cronograma de manutenções e taxa de desconto. Os resultados demonstraram que, apesar de muitos parâmetros serem fontes de variabilidade, apenas alguns afetam a decisão imediata. Além disso, também concluíram que uma abordagem considerando o ciclo de vida pode alterar o menor valor de pavimento e que essa mesma alternativa de menor valor irá variar em diferentes cenários de risco. Entre os parâmetros avaliados pelos autores, a incerteza sobre os custos iniciais de projeto foi a principal fonte de variação dentre os estudos de caso.

Mirzadeh e Birgisson (2015) realizaram um estudo para apresentar uma taxa de desconto para projetos de pavimentos asfálticos que fosse uma função da taxa de interesse, da inflação geral e da inflação no preço da energia. Segundo os autores, o preço da energia está relacionado a mais de metade de todo o custo do ciclo de vida de pavimentos asfálticos. Levando isso em consideração, constataram que a flutuação relacionada ao preço da energia costuma ser muito maior que a inflação geral e taxa de interesse, o que faz a inflação dessa variável um parâmetro muito importante a ser considerado ao se fazer a LCCA.

De acordo com Han et al. (2016), repetidas manutenções sobre pavimentos danificados podem acelerar a velocidade de deterioração, o que faz necessária sua reconstrução periódica para recuperação da integridade original. Como, devido a diversos fatores, um nível de manutenção tão elevada periodicamente é inviável, o estudo dos autores se propôs a definir a mudança na performance de pavimentos através de manutenções repetidas utilizando dados empíricos de rodovias coreanas. Com os resultados obtidos, estabeleceram um esquema de manutenção sugerido através de LCCA.

Wang e Wang (2016) desenvolveram um estudo relacionando os ajustes de preço com a performance de pavimentos. Para isso, utilizaram modelos probabilísticos de performance de pavimentos com aplicação para controle in loco do número de vazios de pavimentos asfálticos. Com os resultados, os autores puderam comprovar que uma abordagem com a cadeia Markov e os métodos Monte Carlo conseguem capturar variações até então não observadas em dados relacionados a condições de pavimentos. Também conseguiram relacionar a qualidade de medição in loco do número de vazios para a vida esperada de pavimentos com boa qualidade de ajuste.

Dalla Valle e Thom (2016) introduziram um método que leva em conta a variabilidade dos principais parâmetros de projeto de pavimentos flexíveis - espessura da camada de revestimento, rigidez do asfalto e rigidez do subleito – de forma a avaliar seu efeito na performance do pavimento. Para estimar sua performance levando em consideração a incerteza sobre as variáveis, os autores utilizaram uma análise de Monte Carlo. Também fizeram essa análise a fim de calcular a probabilidade de falha na estrutura do pavimento.

Wang e Wang (2017) realizaram um estudo a fim de avaliar o efeito da condição do revestimento existente na performance de pavimentos e desenvolver uma abordagem determinística e outra probabilística para analisar a relação entre custo e efetividade de alternativas de revestimento. De acordo com testes estatísticos, os autores puderam concluir que é significativamente maior o período de vida estimado para revestimentos submetidos a reabilitações maiores do que o daqueles submetidos a reabilitações menos agressivas. Com

esses dados em mãos, propuseram um índice capaz de quantificar a probabilidade de o custo do ciclo de vida de reabilitações menores ser maior que o de grandes reabilitações.

Muitos estudos foram realizados indicando a vasta contribuição da condição e do projeto de pavimento na interação veículo-pavimento, demonstrando como esses itens interferem na economia de combustível de veículos e, conseqüentemente, trazendo impacto na carga ambiental de pavimentos (AKBARIAN et al., 2017). No entanto, poucos estudos existem quantificando a contribuição relativa da interação veículo-pavimento na LCCA total. Assim sendo, Akbarian et al. (2017) realizaram um estudo para desenvolvimento de uma abordagem da LCCA que abrangesse os custos dos usuários relacionando, adicionalmente, a interação veículo-pavimento aos atrasos de trânsito. Com o estudo realizado, os autores puderam concluir que a interação veículo-pavimento é um fator dominante para os custos dos usuários e, além disso, tais custos são da mesma magnitude que os custos do ciclo de vida para a agência. Com isso, ressalta a importância de que os estudos futuros sobre LCCA comecem a incorporar também os custos citados.

Santos et al. (2017) propuseram um *framework* de apoio à decisão para gerência de pavimentos com a finalidade de integrar ao processo de manutenção de pavimentos, adicionalmente às agências de rodovias, seus usuários e preocupações ambientais. Identificando e quantificando os custos das agências rodoviárias, os custos dos usuários de rodovias e impactos ambientais originados ao longo do ciclo de vida do pavimento, o *framework* possibilita a geração de potenciais estratégias ótimas de manutenção e reabilitação de pavimentos contemplando, além de objetivos econômicos, diversas outras variáveis.

Souza (2017), selecionou três estruturas típicas de pavimentos (rígida, semirrígida e flexível) propostas para uma rodovia em fase de implantação, as avaliou e comparou para, posteriormente, realizar a integração dos resultados sob o âmbito de sustentabilidade e viabilidade de implantação. A autora utilizou o método multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Através da integração, pôde realizar uma avaliação analítica de indicadores, pela verificação das emissões de CO₂ equivalentes e da verificação do VPL para cada uma das três alternativas e observar aspectos relevantes para a tomada de decisão, como a viabilidade de investimentos menos atrativa e a maior liberação de CO₂ dentre as estruturas.

Bagdatli (2018) utilizou a técnica de lógica *fuzzy*, ou lógica difusa, integrada à LCCA para tomada de decisão em pavimentos. O conjunto de teorias *fuzzy* é uma abordagem que se baseia em pensar com um ser humano e operar tornando esses pensamentos em equações matemáticas. Dessa forma, possui a capacidade de representar informações incertas e muito próximas da forma como a mente humana opera (BAGDATLI, 2018). Segundo o autor, essa

técnica surge como uma alternativa às abordagens determinística e probabilística nesse tipo de análise pois, além de ser de fácil entendimento, consegue superar as incertezas e, ao contrário da abordagem probabilística, é possível fazer uso do método mesmo com escassez de dados.

Segundo Hasan et al. (2018), o gerenciamento de ciclo de vida de pavimentos enfatiza, tradicionalmente, a produção de material e os estágios de construção, muitas vezes não dando a devida atenção à fase de uso e melhorias na funcionalidade do pavimento. Assim sendo, os autores realizaram uma revisão de literatura, a partir de 2008, de artigos publicados abordando a LCCA e a LCA. Tendo a revisão e análise de artigos feitas, os autores puderam chegar a algumas conclusões, como a importância dos parâmetros de custo, especialmente de custo inicial, para a tomada de decisão. Verificaram também que o interesse dos *stakeholders* (partes interessadas) e pesquisadores em rodovias “sustentáveis” tem crescido nos últimos anos. No entanto, a maioria dos estudos vem sendo realizada em contexto geográfico limitado, abrangendo EUA e Europa. Outro fato importante constatado pelos autores é de que os custos dos usuários e custos sociais embutidos em projetos de rodovias a nível de rede são significativamente maiores que os investimentos de capital inicial, sendo importante se dar atenção a esses custos. Por fim, o uso de materiais reciclados e materiais residuais da indústria têm-se demonstrado muito interessante, aumentando os benefícios ambientais, como a redução da emissão de gases de efeito estufa na construção de rodovias.

Chen et al. (2019) utilizaram a LCCA determinística e probabilística para comparar três alternativas de pavimento, sendo que duas delas incluíam o uso de asfalto poroso modificado. Segundo os autores, o asfalto poroso pode trazer benefícios ambientais e de segurança, reduzindo ruídos provenientes do tráfego e melhorando a drenagem. A análise realizada pelos autores concluiu que para o asfalto poroso modificado com escória de aciaria ser economicamente vantajoso considerando uma faixa de preços elevada, seu ciclo de vida deve ser maior que oito anos. Esse asfalto mostrou a probabilidade de 78 e 92% de ter melhor custo benefício que o asfalto convencional e o asfalto poroso não modificado, respectivamente. Ele também mostrou apresentar um melhor custo benefício em um período de análise de 40 anos, demonstrando que seu uso pode combinar eficiência com sustentabilidade em projetos de rodovias.

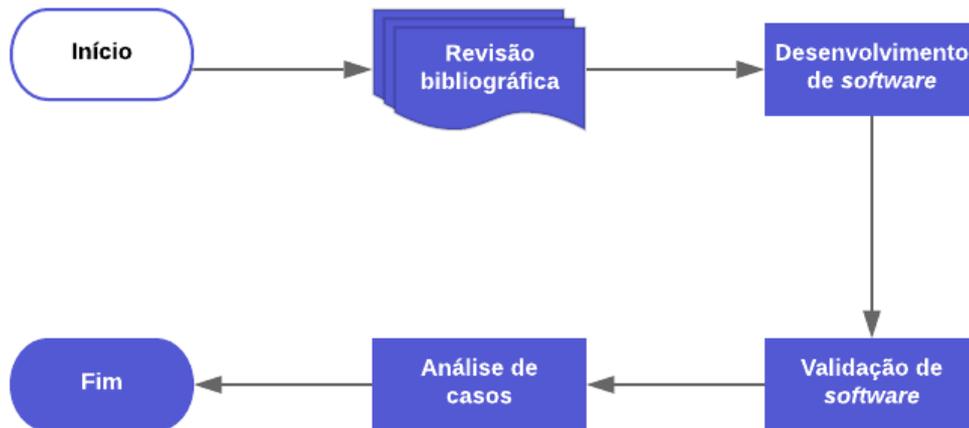
Guo et al. (2019) apresentaram um novo modelo de simulação probabilística otimizada de LCCA. Em seu modelo, os autores determinaram cronogramas de tratamento de forma a minimizar o LCC total, incluindo os custos de agência e do usuário, além de incorporar incertezas nos custos de tratamento e processos de deterioração. Após a apresentação do modelo, os autores apresentaram dois estudos de caso para mostrar a influência das incertezas

no cronograma de tratamento e comparando o modelo proposto com modelos tradicionais na seleção de projetos de pavimentos. Como o modelo proposto considera incertezas no tipo de tratamento e no tempo a ser considerado, seus resultados demonstraram que as escolhas apresentadas podem divergir daquelas indicadas pelo modelo tradicional.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho teve seu desenvolvimento realizado de acordo com as etapas demonstradas no Fluxograma de metodologia demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma de metodologia



Fonte: Própria autora (2021).

Inicialmente, procedeu-se à revisão bibliográfica de autores pertinentes ao tema desenvolvido para então dar-se início ao desenvolvimento do *software* proposto. Todas as etapas abrangidas na etapa de desenvolvimento estão detalhadas no Capítulo 4 da presente dissertação.

Após o desenvolvimento do *software*, a validação da ferramenta foi realizada. Para tal, utilizou-se como referência a dissertação de mestrado de Artusi (2020), em que o autor faz a análise de diferentes estruturas durante o seu ciclo de vida, dimensionando-as no Medina e no HDM-4. Uma das estruturas utilizadas pelo autor foi selecionada, dimensionada no Medina e inserida na ferramenta proposta para que fosse possível, posteriormente, comparar-se seu resultado com o de Artusi (2020).

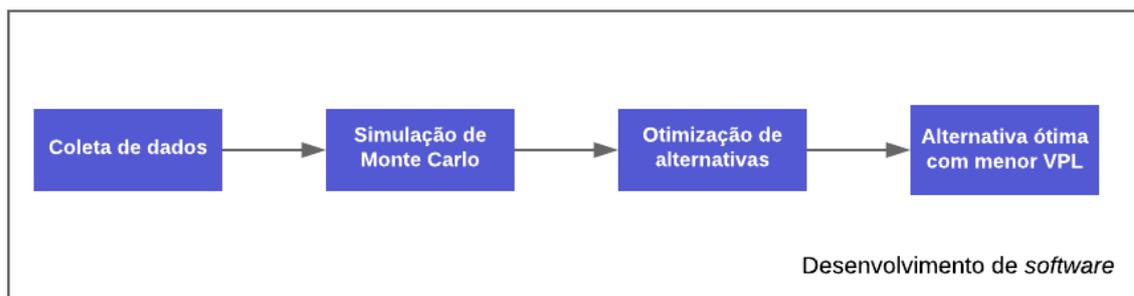
A última etapa do trabalho consistiu na avaliação da mesma estrutura utilizada na etapa de validação, porém variando-se seu tráfego. Dessa forma, realizou-se o dimensionamento da estrutura e posterior inserção na ferramenta sob efeito de tráfego leve e de tráfego médio para que fosse possível verificar como seria a distribuição de custos e estratégias de manutenção e reabilitação em estruturas submetidas a esses tráfegos.

As etapas de validação e de análise de estruturas submetidas a tráfegos leve e médio estão detalhadas no Capítulo 5 da presente dissertação.

4 DESENVOLVIMENTO DO *SOFTWARE*

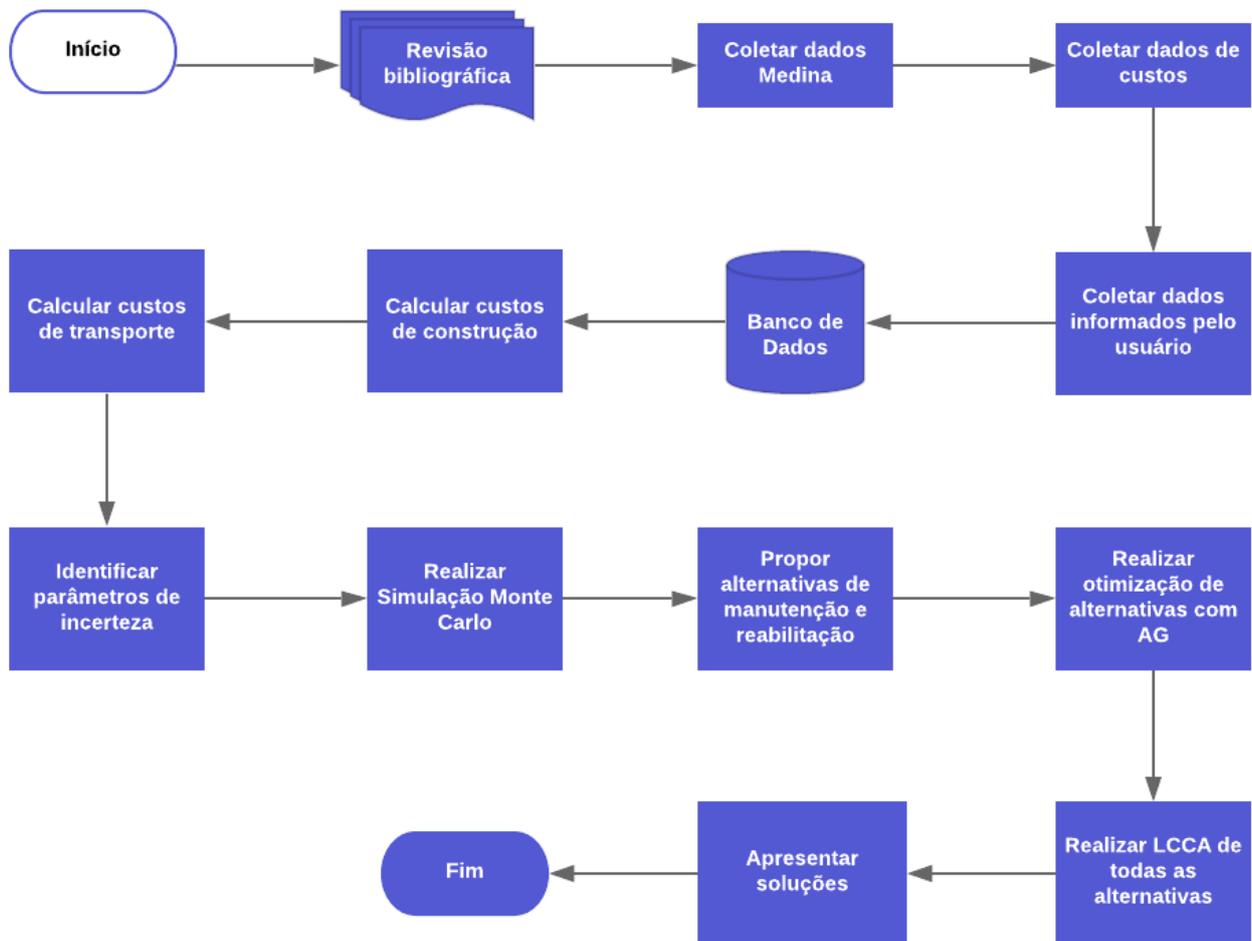
Para desenvolvimento da ferramenta, necessitou-se preparar o ambiente de desenvolvimento para receber e armazenar no banco de dados as informações contidas nos arquivos gerados pelo Medina, nas planilhas de custos e também os dados informados pelo usuário na tela de entrada. Em posse dos dados, os parâmetros de incerteza foram identificados para então prosseguir-se para a simulação de Monte Carlo, de modo a informar ao usuário a curva de distribuição dos custos de construção e transporte do projeto. A otimização de alternativas foi realizada para tornar possível a identificação das melhores alternativas de manutenção e reabilitação durante o período de projeto. As Figuras 10 e 11 ilustram, de forma resumida e completa, respectivamente, as etapas da dissertação

Figura 10 - Fluxograma de desenvolvimento simplificado



Fonte: Própria autora (2021).

Figura 11 - Fluxograma de desenvolvimento completo



Fonte: Própria autora (2021).

4.1 Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados

O Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) selecionado para o projeto em curso foi o MongoDB. MongoDB é um banco de dados NoSQL (*Not Only SQL*), orientado a documentos, gratuito e de código aberto. É um banco de dados recente, mas que vem ocupando espaço no mercado, sendo usado por grandes empresas como Google, PayPal, LinkedIn e Globo.com devido ao seu ótimo desempenho, alta disponibilidade e fácil escalabilidade. Além disso, é compatível com diversas linguagens de programação e possui vasta documentação.

4.1.1 Coleta de Dados no Medina

Os dados relacionados às estruturas de pavimentos são coletados dos arquivos de saída do *software* Medina e armazenados no banco de dados. Através do Medina, é possível realizar o dimensionamento de novos projetos de pavimento ou projetos de reforço. O *software* também permite a realização da análise de estruturas já dimensionadas. Nesse caso, são realizados os cálculos e verificados os critérios de área trincada e/ou deformação permanente (FRANCO; MOTTA, 2018). Esses dados são importantes para que se possa estabelecer o gatilho para intervenção no pavimento, através de projetos de manutenção e reabilitação, e estimar seus custos. Na Figura 12, pode-se visualizar a tela de entrada do Medina.

Figura 12 - Tela inicial Medina

The screenshot shows the Medina software interface with the following components:

- Header:** MeDiNa - v.1.1.4.0 - agosto/2020. Menu items: Projeto, Editar, Análise, Ajuda.
- Tabs:** ESTRUTURA (selected), MODELAGEM, RESULTADOS.
- Form Fields:**
 - RESPONSÁVEL: Luana
 - EMPRESA: UPF
 - PROJETO: Dissertação
 - MODDO: Pavimento Novo (Nível A)
- Buttons:** Alterar Estrutura >>
- Table of Layers:**

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Concreto asfáltico projeto	12,5	4901	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita basáltica	20,0	Resiliente Não Linear	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Brita basáltica	30,0	Resiliente Não Linear	0,35
SL	SUBLEITO	Solo LG'	0,0	Resiliente Não Linear	0,45
- Left Panel - EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO:**
 - DADOS DO TRÁFEGO**

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	4136
FV:	1.000
N anual (1º ano):	1,51e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	1,51e+06
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	20
N Total:	4,06e+07
- Right Panel - ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO:**
 - Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.
 - Nível de confiabilidade da análise: 85%
 - Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 80,0%
 - Afundamento de Trilha de Roda: 10,1mm
 - ALERTAS:** Tráfego elevado para a estrutura proposta.

Fonte: MeDiNa (2021).

Após todas as análises finalizadas, o programa gera três tipos de relatórios que ficam disponíveis para consulta e podem ser facilmente copiados e colados em planilhas Excel (FRANCO; MOTTA, 2018):

1. Evolução mensal dos danos: esse relatório apresenta, conforme modelo de Fritzen (2016), para pavimentos asfálticos, os resultados do comportamento da área trincada e da deformação permanente total.
2. Resumo da deformação permanente: o relatório apresenta a contribuição de cada camada na deformação permanente total da estrutura, de acordo com o modelo de Guimarães (2009).
3. Bacias de deflexão: apresenta as bacias de deflexão, medidas em 10^{-2} mm no topo de cada uma das camadas e no topo do subleito.

Além dos relatórios supracitados, também é possível gerar o relatório completo da análise, que apresenta todas as informações utilizadas no dimensionamento ou análise da estrutura com seus respectivos resultados. Esse relatório pode ser impresso ou salvo no formato .pdf.

Os três relatórios supracitados são importados para o banco de dados do *software* desenvolvido, no formato .csv. Como os documentos apresentam o comportamento da área trincada e da deformação permanente total do pavimento em análise, eles são utilizados para que, com base em seus dados, se estabeleça o gatilho inicial de intervenção no pavimento.

4.1.2 Coleta de Dados de Custos

Para a estimativa do custo do ciclo de vida, as informações referentes aos custos de implantação, manutenção e reabilitação de pavimentos foram coletadas através do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), disponibilizado pelo DNIT e Fundação Getúlio Vargas. O SICRO é a principal referência de custos para obras rodoviárias no Brasil, sendo utilizado por órgãos da administração pública e por empresas privadas.

Os dados são disponibilizados para *download* em documentos PDF, separados por mês, ano e estado. Para que sua importação fosse facilitada, entrou-se em contato com o DNIT via e-mail solicitando os referidos arquivos em planilhas *Excel*, que foram disponibilizados para o estado do Rio Grande do Sul, desde janeiro de 2017 a julho de 2020, que é a última atualização até o momento. Essas planilhas foram exportadas para o formato .csv e importadas, através da tela de entrada da ferramenta, para o banco de dados.

4.1.3 Coleta de Dados Informados pelo Usuário

Alguns dados adicionais foram solicitados ao usuário no momento da criação do projeto para que fosse possível realizar os cálculos. Os dados solicitados foram:

- Benefícios e Despesas Indiretas - BDI;
- BDI Diferenciado;
- Extensão da via;
- Largura total da via;
- Volume Diário Médio - VDM - médio anual de veículos leves;
- VDM médio anual de veículos pesados;
- Taxa de crescimento do tráfego.

4.2 Desenvolvimento da Ferramenta

Neste item serão apresentados os módulos executados na ferramenta, desenvolvidos na linguagem de programação *Javascript*, uma linguagem interpretada pelos navegadores amplamente utilizada em aplicações *web*.

4.2.1 Cálculo dos Custos de Construção e Transporte

O primeiro módulo executado realiza o cálculo dos custos relativos à construção e ao transporte de material necessário para a construção. Para a execução desses cálculos, foram utilizados alguns dados solicitados ao usuário do sistema referentes à rodovia a ser implantada. Os custos dos materiais selecionados pelo usuário foram retirados das planilhas do Sicro. Adicionalmente, os custos dos materiais betuminosos (asfalto diluído, concreto asfáltico e emulsão asfáltica), que não são quantificados nas composições Sicro, foram retirados das tabelas da ANP (2020).

Como as planilhas do Sicro possuem diversos tipos de materiais e serviços, para que fosse possível calcular a quantidade de material de acordo com a espessura da camada, foi necessário realizar o tratamento dos dados, de acordo com sua unidade. Esse tratamento foi realizado para as unidades de metro quadrado, metro cúbico e tonelada, sendo a densidade do CBUQ considerada em $2,4 \text{ t/m}^3$, conforme demonstrado no Algoritmo 1 abaixo:

Algoritmo 1 - Cálculo da quantidade de material

Entrada: extensão da via; largura da via; unidade do material; espessura de material

Saída: quantidade de material para o segmento

```

1 se unidade = "m2" então
2   quantidade = extensão * largura
3 senão se unidade = "m3" então
4   quantidade = extensão * largura * espessura
5 senão se unidade = "t" então
6   quantidade = extensão * largura * espessura * 2,4
7 retornar quantidade

```

Fonte: Própria autora (2021).

O custo de construção foi calculado de acordo com as Equações (1), (2) e (3) abaixo, sendo que a quantidade de material é calculada de acordo com o Algoritmo 1 e o BDI e BDI diferenciado são informados pelo usuário.

$$CC = \textit{quantidade} \times (1 + \textit{bdi}) \times \textit{número aleatório} \quad (1)$$

$$CMB = \textit{quantidade} \times (1 + \textit{bdi diferenciado}) \times CUMB \quad (2)$$

$$CTC = CC + CMB \quad (3)$$

Sendo:

BDI = Benefícios e Despesas Indiretas;

CC = Custo de Construção;

CMB = Custo de Materiais Betuminosos;

CUMB = Custo Unitário de Material Betuminoso;

CTC = Custo Total de Construção.

Os materiais betuminosos foram calculados de acordo com os custos informados pela ANP com referência em dezembro de 2020, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Aquisição de materiais betuminosos

Material	Custo unitário (kg)	Taxa de aplicação	Custo unitário (m ²)
CAP 50-70 (R\$/m ³)	2,63925	0,14	369,50
Asfalto diluído CM 30 (R\$/m ²)	3,84966	0,0012	4,62
Emulsão RR-2C (R\$/m ²)	2,12857	0,0004	0,85

Fonte: Própria autora (2021).

O algoritmo 2 mostra a sequência realizada para gerar os números aleatórios referentes à distribuição dos custos unitários dos materiais das tabelas Sicro, que são utilizados no cálculo dos custos de construção do pavimento.

Algoritmo 2 – Distribuição dos custos unitários

Entrada: número de simulações; entradas de custo unitário do material
Saída: distribuição probabilística do custo unitário dos materiais selecionados

- 1 Determinar *número de soluções*
 - 2 **para** $j = 0$ até *número de soluções*
 - 3 gerar *número aleatório*
-

Fonte: Própria autora (2021).

Os custos de transporte referentes aos materiais utilizados na construção do pavimento foram calculados de acordo com a Equação (4) para materiais granulares e com a Equação (5) para materiais betuminosos.

$$CTMG = quantidade \times DMT \times (1 + bdi) \times (1 + icms) \times \text{número aleatório} \quad (4)$$

$$CTMB = quantidade \times DMT \times (1 + bdi \text{ diferenciado}) \times (1 + icms) \times \text{número aleatório} \quad (5)$$

$$CTT = CTMG + CTMB \quad (6)$$

Sendo:

CTMG = Custo de Transporte de Materiais Granulares;

DMT = Distância Média de Transporte;

CTMB = Custo de Transporte de Materiais Betuminosos;

CTT = Custo Total de Transporte;

ICMS = Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços.

Para o cálculo desses custos, o usuário deve informar, além do código do material na tabela Sicro, a quantidade de material a ser transportada, a DMT empregada e o valor de ICMS. Também deve informar se o material é granular ou betuminoso.

4.2.2 Análise de Custo do Ciclo de Vida

O cálculo do custo do ciclo de vida das estruturas é realizado com base nos dados provenientes do dimensionamento das alternativas de pavimento no *software* Medina, dos custos extraídos das tabelas do SICRO e dos dados fornecidos pelos usuários na tela inicial da ferramenta. A análise é realizada para os custos iniciais de construção e transporte e para cada uma das alternativas de otimização.

Para a construção e transporte de materiais, o custo do ciclo de vida é calculado por uma abordagem probabilística, considerando a incerteza dos custos dos materiais necessários e da taxa de desconto. Para contemplar essas incertezas, a simulação de Monte Carlo é realizada e, posteriormente, calcula-se o LCC através do método do Valor Presente Líquido, utilizando-se a Equação (7) abaixo (DNIT, 2006b):

$$[VPL_{x,n}]_i = \sum_{t=0}^n \frac{B_{x,t} - C_{x,t}}{(1+i)^t} \quad (7)$$

em que VPL é o valor presente líquido dos fluxos da alternativa x , para um período de n anos, com taxa de desconto t . $B_{x,t}$ é o valor dos benefícios para a alternativa x que ocorrem no intervalo de tempo t e $C_{x,t}$ é o valor dos custos para a alternativa x que ocorrem no intervalo de tempo t .

A taxa de desconto (ou taxa de interesse) deve, segundo o DNIT (2006b), refletir a taxa média de retorno esperada em investimentos públicos, considerando a expectativa de inflação, riscos e incertezas inerentes ao processo. Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, os valores usuais recomendados pelo DNIT (2006b) variam entre 10 e 12% ao ano, enquanto em países desenvolvidos, entre 4 e 8% ao ano. Para o presente trabalho, adotou-se uma taxa de desconto de 9,5% ao ano.

4.2.2.1 Simulação de Monte Carlo

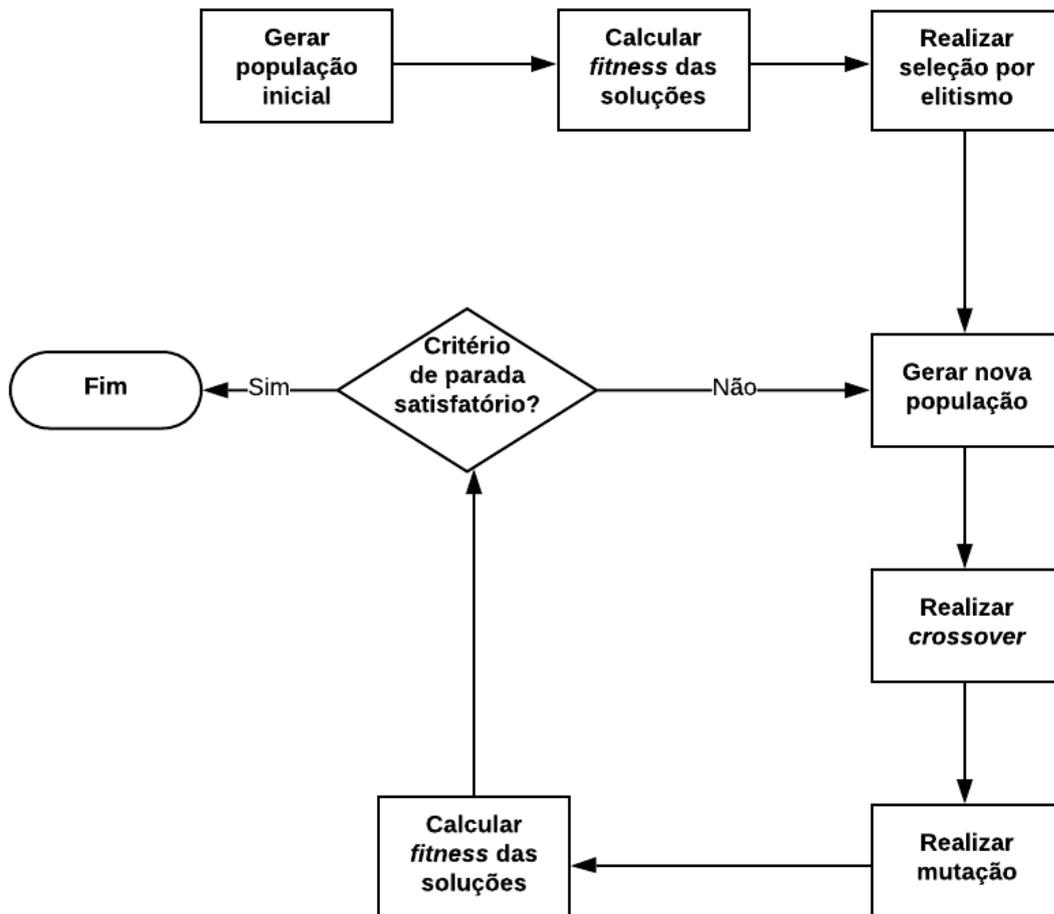
O método de simulação Monte Carlo é amplamente recomendado e utilizado em análises probabilísticas, inclusive em análises que compreendam avaliações de custos. Segundo Walls III e Smith (1998), essas simulações traçam amostras aleatórias, através de dados de entrada individuais, consistentes com suas distribuições definidas e calculam milhares de resultados “e se”. Com um número de amostras suficiente, através da simulação pode-se definir uma distribuição probabilística da composição global do VPL (WALLS III; SMITH, 1998).

Obtendo-se as planilhas do Sicro, foi possível inserir no banco de dados os custos unitários de cada material com suas variações nesse período. A partir disso, para cada material utilizado no cálculo do custo de construção ou manutenção, foram gerados 1.000 valores aleatórios seguindo-se uma distribuição normal dos custos unitários do material.

4.2.3 Otimização de Alternativas

Um módulo de otimização de alternativas foi desenvolvido na ferramenta para que fosse possível estimar o melhor momento para a execução das estratégias de manutenção e reabilitação do pavimento pré-estabelecido. A técnica utilizada para execução desse módulo foi a de algoritmos genéticos. O fluxograma que demonstra o AG proposto está esquematizado na Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma do AG proposto



Fonte: Própria autora (2021).

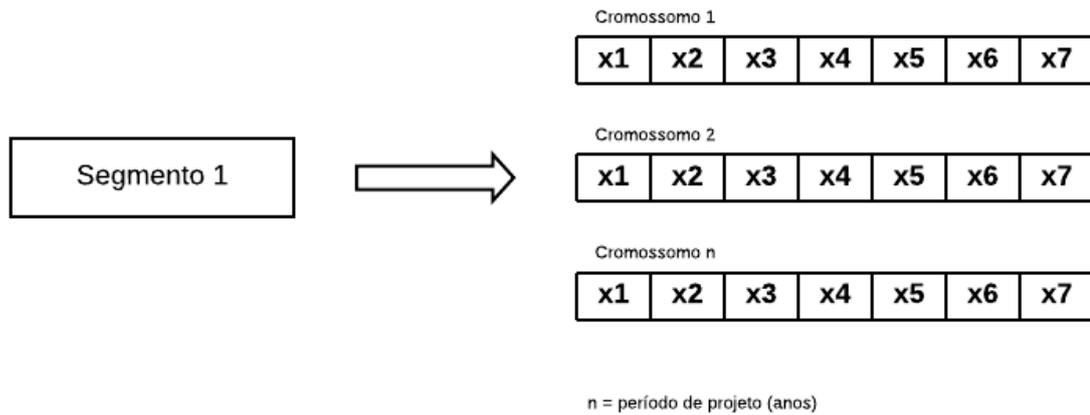
Para desenvolvimento do algoritmo genético algumas premissas foram assumidas:

- Cada projeto inserido na ferramenta deve ser referente a um segmento homogêneo, com características similares;
- Uma função de desempenho deve ser empregada de forma a prever a condição do pavimento ao longo do tempo;
- Há uma quantidade pré-definida de alternativas de manutenção e reabilitação;
- Cada alternativa de manutenção e reabilitação possui um custo de execução e representa um ganho na condição do pavimento.

Inicialmente, é necessário gerar a população inicial. Para isso, as soluções foram divididas de forma que cada segmento contenha um número n de cromossomos, com cada cromossomo representando um ano do período de projeto. Os cromossomos guardam as informações referentes a técnica, custo, largura do segmento, extensão do segmento, área

trincada, afundamento de trilha de roda e irregularidade longitudinal do segmento no ano. O esquema representativo de uma solução se encontra na Figura 14.

Figura 14 - Demonstração de uma solução do AG



Fonte: Própria autora (2021).

Sendo:

- x1: técnica de manutenção; variável independente;
- x2: custo da técnica para o segmento (R\$);
- x3: largura do segmento (m);
- x4: extensão do segmento (m);
- x5: área trincada AT (%);
- x6: afundamento de trilha de roda ATR (mm);
- x7: índice de irregularidade longitudinal IRI (m/km).

A técnica, representada pelo gene x1 é a variável independente, gerada randomicamente dentre um conjunto pré-definido de técnicas de manutenção que estão caracterizadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Técnicas de manutenção definidas

T1	Nenhum tratamento	-
T2	Manutenção Preventiva	MRAF
T3	Reabilitação Leve	Reperfilagem 2cm
T4	Reabilitação Média	Fresagem 5cm + recape 5cm
T5	Reabilitação Pesada	Reconstrução

Fonte: Própria autora (2021).

O custo é calculado em função da técnica, para o segmento, sendo que o custo/m² de cada uma das técnicas definidas foi calculado com base na última tabela do Sicro inserida na ferramenta (Julho/2020) e nos custos de materiais fornecidos pela ANP com referência dezembro/2020 e se encontra discriminado no Quadro 3. As demais características são provenientes dos dados informados.

Quadro 3 - Custo das técnicas de manutenção

Identificador		Técnica	Técnica discriminada	Código SICRO	Custo por m ² (R\$)
T1	Nenhum tratamento	-	-	-	0,00
T2	Manutenção Preventiva	MRAF	Microrrevestimento a frio com emulsão modificada com polímero de 1,5cm	4011410	3,16
			Emulsão asfáltica RR-2C	ANP	
T3	Reabilitação Leve	Reperfilagem 2cm	Pintura de ligação	4011353	13,84
			Emulsão asfáltica RR-2C	ANP	
			CBUQ capa rolamento 2cm	4011463	
			Cimento asfáltico CAP-50-70	ANP	
T4	Reabilitação Média	Fresagem 5cm + recape 5cm	Fresagem contínua	4011479	35,07
			Pintura de ligação	4011353	
			Emulsão asfáltica RR-2C	ANP	
			CBUQ capa rolamento	4011463	

			Cimento asfáltico CAP-50-70	ANP	
T5	Reabilitação Pesada	Reconstrução	Remoção de camada granular	4915669	73,52
			Remoção de revestimento betuminoso	4915667	
			Sub-base de brita graduada 20cm	4011276	
			Base de brita graduada 20cm	4011276	
			Imprimação	4011351	
			Asfalto diluído CM-30	ANP	
			Pintura de ligação	4011353	
			Emulsão asfáltica RR-2C	ANP	
			CBUQ capa rolamento 10cm	4011463	
			Cimento asfáltico CAP-50-70	ANP	

Fonte: Própria autora (2021).

Adicionalmente ao custo necessário para realizar cada uma das técnicas de manutenção, também foram calculados os custos adicionais que incorrem aos usuários da rodovia devido à progressiva degradação do pavimento. Wilde et al. (1999) atribui esses custos como o conjunto formado pelos atrasos de viagens, operação dos veículos, gastos com combustíveis e aumento dos riscos de acidentes devido ao tráfego em zonas de trabalho. Kerali (2001) afirma que três fatores estão compreendidos nesses custos, sendo eles custos de operação do veículo, custos de tempo de viagem e custos de acidentes rodoviários.

Neste trabalho, devido a sua característica de ser genérico e poder ser utilizado por qualquer gestor para aplicação nas mais diversas rodovias, alguns dados são de mais difícil mensuração, pois podem variar muito em cada caso concreto, dificultando, assim, sua predeterminação de forma genérica para que possa ser utilizado em todas as situações. Devido a isso, optou-se por restringir o cálculo dos custos ao usuário somente àquele referente ao gasto adicional de combustível que ocorre quando o nível de irregularidade do pavimento aumenta.

Para determinação do consumo anual de combustível utilizou-se a Equação (8) e Quadro 4, de acordo com MMA (2011). Para uso da equação, considerou-se que a idade média da frota dos veículos brasileiros é de 15 anos e que os combustíveis mais utilizados para veículos leves e pesados são gasolina e diesel, respectivamente, conforme informado por MMA (2011) e Souza (2017).

$$C_{i\text{estimado}} = Fr_i \times \frac{Iu_{i,\text{referência}}}{Ql_i} \quad (8)$$

Onde:

$C_{i\text{estimado}}$ = consumo anual de combustível do veículo tipo i (L/ano);

Fr_i = frota em circulação no ano do veículo do tipo i, informado pelo usuário;

$I_{u_i, \text{referência}}$ = intensidade de uso de referência do veículo do tipo i , em quilometragem anual percorrida (km/ano), conforme MMA (2011);

Q_{li} = quilometragem por litro de combustível do veículo tipo i (km/L), conforme MMA (2011).

Quadro 4 - Valores utilizados para cálculo do consumo anual de combustível

	Veículos leves	Veículos pesados
Q_{li}	10	6
$I_{u_i, \text{referência}}$	10.000	100.000

Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2011).

Após a obtenção do consumo anual de combustível da frota em circulação, foi aplicado o fator FCF ano a ano, conforme metodologia proposta por Yu et al. (2013) e também utilizada por Souza (2017). Através do fator FCF é possível calcular o aumento do consumo de combustível relacionando-o com o aumento progressivo da irregularidade da rodovia, conforme as Equações (9) e (10).

$$FCF_{Leves} = 7,377 \times 10^{-3} \times IRI + 0,993 \quad (9)$$

$$FCF_{Pesados} = 2,163 \times 10^{-2} \times IRI + 0,953 \quad (10)$$

Sendo:

FCF = Fator de Consumo de Combustível (superior a 1,0);

IRI = Índice de Irregularidade Longitudinal.

Multiplicando-se o consumo anual de combustível pelo fator de consumo de combustível, atinge-se o consumo adicional de combustível da frota ano a ano. Para a análise em termos monetários, os valores dos combustíveis foram obtidos em ANP (2020), sendo o valor de distribuição da gasolina comum igual a R\$ 4,106 e do diesel R\$ 3,164, para o estado do Rio Grande do Sul e referência em dezembro de 2020.

Para atualização do custo ao usuário, seu VPL também foi obtido e somado aos custos anuais de manutenção da rodovia.

Tendo-se definida a configuração das soluções foi possível partir para a criação da população inicial. Cancian (2015) informa que algoritmos genéticos padrão utilizados em gerenciamento de pavimentos costumam ter população inicial entre 30 e 200 soluções geradas

aleatoriamente. Oliveira (2015) afirma que a escolha do tamanho da população inicial pode afetar a qualidade da solução e o número de gerações necessárias para encontrar um resultado satisfatório, porém, quanto maior a população, maior será o tempo de processamento. A população inicial é composta por um conjunto de 20 indivíduos. Optou-se pela definição de uma população inicial com um valor relativamente pequeno de indivíduos pois, diferentemente da maioria dos AG, em que um cromossomo representa uma solução completa, neste trabalho uma solução é composta de diversos cromossomos, que variam em quantidade de acordo com o período de projeto, o que acarreta tempo de processamento muito maior que o habitualmente realizado.

Após a geração da população inicial, é realizada a avaliação de cada um dos indivíduos, de forma a determinar sua *fitness*. Para essa avaliação, uma função objetivo foi determinada e aplicada, objetivando estabelecer o custo no tempo necessário à técnica, através da equação do Valor Presente Líquido (7). Dessa forma, a avaliação é realizada de forma que quanto menor o VPL da solução, maior sua pontuação.

Para que se tornasse possível avaliar qual seria o benefício garantido ao pavimento após a aplicação das técnicas de manutenção foi necessário, inicialmente, determinar de que forma ocorre a evolução dos defeitos selecionados no pavimento. Ao realizar a avaliação do pavimento, o Medina apresenta o progresso previsto para a área trincada e a deformação permanente. Para esses dois defeitos, as estimativas do Medina foram as utilizadas.

Já a irregularidade longitudinal é um parâmetro que o Medina não fornece. Dessa forma, fez-se necessário utilizar um modelo que represente a progressão desse defeito ao longo do período de projeto. Para isso, diversos trabalhos foram analisados, porém, em sua grande maioria, tratava-se de trabalhos realizados através de análises em campo. Devido ao fato de este trabalho ser essencialmente teórico, diversos dos dados necessários para utilização dos modelos desenvolvidos não estavam disponíveis. Dessa forma, optou-se por utilizar o modelo que prevê o comportamento da irregularidade longitudinal aplicado ao HDM-4. Os componentes do modelo encontram-se na Equação (11) abaixo.

$$\Delta RI = K_{gp}(\Delta RI_S + \Delta RI_{TR} + \Delta RI_{ATR} + \Delta RI_P) + \Delta RI_E \quad (11)$$

Em que:

ΔRI = acréscimo total na irregularidade longitudinal durante o ano em análise (m/km)

K_{gp} = fator de ajuste para progressão da irregularidade longitudinal

ΔRI_S = acréscimo na irregularidade longitudinal devido ao componente estrutural (m/km)

ΔRI_{TR} = acréscimo na irregularidade longitudinal devido ao trincamento (m/km)

ΔRI_{ATR} = acréscimo na irregularidade longitudinal devido ao afundamento de trilha de roda (m/km)

ΔRI_P = acréscimo na irregularidade longitudinal devido à presença de panelas (m/km)

ΔRI_E = acréscimo na irregularidade longitudinal devido às condições ambientais (m/km)

De forma a se trabalhar com os dados obtidos na presente dissertação, optou-se por reduzir a equação, utilizando apenas os dados de trincamento e afundamento de trilha de roda, obtidos através do *software* Medina. Dessa forma, a Equação (12) utilizada para prever a progressão da irregularidade longitudinal foi a seguinte:

$$\Delta RI = K_{gp}(\Delta RI_{TR} + \Delta RI_{ATR}) \quad (12)$$

Analisando-se separadamente os dois componentes de incremento no IRI, tem-se, inicialmente, o componente devido ao trincamento, expresso na Equação (13):

$$\Delta RI_{TR} = K_{gc} \times 0,0066 \times \Delta TR \quad (13)$$

Em que:

ΔRI_{TR} = acréscimo na irregularidade longitudinal devido ao trincamento (m/km);

K_{gc} = fator de calibração para o componente de trincamento da irregularidade;

ΔTR = aumento percentual na área com presença de trincamento durante o ano em análise.

Já o componente devido ao afundamento de trilha de roda está expresso na Equação (14):

$$\Delta RI_{ATR} = K_{gr} \times 0,088 \times \Delta DP \quad (14)$$

Em que:

ΔRI_{ATR} = acréscimo na irregularidade longitudinal devido ao afundamento de trilha de roda (m/km);

K_{gr} = fator de calibração para o componente de afundamento de trilha de roda na irregularidade;

ΔDP = aumento no desvio padrão do afundamento de trilha de roda durante o ano em análise (mm).

Os coeficientes de calibração necessários para a utilização das equações foram os propostos por Arango (2018), para o subgrupo 9-SN-A-TM. Os mesmos podem ser visualizados no Quadro 5:

Quadro 5 - Coeficientes de calibração

Coeficiente	Sigla	Valor
Componente de trincamento do IRI	Kgc	1,00
Componente de afundamento do IRI	Kgr	1,40
Componente de painéis do IRI	Kgp	1,00

Fonte: Adaptado de Arango (2018).

Para se avaliar a recuperação do pavimento após as técnicas de intervenção, utilizou-se como base o trabalho de Lerch (2002), que desenvolveu um modelo de regressão linear múltipla para avaliar a recuperação do pavimento após a aplicação de recapes em concreto asfáltico. A equação (15) desenvolvida para avaliar a recuperação do IRI pós-recape pode ser visualizada abaixo:

$$\Delta IRI = 0,31 \times Esp + 0,87 \times IRI_{antes} - 3,17 \quad (15)$$

Em que:

ΔIRI = redução prevista da irregularidade longitudinal pós recape (m/km)

Esp = espessura do recape executado (cm)

IRI_{antes} = irregularidade longitudinal medida antes do recape (m/km)

Portanto, a recuperação do pavimento de acordo com cada uma das técnicas previstas segue o que foi apresentado por Lerch (2002) em sua dissertação e está apresentada no Quadro 6.

Quadro 6 - Recuperação do pavimento de acordo com cada técnica

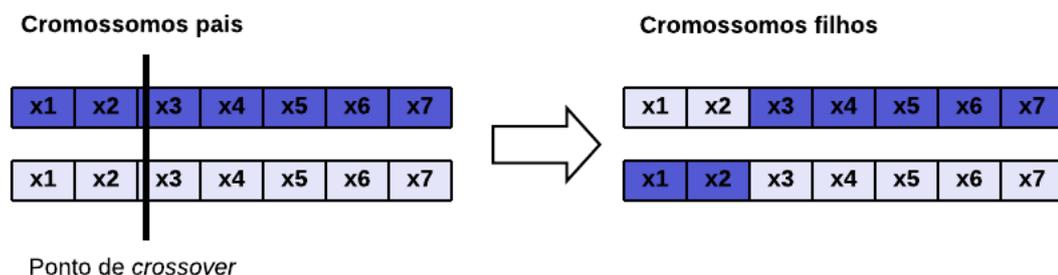
	IRI	AT	ATR
T1	Inalterado	Inalterada	Inalterado
T2	Decréscimo conforme Equação de Lerch	Inalterada	Inalterado
T3	Decréscimo conforme Equação de Lerch	Inalterada	Inalterado
T4	Decréscimo conforme Equação de Lerch	Retorna ao valor pós-construção	Retorna ao valor pós-construção
T5	Retorna ao valor pós-construção	Retorna ao valor pós-construção	Retorna ao valor pós-construção

Fonte: Própria autora (2021).

Após a avaliação da população inicial, inicia-se o processo de iteração que dá início às próximas gerações. Inicialmente, a seleção por elitismo foi utilizada. Nesse tipo de seleção, o indivíduo com a melhor avaliação de todas é automaticamente passado para a próxima geração, a fim de garantir que não ocorra a perda de indivíduos com aptidão muito alta.

Em seguida, o *crossover* (ou cruzamento) é realizado, o que significa que dois indivíduos são selecionados e seu cruzamento é realizado, de forma a criar dois novos indivíduos, contendo material genético de ambos os pais. Nesse caso, realizou-se o *crossover* de um único ponto, com a recombinação do tratamento e custo das seleções, conforme demonstrado na Figura 15.

Figura 15 - Recombinação de indivíduos



Fonte: Própria autora (2021).

No Algoritmo 3 está demonstrada a execução do *crossover* dos cromossomos.

Algoritmo 3 - *Crossover* de cromossomos

Entrada: taxa de crossover; geração anterior

Saída: indivíduo recombinação

```

1 taxa crossover = 0,6
2 random = gerar número aleatório entre 0 e 1
3 se (random <= taxa crossover)
4     indivíduo = selecionar indivíduo da geração anterior
5     faça
6         cromossomo1 = selecionar cromossomo de indivíduo
7         cromossomo2 = selecionar cromossomo de indivíduo
8     enquanto (cromossomo1 == cromossomo2)
9         cromossomo1 recebe técnica de cromossomo2
10        cromossomo2 recebe técnica de cromossomo1
11        recalcular vpl de cromossomo1
12        recalcular vpl de cromossomo2
13        recalcular vpl de indivíduo
14    fim se
15    retornar indivíduo

```

Fonte: Própria autora (2021).

Após a recombinação dos indivíduos, seguiu-se para a mutação, de forma a selecionar um indivíduo aleatoriamente e alterar sua técnica e seu custo, também de forma randômica. A mutação dos cromossomos está representada pelo Algoritmo 4.

Algoritmo 4 - Mutação de cromossomos

Entrada: taxa de mutação; geração anterior; técnicas

Saída: indivíduo mutado

```

1 taxa mutação = 0,01
2 random = gerar número aleatório entre 0 e 1
3 se (random <= taxa mutação)
4     indivíduo = selecionar indivíduo da geração anterior
5     cromossomo = selecionar cromossomo de indivíduo
6     nova técnica = selecionar técnica
7     faça
8         selecionar nova técnica
9     enquanto (técnica de cromossomo == nova técnica)
10        cromossomorecebe nova técnica
11        recalcular vpl de cromossomo
12        recalcular vpl de indivíduo
13    fim se

```

14 retornar indivíduo

Fonte: Própria autora (2021).

Yang et al. (2015) afirmam que a taxa de *crossover* usualmente varia entre 60% e 90% de forma a assegurar que a maioria dos cromossomos tenha a chance de se recombinar. Por outro lado, menos de 10% dos cromossomos devem ser permitidos a mutarem para que os bons cromossomos não sejam perdidos. Nesse trabalho utilizaram-se taxas de 60% e 1% para *crossover* e mutação, respectivamente.

Para cálculo de obtenção do VPL de cada solução, assim como nos custos de construção e transporte, utilizou-se uma taxa de desconto de 9,5%.

A fim de garantir que as melhores soluções não contemplariam pavimentos com condições piores que as aceitáveis, impuseram-se penalizações, de forma a acrescentar um determinado valor ao VPL total nas soluções em que os pavimentos atingissem determinados gatilhos nos genes x5, x6 e x7, determinados no Quadro 7.

Quadro 7 - Gatilhos para penalização

Identificador	Defeito	Gatilho
AT	Área trincada	20%
ATR	Afundamento de trilha de roda	10 mm
IRI	Índice de irregularidade longitudinal	3,5 m/km

Fonte: Própria autora (2021).

O Algoritmo 5 demonstra a imposição das penalizações impostas ao sistema, de forma a contemplar os gatilhos máximos de defeitos.

Algoritmo 5 - Penalização de soluções

Entrada: valor de AT; valor de ATR; valor de IRI; VPL

Saída: VPL total da solução

- 1 se $(AT \geq 20)$ ou $(ATR \geq 10)$ ou $(IRI \geq 3,5)$
- 2 $VPL_{Total} += 10.000.000,00$
- 3 fim se
- 4 retornar VPL_{Total}

Fonte: Própria autora (2021).

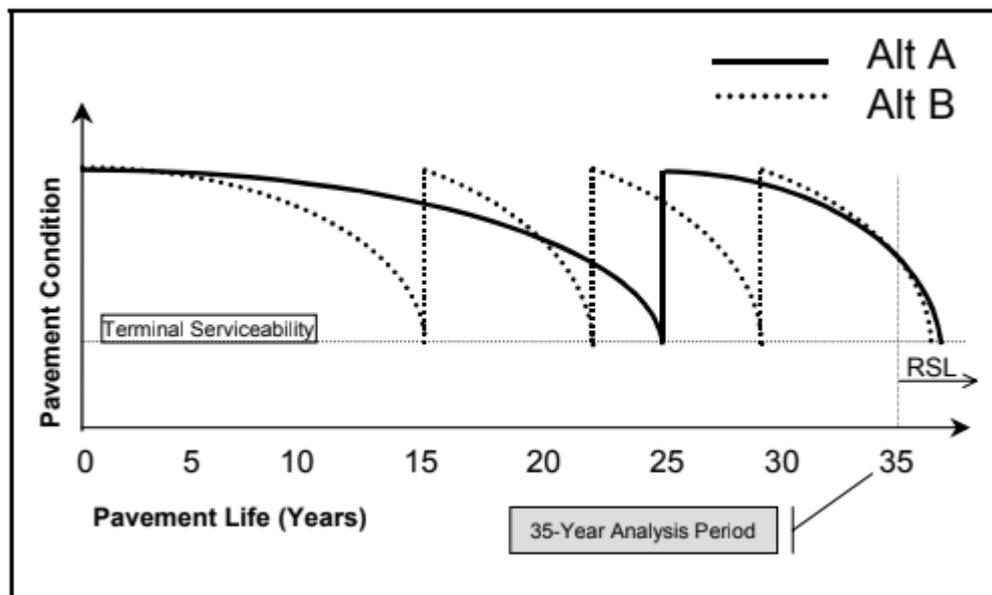
Com a nova geração devidamente populada, realiza-se novamente a avaliação dos indivíduos. Por fim, o critério de parada é verificado: caso seja satisfatório, chega-se ao fim do

problema, obtendo-se a solução com o menor custo possível; caso contrário, inicia-se uma nova iteração, criando-se uma nova geração até que o critério seja satisfeito.

4.2.4 Priorização de Alternativas

A priorização de alternativas consiste na comparação entre os valores de VPL encontrados para cada uma. A alternativa contendo o menor VPL é a priorizada, por se tratar da opção mais atrativa em termos financeiros, conforme pode ser visualizado no esquema da Figura 16.

Figura 16 - Curvas das alternativas A e B do ciclo de vida de um pavimento



Fonte: Walls III e Smith (1998).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Essa seção apresenta os resultados obtidos pelo uso da ferramenta desenvolvida. Inicialmente serão exibidas as telas iniciais de configuração do *software*. No momento seguinte, será apresentada a estrutura que foi utilizada para validação da ferramenta, apresentando-se seus resultados em seguida.

5.1 Configurações Iniciais

A primeira etapa realizada na criação da ferramenta foi a tela de entrada, em que se pode visualizar os projetos criados e escolher entre duas opções: configurar Sicro ou criar um novo projeto (Figura 17).

Figura 17 - Tela de entrada do software

Simulações						
Configurar Sicro		Novo Projeto				
Código	Nome	Responsável	Empresa	Data de Análise	Período de Projeto	
1	Projeto 20 anos CA 10	Luana	UPF	08/01/2021	20	Ver X
2	Projeto 20 anos CA 12.5	Luana	UPF	08/01/2021	20	Ver X
3	Projeto 20 anos CA 15	Luana	UPF	08/01/2021	20	Ver X
4	Projeto 20 anos CA 12.5 Base 20	Luana	UPF	08/01/2021	20	Ver X

Fonte: Própria autora (2020).

Ao selecionar a opção “Configurar Sicro”, o usuário é redirecionado para uma nova tela, em que deverá inserir o arquivo Sicro com a extensão .csv, e informar o mês, ano e estado da referida tabela (Figura 18).

Figura 18 - Importação dos dados de custos

Sicro

Importar Dados Sicro

Arquivo:

Choose File No file chosen

Mês

Ano

Estado

Importar

Importações Sicro - 6718 Materiais Processados

Ver importações Consultar Materiais Configurar Dados

Fechar

Fonte: Própria autora (2021).

Para o cálculo do custo de cada camada do pavimento, inicialmente definiu-se o custo unitário dos materiais que compõem as camadas. Para a determinação desse custo, definido como a primeira variável aleatória, procedeu-se o levantamento dos custos informados no Sicro desde janeiro de 2017, ano em que essas tabelas começaram a ser adotadas pelo DNIT. Isso resultou em um total de 18 amostras para cada material.

Para a criação de um projeto, o primeiro passo a ser realizado é o preenchimento de alguns dados, que devem ser informados da mesma forma como foram informados no Medina. Há três campos de importação para que possam ser inseridas as tabelas exportadas do Medina, em formato .csv, referentes aos resultados de área trincada, deflexões e afundamento de trilha de roda obtidos no dimensionamento. A Figura 19 mostra a tela de inserção dos dados de projeto na ferramenta.

Figura 19 – Inserção de novo projeto

The image shows a web-based form for creating a new project. The form is divided into two main sections. The left section, titled 'Arquivos Medina', contains several file upload buttons labeled 'Choose File' for 'Área Trincada', 'Deflexões', and 'Afundamento de Trilha de Roda'. Below these are input fields for 'BDI (%)', 'BDI Diferenciado (%)' (with a placeholder 'BDI utilizado para Materiais Betuminosos'), 'Extensão (m)', and 'Largura total (m)'. A blue 'Importar Dados' button is at the bottom left of this section. The right section, titled 'Projeto 1 - Importações 0', contains input fields for 'Nome', 'Responsável', 'Empresa', 'Data da Análise', 'Período de projeto (anos)', and 'Número de gerações do Algoritmo Genético' (with a placeholder 'Informe um valor maior que 50'). A yellow 'Concluir Projeto' button is positioned between the two sections. A 'Fechar' button is located at the bottom right of the entire form.

Fonte: Própria autora (2021).

Após a criação do projeto, deve-se realizar a inserção dos materiais de construção e de transporte necessários, e então o *software* executa o cálculo dos custos de construção e de transporte considerando a incerteza das variáveis de custo disponibilizadas pelo DNIT. Para que essa incerteza fosse integrada, para cada material selecionado na etapa de seleção dos materiais, são realizadas 1.000 repetições da simulação de Monte Carlo. Após, para cada repetição, somam-se os custos das camadas, de forma a se obter o custo total de construção. Dessa forma, para cada projeto, o custo total é calculado 1.000 vezes, variando-se o custo unitário do material.

5.2 Estrutura analisada

Para que fosse possível avaliar a ferramenta proposta, utilizou-se como referência uma das estruturas analisadas no trabalho de Artusi (2020). Em seu trabalho, o autor analisa diferentes estruturas durante seu ciclo de vida, dimensionando-as tanto no Medina quanto no

HDM-4 e, posteriormente, comparando seus resultados. Dessa forma, selecionou-se uma das estruturas avaliadas pelo autor e realizou-se seu dimensionamento no Medina e inserção na ferramenta desenvolvida, a fim de comparar os resultados com os do autor. A Tabela 3 contém as características do projeto inserido.

Tabela 3 - Características do projeto

Dado	Valor
Extensão	1.000,00 m
Largura total	7,20 m
BDI	22,49%
BDI Diferenciado	15,00%
ICMS	18,00%

Fonte: Adaptado de Artusi (2020).

A Tabela 4 mostra os materiais utilizados em cada camada do pavimento com suas respectivas espessuras e valores de massa específica e coeficiente de Poisson. Informações mais detalhadas a respeito das características dos materiais podem ser encontradas em Artusi (2020).

Tabela 4 - Especificações das camadas do pavimento

Camada	Material	Espessura (cm)	Massa específica (g/cm³)	Coefficiente de Poisson
Revestimento	Concreto asfáltico	12,50	2,43	0,30
Base	Brita basáltica	20,00	2,47	0,35
Sub-base	Brita basáltica	30,00	2,47	0,35
Subleito	Solo LG'	-	2,70	0,45

Fonte: Adaptado de Artusi (2020).

As informações relativas ao tráfego foram baseadas no mesmo trabalho supracitado. Para cada uma das faixas de rodagem, quantificou-se um VDM de 2.068 veículos, sendo desses 1.600 referentes à tráfego leve e 468 para tráfego pesado, o que resultou em um VDM total, para as duas pistas, de 4.136 veículos. A esse tráfego, atribuiu-se uma taxa de crescimento anual de 3%.

Todas as estruturas foram dimensionadas no Medina para, posteriormente, criarem-se os projetos na ferramenta desenvolvida, juntamente com os resultados de deformações obtidos no Medina.

A ferramenta desenvolvida encontra-se alocada em um servidor virtual Amazon EC2 t2.micro com 1 GiB de memória RAM, 1 vCPU e 8 GiB de armazenamento SSD, sistema operacional Linux Ubuntu 20.04 server. Porém, por se tratar de um servidor gratuito, algumas

limitações de processamento foram encontradas durante a execução dos testes, o que acarretou lentidão na execução do algoritmo genético. Por isso, os testes executados para análise da estrutura desse trabalho foram executados em uma VPN de um computador i7 10ª geração com 9 núcleos, 16 GiB de memória RAM e HD com 250 GiB de SSD, sistema operacional Linux Ubuntu Desktop 20.4. Salienta-se que para usos futuros da ferramenta aconselha-se a aquisição de um servidor com maior capacidade.

5.2.1 Resultados obtidos na ferramenta proposta neste estudo

Os materiais de construção inseridos na ferramenta para a estrutura de análise, com seus respectivos códigos na tabela Sicro encontram-se demonstrados na Figura 20.

Figura 20 - Materiais de construção utilizados nas análises

Materiais Selecionados Importação 1

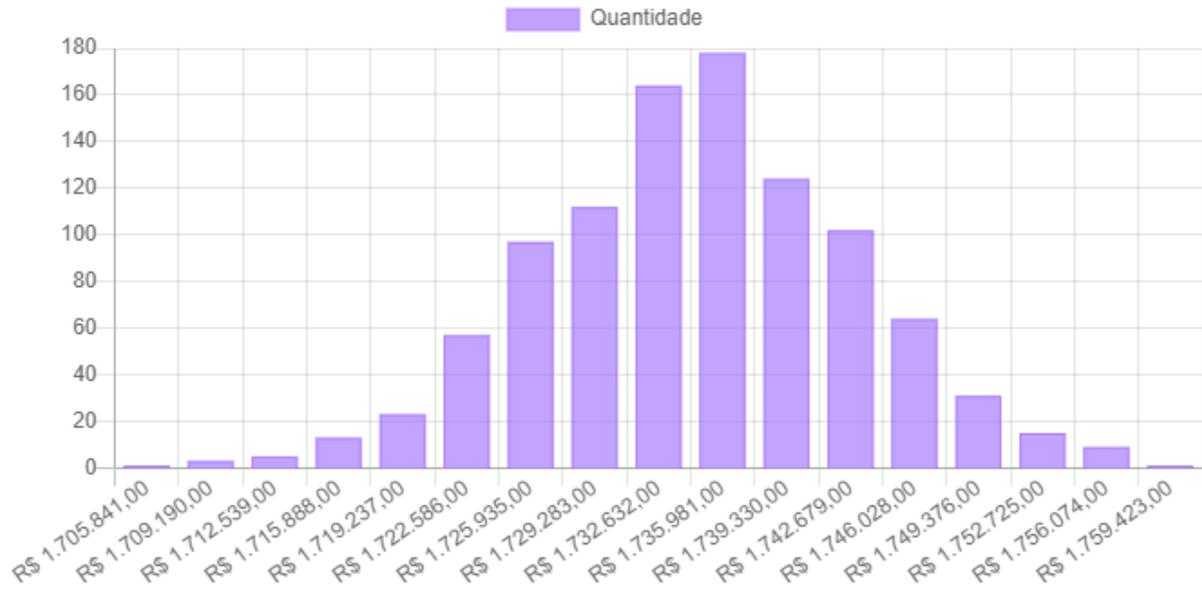
Construção

<p>4011276 - Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial (m³) - Espessura: 0.3 cm</p> <p>X</p>	<p>4011353 - Pintura de ligação (m²) -</p> <p>X</p>
<p>4011276 - Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial (m³) - Espessura: 0.2 cm</p> <p>X</p>	<p>4011459 - Concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais (t) - Espessura: 0.125 cm</p> <p>X</p>
<p>4011351 - Imprimação com asfalto diluído (m²) -</p> <p>X</p>	<p>4011353 - Pintura de ligação (m²) -</p> <p>X</p>

Fonte: Própria autora (2021).

Com os dados fornecidos foi possível obter a curva de distribuição do custo de construção da estrutura inserida na ferramenta, apresentada na Figura 21. Obteve-se um custo médio de R\$ 1.733.025,20, com desvio padrão de R\$ 16.502,41.

Figura 21 - Custos de construção utilizados nas análises

Materiais de Construção: 6**Valor Total Médio:** R\$ 1.733.025,20**Desvio Padrão Médio:** R\$ 16.502,41

Fonte: Própria autora (2021).

A Figura 22 apresenta os materiais utilizados para o transporte dos insumos de construção, com suas respectivas quantidades e DMTs. O valor de ICMS utilizado, valorado para o estado do Rio Grande do Sul, foi de 18%.

Figura 22 - Materiais sujeitos à transporte

Transporte

5914389 - Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia pavimentada (tkm)- DMT: 300 - QTD: 14.4 - ICMS: 18 - Tipo Material: betuminoso



5914374 - Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia com revestimento primário (tkm)- DMT: 30 - QTD: 2160 - ICMS: 18 - Tipo Material: betuminoso



5914359 - Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia em leito natural (tkm)- DMT: 10 - QTD: 3600 - ICMS: 18 - Tipo Material: granular



5914359 - Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia em leito natural (tkm)- DMT: 20 - QTD: 3600 - ICMS: 18 - Tipo Material: granular



Fonte: Própria autora (2021).

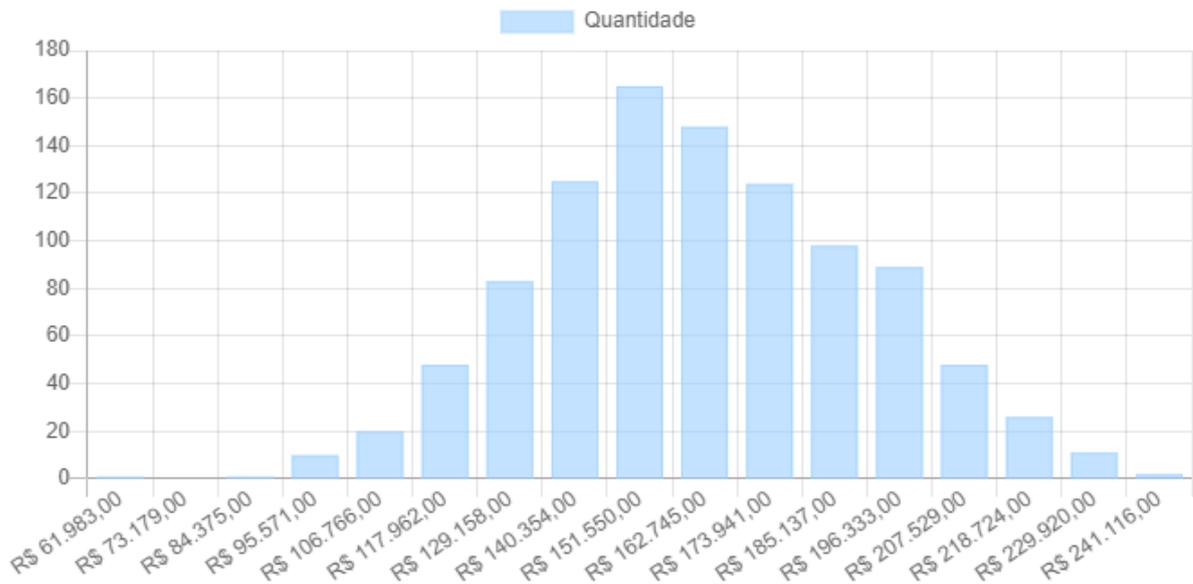
O custo de transporte resultou em um valor total médio de R\$ 156.520,77 com desvio padrão médio de R\$ 48.847,65, conforme pode ser visualizado na curva de distribuição apresentada na Figura 23. Destaca-se o elevado valor de desvio padrão encontrado para o custo de transporte que se deve, essencialmente, à alta variabilidade do custo unitários dessas composições ao longo dos anos.

Figura 23 - Custo de transporte avaliados nas análises

Materiais de Transporte: 4

Valor Total Médio: R\$ 156.520,77

Desvio Padrão Médio: R\$ 48.847,65



Fonte: Própria autora (2021).

Após a obtenção dos custos de construção e transporte, a próxima etapa foi a obtenção do melhor plano de manutenção da estrutura para o período de 20 anos, obtido através da execução do algoritmo genético.

A estrutura analisada contou com uma população inicial de 20 indivíduos e 50 gerações. 5.000 execuções foram rodadas, com tempo médio de execução de 2 minutos e 8 segundos a cada 100 execuções. O plano de manutenção contendo o menor VPL foi obtido na execução 4.300, tendo o resultado se estabilizado a partir de então. A Figura 24 mostra um resumo das estratégias propostas ao longo dos 20 anos de projeto, ano a ano, para a alternativa 4.300.

Figura 24 - Resumo das estratégias propostas na alternativa 4.300

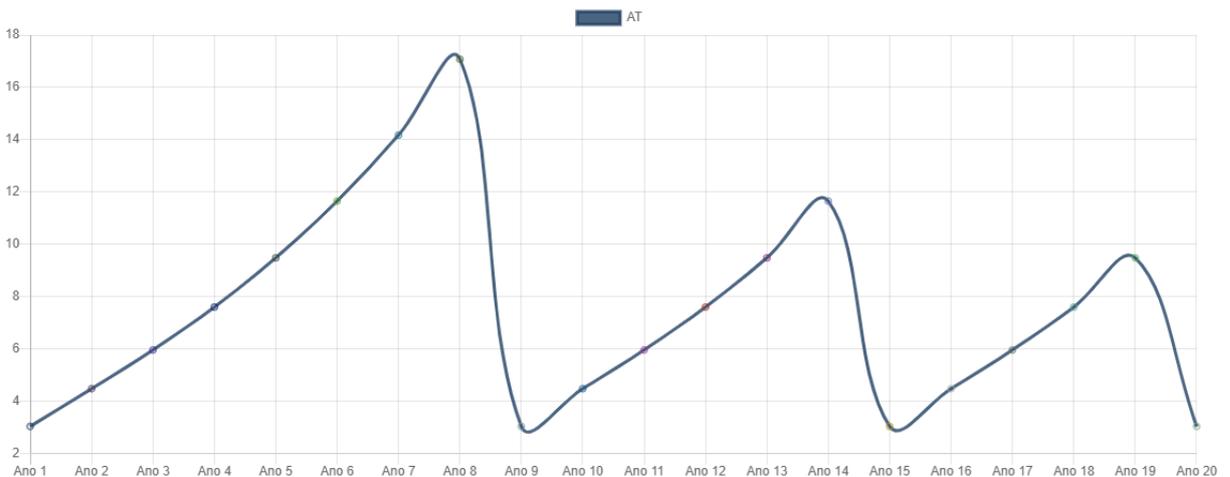
VPL Total: 1.312.763,24

Ano	Técnica	Custo (R\$)	Área Trincada (%)	ATR (mm)	IRI (m/km)	VPL (R\$)	VPL Usuário(R\$)	VPL Total(R\$)
1	t2 - Manutenção Preventiva	27.410,54	3,05	8,11	1,80	25.032,45	77.598,77	102.631,22
2	t1 - Nenhum Tratamento	0	4,49	8,51	1,85	0	77.437,67	77.437,67
3	t2 - Manutenção Preventiva	27.410,54	5,97	8,75	1,80	20.877,34	68.659,57	89.536,91
4	t1 - Nenhum Tratamento	0	7,61	8,93	1,83	0	66.835,92	66.835,92
5	t1 - Nenhum Tratamento	0	9,49	9,07	1,86	0	64.826,68	64.826,68
6	t1 - Nenhum Tratamento	0	11,66	9,19	1,88	0	62.774,67	62.774,67
7	t2 - Manutenção Preventiva	27.410,54	14,18	9,30	1,80	14.521,74	53.751,86	68.273,60
8	t1 - Nenhum Tratamento	0	17,08	9,39	1,83	0	52.193,48	52.193,48
9	t4 - Reabilitação Média	298.847,63	3,05	8,11	1,80	132.045,24	47.559,76	179.605,00
10	t2 - Manutenção Preventiva	27.410,54	4,49	8,51	1,80	11.060,54	44.736,58	55.797,12
11	t2 - Manutenção Preventiva	27.410,54	5,97	8,75	1,80	10.100,95	42.080,99	52.181,94
12	t2 - Manutenção Preventiva	27.410,54	7,61	8,93	1,80	9.224,61	39.583,03	48.807,64
13	t2 - Manutenção Preventiva	27.410,54	9,49	9,07	1,80	8.424,30	37.233,35	45.657,65
14	t1 - Nenhum Tratamento	0	11,66	9,19	1,83	0	36.124,00	36.124,00
15	t4 - Reabilitação Média	298.847,63	3,05	8,11	1,80	76.601,63	32.944,15	109.545,79
16	t2 - Manutenção Preventiva	27.410,54	4,49	8,51	1,80	6.416,40	30.988,56	37.404,97
17	t2 - Manutenção Preventiva	27.410,54	5,97	8,75	1,80	5.859,73	29.149,06	35.008,79
18	t2 - Manutenção Preventiva	27.410,54	7,61	8,93	1,80	5.351,35	27.418,75	32.770,10
19	t2 - Manutenção Preventiva	27.410,54	9,49	9,07	1,80	4.887,08	25.791,15	30.678,23
20	t4 - Reabilitação Média	298.847,63	3,05	8,11	1,80	48.659,48	24.260,17	72.919,65

Fonte: Própria autora (2021).

A Figura 25 mostra o gráfico de evolução da área trincada ao longo dos 20 anos. Seu pico máximo ocorreu no oitavo ano, chegando a 17,08%, momento em que uma reabilitação média foi executada, reiniciando seus valores.

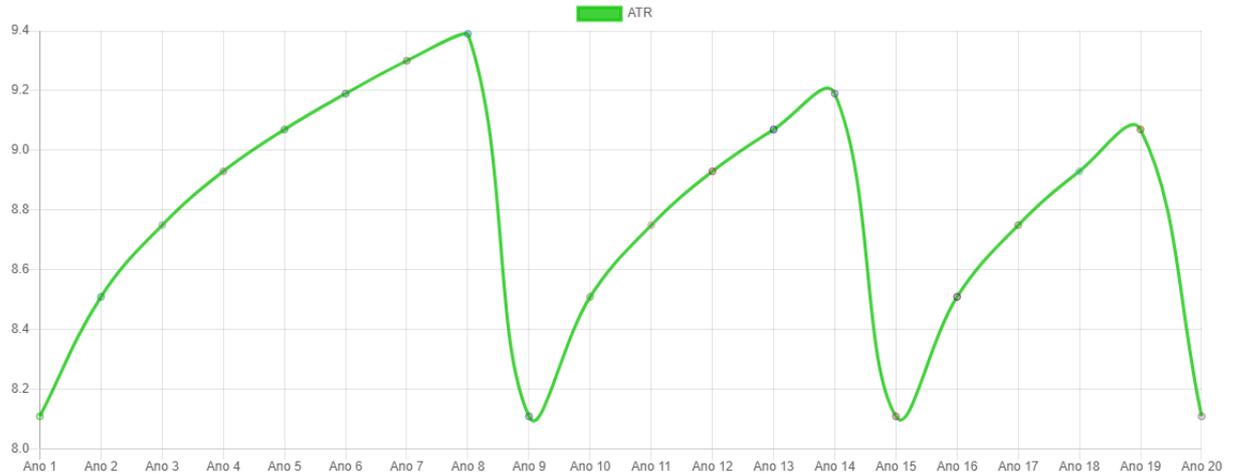
Figura 25 - Área trincada prevista na estrutura de análise



Fonte: Própria autora (2021).

O afundamento de trilha de roda também chegou a seu valor máximo no ano 8, com 9,39 mm, conforme por ser visualizado na Figura 26.

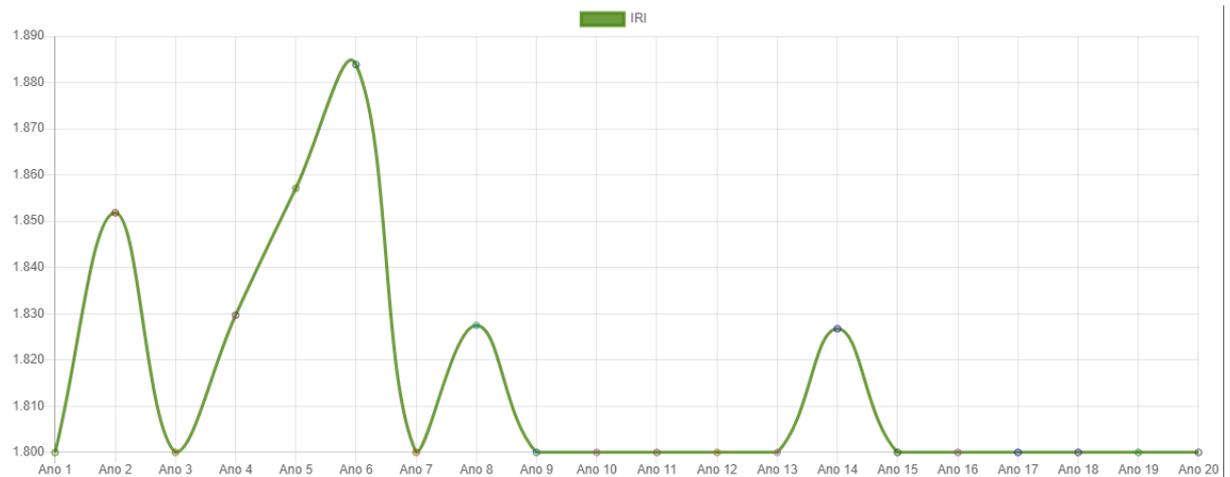
Figura 26 - Afundamento de trilha de roda previsto na estrutura de análise



Fonte: Própria autora (2021).

A irregularidade longitudinal da via teve seu maior valor no sexto ano, chegando a 1,88 m/km. Dos 20 anos de projeto, apenas em seis deles o valor de IRI se manteve acima do valor mínimo previsto, conforme mostra a Figura 27.

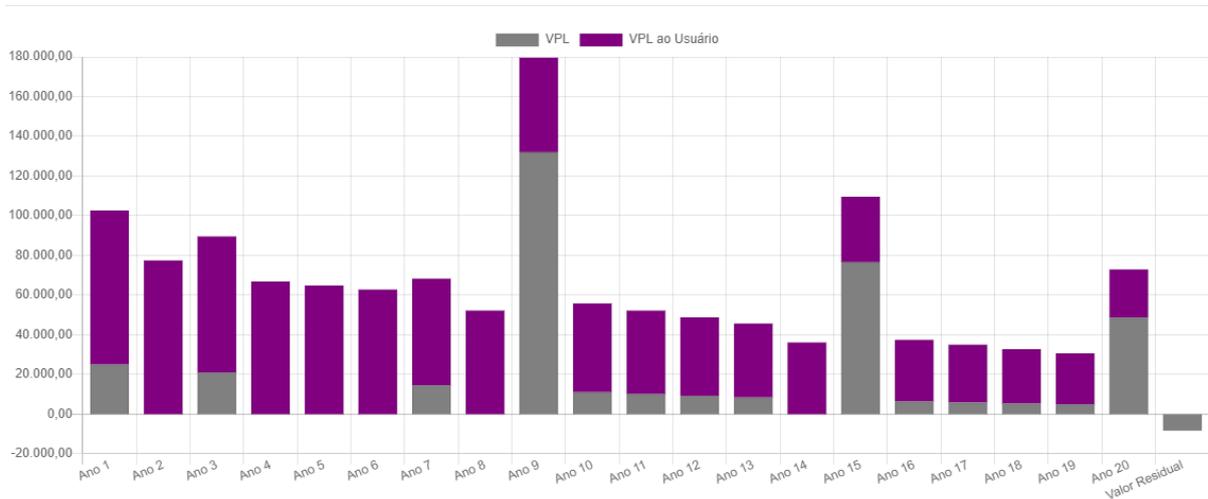
Figura 27 - Irregularidade longitudinal prevista na estrutura de análise



Fonte: Própria autora (2021).

Na Figura 28 é possível visualizar os VPLs referentes aos custos de manutenção e aos custos aos usuários ao longo do período de projeto.

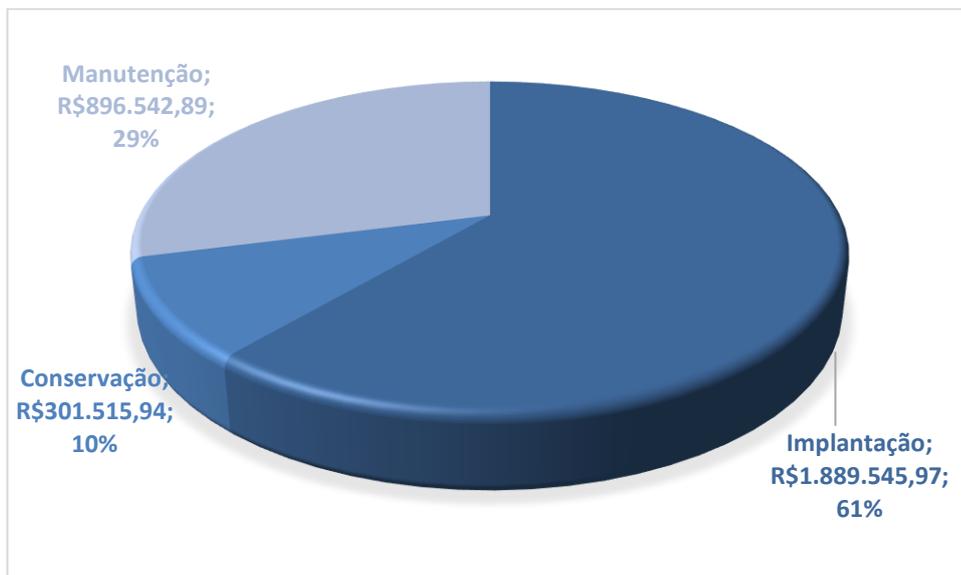
Figura 28 - VPL ao longo do período de projeto



Fonte: Própria autora (2021).

A Figura 29 mostra a distribuição dos custos da estrutura de análise para o período de projeto total. Os custos de implantação, incluídos aqui custos de construção e de transporte dos materiais de construção corresponderam a 61% do valor total. Já os custos de manutenção, compreendendo as técnicas T4 (Reabilitação média – Fresagem 5 cm + recape 5 cm) e T5 (Reabilitação pesada – Reconstrução), corresponderam a 29% do valor dos custos. Por fim, os custos de conservação, que incluem as técnicas T2 (Manutenção preventiva – MRAF) e T3 (Reabilitação leve – Reperfilagem 2 cm) corresponderam a 10% do valor total.

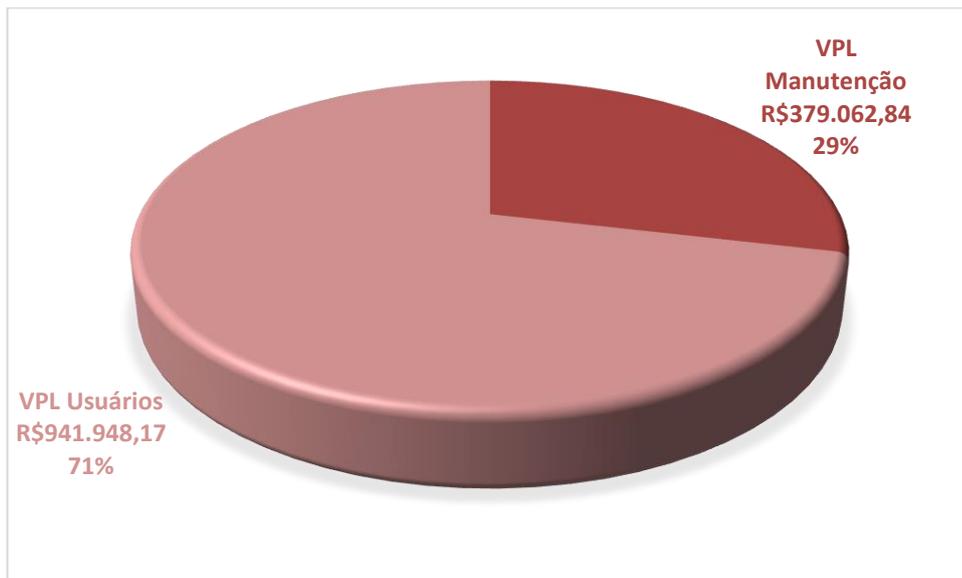
Figura 29 - Distribuição de custos



Fonte: Própria autora (2021).

Já a Figura 30 mostra como ficou a divisão do VPL referente à manutenção – compreendendo, aqui, os custos de conservação e manutenção – e aos usuários. Conforme pode ser verificado, o custo dos usuários, mesmo tendo sido avaliado apenas em relação ao consumo adicional de combustível, corresponde à maior parcela, sendo responsável, nesse caso, por 71% dos custos de manutenção da rodovia.

Figura 30 - Distribuição do VPL



Fonte: Própria autora (2021).

5.2.2 Resultados obtidos em Artusi (2020)

Considerando as características da estrutura de análise e os materiais previamente descritos, Artusi (2020) realizou o dimensionamento da rodovia no *software* Medina e, posteriormente, no HDM-4, a fim de comparação entre as duas metodologias. Todos os custos unitários utilizados pelo autor foram retirados das composições das planilhas Sicro, com referência em abril de 2019 e da ANP. Na Tabela 5 é possível visualizar o custo de implantação da rodovia.

Tabela 5 - Custo de implantação obtido por Artusi (2020)

Material	Custo (R\$)
Concreto asfáltico	988.666,50
Material granular	846.192,00
Imprimação	76.006,00
Pintura de ligação	25.608,00
Total	1.936.472,50

Fonte: Adaptado de Artusi (2020).

As estratégias de manutenção adotadas pelo autor correspondem a um microrrevestimento asfáltico na situação em que a porcentagem de área trincada fosse menor que 20 e considerando que a deformação permanente não tivesse atingido 10 mm. Em situação similar à anterior, porém considerando que a área trincada fosse maior que 20%, a estratégia adotada foi a de fresagem de 5 cm do pavimento seguido de recomposição. Por fim, nas situações em que a deformação permanente ultrapassasse os 10 mm, um reforço estrutural seria executado. Os custos referentes à necessidade dessas técnicas encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Custo de manutenção obtido por Artusi (2020)

Serviço	Custo (R\$)
Fresagem	46.545,84
Pintura de ligação	30.412,80
Concreto asfáltico	1.205.313,42
Total	1.282.272,06

Fonte: Adaptado de Artusi (2020).

Já para a rotina de conservação, Artusi (2020) considerou um custo anual a partir do segundo ano, iniciando em R\$ 5.000,00, com um acréscimo de 15% ao ano. Essa contagem ocorre até o momento em que uma estratégia de manutenção ou reabilitação é executada, retornando, após, a valores semelhantes aos iniciais. Essa rotina inclui serviços de tapa buraco, selagem de trincas, remendo profundo e reparos superficiais. A computação dos custos de conservação anuais se encontra na Tabela 7.

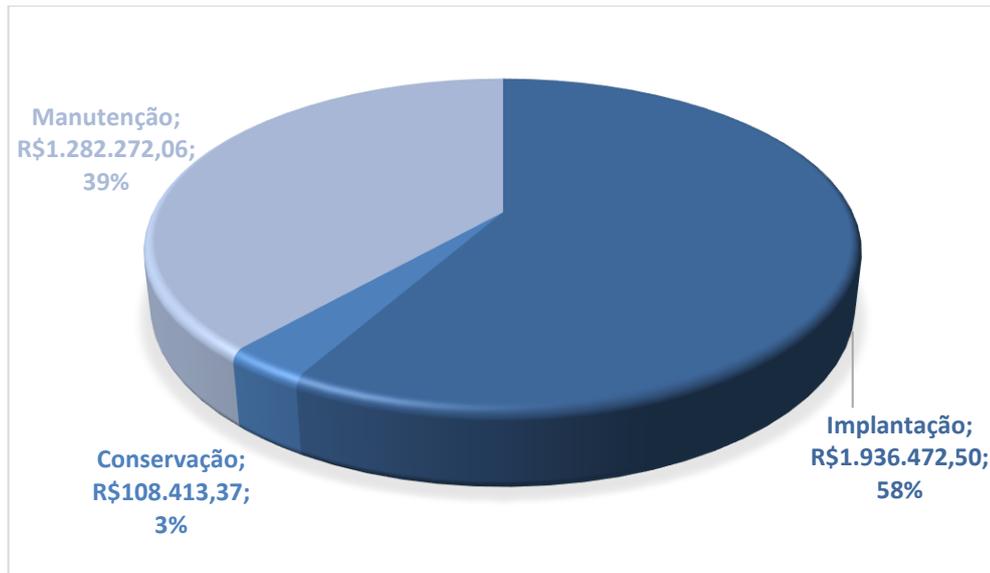
Tabela 7 - Custo de conservação obtido por Artusi (2020)

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

Fonte: Adaptado de Artusi (2020).

A Figura 31 mostra a distribuição dos custos da estrutura de análise pela metodologia de Artusi (2020). Novamente, o custo de implantação compôs a maior parcela de todas, sendo responsável por 58% dos custos da estrutura. A manutenção foi responsável por 39% e a conservação, por 3%.

Figura 31 - Distribuição de custos para a solução de Artusi (2020)



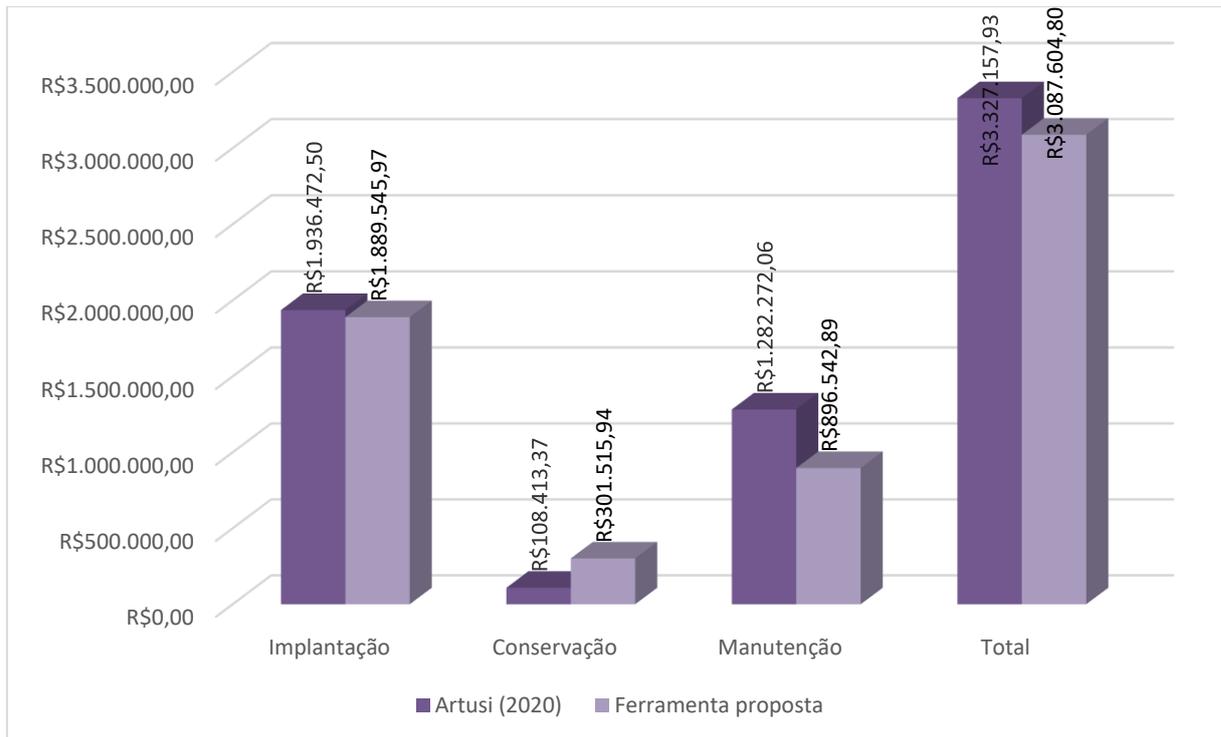
Fonte: Própria autora (2021).

Os custos ao usuário calculados pelo autor não foram objeto de comparação nesse trabalho. Para valorar esse item, o autor fez uso do HDM-4, o que acarretou custos muito mais elevados, por se tratar de uma metodologia muito mais complexa, que analisa esses custos em muitos mais aspectos do que os avaliados nessa dissertação.

5.2.3 Comparação entre as metodologias

De forma geral, os dois trabalhos encontraram uma variação pequena em seus resultados finais, na ordem de R\$ 239.553,13. A Figura 32 mostra a comparação entre os valores obtidos nos dois trabalhos, em cada uma de suas etapas.

Figura 32 - Comparação entre os resultados obtidos de custos no ciclo de vida



Fonte: Própria autora (2021).

Os custos de implantação obtiveram valores muito parecidos, o que se deve ao fato de a estrutura ter sido dimensionada inicialmente pela mesma metodologia em ambos os casos. Já quanto aos serviços de conservação e manutenção, pode-se avaliar que, na ferramenta proposta nesse trabalho, os custos de conservação foram quase três vezes maiores do que aqueles obtidos por Artusi (2020), o que possibilitou que os custos de manutenção fossem reduzidos em quase 1,5 vez, em comparação.

5.2.4 Análise de estruturas de tráfego leve e médio

A fim de avaliar o desempenho da ferramenta em projetos contendo tráfego leve e médio, foram dimensionadas mais duas estruturas no Medina com período de projeto igual a dez anos e com os mesmos materiais utilizados nas estruturas previamente dimensionadas, variando-se apenas a espessura das camadas e o tráfego, conforme demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Características das estruturas

Estrutura	Espessura (cm)			VDM Veículos Leves	VDM Veículos Pesados
	Revestimento	Base	Sub-base		
Tráfego leve	6,50	20,00	30,00	213	61
Tráfego médio	10,00	25,00	30,00	1069	301

Fonte: Própria autora (2021).

O tráfego foi selecionado de acordo com a classificação de vias determinada pela Instrução de Projeto 04 da Prefeitura Municipal de São Paulo, como pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 9 - Classificação das vias segundo função

FUNÇÃO PREDOMINANTE	TRÁFEGO PREVISTO	VIDA DE PROJETO (ANOS)	VOLUME INICIAL DA FAIXA MAIS CARREGADA		N	N _{CHARACTERÍSTICO}
			VEÍCULO LEVE	CAMINHÕES E ÔNIBUS		
Via Local	Leve	10	100 a 400	4 a 20	2,7 x 10 ⁴ a 1,5 x 10 ⁵	1 x 10 ⁵
Via Local e Coletora	Médio	10	401 a 1500	21 a 100	1,4 x 10 ⁵ a 6,8 x 10 ⁵	5 x 10 ⁵

Fonte: Prefeitura Municipal de São Paulo (2004).

Em ambos os projetos, foi possível observar que, ao contrário da estrutura analisada anteriormente, em que as manutenções foram guiadas principalmente pela área trinada, nestas estruturas o afundamento de trilha de roda foi o defeito mais próximo de alcançar o gatilho de manutenção ao longo do período de projeto.

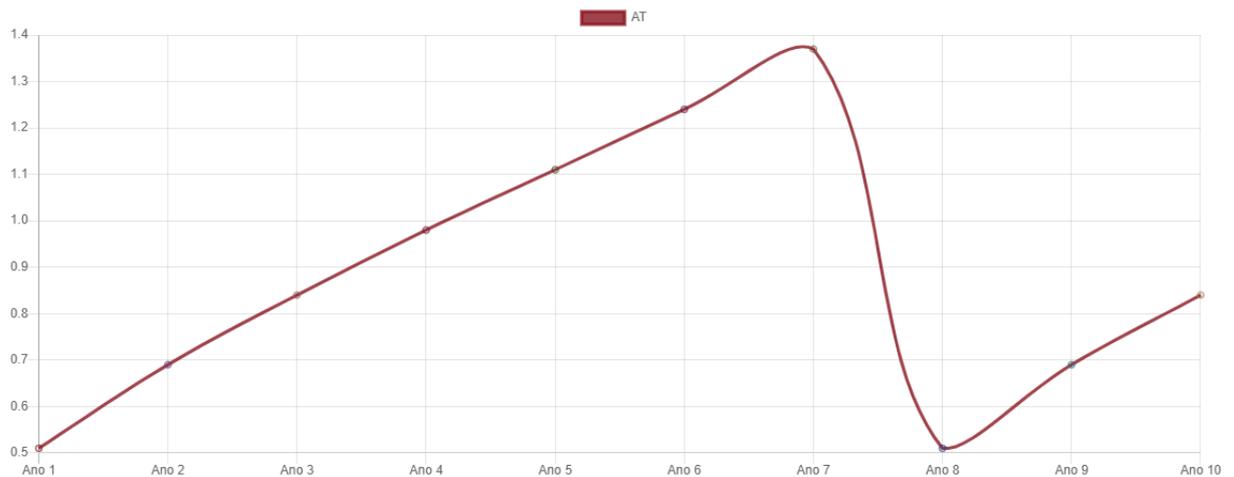
Os resultados obtidos estão apresentados nos próximos tópicos.

5.2.4.1 Tráfego Leve

Para o projeto de tráfego leve, ao longo dos 10 anos de período de projeto, obteve-se um VPL total igual a R\$ 201.123,31, sendo desses R\$ 181.368,19 referentes às estratégias de conservação e manutenção, R\$ 42.860,03 referente aos custos de usuário e R\$ 23.104,90 de valor residual.

A área trincada manteve-se em valores baixos durante todo o período de projeto, conforme pode ser visualizado na Figura 33.

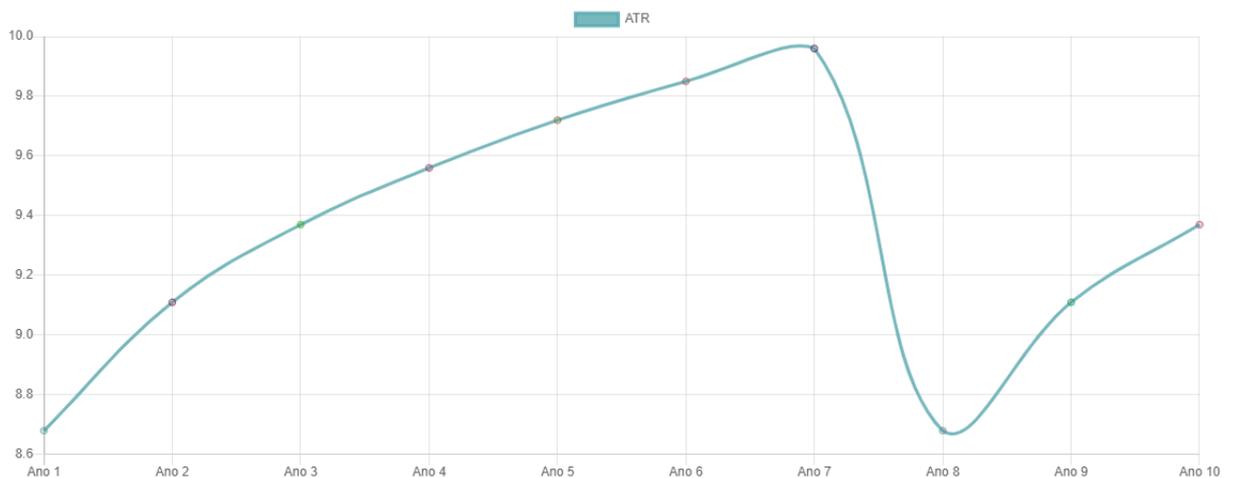
Figura 33 - Área trincada prevista para tráfego leve



Fonte: Própria autora (2021).

O afundamento de trilha de roda teve seu pico no ano 7, quando atingiu 9,96 mm e então uma estratégia de reabilitação média ocorreu, restabelecendo seu valor inicial, conforme Figura 34.

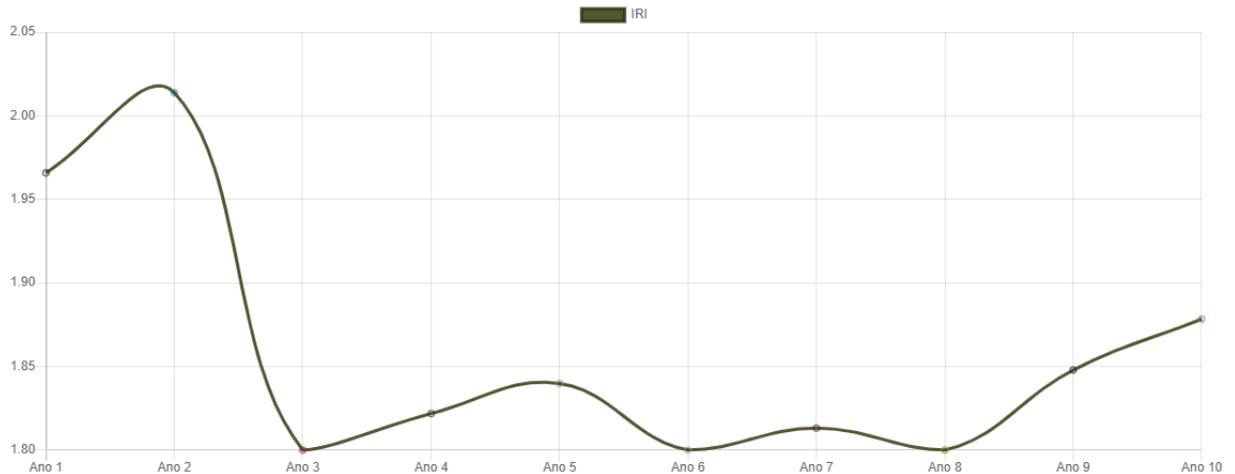
Figura 34 - Afundamento de trilha de roda previsto para tráfego leve



Fonte: Própria autora (2021).

A irregularidade longitudinal manteve-se em valores baixos durante a maior parte do período de projeto, tendo seu maior valor no ano 2, atingindo 2,01 m/km, momento em que foi executada uma estratégia de manutenção preventiva. A Figura 35 mostra sua evolução no período.

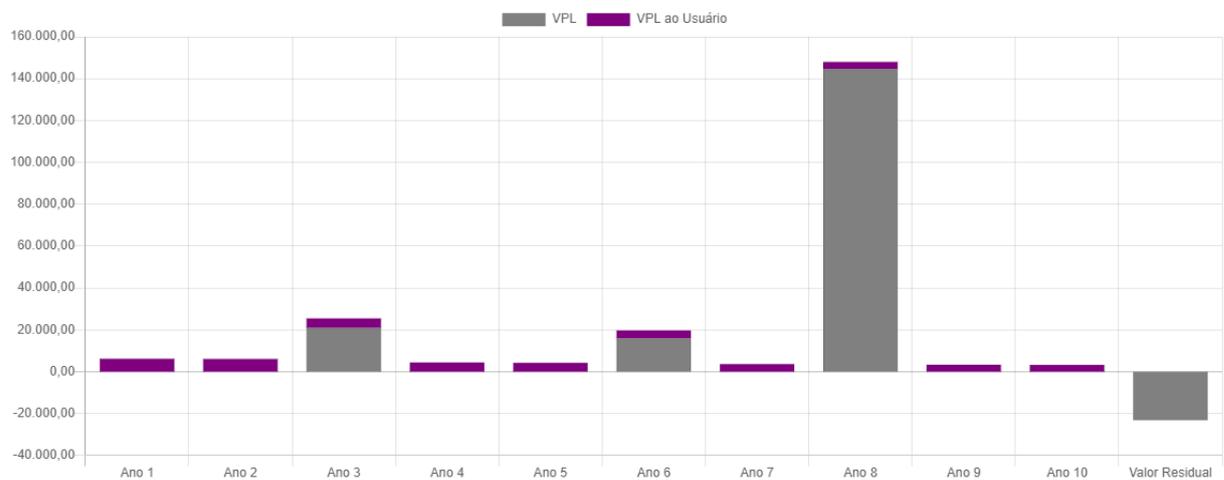
Figura 35 - Irregularidade longitudinal prevista para tráfego leve



Fonte: Própria autora (2021).

O VPL e VPL ao usuário ao longo de todo o período de projeto podem ser visualizados na Figura 36, onde pode-se observar que os valores de execução das estratégias foram superiores aos custos do usuário.

Figura 36 - VPL previsto ao longo do projeto de tráfego leve



Fonte: Própria autora (2021).

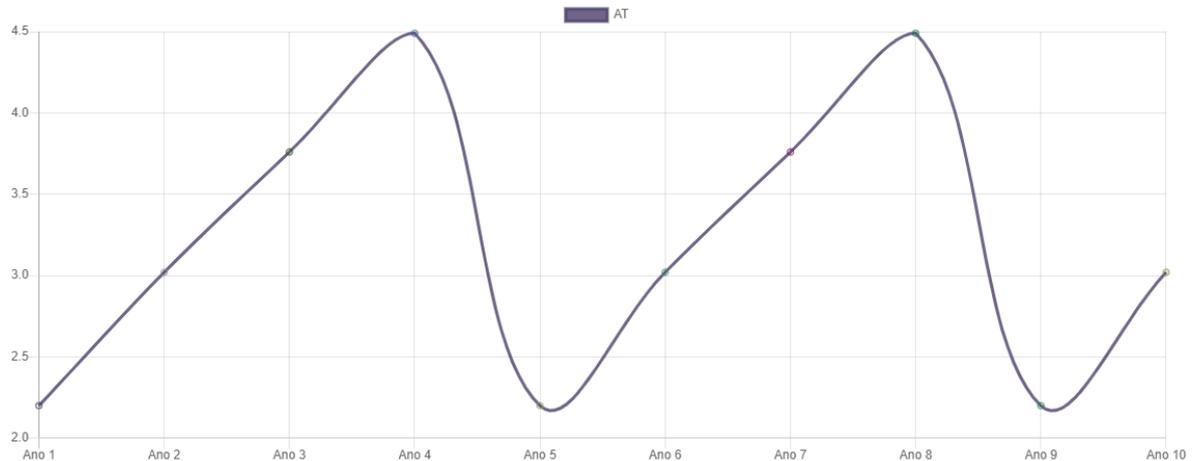
5.2.4.2 Tráfego Médio

Para o projeto de tráfego médio, ao longo dos 10 anos de período de projeto, obteve-se o valor de R\$ 359.263,95 referente às estratégias de conservação e manutenção, R\$ 210.337,61

referente aos custos dos usuários e R\$ 20.476,06 de valor residual, totalizando um VPL total de R\$ 549.125,51.

A evolução da área trincada do projeto pode ser visualizada na Figura 37.

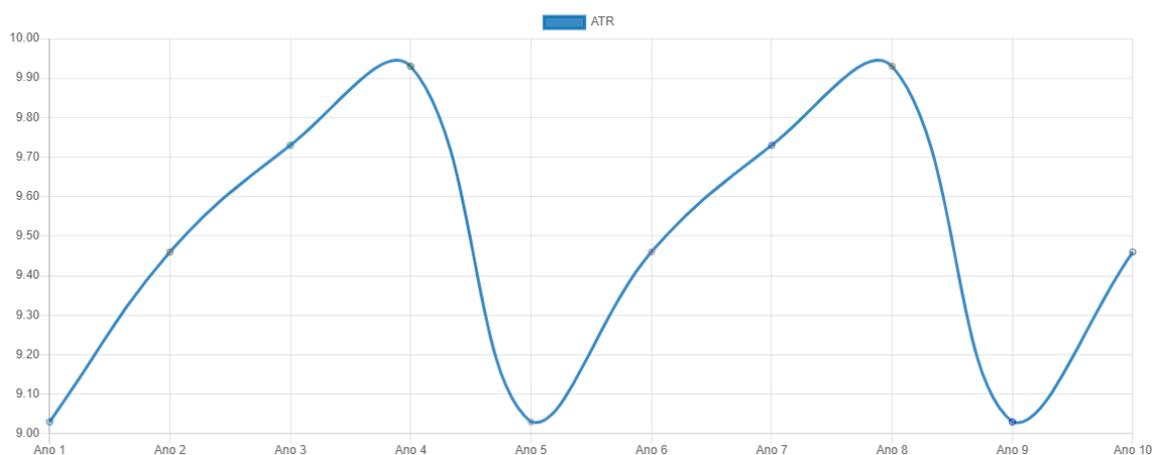
Figura 37 - Área trincada prevista para tráfego médio



Fonte: Própria autora (2021).

O afundamento de trilha de roda atingiu seu pico em dois momentos, no ano 4 e no ano 8, momentos que foram sucedidos por uma estratégia de reabilitação média para restabelecer seu valor, conforme mostrado na Figura 38.

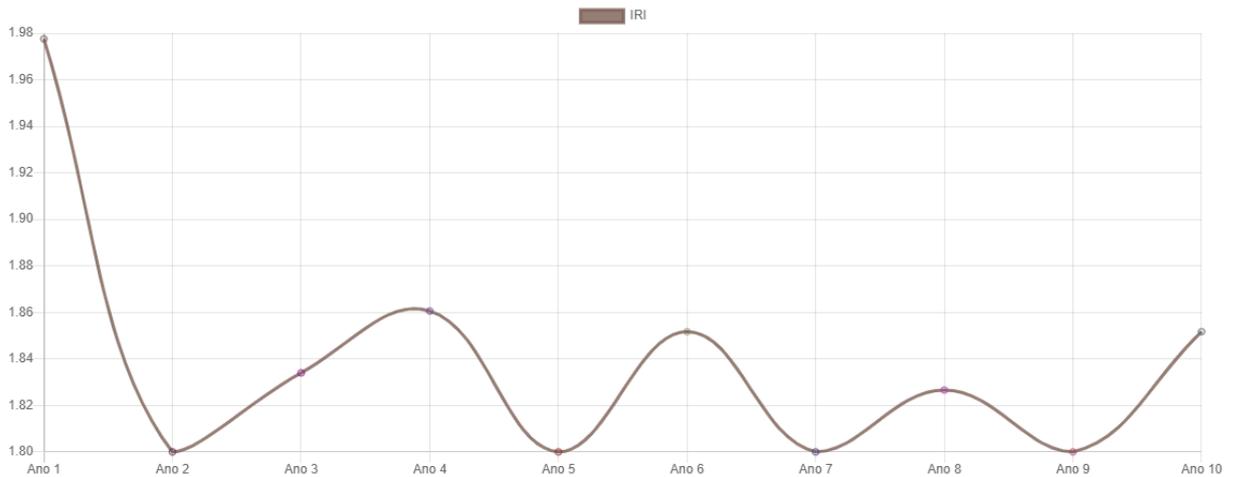
Figura 38 - Afundamento de trilha de roda previsto para tráfego médio



Fonte: Própria autora (2021).

A irregularidade longitudinal manteve-se abaixo de 2 m/km durante todo o período de projeto, como pode ser visto na Figura 39.

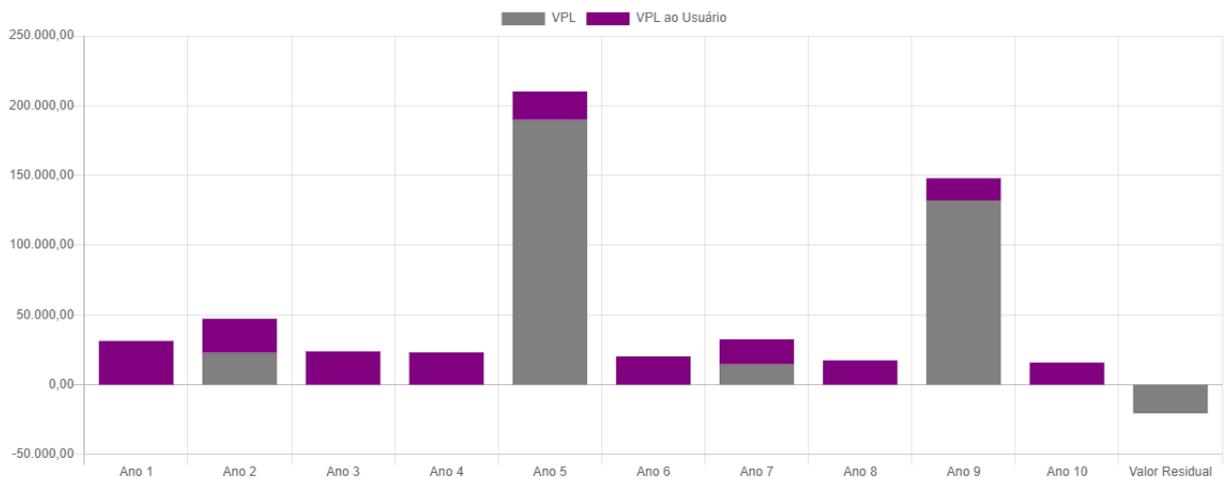
Figura 39 - Irregularidade longitudinal prevista para tráfego médio



Fonte: Própria autora (2021).

O VPL previsto para todo o período de projeto, assim como o VPL ao usuário, está representado na Figura 40.

Figura 40 - VPL previsto ao longo do projeto de tráfego médio



Fonte: Própria autora (2021).

Após a análise dos dois projetos, pode-se verificar que, em ambos os casos, a aplicação de alguma estratégia de manutenção ou reabilitação fez com que o custo aos usuários diminuísse ou se mantivesse estável, o que demonstra a importância de se manter a rodovia em níveis de trafegabilidade adequados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais do trabalho serão apresentadas neste capítulo, baseadas nas análises e discussões realizadas previamente. Ademais, algumas recomendações para pesquisas futuras acerca dos assuntos abordados serão apresentadas.

6.1 Conclusão

Essa dissertação teve como objeto principal desenvolver uma ferramenta de fácil compreensão pelos gestores de rodovias, que realizasse a análise de custo do ciclo de vida de pavimentos flexíveis sob uma abordagem probabilística e que executasse uma otimização de estratégias de manutenção e reabilitação através de um algoritmo genético desenvolvido para esse fim. Considerando os resultados obtidos após a validação da ferramenta pelo dimensionamento de uma estrutura e comparação com os resultados obtidos em trabalho diverso, as principais conclusões obtidas serão apresentadas a seguir.

A análise de custo do ciclo de vida é muito importante para que seja possível avaliar os custos que incorrem nessas estruturas ao longo de todo seu período de projeto. Os custos de implantação costumam ser responsáveis pela maior parcela dos custos totais. Logo, essa etapa deve ser sempre avaliada com muita atenção, pois uma rodovia dimensionada de forma equivocada, que venha a acarretar menores custos de implantação pode causar impactos futuros, aumentando a necessidade de intervenções, o que irá resultar em maiores custos de manutenções e, conseqüentemente, maiores custos aos usuários.

Especialmente em momentos de instabilidade financeira, em que o valor dos insumos sofre grandes variações, se torna de grande necessidade uma análise probabilística, que contemple essas variações ao longo dos anos e consiga mostrar como essas variações podem impactar no valor final de uma estrutura. Nesse sentido, a simulação de Monte Carlo se mostra como uma importante aliada nesse tipo de análise.

Os custos relativos à conservação e manutenção da rodovia se mostraram de grande relevância no montante total, especialmente considerando-se os usuários da via. Apesar de, nessa dissertação, os custos aos usuários terem sido abordados de maneira bastante simplificada devido à dificuldade de generalização desses dados para inserção na ferramenta, foi possível observar que eles representam parcela muito importante a ser considerada nas análises. Vias que são levadas ao seu extremo em termos estruturais e de desempenho podem, além de

necessitarem de intervenções mais complexas e onerosas, representar custo muito elevado ao usuário. Por outro lado, vias que são mantidas em níveis adequados de desempenho, apesar de não significarem algum tipo de benefício ao usuário, fazem com que seus custos de manutenção constantes, não acarretando nenhum tipo de penalização.

Por fim, a análise de custo do ciclo de vida de rodovias se mostrou uma importante ferramenta para ser utilizada no processo gerencial. Apesar da difícil generalização dos dados, o que resultou em algumas equações mais simplificadas, a ferramenta proposta nessa dissertação se mostrou uma interessante aliada ao uso do Medina para análise de custo do ciclo de vida e otimização de rodovias.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, identificaram-se alguns tópicos que podem ser abordados de forma mais profunda em pesquisas futuras, servindo de complementação para a pesquisa realizada, que seguem comentados abaixo:

- a) O MeDiNa, método de dimensionamento brasileiro que será adotado pelo DNIT, ainda se encontra em desenvolvimento, porém não contempla a previsão da irregularidade do pavimento. Logo, sugere-se que seja feito um estudo mais aprofundado correlacionando os parâmetros fornecidos pelo Medina com os modelos de previsão de IRI já existentes, de forma a se obter uma previsão de IRI mais precisa e condizente com a realidade das rodovias brasileiras;
- b) Por se tratar de uma ferramenta mais genérica, os custos aos usuários foram abordados de forma simplificada. Sugere-se que, em trabalhos futuros, esses custos sejam incluídos em seus aspectos mais regionalizados também, contemplando parcelas como o custo do tempo dos usuários e custo do risco de acidentes;
- c) A variável ambiental não foi contemplada nessa pesquisa. Sabendo-se da relevância dos impactos ambientais causados pela implantação de rodovias, sugere-se a inclusão dessa variável em trabalhos futuros, realizando-se conjuntamente à análise de custo do ciclo de vida, a análise de ciclo de vida dos pavimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. **Preços de distribuição de produtos asfálticos**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-distribuicao-de-produtos-asfalticos>> Acesso em: fev. 2021.

_____. **Preços de distribuição de combustíveis**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-distribuicao-de-combustiveis>> Acesso em: fev. 2021.

AKBARIAN, M. et al. **Probabilistic Characterization of Life-Cycle Agency and User Costs: Case Study of Minnesota**. Transportation Research Board: Washington, 2017, p. 93-101. DOI 10.3141/2639-12.

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice**. AASHTO, 2008. ISBN 978-1-56051-423-7.

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: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/1a-semana-do-planejamento/13CalibraoeaferiodomodeloHMD4.pdf>> Acesso em: ago. 2020.

ARTUSI, R. A. **Análise do custo de ciclo de vida de pavimentos flexíveis a partir de uma abordagem mecanicista-empírica**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2020.

BAGDATLI, M. E. C. **Fuzzy Logic-Based Life-Cycle Cost Analysis of Road Pavements**. American Society of Civil Engineers, 2018. DOI 10.1061/JPEODX.0000081.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. ISBN 978-85-86238-56-7.

BUENO, L.D. **Avaliação deflectométrica e de rigidez: estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 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 Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

BURKE, E. K.; KENDALL, G. **Search Methodologies**. 2. ed. New York: Springer Science+Business Media, 2014. ISBN 978-1-4614-6940-7.

CANCIAN, G. A. **Heuristic Based Optimisation of Pavement Management Scheduling**. 2015. Tese (Doutorado em Filosofia) – Griffith School of Engineering, Griffith University, Australia, 2015.

CASTRO, R. E. de. **Otimização de Estruturas com Multi-objetivos Via Algoritmos Genéticos de Pareto**. 2001. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CHEN, J.; YANG, C. H.; LEE, C. **Field evaluation of porous asphalt course for life-cycle cost analysis**. Construction and Building Materials, 2019. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.072.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018: Relatório Gerencial**. Brasília: CNT; Brasília: SEST SENAT, 2018.

_____. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019**. Brasília: CNT; Brasília: SEST SENAT, 2019.

_____. **Transporte Rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília: CNT, 2017.

DALLA VALLE, P.; THOM, N. **Inclusion of design variability in flexible highway pavement life-cycle cost analysis**. Institution of Civil Engineers, 2016. DOI 10.1680/jcoma.16.00045.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT IPR 710: Manual de Conservação Rodoviária**. 2 ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2005.

_____. **DNIT IPR 719: Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006a.

_____. **DNIT IPR 720: Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006b.

_____. **DNIT IPR 745: Manual de Gerência de Pavimentos**. Rio de Janeiro: DNIT, 2011.

_____. **Memorando Circular nº 12/2012/DIREX**. 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/documentos/copy_of_MemorandoCircularn122012DIREX.pdf> Acesso em: set. 2020.

_____. **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes**. Brasília: DNIT, 2017.

_____. **Portaria nº 1977**. 2017. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/documentos/Portaria1977.2017DGPProdutosasfálticos.pdf>> Acesso em: set. 2020.

_____. **Ofício Circular nº 3374/2020/ACE – DPP**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/OficioCircularN33742020ACEDPPDPPDNITSEDE.pdf>> Acesso em: set. 2020.

_____. **Sistemas de Custos – Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO (Janeiro de 2017 a Julho de 2020)**. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro/sul/sul>> Acesso em: jan. 2021.

DEVMEDIA. **Introdução ao MongoDB**. [S.I.] [2014?]. Disponível em: <<https://www.devmedia.com.br/introducao-ao-mongodb/30792>> Acesso em: 23 jun. 2020.

DHILLON, B. S. **Life Cycle Costing for Engineers**. New York: CRC Press, 2010.

Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. **IPR**, Rio de Janeiro, 11 abr. 2014. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/pesquisa>. Acesso em: 10 out. 2019.

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

FRANCO, F. A. C. de P.; MOTTA, L. M. G. **Guia para utilização de Método Mecanístico-Empírico**: Apresentação dos programas desenvolvidos. Rio de Janeiro: COPPE; Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

FWA, T. F. **The Handbook of Highway Engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2006. ISBN 0-8493-1986-2.

Genetic Algorithms. **Tutorials Point**, 2016. Disponível em: <https://www.tutorialspoint.com/genetic_algorithms/index.htm> Acesso em: 15 set. 2020.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. ISBN 978-85-386-0071-8

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GUO, F.; GREGORY, J.; KIRCHAIN, R. **Probabilistic Life-Cycle Analysis of Pavements Based on Simulation Optimization**. Transportation Research Board: Washington, 2019. DOI 10.1177/0361198119838984.

HAN, D. et al. **Management Scheme of Road Pavements Considering Heterogeneous Multiple Life Cycles Changed by Repeated Maintenance Work**. Journal of Civil Engineering, 2016. DOI 10.1007/s12205-016-1461-x.

HASAN, U.; WHYTE, A.; JASSMI, H. A. **Critical Review and Methodological Issues in Integrated Life-Cycle Analysis on Road Networks**. Journal of Cleaner Production, 2018. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.09.148.

HEUSER, C. A.; **Projeto de Banco de Dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. ISBN 9788577804528. *E-book*.

JAWAD, D.; OZBAY, K. Probabilistic Lifecycle Cost Optimization for Pavement Management at the Project Level. *In*: 85th ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2006, Washington, DC. **Anais** [...]. Washington, DC: National Academy of Science, 2006. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/3931/08450e2c3d29579c5529e135377d5375323b.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2019.

JÚNIOR, J. G. de S. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

KERALI, H. G.. **Overview of HDM-4**. Paris: The World Road Association, 2000.

KERALI, H. R. The role of HDM-4 in road management. In: **Proceedings, First Road Transportation Technology Transfer Conference in Africa, Ministry of Works, Tanzania**. 2001. p. 320-333.

LEE, J.; MADANAT, S. **A joint bottom-up solution methodology for system-level pavement rehabilitation and reconstruction**. Transportation Research Part B, 2015. DOI 10.1016/j.trb.2015.05.001

LERCH, R. L. **Previsão de irregularidade pós-recapê em rodovias do RS: ajuste do modelo HDM-4**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

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

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. Brasília: MMA, 2011.

MIRANDA, M.N. **Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicações**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2007.

MIRZADEH, I.; BIRGISSON, B. **Accommodating energy price volatility in life cycle cost analysis of asphalt pavements**. Journal of Civil Engineering and Management, 2015. DOI 10.3846/13923730.2014.945951.

OLIVEIRA, R. A. de. **Especificação e Implementação de um Algoritmo Genético para Otimização de Projetos de Iluminação Pública**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. **Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication**. Scientometrics, 2015. DOI 10.1007/s11192-015-1744-x.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **Dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego leve e médio**. IP-04. São Paulo, 2004.

RAMAKRISHNAN, R.; GEHRKE, J. **Sistemas de Gerenciamento de Banco de Dados**. Tradução Célia Taniwake e João Eduardo Nóbrega Tortello. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill Interamericana do Brasil, 2008. ISBN 978-85-7726-027-0.

RARDIN, R. L.; UZSOY, R. **Experimental Evaluation of Heuristic Optimization Algorithms: A tutorial**. Journal of Heuristics, 2001.

ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R. W.; JORDAN, B. D. **Princípios de Administração Financeira**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

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

SANTOS, J.; FERREIRA, A.; FLINTSCH, G. **A multi-objective optimization-based pavement management decision-support system for enhancing pavement sustainability**. Journal of Cleaner Production, 2017. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.07.027.

_____. **An adaptive hybrid genetic algorithm for pavement management**. International Journal of Pavement Engineering, 2017. DOI 10.1080/10298436.2017.1293260

SHAHIN, M. Y. **Pavement management for airports, roads, and parking lots**. v. 501. New York: Springer, 2005.

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

SWEL, O.; GREGORY, J.; KIRCHAIN, R. **Probabilistic Life-Cycle Cost Analysis of Pavements: Drivers of Variation and Implications of Context**. Journal of the Transportation Research Board: Washington, 2015, p. 47-55. DOI 10.3141/2523-06.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Life-Cycle Cost Analysis Primer**. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2002.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Mechanistic Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice**. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2008.

WALLS III, J.; SMITH, M. R. **Life Cycle Cost Analysis in Pavement Design – Interim Technical Bulletin**. FHWA-SA-98-079. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1998.

WANG, Z.; WANG, H. **Deterministic and probabilistic life-cycle cost analysis of pavement overlays with different pre-overlay conditions**. Road Materials and Pavement Design, 2017. DOI 10.1080/14680629.2017.1374996.

_____. **Probabilistic Modeling of Performance-Related Pay Adjustment for In-Place Air-Void Contents of Asphalt Pavements**. American Society of Civil Engineers, 2016. DOI 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000330.

WHITLEY, D. **A genetic algorithm tutorial**. Fort Collins: Colorado State University, 1994.

WILDE, W. J.; WAALKES, S.; HARRISON, R. **Life Cycle Cost Analysis of Portland Cement Concrete Pavements**. Texas Department of Transportation, Texas, 1999.

WU, D.; YUAN, C.; LIU, H. **A risk-based optimisation for pavement preventive maintenance with probabilistic LCCA: a Chinese case.** International Journal of Pavement Engineering, 2015. DOI 10.180/10298436.2015.1030743.

YANG, C.; REMENYTE-PRESCOTT, R.; ANDREWS, J. D. **Pavement Maintenance Scheduling using Genetic Algorithms.** International Journal of Performability Engineering, 2015.

YU, B.; LU, Q.; XU, J. **An improved pavement maintenance optimization methodology: Integrating LCA and LCCA.** Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2013. DOI 10.1016/j.tra.2013.07.004.

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



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

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