



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MODELO DE OTIMIZAÇÃO MECANICISTA E FUNCIONAL APLICADO AO
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS

Diewelly Maria Silva

São Cristóvão

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MODELO DE OTIMIZAÇÃO MECANICISTA E FUNCIONAL APLICADO AO
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS

Diewelly Maria Silva

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil
como requisito parcial à obtenção do
título de MESTRE EM ENGENHARIA
CIVIL

Orientador: Dr. Fernando Silva Albuquerque

Coorientador: Dr. Alcigeimes Batista Celeste

Agência Financiadora: CAPES

São Cristóvão

2024

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

S586m Silva, Diewelly Maria
Modelo de otimização mecanicista e funcional aplicado ao dimensionamento de pavimentos semirrígidos / Diewelly Maria Silva ; orientador Fernando Silva Albuquerque. - São Cristóvão, 2024.
110 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, 2024.

1. Pavimentos. 2. Otimização estrutural. 3. Algoritmos. 4. Análise estrutural (Engenharia). 5. Estudos de viabilidade. I. Albuquerque, Fernando Silva Orient. II. Título.

CDU 693.7

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DIEWELLY MARIA SILVA

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 29 DE AGOSTO DE 2024.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Fernando Silva Albuquerque
Orientador
PROEC/UFS

Dr. Alcigeimes Batista Celeste
Presidente - Coorientador
PROEC/UFS

1.o Examinador - Interno
Dra. Debora de Gois Santos
PROEC/UFS/SE

2.o Examinador - Externo
Dr. Francisco Dalla Rosa
UPF/RS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, minha mãe Luciene, meu pai Luiz Dermeval (in memorian), e meus irmãos Dernei e Diego, pelo amor, apoio incondicional e incentivo em cada etapa da minha jornada acadêmica. Aos meus sobrinhos, por iluminarem minha vida com alegria e leveza, tornando os momentos desafiadores mais suportáveis.

Ao meu companheiro, Josenaldo, minha gratidão profunda por todo o apoio, paciência e compreensão ao longo desta caminhada. Sua presença foi fundamental para que eu seguisse em frente, mesmo nos momentos mais difíceis. À minha filha de quatro patas, Amora, pelo conforto e companhia inestimáveis, sendo um verdadeiro alívio emocional durante essa jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Silva Albuquerque, por quem nutro grande respeito e estima, expresso minha gratidão pela confiança depositada, pelo incentivo constante e pelo suporte essencial ao longo desta caminhada. Sou imensamente grata por todo o conhecimento compartilhado, pela paciência demonstrada, pelas correções detalhadas permitindo que esta pesquisa fosse concluída com sucesso.

Ao meu coorientador, Dr. Alcigeimes Batista, registro minha sincera gratidão. Sua sabedoria, dedicação e apoio foram indispensáveis para que eu superasse os desafios e atingisse este importante objetivo. Agradeço por toda a orientação, pelo aprendizado enriquecedor e pelo suporte fundamental nesta trajetória.

Aos membros da banca, Dr. Debora de Gois Santos (PROEC) e Dr. Francisco Dalla Rosa (UPF), sou grata pelas valiosas contribuições, críticas e sugestões que enriqueceram este trabalho e me ajudaram a aprimorá-lo.

À CAPES, pelo apoio financeiro essencial para a realização desta pesquisa e para a conclusão do meu mestrado, possibilitando que esta etapa fosse cumprida com maior segurança e dedicação.

Por fim, a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que eu acreditasse em mim mesma, deixo minha gratidão sincera e eterna. O apoio, incentivo e palavras encorajadoras de cada uma delas foram fundamentais para que esta conquista se tornasse realidade.

RESUMO

As malhas rodoviárias desempenham papel preponderante no transporte de cargas e passageiros em todo o mundo, representando, conseqüentemente, a maior parcela de investimentos em infraestrutura. Sabendo-se que o dimensionamento de pavimentos interfere diretamente no Custo no Ciclo de Vida (CCV) do pavimento, a obtenção de soluções ótimas num específico cenário técnico e econômico é algo desejável. Nessa ótica, o objetivo central desta pesquisa consistiu na otimização do dimensionamento estrutural das camadas de pavimentos flexíveis e semirrígidos, levando em consideração variáveis como o tipo de estrutura, as espessuras das camadas e os custos dos materiais empregados. Para tanto, a aplicação de técnicas de otimização se revelou numa abordagem altamente eficaz na busca por um dimensionamento apropriado de pavimentos. Os algoritmos de pesquisa inteligente emergem como instrumentos valiosos na busca pelo “projeto ideal”, aquele que não apenas maximiza os benefícios proporcionados, mas também minimiza os custos associados à construção do pavimento. A implementação dessa técnica foi realizada por meio do software livre e plataforma de computação numérica Octave e integrou abordagem mecanística-empírica, funcional e econômica para otimizar as espessuras das camadas de pavimentos. O software ELSYM5 foi utilizado como sub-rotina especializada para cálculos de tensões e deformações críticas no pavimento. Os resultados dessas análises foram aplicados em modelos de previsão de desempenho para estimativa de danos e vida de serviço. A estrutura de pavimento apta do ponto de vista mecânico, também passou por análise de desempenho de Irregularidade Longitudinal (*International Roughness Index* – IRI). Levando-se em conta que as soluções possíveis seriam apenas as que tivessem viabilidade econômica, ou seja, com CCV menor que o orçamento disponível, algumas técnicas de otimização foram testadas e comparadas à solução de engenharia aplicada em um Trecho Monitorado da BR-101/SE. Dentre as quatro técnicas de otimização testadas nessa pesquisa, os algoritmos evolucionários se destacaram como uma tendência robusta e promissora, principalmente pela sua facilidade de implementação e pela obtenção da solução tecnicamente viável mais econômica entre as testadas, com economia estimada de 18% no CCV em relação à efetivamente aplicada na BR-101/SE.

Palavras-chave: Pavimentação, Dimensionamento, Otimização, Algoritmo Evolucionário, Análise Estrutural, Análise Funcional, Análise Econômica.

ABSTRACT

Road networks are critical for the global transportation of goods and passengers, accounting for the largest share of infrastructure investments. Since pavement design directly impacts the Life Cycle Cost (LCC) of pavement, achieving optimal solutions within specific technical and economic contexts is highly desirable. The primary objective of this research was to optimize the structural design of flexible and semi-rigid pavement layers, considering variables such as structural type, layer thicknesses, and material costs. Consequently, the application of optimization techniques has proven to be highly effective in achieving suitable pavement designs. Intelligent search algorithms emerge as valuable tools in the quest for the "ideal project," maximizing benefits while minimizing pavement construction costs. This technique was implemented by means of the free software and numerical computation platform Octave, integrating mechanistic-empirical, functional, and economic approaches to optimize pavement layer thicknesses. The ELSYM5 software served as a specialized subroutine for calculating critical stresses and strains in the pavement. These analysis results were evaluated using performance prediction models to estimate damage and service life. The mechanically suitable pavement structure was also subjected to a performance analysis of Roughness (International Roughness Index – IRI). Given that feasible solutions are those with economic viability, i.e., with LCC within the available budget, various optimization techniques were tested and compared to the engineering solution applied in a Monitored Section of BR-101/SE. Among the four optimization techniques tested in this research, evolutionary algorithms stood out as a robust and promising approach, primarily due to their ease of implementation and for providing the most economically viable technically feasible solution, with an estimated 18% LCC savings compared to the solution applied on BR-101/SE.

Keywords: Pavement, Design, Optimization, Evolutionary Algorithm, Structural Analysis, Functional Analysis, Economic Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Distribuição de tensões nos diferentes tipos de pavimento	18
Figura 2-Variação da serventia com o tráfego ou com o tempo decorrido de utilização da via	21
Figura 3-Tensões numa estrutura de pavimento.....	28
Figura 4-Eschema de um dimensionamento mecanístico de pavimentos	32
Figura 5-Multidirectional search	44
Figura 6-Eschema básico de um algoritmo evolucionário	50
Figura 7- Fluxograma da metodologia	52
Figura 8- Fluxograma de funcionamento da rotina de simulação-otimização	55
Figura 9- Parâmetros críticos das camadas	68
Figura 10- Impressão dos dados de entrada para sub-rotina do Elsym5	72
Figura 11- Conteúdo do arquivo de saída da rotina	73
Figura 12- Número de gerações 1ª execução	74
Figura 13- Número de gerações 2ª execução	74
Figura 14- Configuração ótima encontrada.....	74
Figura 15- Evolução da irregularidade longitudinal com o tempo	80
Figura 16 - N crítico obtido por cada método de otimização	85
Figura 17- Comparativo valores de IRI.....	86
Figura 18 - Número de gerações médio gerados pelos métodos de otimização.....	88
Figura 19- Tempo computacional médio utilizado pelos métodos de otimização	89
Figura 20-Comparativo de CCV	96
Figura 21-Comparativo de redução de custos	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Disposição e propriedades mecânicas das camadas no TMA	69
Tabela 2- Características do projeto	76
Tabela 3- Dano previsto para a camada de Binder	78
Tabela 4- Dano previsto para a camada de BGTC	78
Tabela 5-Dano previsto para a camada de Sub-base	79
Tabela 6-Dano previsto para a camada do Subleito	79
Tabela 7- Custos dos materiais	82
Tabela 8- Comparativo de espessuras do pavimento	83
Tabela 9- Comparativo de análise de desempenho	84
Tabela 10- Comparação da eficiência computacional	89
Tabela 11- Otimização a partir das espessuras mínimas das camadas (Exemplo 1).....	92
Tabela 12 - Otimização a partir das espessuras média das camadas (Exemplo 2).....	93
Tabela 13 - Otimização a partir das espessuras máxima das camadas (Exemplo 3).....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	Association of State Highway and Transportation Officials
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
ANP	Processo Analítico em Rede
APDG	Austroads Pavement Design Guide
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCV	Custo do ciclo de vida
CMA-ES	Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
HDM4	Highway Development and Management
IRI	Índice de Irregularidade Internacional
LVC	Levantamento Visual Contínuo
MDSEARCH	Multidirectional Direct Search
MET	Método de espessuras equivalentes
PCI	Índice de Condição do Pavimento
PSO	Otimização por enxame de partículas
SA	Simulated Annealing
SAPEM	South African Pavement Engineering Manual
SGBD	Sistema de gerenciamento de banco de dados
SHRP	Superpave Asphalt Pavement Research Program
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
VSA	Valor de Serventia Atual

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Contextualização	12
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 Estrutura da dissertação	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Pavimento: conceito e classificação	16
2.2 Serventia estrutural e funcional.....	20
2.2.1 Serventia funcional	20
2.2.2 Serventia estrutural	24
2.3 Conceito de dano	25
2.4 Métodos de dimensionamento: análise crítica.....	30
2.4.1 Método da resistência	31
2.4.2 Mecanístico-empírico	32
2.4.3 Funcional	35
2.5 Métodos para tomada de decisão.....	37
2.6 Métodos de otimização.....	41
2.6.1 Pesquisa direta multidirecional	43
2.6.2 Algoritmo de recozimento simulado.....	45
2.6.3 Otimização por enxame de partículas	48
2.6.4 Estratégia de evolução com adaptação de matriz de covariância	49
3. METODOLOGIA.....	52
3.1 Desenvolvimento da rotina.....	53
3.1.1 Coleta de dados.....	57
3.1.2 Processo de Desenvolvimento	57
3.1.3 Função objetivo, variáveis e restrições do projeto.....	58
3.2 Modelos de desempenho	60

3.2.1	Fadiga em Camadas Asfálticas	61
3.2.2	Esmagamento e Fadiga em Camadas Cimentadas	62
3.2.3	Cisalhamento em Camadas Granulares Finitas.....	62
3.2.4	Ruptura do Subleito	63
3.2.5	Irregularidade Longitudinal	63
3.3	Comparação dos métodos de otimização	65
3.4	Otimização de alternativas	66
3.5	Estrutura analisada	67
3.6	Validação da rotina.....	69
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	71
4.1	Interface da rotina.....	71
4.2	Avaliação de Desempenho do TMA	76
4.3	Comparação dos métodos de otimização	81
4.4	Análise de desempenho dos métodos de otimização estudados	87
4.4.1	Eficiência (tempo/gerações)	88
4.4.2	Eficácia na convergência da otimização	91
4.4.3	Métricas de desempenho.....	95
5.	CONCLUSÕES	99
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	100
	REFERÊNCIAS.....	102

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A vida útil dos pavimentos é frequentemente afetada por uma série de fatores que contribuem para sua curta durabilidade. Dentre esses fatores, destacam-se as cargas frequentes impostas pelos veículos, as condições climáticas e problemas relacionados ao dimensionamento e à execução inadequados. Portanto, é fundamental que os projetos de pavimentos sejam elaborados de forma a abordar e solucionar essas questões, enquanto a execução da obra deve assegurar a efetiva implementação do projeto. Para tanto, torna-se imprescindível a realização de uma avaliação abrangente das diferentes fases de vida útil de cada trecho viário, dentro de um sistema eficaz de gerenciamento de pavimentos.

No entanto, esta tarefa requer recursos substanciais principalmente financeiros e tempo que são normalmente limitados quando se trata de uma grande rede de pavimentos. No Brasil, o modal rodoviário é responsável pelo transporte de mais de 65% das mercadorias entre os estados e cerca de 95% dos passageiros, conforme apontado no último relatório anual (CNT, 2022). No entanto, de acordo com os dados da CNT (2022), em toda a malha pesquisada, foi observada uma piora de serventia nas rodovias com relação aos dados do ano anterior, quando a CNT identificou que 55,5% (61.311 quilômetros) da extensão encontram-se em estado Regular, Ruim ou Péssimo, representando um acréscimo de 3,3%.

Nesse contexto, a tomada de decisão eficiente emerge como um componente crítico na construção e gerenciamento de pavimentos. Albuquerque (2007) enfatiza que a tomada de decisão na pavimentação rodoviária vai além da simples otimização de custos e desempenho futuro. É imprescindível considerar a complexidade das obras, incluindo critérios financeiros, técnicos, ambientais e socioeconômicos, assegurando decisões mais informadas e abrangentes. Pesquisas como Mendonça (2014) e Nascimento (2017) enfatizam a importância de abordagens que considerem não apenas a análise mecânica, mas também a funcional.

Nos últimos cinco anos, o governo federal investiu, em média, R\$ 8,88 bilhões em infraestrutura de transporte rodoviário, incluindo despesas com manutenção, adequação, recuperação e construção (CNT, 2022). Paralelamente, as concessionárias também realizaram investimentos significativos, totalizando R\$ 7,41 bilhões no mesmo período. Apesar desses consideráveis investimentos, as rodovias apresentam problemas críticos relacionados a danos estruturais e funcionais precoces.

Uma parte significativa desse problema, como indicado pela CNT (2017), é atribuída à engenharia brasileira, que ainda depende principalmente de metodologias ultrapassadas para o

dimensionamento de obras rodoviárias. Essas abordagens antiquadas se baseiam na resistência à ruptura de materiais e consideram carregamentos monotônicos estáticos. Isso contrasta fortemente com os conceitos modernos da mecânica dos pavimentos, que levam em consideração a deformabilidade da estrutura e o impacto das cargas transitórias no acúmulo de danos ao longo da vida útil do pavimento (HUANG, 2004).

Além disso, frequentemente, as obras apresentam deficiências técnicas na execução e nos materiais, somadas a um baixo investimento em gerenciamento viário e na instalação de postos de fiscalização de carga. Esses fatores que afetam a construção viária no Brasil contribuem para a baixa durabilidade e qualidade da pavimentação, tornando necessários reparos e manutenções frequentes.

Historicamente no Brasil, os pavimentos flexíveis têm sido amplamente empregados em rodovias por serem mais econômicos e pela sua capacidade de distribuir cargas de maneira eficaz. Entretanto, observa-se atualmente um aumento na adoção de pavimentos semirrígidos em projetos rodoviários, especialmente em regiões com alto tráfego de cargas e em climas desafiadores. Embora haja menos pesquisa nessa área em comparação com outros tipos de pavimentos, como pavimentos flexíveis e rígidos, isso destaca a necessidade de mais investigação voltada para essa categoria.

A espessura das camadas do pavimento exerce um impacto direto na qualidade e no custo do pavimento (HUANG, 2004). No entanto, a realização manual dos cálculos de espessura do pavimento, visando selecionar a opção mais econômica, é um processo demorado e ineficiente. Em contrapartida, os algoritmos de otimização podem atuar como ferramentas eficazes e ágeis para avaliar diversos projetos de espessura de pavimento em um curto período, selecionando a melhor opção com o menor custo.

É importante destacar que a utilização de softwares para o dimensionamento de pavimentos tem ganhado cada vez mais destaque devido à praticidade, rapidez e precisão que oferecem. Tais ferramentas proporcionam uma abordagem moderna e eficiente para atender às demandas complexas envolvendo o projeto e a gestão de pavimentos. Além disso, os algoritmos evolutivos, baseados na teoria da evolução genética, têm sido amplamente aplicados para otimizar projetos complexos, como a otimização de espessuras de pavimentos. Trabalhos como o de Hadi e Arfiadi (2001), Pryke et al. (2006), Bassos (2021) e Tohidi, Khayat e Telvari (2022) ilustram o sucesso do uso de estratégias evolutivas na otimização de projetos de pavimentos, fornecendo soluções ótimas mais adequadas no espaço de busca global.

Nesse contexto, o presente estudo foi idealizado com o propósito de desenvolver uma ferramenta capaz de otimizar o dimensionamento de pavimentos atendendo a critérios

estruturais, funcionais e econômicos. Esse algoritmo tem a finalidade de selecionar a melhor opção estrutural de forma que maximize os benefícios e minimize os custos envolvidos. A utilização dessa abordagem otimizada não só promove uma utilização racional dos recursos disponíveis, mas também contribui para a redução dos custos de construção e manutenção das vias, além de proporcionar um aumento na competitividade dos produtos brasileiros por meio da melhoria de qualidade na infraestrutura de transporte.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um modelo de otimização para dimensionamento estrutural de camadas de pavimentos flexíveis e semirrígidos baseado uma abordagem conjunta de critérios mecanísticos-empíricos, funcionais e econômicos.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Identificar os fatores técnicos e econômicos relevantes para o dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos em diversas condições de projeto.
2. Desenvolver modelos de otimização utilizando quatro técnicas diferentes, para determinar as espessuras ideais das camadas em pavimentos flexíveis e semirrígidos, levando em consideração os fatores identificados anteriormente.
3. Validar os modelos de otimização por meio de estudo de caso em projeto real, analisando a eficiência e precisão das soluções encontradas por cada técnica.
4. Avaliar os benefícios e impactos da aplicação do modelo de otimização no dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos, considerando aspectos como a durabilidade e qualidade das vias, a economia de custos.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por 5 capítulos. Neste primeiro, são realizadas a contextualização e justificativa e apresentados os problemas de pesquisa e os objetivos.

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão abrangente da literatura que constitui a base teórica essencial relacionada a pavimentos, serventia, conceito de dano, métodos de dimensionamento, bem como os métodos de otimização.

No capítulo 3, são discutidos os métodos e procedimentos da pesquisa, detalhando as etapas de coleta de dados, a construção do modelo de otimização, os modelos de desempenho utilizados e como foi validada a rotina

No capítulo 4, são apresentados os resultados e análises do desempenho do pavimento, comparando a estrutura inicial fornecida pelo estudo de caso com os modelos de otimização, bem como a validação do modelo.

No capítulo 5, encontra-se a conclusão dos trabalhos, juntamente com sugestões para pesquisas futuras.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Essa revisão bibliográfica para identificar artigos científicos relevantes para a temática, assim a pesquisa envolveu uma busca detalhada em diversas fontes de dados para obter uma visão completa das informações relevantes. Para conduzir essa pesquisa, foram exploradas várias bases de dados. As bases de dados consultadas incluíram o IEEE Xplore, Google Scholar, Web of Science e Scopus. Essa escolha estratégica de bases de dados permitiu uma busca abrangente e diversificada.

No processo de pesquisa, foram elaboradas strings de busca precisas que englobaram os principais tópicos relacionados a pavimentos, técnicas de otimização e algoritmos evolutivos. A pesquisa foi conduzida em ambos os idiomas, português e inglês, utilizando operadores booleanos, como "AND" e "OR", para combinar termos-chave de forma específica e abrangente.

Por exemplo, para explorar temas relacionados a pavimentação, foram utilizadas strings *pavement layers* OR *road pavement layers*. Para abordar a otimização no contexto do dimensionamento de pavimentos, strings como *"pavement design optimization"* OR *"economic pavement design"* OR *"pavement thickness optimization"* foram empregados. Além disso, termos relacionados a algoritmos evolutivos e técnicas de busca local, como *"evolutionary algorithms"* OR *"local search algorithms"* OR *"optimization techniques"*.

Essas estratégias elaboradas resultaram em uma quantidade substancial de resultados, ultrapassando 200 trabalhos. Contudo, foram refinados para identificar estudos verdadeiramente relevantes. Após uma análise minuciosa, identificaram-se aproximadamente 54 estudos verdadeiramente relevantes entre os resultados obtidos. Destes, 28 foram criteriosamente selecionados para incorporação direta no trabalho, garantindo uma base sólida de informações teóricas que sustentam os princípios fundamentais desta pesquisa.

2.1 Pavimento: conceito e classificação

Conforme definido por Bernucci *et al.*, (2022), o pavimento representa uma estrutura composta por múltiplas camadas, construída sobre uma superfície final conhecida como terraplanagem, e se configura como um conjunto estratificado de camadas, cada uma delas com espessuras finitas, com o objetivo de suportar as cargas provenientes do tráfego de veículos e as condições climáticas adversas.

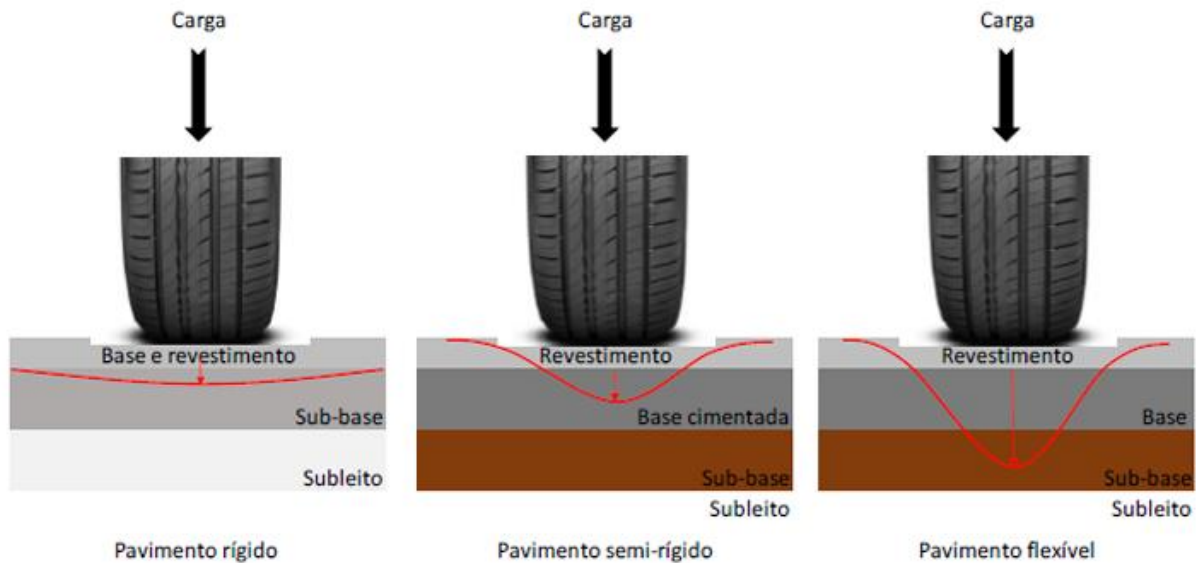
Senço (2018) enfatiza que o pavimento desempenha um papel crucial ao atender diversas funções essenciais. Ele é responsável por resistir os esforços verticais e horizontais como o desgaste, originárias do tráfego, tornando a superfície mais durável, e aprimorar as condições de rolamento para promover conforto e segurança. Dentro desse contexto, Balbo (2007) realça

que a otimização operacional do tráfego é alcançada por meio da criação de uma superfície de rolamento mais uniforme, aderente e silenciosa. Essa uniformidade não somente proporciona maior conforto ao condutor, mas também eleva de maneira significativa a segurança do usuário, especialmente em condições de pista molhada ou úmida. Ao fornecer uma via com melhor qualidade de rolamento, ocorre automaticamente uma notável redução nos custos operacionais para os usuários, uma vez que os custos de operação e manutenção dos veículos estão diretamente vinculados às condições da superfície do pavimento. A uniformidade da via também viabiliza o aumento da velocidade de deslocamento, que, por outro lado, acarreta a redução do consumo de combustível, e também contribui para otimizar o tempo de viagem.

Historicamente, tem havido um interesse maior em melhorar a qualidade e a durabilidade das rodovias brasileiras, um setor que tem recebido maior ênfase em investimento. Esse direcionamento reflete a priorização das rodovias na economia brasileira em detrimento de outros modais, como os aquaviários, ferroviários e aéreos. A pavimentação rodoviária no Brasil desempenha um papel essencial no desenvolvimento socioeconômico do país ao longo dos anos. As rodovias têm sido responsáveis pela integração das regiões, promovendo a conectividade e facilitando o comércio. No entanto, a tradição das técnicas de pavimentação no país cria uma cultura que muitas vezes prevalece sobre a abordagem técnica moderna, impactando no desempenho e qualidade das rodovias (OLIVEIRA; SILVA; FERREIRA, 2019).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006a) classifica, de maneira geral, os pavimentos como flexíveis, semirrígidos e rígidos, de acordo com a maneira como cada estrutura distribui os esforços que são aplicados sobre si ao longo das camadas e no subleito. Como apresentado na Figura 1, o pavimento flexível concentra as tensões nas proximidades do ponto de aplicação da carga, e o pavimento rígido apresenta uma distribuição mais ampla das tensões ao longo da estrutura (YODER; WITCZAK, 1975). É importante ressaltar que não existe uma categoria de pavimento intrinsecamente mais apta a resistir a esforços de fadiga. Cada pavimento é meticulosamente projetado para suportar as tensões de fadiga dentro dos limites que os materiais podem resistir. No que diz respeito à deformação permanente ou plástica, a magnitude dessas deformações é diretamente influenciada pela rigidez das camadas. Essa consideração desempenha um papel essencial no delineamento do projeto, destacando-se a necessidade de uma abordagem técnica e científica na avaliação das propriedades estruturais dos pavimentos (SOUZA et al., 2022)

Figura 1- Distribuição de tensões nos diferentes tipos de pavimento



Fonte: FATEC-SP (2018)

O pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa quando submetidas a cargas, resultando em uma distribuição aproximadamente igualitária da carga entre essas camadas (DNIT, 2006a). A estrutura típica de um pavimento flexível é subdividida em várias camadas, cada uma desempenhando um papel específico na capacidade de suporte e na distribuição de tensões.

O revestimento asfáltico, localizado na camada superior, fornece a superfície de rolamento e é projetado para resistir ao desgaste causado pelo contato direto com os pneus dos veículos, além disso, ele possui características impermeáveis que impedem a penetração da água da chuva em direção às camadas subjacentes do pavimento, protegendo a estrutura como um todo (BERNUCCI, 2006). Essa impermeabilidade é crucial para evitar a deterioração prematura das camadas inferiores devido à infiltração de água. Logo abaixo, encontra-se a camada de base, que desempenha um papel crucial na distribuição das cargas aplicadas pelo tráfego.

Ela é responsável por transmitir as cargas uniformemente, reduzindo os esforços transferidos para camadas inferiores e, assim, evitando danos à estrutura (DNIT, 2006a). A sub-base, por sua vez, é uma camada adicional que complementa a função da base, realizando tarefas similares, como a distribuição de cargas e alívio de tensões, sendo desempenhada em situações em que, devido a considerações técnicas e econômicas, não é viável construir o pavimento diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito (AUSTROADS, 2004). Além disso, pode atuar como agente de drenagem permeável, contribuindo para a durabilidade do pavimento. Quando um veículo passa sobre o pavimento flexível, as camadas elásticas temporariamente absorvem parte da carga, deformando-se e posteriormente retornando à sua

forma original. Essa capacidade de deformação elástica é crucial para suportar cargas dinâmicas e estáticas do tráfego sem causar danos à estrutura (SENÇO, 2018).

O pavimento rígido, por outro lado é uma alternativa robusta e durável, constituído por uma camada superior de elevada resistência, frequentemente composta de cimento Portland. Essa camada desempenha um papel duplo, atuando tanto como revestimento quanto como base estrutural. A estrutura típica desse pavimento compreende uma camada superficial de concreto, uma sub-base, a qual pode ser granular ou constituída por material estabilizado. Essa sub-base, por sua vez, é apoiada pelo subleito ou, se necessário, por um reforço de subleito (RODRIGUES, 2023). Este tipo de pavimento geralmente é recomendado para vias de tráfego intenso e cargas pesadas, apresentando vantagens significativas. De acordo com Bernucci et al (2022), a estrutura de placas de concreto exibe alta rigidez, consumindo grande partes das cargas e tensões provenientes do carregamento. Embora a construção inicial desse tipo de pavimento envolva custos elevados, a longo prazo, a sua durabilidade é mais elevada que pavimentos flexíveis e pode persistir por anos com pouca necessidade de manutenção. Contudo, vale destacar que a manutenção desse tipo de pavimento é mais complexa, muitas vezes exigindo a substituição completa de placas inteiras em caso de deterioração.

Por fim, o pavimento semirrígido, que se posiciona como uma solução intermédia entre os pavimentos flexíveis e rígidos, incorpora características distintas com o objetivo de otimizar o desempenho e a durabilidade. É caracterizado pela presença de uma base cimentada utilizando algum aglutinante com propriedades cimentícias, como o solo cimento, que é revestido por uma camada asfáltica (DNIT, 2006a).

São compostos geralmente de revestimento, base ou sub-base cimentada, base ou sub-base granular, reforço do subleito e subleito (DER-PR, 2008). A distribuição de carga no pavimento semirrígido segue uma abordagem equilibrada. A base cimentada atua como uma camada intermediária, absorvendo parcialmente as cargas do tráfego e transmitindo-as para as camadas subjacentes. Esse tipo de estrutura apresenta uma rigidez intermediária, compartilhando características de redistribuição de carga presentes nos pavimentos flexíveis e rígidos (DNIT, 2006). Com isso as tensões provenientes do tráfego são distribuídas de maneira mais uniforme, contribuindo para a durabilidade e desempenho global do pavimento. A estrutura do pavimento semirrígido é composta por camadas interligadas. Assim como nos flexíveis, os pavimentos semirrígidos utilizam revestimento de material asfálticos. A grande diferença é a presença de camada com ligantes hidráulicos, sendo as mais utilizadas: *Sand-*

creet, solo tratado com cimento, solo cimento, solo-cimento-cal e a brita graduada tratada com – BGTC (DER-PR, 2008).

O processo de construção e o planejamento desse tipo de pavimento requerem uma análise das condições locais, do tráfego e das características dos materiais a serem utilizados.

2.2 Serventia estrutural e funcional

Os pavimentos desempenham um papel essencial nas infraestruturas rodoviárias, fornecendo características de superfície de rolamento para suportar o tráfego de veículos, sendo mensurada através de sua serventia. A serventia é a capacidade que o pavimento tem de oferecer um nível de desempenho adequado, ou seja, sua condição operacional ao longo do ciclo de vida. Dentro desse contexto, destacam-se duas perspectivas cruciais que guiam a concepção e a aplicação de pavimentos: a serventia estrutural e a funcional.

2.2.1 Serventia funcional

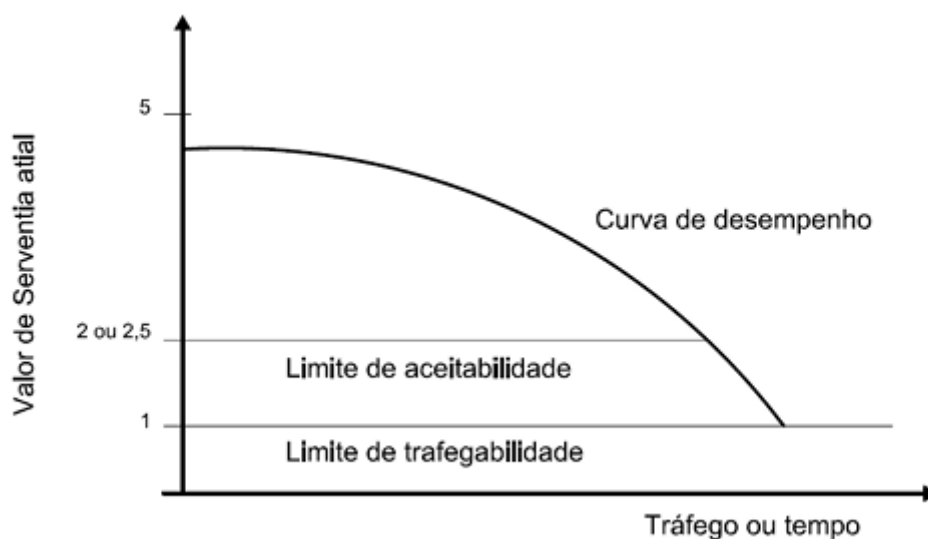
Segundo o DNIT (2006a), a serventia funcional de um pavimento refere-se à sua capacidade de fornecer um determinado nível de desempenho funcional. Isso envolve a avaliação da experiência de condução e utilização da camada de rolamento, considerando fatores que influenciam diretamente a segurança, o conforto e a eficiência do tráfego. A avaliação da serventia funcional pode ser realizada por meio de métodos subjetivos, que envolvem a participação de um grupo de indivíduos identificados com a rodovia e orientados de acordo com as diretrizes estabelecidas na Norma DNIT 009/2003-PRO. Conforme definido pela AASHTO (2004), a serventia reflete a aptidão do pavimento para suportar as demandas impostas pelo tráfego rodoviário intenso e veloz. Dentre as abordagens utilizadas para avaliar a funcionalidade de pavimentos flexíveis e semirrígidos, três se destacam: conforto ao rolamento, avaliação de defeitos de superfície e textura superficial. Essas avaliações fornecem insights valiosos sobre a condição funcional e estrutural dos pavimentos, contribuindo para a gestão eficaz das redes viárias.

A avaliação funcional de conforto ao rolamento em pavimentos desempenha um papel essencial na gestão eficaz das redes viárias, permitindo uma compreensão mais abrangente das condições de rolamento percebidas pelos usuários por meio de avaliações que possibilitam inferir o nível de serventia do pavimento, ou seja, sua capacidade de atender satisfatoriamente ao tráfego e proporcionar conforto e segurança aos usuários.

Conforme definido pela norma DNIT 008/2003, o Valor de Serventia Atual (VSA) representa a medida subjetiva das condições de superfície de um pavimento, obtida por meio

da percepção de uma equipe de avaliadores que percorre o trecho em análise. Esses avaliadores registram suas opiniões sobre a capacidade do pavimento de atender às demandas do tráfego em relação à suavidade e conforto do rolamento. Essa abordagem permite capturar a perspectiva direta dos usuários da rodovia, refletindo o nível de conforto que eles experimentam durante a condução; existem dois limites: de aceitabilidade e de trafegabilidade. A curva de serventia de acordo com o tempo decorrido de utilização da via é mostrada esquematicamente na Figura 2.

Figura 2-Variação da serventia com o tráfego ou com o tempo decorrido de utilização da via



Fonte: DNIT (2011)

A serventia de um pavimento, em termos de capacidade de servir ao tráfego com conforto, segurança e eficiência, está intrinsecamente ligada ao seu perfil longitudinal. A mensuração desse perfil pode ser realizada por meio de técnicas como perfilometria, perfilografia e instrumentos de resposta. Essas abordagens fornecem um panorama detalhado das variações verticais na superfície do pavimento, permitindo uma avaliação quantitativa da qualidade do rolamento e do conforto percebido pelos usuários (HAAS, HUDSON, ZANIEWSKI, 1994).

Nos pavimentos rodoviários, a irregularidade longitudinal se destaca como uma variável crucial na avaliação de perfil e, conseqüentemente, da condição dos pavimentos, tendo um impacto significativo nos custos operacionais dos veículos, além de influenciar diretamente a segurança, o conforto e a fluidez do tráfego. A avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos envolve o levantamento dos desvios presentes na superfície do pavimento. A Classificação dos Métodos de Avaliação da Irregularidade Longitudinal (DNER, 1986) abrange diversas abordagens:

- a) Medição Direta do Perfil: Utilização de equipamentos como níveis e miras para registrar diretamente o perfil da superfície do pavimento.

- b) Medição Indireta do Perfil: Emprego de dispositivos como perfilógrafos, o APL francês, e o sistema Merlin para avaliar o perfil de forma indireta.
- c) Baseados na Reação do Veículo: Uso de sistemas que reagem às características da superfície durante a passagem do veículo. Exemplos incluem o Rugosímetro BPR, Bump Integrator, Maysmeter e o sistema IPR-USP.
- d) Medição com Onda sem Contato: Utilização de tecnologias sem contato, como perfilômetros a laser, para obter dados sobre a superfície sem contato ou interferência direta.

Cada um desses métodos oferece uma abordagem única para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos, permitindo uma análise detalhada das condições da superfície. O IRI (*International Roughness Index* - Índice de Irregularidade Internacional) e o QI (Coeficiente de Irregularidade) são métricas utilizadas para caracterizar a irregularidade longitudinal no Brasil.

Em um estudo conduzido por Ahmed, Khattak e Hoque (2016), foi demonstrada uma correlação direta entre a qualidade do pavimento e a segurança viária. A deterioração do pavimento, caracterizada por buracos, trincamentos e deformações, foi identificada como um fator que contribui para o aumento da irregularidade da superfície e da taxa de acidentes, especialmente em condições climáticas adversas. Isso destaca a relevância da avaliação de defeitos na prevenção de acidentes e na promoção da segurança nas rodovias.

A inspeção visual dos pavimentos é uma prática crucial para identificar e quantificar os diferentes tipos de defeitos presentes, como trincas, deformações e desgastes. Através desse levantamento, é possível avaliar a extensão e a severidade de cada defeito, fornecendo uma visão abrangente das condições do pavimento. As informações coletadas são valiosas para planejar ações de manutenção e reabilitação, bem como para fundamentar a tomada de decisões em termos de prioridades.

A avaliação de defeitos pode ser realizada por avaliação expedita ou diretamente. Para a avaliação expedita, a norma DNIT 006/2003 PRO descreve o Levantamento Visual Contínuo (LVC), sendo realizado por técnicos a bordo de um veículo. Identificam-se e avaliam-se defeitos em todas as faixas de tráfego de um trecho rodoviário, frequentemente segmentado em trechos de 1 km. Durante o LVC, os avaliadores registram ocorrências, frequência e severidade de defeitos na superfície do pavimento. O LVC, segundo a norma DNIT 006/2003 PRO, fornece dois parâmetros: o Índice de Gravidade Global Expedito (IGGE), que representa o grau de deterioração da superfície do pavimento, calculado somando a ponderação das frequências e dos pesos relativos às severidades das ocorrências dos distintos tipos de defeitos verificados, e

o Índice de Condição Funcional (ICF), que caracteriza a condição funcional do pavimento. Os índices oriundos do LVC são mais utilizados para análise de redes

Já a avaliação objetiva de defeitos da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos, conforme estabelecido pelo DNIT 006/2003 – PRO, tem o objetivo de identificar, contabilizar e classificar os defeitos visíveis e medir as deformações nas trilhas de rodas dos pavimentos. A norma abrange vários índices e métodos para a avaliação da serventia funcional, englobando a análise e categorização de eventos aparentes, bem como a medição de deformações permanentes nas trilhas de roda. Segundo a codificação de defeitos especificada na Norma DNIT 005/2003-TER, é necessário calcular tanto as frequências absolutas (f_a), quanto às relativas (f_r) das ocorrências registradas. Essas variáveis proporcionam a avaliação das condições das superfícies de pavimentos rodoviários, resultando no Índice de Gravidade Global (IGG). O IGG é um índice que quantifica e classifica o grau de degradação superficial devido à incidência de defeitos, incluindo a classificação por níveis de severidade de trincas em FC-1, FC-2 e FC-3 (DNIT, 2006b). Isso o torna uma ferramenta útil para ser utilizado em projetos. Contudo, não leva em conta a área afetada pelos defeitos, o que pode limitar sua precisão (VIEIRA et al., 2016).

Dentre os diversos índices de avaliação de pavimentos existentes, destacam-se os seguintes: VSA (Valor de Serventia Atual), é um índice subjetivo, onde quantifica a condição funcional do pavimento, levando em consideração a qualidade da superfície de rolamento (DNIT 009/2003 – PRO;), e o IRI, que se baseia na análise do perfil longitudinal do pavimento, medindo as variações verticais ao longo de uma determinada distância (DNIT 442/2023 – PRO). Esses índices fornecem informações objetivas, subjetivas e quantificáveis que, quando analisadas em conjunto, permitem uma compreensão abrangente das condições do pavimento, auxiliando em seu gerenciamento.

Outro método, amplamente empregado é o Índice de Condição do Pavimento (*Pavement Condition Index* – PCI) como um método eficaz para avaliar a integridade e o nível de serviço dos pavimentos de aeródromos e rodovias (SHAHIN, KHON, 1979). O PCI é determinado usando a metodologia da norma ASTM D 6433-18/2018, e, a partir desse índice, é possível estabelecer metas e prioridades relacionadas à manutenção e recuperação, permitindo uma gestão mais eficiente dos recursos disponíveis.

Além dos defeitos de superfície, a textura superficial, que afeta a interface pneu-pavimento, também está diretamente relacionada à segurança viária, especialmente em altas velocidades e em períodos chuvosos. De acordo com o Bernucci *et al.*, (2022) as características de textura influenciam diretamente a magnitude do atrito entre os pneus dos veículos e a

superfície do pavimento. A textura superficial do pavimento é subdividida em quatro classes diferentes: microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidade.

A microtextura refere-se à rugosidade ou aspereza das superfícies individuais dos agregados que compõem o revestimento. Existem diversos ensaios disponíveis para a avaliação da microtextura, com destaque aos ensaios de pêndulo britânico, o *Dynamic Friction Tester* (DFT), o Mu-Meter, *Sideways force coefficient routine investigation machine* (SCRIM), o Grip Test, entre outros. Devido à variedade de ensaios que caracterizam a textura da superfície do pavimento, a PIARC (*Permanent International Association of Roads Congress*) conduziu, em 1992, um experimento resultando no desenvolvimento de um índice combinado, denominado IFI (*International Friction Index*) (APS, 2006). Esse índice é amplamente utilizado para avaliar o momento apropriado para a intervenção no pavimento, além de ser aplicado em análises de acidentes de trânsito e na gestão de pavimentos (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Por sua vez, a macrotextura está associada ao tamanho dos agregados, aos espaços vazios presentes no revestimento e à geometria de cada agregado. Existem diversos métodos para avaliar a macrotextura no pavimento, onde os mais utilizados são: o ensaio de mancha de areia (ASTM E965, 1996), que é o mais utilizado no Brasil, o ensaio com mancha de graxa (WAMBOLD, HENRY, 2002), o drenômetro LTP-EPUSP e o perfilômetro a laser de alta frequência para obter o MPD (*Mean Profile Depth*) seguindo a norma ASTM E1845 (ASTM, 2015).

A megatextura está relacionada a buracos (panelas) em fase avançada de degradação, ondulações e desníveis na pista (BERNUCCI *et al.*, 2006). Quanto à irregularidade, ela é definida como o desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, impactando o movimento dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via (CABRAL, 2013).

2.2.2 Serventia estrutural

A serventia estrutural de um pavimento rodoviário refere-se à sua capacidade de suportar o tráfego rodoviário com segurança e eficiência ao longo do tempo, enquanto mantém suas características de desempenho estrutural. Essa capacidade é fundamental para garantir a integridade e a durabilidade da estrada.

Vários fatores podem afetar a serventia estrutural de um pavimento rodoviário, e é crucial compreender esses mecanismos para preservar sua funcionalidade. Conforme Bernucci *et al.*, (2022) um dos principais fatores que contribuem para a diminuição da utilidade estrutural é o tráfego de veículos de cargas. À medida que os veículos trafegam pela via, cada carga adicional

contribui incrementalmente para o processo de deterioração do pavimento. Esse efeito é particularmente significativo para veículos pesados, como caminhões e ônibus. Esses veículos provocam a perda de serventia aos pavimentos, podendo amplificar ainda mais esse processo ao passarem por imperfeições na superfície, pois intensificam os efeitos dinâmicos dos carregamentos. Esses impactos dinâmicos podem acelerar a progressão de defeitos no pavimento, resultando em uma superfície mais irregular e reduzindo sua funcionalidade.

Além disso, as condições climáticas desempenham um papel crucial na perda da serventia estrutural. A água da chuva pode penetrar no pavimento comprometendo a capacidade de suporte das camadas e subleito. O envelhecimento do revestimento asfáltico após sua aplicação na via, devido às ações da incidência solar e do oxigênio nos vazios da mistura, tornando-o mais suscetível a danos. Temperaturas extremas, afetam os materiais do pavimento, já que o aumento da temperatura reduz a viscosidade dos ligantes asfálticos, tornando o pavimento mais propenso a deformações permanentes. Por outro lado, temperaturas muito baixas podem causar trincamento no revestimento asfáltico, devido ao efeito da retração térmica (BERNUCCI *et al.* 2022). A evolução das trincas na superfície do pavimento facilita a entrada de água, acelerando ainda mais a deterioração e afetando o comportamento dos materiais.

2.3 Conceito de dano

Na área da pavimentação o conceito de dano se refere à deterioração ou degradação que ocorre ao longo da estrutura, quanto na superfície dos pavimentos. Essa degradação é resultado da constante ação do tráfego, das condições climáticas e de outros fatores ambientais. Huang *et al.* (2004) destacam que o dano em pavimentos é frequentemente expresso por meio de defeitos visíveis que emergem como resultado do uso contínuo e das cargas exercidas sobre a superfície. Esses defeitos podem assumir várias formas, como trincas, fissuras, buracos, afundamentos, desgaste da superfície e deformações plásticas. Cada tipo de dano pode ser causado por diferentes mecanismos, como efeitos térmicos, ação da água sobre as camadas, ação química de agentes agressivos e repetidas cargas de tráfego.

Hudson (1997) ressalta que o dano em pavimentos é uma inevitável consequência principalmente do tráfego e do envelhecimento dos materiais, resultando em uma gradual redução da capacidade estrutural e funcional ao longo do tempo. A compreensão desse conceito de dano é de extrema importância para a avaliação das condições do pavimento. Ele pode se manifestar tanto na superfície quanto nas camadas internas da estrutura do pavimento, sendo essencial uma avaliação precisa da sua severidade e extensão. Para quantificar o dano, é

necessário adotar um sistema de classificação que atribua níveis de gravidade e intensidade aos defeitos observados.

A abordagem proposta por Huang *et al.*, (2004) sugere uma classificação dos defeitos com base em suas características visuais, extensão e profundidade. Conforme as diretrizes da norma Brasileira DNIT 005/2003 - TER, os defeitos mais comuns em pavimentação asfáltica são categorizados em várias classes distintas:

1. Fendas (Trincas): Descontinuidades superficiais causadas por tensões térmicas, cargas repetidas, retração do asfalto ou envelhecimento do material.
2. Afundamentos: Deformações permanentes caracterizadas por depressões na superfície do pavimento, frequentemente originadas por compactação inadequada, falhas estruturais ou suporte subleito insatisfatório.
3. Ondulação ou Corrugação: Deformações com ondulações transversais na superfície, provenientes de cargas repetidas, movimentação do subleito ou falta de aderência entre camadas.
4. Escorregamento: Deslocamento do revestimento em relação à camada subjacente, causado por falta de aderência, lubrificação entre camadas ou condições climáticas adversas.
5. Exsudação: Excesso de ligante betuminoso na superfície do pavimento, resultado do aumento do teor de betume, calor excessivo ou migração do material para a superfície.
6. Desgaste: Progressiva erosão do agregado do pavimento devido ao tráfego, abrasão causada pelas cargas de pneus e efeitos climáticos.
7. Panela ou Buraco: Cavidades na superfície, formadas por erosão devido à água, cargas ou desgaste intenso, frequentemente indicando falhas estruturais e regiões com outros defeitos, como trincamentos.
8. Remendo: Áreas onde foram realizadas intervenções para reparar defeitos anteriores, preenchidas com uma ou mais camadas de pavimento.

Essa classificação oferece uma avaliação objetiva e coesa do dano, permitindo a comparação entre diferentes seções de pavimentos e a priorização de intervenções. Além da detecção visual, a análise do dano envolve técnicas de medição e monitoramento, como perfilometria a laser e defletometria, para quantificar numericamente o grau de deterioração e a profundidade das camadas afetadas. Esses dados essenciais avaliam a capacidade funcional e estrutural do pavimento e identificam áreas críticas para intervenções, revelando uma forte relação entre os conceitos de serventia e dano estrutural.

Em relação à análise dos danos, é fundamental considerar fenômenos como fissuração por fadiga e deformação permanente, que podem comprometer a integridade estrutural e funcional dos pavimentos ao longo do tempo. Geralmente, essa análise divide o ano em períodos, cada um com propriedades específicas do material e grupos de carga distintos. Cada período é caracterizado por variações sazonais nas condições de tráfego e nas propriedades do pavimento, permitindo uma avaliação precisa dos danos acumulados. O método de contabilização de dano acumulado, representado pela Equação 01 (HUANG, 2004) e frequentemente associado à Lei de Miner, foi desenvolvido pelo engenheiro norte-americano Stephen Timoshenko, que fez contribuições significativas no campo da engenharia civil, incluindo o estudo da fadiga de materiais e estruturas, que é uma ferramenta essencial nesse contexto, permitindo calcular a relação entre as repetições de carga previstas e as admissíveis para diferentes grupos de carga.

$$D_r = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m \frac{n_{i,j}}{m_{i,j}} \quad (1)$$

Onde:

D_r = índice de dano

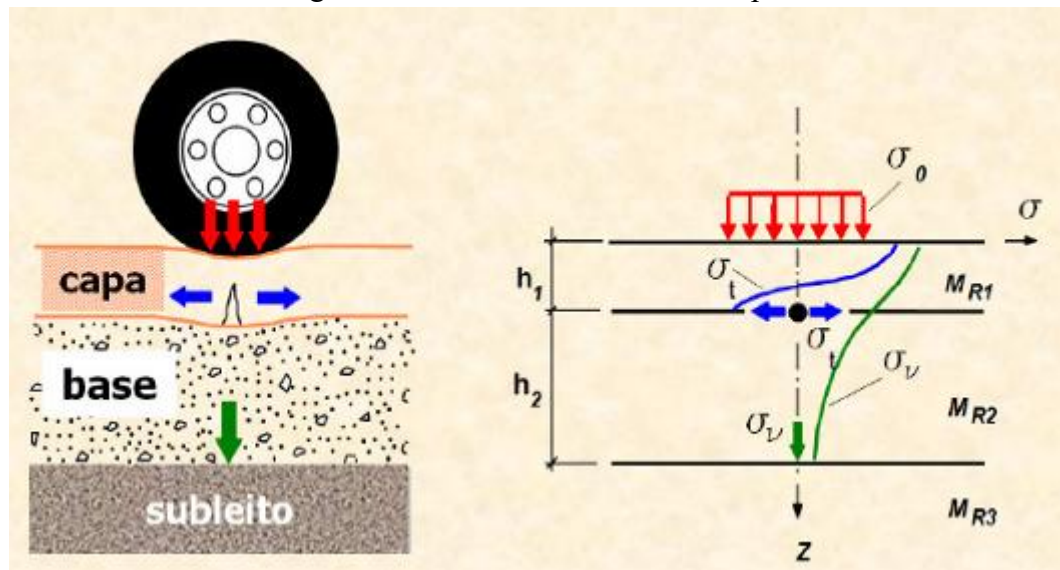
$n_{i,j}$ = número de repetições previsto

$m_{i,j}$ = número de repetições admissível

A variável " p " corresponde ao número de períodos que ocorrem em um ano, e " m " representa o número de grupos de cargas considerados no projeto do pavimento. A vida útil projetada do pavimento, que é representada por " $\frac{1}{D_r}$ ", é um valor crítico a ser avaliado no projeto. Essa vida útil é calculada levando em conta dois cenários diferentes: a possibilidade de fissuração por fadiga e o risco de deformação permanente. O dano estrutural do pavimento é resultante principalmente das cargas repetidas aplicadas por veículos em movimento. Essas cargas geram tensões e deformações dentro da estrutura do pavimento, que se acumulam ao longo do tempo. A análise dessas tensões (σ) e deformações (ϵ) é crucial para identificar áreas críticas suscetíveis a falhas e para determinar a capacidade do pavimento de suportar as solicitações do tráfego sem comprometer sua integridade. Cada camada, desde a superfície até o subleito, é submetida a cargas e solicitações provenientes do tráfego veicular e das condições ambientais. As tensões são causadas por forças internas que atuam sobre as partículas do material, enquanto as deformações representam as mudanças na forma e no tamanho dessas partículas devido à aplicação de cargas. A distribuição de tensões e deformações varia ao longo das diferentes camadas do pavimento, e a interação entre elas influencia diretamente o

desempenho da estrutura como um todo. Por exemplo, a camada de revestimento asfáltico é a primeira a entrar em contato com as cargas do tráfego, experimentando tensões de compressão e tração que afetam sua integridade e durabilidade. Já a camada subjacente, como a base granular, absorve parte dessas tensões, sofre esforços cisalhantes, devido à sua espessura finita, e redistribui as cargas ao longo da espessura do pavimento. O subleito, por sua vez, é responsável por suportar as tensões verticais provenientes das camadas superiores, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3-Tensões numa estrutura de pavimento



Fonte: Medina & Motta (2005)

Nascimento (2015) reafirma em seu trabalho que o trincamento por fadiga é o principal defeito dos pavimentos de concreto asfáltico no Brasil. Essa ocorrência é fundamentalmente originada pelo efeito do carregamento repetitivo que atua sobre a superfície do pavimento. Esse fenômeno se manifesta por meio da formação de trincas na camada de revestimento, caracterizando assim um desafio crítico na durabilidade e no desempenho dessas estruturas viárias. O critério de falha para trincas por fadiga é formulado por meio de equações que consideram os parâmetros e constantes derivadas de testes laboratoriais e de campo. Huang (2004) traz um exemplo geral, na Equação 2, que se constitui no critério de falha para trincamento por fadiga, frequentemente expresso como:

$$Nf = f1(\varepsilon_t)^{-f2}(E_1)^{-f3} \quad (2)$$

Onde:

Nf = número final de repetições de carga para ocorrência de fissuração por fadiga.

ε_t = deformação específica de tração na fibra inferior da camada asfáltica.

E_1 = módulo de elasticidade da camada asfáltica.

$f1, f2$ e $f3$ = constantes determinadas por meio de tratamento estatístico de ensaios de fadiga em laboratório e correlacionadas com observações de desempenho de campo.

Em paralelo, a deformação permanente é outra forma de dano frequente que ocorre quando o pavimento sofre deformações plásticas devido às cargas repetidas. O critério de falha para a deformação permanente considera o número permitido de repetições de carga necessário para evitar a deformação excessiva (CABRAL *et al.*, 2021). Este critério é expresso em função da deformação de compressão no topo do subleito e envolve constantes etapas de ensaios de materiais ou observação de desempenho em campo, sendo expresso, usualmente, pela Equação 3 (HUANG, 2004):

$$N_d = f_4(\varepsilon_c)^{-f_5} \quad (3)$$

Onde:

N_d = número de repetições de carga para atingir a deformação permanente limite.

ε_c = deformação plástica no topo de camadas ou do subleito.

f_4 e f_5 = constantes determinadas por de ensaios de laboratório ou desempenho em campo.

Essas equações, juntamente com outras derivadas de critérios de falha específicos, são aplicadas durante a análise de danos para prever como as diferentes formas de dano podem se manifestar ao longo do tempo.

No cenário brasileiro, Nascimento (2015) e Fritzen (2016) desempenharam um papel crucial ao desenvolverem funções de transferência que correlacionam o dano acumulado causado pela fadiga com a percentagem de tensão aplicada para BGTC (Brita Graduada Tratada com Cimento) e misturas asfálticas, respectivamente. Além disso, é importante mencionar o modelo proposto por Salomão Pinto em 1991, posteriormente atualizado por Franco (2007), que se concentra na vida de fadiga do concreto asfáltico em laboratório e também avaliados em campo.

Além das investigações previamente mencionadas, é fundamental reconhecer o impacto de programas de pesquisa internacionalmente respeitados, tais como o Programa SHRP (*Superpave Asphalt Pavement Research Program*), o SAPEM (*South African Pavement Engineering Manual*), APDG (*Austroads Pavement Design Guide*), entre outros.

O programa SHRP, originado a partir dos estudos sobre o Desempenho de Pavimentos a Longo Prazo (LTPP), implementado nos Estados Unidos (SHRP, 1993), desempenhou um papel crucial na evolução de tecnologias e metodologias avançadas destinadas à melhoria de pavimentos asfálticos. O SAPEM é adotado como referência nos projetos de pavimentos rodoviários na África do Sul, abordando variados aspectos, como a seleção de materiais,

dimensionamento de pavimentos, análise de tráfego, métodos construtivos e estratégias de gestão de ativos, com o objetivo de garantir a durabilidade e o desempenho adequado das estradas (SAPEM, 2014). O APDG, por sua vez, constitui uma fonte essencial para os engenheiros de pavimentos na Austrália, adotando uma abordagem mecanística na consideração do pavimento como uma estrutura destinada a suportar cargas. Este guia preconiza a análise de aspectos relacionados às tensões e deformações que afetam o pavimento e se apoia em modelos de previsão de desempenho fundamentados empiricamente (LIRA, 2017). Esses programas representam apenas uma parcela das diversas iniciativas que contribuíram significativamente para o avanço do conhecimento e para a eficaz gestão de pavimentos em escala global.

2.4 Métodos de dimensionamento: análise crítica

O dimensionamento de pavimentos emerge como um processo de suma relevância no âmbito do planejamento viário, constituindo-se na busca pela preservação da integridade, durabilidade e segurança das vias, independentemente das variadas demandas de tráfego. Nessa empreitada, a determinação criteriosa da espessura das camadas que compõem o pavimento desponta como um critério crucial, onde fatores como as cargas impostas, os materiais empregados e as condições climáticas atuam em intersecção. LI et al. (2017) discutem o dimensionamento de pavimentos, ressaltando a necessidade de considerar, de modo concomitante, tanto a robustez estrutural quanto a funcionalidade da pavimentação, em prol de garantir um desempenho satisfatório ao longo do tempo. Em consonância, Shahin (2005) também destaca a abordagem abrangente no dimensionamento, visando a contemplar aspectos mecânicos, ambientais e de tráfego. A relevância do dimensionamento adequado do pavimento baseia-se em assegurar a sua capacidade estrutural, longevidade, segurança e desempenho.

Nessa ótica, o dimensionamento de pavimentos semirrígidos desempenha um papel essencial na garantia da durabilidade e segurança das vias de alto volume de veículos comerciais, uma vez que essas estruturas são submetidas a cargas dinâmicas em maior frequência ao longo de sua vida útil. A correta escolha dos materiais e espessuras do pavimento é essencial para suportar as solicitações impostas pelo tráfego, evitando falhas prematuras e reduzindo custos com manutenção. A interação entre esses fatores é essencial para determinar as espessuras das camadas do pavimento, bem como os tipos de materiais mais adequados para cada função dentro da estrutura (TIRATURYAN, LYAPIN, UGLOVA, 2023). Os métodos comumente utilizados para dimensionamento estrutural de pavimentos estão agrupados em 03 classes principais: Método da resistência, Mecanístico-empírico e Funcional.

2.4.1 Método da resistência

O método da resistência, um dos métodos tradicionais usados para dimensionar pavimentos, se destaca por sua atenção à análise estrutural e avaliação da capacidade de suporte do pavimento, com o objetivo de proteger o subleito contra deformações permanentes. Esse método foca em avaliar a resistência do pavimento às cargas do tráfego, e seus reflexos no subleito. É um método empírico que correlaciona o Índice de Suporte Califórnia (CBR) com a resistência das camadas granulares. Esse método é baseado em experiências realizadas nas pistas experimentais da AASHO ROAD TEST na década de 1960 nos Estados Unidos, e tem como objetivo preservar o subleito contra deformações plásticas excessivas (DNIT, 2006a). O dimensionamento é determinado usando uma combinação de fatores equivalentes à carga, levando em consideração o número de repetições do eixo-padrão de 80kN durante o período de projeto (BALBO, 2007).

Por outro lado, o método conhecido como DNER (SOUZA, 1981) avalia a capacidade de resistência do solo utilizando o Índice de Suporte (IS) e estabelece uma relação com o número N. Dessa forma, busca-se proteger a camada inferior contra possíveis rupturas por cisalhamento, considerando a configuração estrutural do pavimento.

Esse método estabeleceu as bases para a abordagem de dimensionamento de pavimentos com base na resistência. Com o tempo, pesquisadores e engenheiros contribuíram para o aprimoramento desse método, resultando em avanços significativos na compreensão e aplicação do método da resistência em diferentes cenários rodoviários.

Com os resultados obtidos nos ensaios realizados em pistas experimentais subsequentemente desenvolvidos pela AASHO (Associação Americana de Rodovias Interestaduais e Estaduais), o engenheiro Murilo Lopes de Souza adaptou o método para sua aplicação no contexto brasileiro (SOUZA, 1981) e implementação pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). O DNER (1981) incorporou o método da resistência como uma das bases para o dimensionamento de pavimentos no Brasil, adotando suas premissas e conceitos estruturais para lidar com as particularidades das rodovias do país.

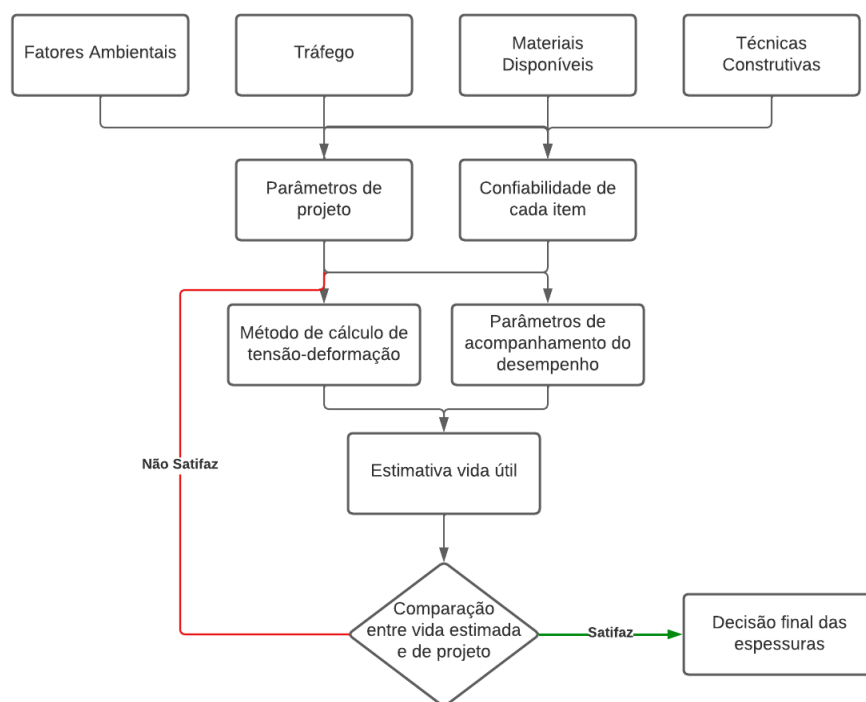
O método da resistência obteve sucesso ao longo de muitos anos de uso no Brasil, especialmente por sua adoção pelo DNIT, porém, existem deficiências. A adaptação do método da resistência parece negligenciar os efeitos da fadiga na estrutura do pavimento, decorrentes da repetição das cargas do tráfego (FRANCO, 2007). A fadiga é um fenômeno crítico no dimensionamento de pavimentos, e sua não consideração pode levar a estruturas subdimensionadas que podem sofrer danos prematuros devido à fadiga. Outro desafio apresentado é o aumento da frota de veículos no Brasil, tanto em termos de volume quanto em

carga, tornando o conceito de eixo padrão defasado (CHIARELLO *et al.*, 2019). Isso levanta questões sobre a representatividade das cargas de projeto, uma vez que o tráfego real pode impor demandas diferentes das consideradas pelo método. Além do mais, a adaptação do método americano para as condições brasileiras foi um processo que pareceu desconsiderar as diferenças no comportamento dos solos entre os dois países (FRANCO, 2007 apud CHIARELLO *et al.*, 2019).

2.4.2 Mecanístico-empírico

O método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos constitui uma abordagem racional e integrada que combina princípios mecânicos e informações empíricas para prever com maior precisão as tensões e deformações resultantes do tráfego e das condições climáticas na estrutura do pavimento. A essência desse método é a comparação das tensões e deformações resistentes dos materiais com as tensões e deformações induzidas pelo tráfego e ambiente, permitindo uma otimização das camadas pavimentadas. No dimensionamento mecanístico representado pelo esquema da Figura 4, o processo inicia-se com a definição de espessuras iniciais das camadas, seguido pelo cálculo das tensões e deformações resultantes. Essas grandezas são então comparadas a limites predefinidos. Através de iterações sucessivas, ajustes são realizados até que se alcance uma configuração estrutural satisfatória.

Figura 4-Esquema de um dimensionamento mecanístico de pavimentos



Fonte: Adaptado (MOTTA,1991).

É importante entender os impactos diretos que esse método tem na prática profissional da engenharia rodoviária. Nesse contexto e segundo a ANTT (2009), as vantagens oferecidas pelo método mecanístico-empírico no dimensionamento de pavimentos são variadas e significativas. Dentre esses benefícios destacam-se:

1. **Melhor Confiabilidade no Projeto:** Por considerar fatores mecânicos e ambientais. Isso resulta em uma previsão mais precisa do comportamento do pavimento ao longo do tempo, aumentando a confiabilidade do projeto.
2. **Previsão de Defeitos Específicos:** Ele identifica e prever defeitos específicos que podem ocorrer na estrutura do pavimento, como trincas, deformações excessivas e fadiga. Isso possibilita a adoção de medidas preventivas e a otimização das camadas pavimentadas.
3. **Extrapolação de Resultados de Laboratório e de Campo:** O método permite extrapolar os resultados obtidos em ensaios de laboratório e de campo para prever o desempenho do pavimento em condições reais. Isso reduz a dependência de dados específicos e aumenta a aplicabilidade do projeto.
4. **Maior Compatibilização entre Custo e Benefício das Obras:** Otimiza as espessuras das camadas e escolhe os materiais mais adequados, resultando em um equilíbrio entre custo e benefício das obras.
5. **Previsão de Consequências de Novas Configurações de Carregamento:** A capacidade de prever o impacto de diferentes configurações de carregamento permite antecipar os efeitos de mudanças nas condições de tráfego e de cargas excepcionais, garantindo um projeto adaptável e durável.
6. **Melhor Utilização dos Materiais Disponíveis:** Com base em análises mecanísticas, é possível determinar a combinação ideal de materiais para cada camada do pavimento, otimizando a utilização dos recursos disponíveis e melhorando a eficiência do projeto.
7. **Consideração dos Efeitos Sazonais:** Como variações climáticas e suas influências nas propriedades dos materiais. Isso resulta em um dimensionamento mais realista e durável.

De acordo com Franco (2007), os métodos mecanicistas oferecem a vantagem de otimizar a alocação de recursos financeiros e ambientais, permitindo a utilização de materiais disponíveis nas proximidades das obras. São abordagens que combinam princípios mecânicos com informações empíricas para fornecer uma avaliação mais precisa das tensões, deformações e desempenho do pavimento sob diferentes condições de tráfego e climáticas. Essa integração

visa otimizar o projeto das camadas pavimentadas, levando em consideração tanto as propriedades dos materiais quanto as características do ambiente operacional.

Alguns dos métodos mecanístico-empíricos são amplamente reconhecidos, como por exemplo o guia da AASHTO 2002, que utiliza uma combinação de fatores empíricos e análise mecanicista para determinar as espessuras das camadas do pavimento com base nas características do tráfego e dos materiais. Foi um dos primeiros métodos de projeto a incorporar de uma maneira mais completa o conceito mecanicista aos materiais. Correlacionado com o método, foi apresentado um software que engloba a metodologia proposta, o MEPDG (*Mechanistic-empirical pavement design guide*), que integra os componentes de modelagem mecânica e avaliação do desempenho de pavimentos sob diversas condições de projeto. O Método MACOPAV (Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional) é um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizado em Portugal, baseado no manual de pavimentação Shell (SHELL, 1977). Considera grande gama de variáveis cruciais para o projeto, incluindo a caracterização do tráfego, as condições climáticas, as condições do subleito e os materiais utilizados na pavimentação.

Além dos métodos já mencionados, é importante destacar o SAPEM da África do Sul. Este foi um dos primeiros métodos mecanístico-empíricos do mundo e é amplamente reconhecido por sua aplicação no projeto e gestão de pavimentos rodoviários. O SAPEM incorpora princípios mecanísticos e empíricos para avaliar e dimensionar pavimentos, considerando as condições específicas da África do Sul, incluindo o comportamento dos solos locais, o tráfego, as condições climáticas e os materiais utilizados (SAPEM, 2014).

No Brasil, o método da resiliência foi desenvolvido pelos engenheiros Salomão Pinto e Ernesto Preussler no ano de 1982, prescrito pela norma do tipo procedimento do então DNER-PRO 269/94, e também é identificado pela nomenclatura TECNAPAV, é um procedimento utilizado para o projeto e restauração de pavimentos flexíveis, se concentrando na obtenção de dados em campo, incluindo deflexões recuperáveis, irregularidades e outras características do pavimento, sem a necessidade de cálculos de tensões ou deformações. Esse método constituiu-se na época em um avanço para a avaliação da condição e para o dimensionamento de reforços em pavimentos asfálticos.

Em 2014, no Brasil, surge uma nova perspectiva com a introdução do software Medina, ou método de dimensionamento nacional de pavimentos. Esse software adota uma abordagem mecanística-empírica, realizando o dimensionamento e análise de pavimentos por meio de uma rotina que considera a análise elástica de múltiplas camadas (AEMC) conforme descrito por Franco e Motta (2020). Nesse contexto, utiliza a AEMC para calcular as tensões e deformações

nas estruturas pavimentadas sob ação de cargas, aplicando critérios relacionados à fadiga e deformação permanente para a adequada determinação da espessura das diferentes camadas, conforme mencionado por Souza Júnior (2018).

Como salientado por Franco (2007), essa metodologia tem se consolidado como uma alternativa robusta ao tradicional método empírico de dimensionamento, permitindo considerar de maneira mais eficiente as respostas mecânicas da estrutura sob diferentes condições. Onde utilizam uma abordagem que combina análise mecanicista com informações empíricas para determinar as espessuras das camadas do pavimento com base em uma variedade de fatores, incluindo características de tráfego e materiais.

No entanto, é importante notar que o método mecanístico-empírico tem suas limitações. Embora aborde aspectos mecânicos, ele muitas vezes negligencia a avaliação da parte funcional do pavimento, ou seja, não considera completamente aspectos relacionados ao desempenho ao longo do tempo, como conforto ao usuário, segurança e condições de aderência. Conforme destacado por Musunuru, Haider e Buch, (2020), essa lacuna pode resultar em projetos que atendem a critérios de resistência e deformabilidade, mas não garantem um desempenho satisfatório ao longo da vida útil do pavimento. Essa limitação é ressaltada por autores como Mahdi (2017), que exploram a necessidade de integrar análises estruturais com avaliações funcionais para um dimensionamento mais completo e preciso. A falta de consideração dos aspectos funcionais pode resultar em pavimentos subdimensionados para atender às demandas operacionais e de segurança, levando a uma rápida perda de serventia e a necessidade de manutenções prematuras (CNT, 2017).

2.4.3 Funcional

O método funcional de dimensionamento é fundamentado na premissa de que o projeto de pavimentos deve abranger não somente as demandas estruturais, mas também as necessidades operacionais, de segurança e de conforto à os usuários, bem como a capacidade de resistir às cargas do tráfego e às condições climáticas. Esse enfoque abarca uma vasta gama de aspectos, incluindo o nível de serviço desejado, a qualidade da superfície, a aderência, a drenagem e a eficiência energética (UDDIN, 2006). Com a adoção do método funcional, os projetistas podem integrar características funcionais em suas análises, permitindo uma avaliação holística do desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil.

A aplicabilidade prática do método funcional tem sido evidenciada em diversos estudos e em ferramentas de dimensionamento de pavimentos. O sistema de gerenciamento de pavimentos da Federal Aviation Administration (FAARFIELD, 1991), empregado em

aeroportos, assim como o software *AASHTO Ware Pavement ME Design*, exemplifica a integração de características estruturais e funcionais no processo de projeto. Adicionalmente, o software HDM4 (*Highway Development and Management*) é amplamente reconhecido por sua abordagem funcional na avaliação econômica de pavimentos, considerando aspectos além da engenharia, como impactos financeiros e socioeconômicos (NUNES, 2012). Esse programa é notório por aplicar a Análise de Estratégias, que planeja os custos a médio e longo prazo de uma via.

Uma recente pesquisa conduzida por Goh & Tan (2021) empregou o método funcional para avaliar a qualidade dos pavimentos, incorporando não apenas tráfego e clima, mas também aspectos ambientais e de sustentabilidade. Esse estudo demonstrou a capacidade do método funcional em oferecer soluções abrangentes e alinhadas às necessidades contemporâneas. Contudo, apesar de sua ênfase nas demandas práticas e no conforto do usuário, o método funcional não contempla diretamente a avaliação mecânica das camadas estruturais.

No Brasil, uma norma técnica que estabelece diretrizes e procedimentos técnicos funcionais para o projeto de restauração de pavimentos rodoviários flexíveis e semirrígidos é a DNER-PRO 159/85, considerando diferentes alternativas de restauração, como a utilização de concreto asfáltico, lama asfáltica e tratamento superficial, dependendo das condições específicas do pavimento a ser restaurado. Isso implica em calcular parâmetros como o Coeficiente de Irregularidade (QI), Trincamento (TR), Desgaste (D), levando em consideração o Tráfego Atual (N) e outros fatores relevantes. Esses parâmetros são essenciais para definir as restrições de desempenho do pavimento.

Apesar de suas vantagens na consideração das demandas práticas e relacionadas aos usuários, o método funcional frequentemente carece de uma análise detalhada das respostas mecânicas das camadas estruturais sob as cargas de tráfego. Isso pode acarretar em projetos que, embora atendam às necessidades funcionais, podem não ser suficientemente resistentes para enfrentar cargas variáveis e condições de tráfego em evolução. A ausência de análise mecanicista pode resultar em projetos subdimensionados estruturalmente, escolhas inadequadas de materiais e custos adicionais de manutenção precoce (HANNA & TONNIOLO, 2019). Assim, é imperativo alcançar um equilíbrio entre a abordagem funcional e a análise mecânica para assegurar pavimentos que não só ofereçam conforto e economia, mas também uma infraestrutura sólida e durável, capaz de enfrentar as demandas do tráfego e do ambiente ao longo do tempo.

2.5 Métodos para tomada de decisão

A tomada de decisão desempenha um papel crucial em várias esferas da vida, desde decisões pessoais até complexas escolhas organizacionais. Faz parte do cotidiano e da vida de qualquer pessoa. Ela estrutura os meios para escolhas e solução de problemas, o que torna o processo complexo, uma vez que os tomadores de decisão enfrentam desafios que envolvem diversos fatores, incluindo situações vivenciadas, influências culturais, valores pessoais e opiniões. Por isso, é fundamental compreender e avaliar cuidadosamente o ato decisório, uma vez que suas consequências reverberarão no êxito de escolhas realizadas.

Segundo Antunes *et al.*, (2016), o processo decisório pode se tornar ainda mais complexo, dado o aumento da quantidade de variáveis a ser considerada e a repercussão coletiva que uma decisão escolhida pode acarretar. Um dos problemas na tomada de decisão é justamente a multiplicidade de critérios estabelecidos para avaliar as alternativas, devido à capacidade limitada do ser humano em analisar e processar todas as informações disponíveis. Isso pode acarretar uma percepção limitada das escolhas e das informações recebidas (IMOUSSATEN, COUTURIER, MONTMAIN, 2012). Assim, a tarefa de selecionar as melhores opções dentre as alternativas requer um processo criterioso de análise, muitas vezes envolvendo a criação de múltiplos critérios para aprimorar as escolhas.

No contexto das obras de pavimentação, um segmento que demanda expressivos recursos financeiros e tem implicações significativas tanto em termos socioambientais quanto em considerações políticas, emerge a compreensão de que uma análise meramente centrada na otimização de custos e no desempenho futuro dos pavimentos, sob perspectivas funcionais e estruturais, não é suficiente para embasar uma tomada de decisão abrangente (ALBUQUERQUE, 2007). Problemas de decisão que envolvem áreas como economia, indústria, finanças e política muitas vezes têm múltiplos critérios e envolvem intervenientes com diferentes perspectivas. A literatura acadêmica ressalta a existência de diversos métodos de tomada de decisão baseados na análise multicritério. Estes métodos têm demonstrado sua eficácia em facilitar a avaliação e seleção de alternativas em contextos complexos, como a pavimentação rodoviária, onde considerações técnico-financeiras muitas vezes coexistem com preocupações ambientais e socioeconômicas.

Nesse cenário, os métodos de tomada de decisão desempenham um papel fundamental, possibilitando a análise, avaliação e classificação de alternativas com base em critérios quantitativos ou qualitativos, além de uma abordagem mais organizada, podendo avaliar as vantagens e desvantagens de diferentes alternativas. Dentre os múltiplos métodos existentes, cada qual com suas implicações e abordagens específicas, destacam-se aqueles que consideram

a análise de multicritério. Esses métodos reconhecem que a tomada de decisão é inerentemente influenciada por múltiplos critérios, repetido com frequência estão em conflito. Portanto, os métodos multicritérios permitem uma análise mais abrangente e realista, considerando as diversas dimensões do problema em questão. A probabilidade de sucesso na tomada de decisão aumenta (OSETRIN et al., 2021).

É possível destacar alguns métodos de tomada de decisão frente a critérios abrangentes e complexos, que são capazes de promover hierarquizações. Um deles é o PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*), que permite avaliar e classificar alternativas com base nas preferências dos tomadores de decisão (BRANS, MARESCHAL, 1984). O AHP (*Analytic Hierarchy Process*), por sua vez Randhawa & West (1995), concentra-se na hierarquização e ponderação de critérios para auxiliar na escolha da melhor alternativa. Além disso, o método TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) busca identificar a alternativa mais próxima de um ideal pré-estabelecido. Técnicas como a simulação de Monte Carlo, programação dinâmica, lógica fuzzy, programação de metas, programação linear inteira e análise de sensibilidade são igualmente importantes e já se destacam como métodos de outra classe, otimização. Além disso, como abordagens mais recentes tem-se os algoritmos evolutivos, como adaptação de matriz de covariância (CMA-ES), otimização por enxame de partículas (PSO), otimização por colônia de formigas (ACO) e processo analítico em rede (ANP) que têm ganhado destaque devido à sua capacidade de lidar com problemas complexos de tomada de decisão.

A escolha dos métodos para tomada de decisão em um modelo de otimização mecanicista e funcional, aplicado ao dimensionamento de pavimentos semirrígidos, é de grande importância, uma vez que são responsáveis por garantir a eficiência e precisão dos resultados obtidos. A seleção adequada dos métodos influencia diretamente na qualidade das soluções encontradas, bem como na viabilidade técnica e econômica do projeto de pavimentação. Portanto, é essencial considerar as características específicas do problema em questão, bem como as restrições e objetivos estabelecidos, na escolha dos mais adequados para a tomada de decisão (ARAÚJO, 2023).

A utilização de métodos quantitativos, como a programação linear, na tomada de decisão para otimização do dimensionamento de pavimentos semirrígidos permite a modelagem matemática do problema, facilitando a análise e a busca por soluções ótimas. A programação linear é uma ferramenta poderosa que possibilita a otimização de recursos limitados, como materiais e custos, levando em consideração as restrições técnicas e operacionais do projeto.

Dessa forma, a aplicação desse método contribui para a eficiência e eficácia do processo de dimensionamento de pavimentos (MANFRO, 2018).

A combinação de diferentes métodos para tomada de decisão no dimensionamento de pavimentos pode ser uma abordagem eficaz para obter resultados eficazes e com maior eficiência. A integração de técnicas quantitativas e heurísticas permite explorar diferentes aspectos do problema, aproveitando as vantagens individuais de cada método. Dessa forma, é possível obter soluções mais robustas e confiáveis, que atendam aos requisitos técnicos e econômicos estabelecidos para o projeto (BRITO JÚNIOR *et al.*, 2018).

As aplicações computacionais no domínio dos pavimentos têm sido amplamente empregadas tanto no âmbito do projeto estrutural quanto na análise subsequente dos pavimentos. Os softwares e programas de simulação figuram como ferramentas que desempenham um papel crucial na condução de análises de alta precisão e eficiência. Eles viabilizam a avaliação do comportamento do pavimento ao longo do tempo, considerando fenômenos como a degradação dos materiais e os efeitos induzidos pelas cargas cíclicas. Esses recursos tecnológicos possibilitam a exploração minuciosa das camadas constituintes do pavimento, levando em consideração suas características elásticas e a interação dinâmica entre as diversas camadas. Essa abordagem detalhada capacita a identificação de pontos críticos e favorece a otimização do dimensionamento das camadas, visando assegurar tanto a longevidade quanto a segurança estrutural do pavimento.

Ao longo do tempo, uma diversidade de softwares foi desenvolvida para implementar o método das camadas elásticas em distintos contextos e materiais para pavimentação, como o KENPAVE (HUANG, 2004), ILLIPAVE (RAAD & FIGUEROA, 1980), MICHPAVE (HAEICHANDRAN *et al.*, 1980) e o ABAQUS (COOK *et al.*, 2007). Esses programas levaram em consideração diferentes aspectos, como carregamentos dinâmicos, influências climáticas e comportamento viscoelástico dos materiais. Além disso, o programa FEPAVE 2, desenvolvido em Berkeley no ano de 1965, e posteriormente modificado por Duncan, Monismith e Wilson (1968), desempenhou um papel significativo ao permitir a análise não linear de estruturas axissimétricas de pavimentos flexíveis e a adaptação de módulos dependentes da temperatura e das tensões. Adicionalmente, o EVERSERIES, elaborado pelo Departamento de Transportes do Estado de Washington (EUA), adotando uma abordagem mecanicista baseada em análise elástica *multilayer*, oferece um dimensionamento detalhado de pavimentos novos e reforços, considerando parâmetros de resposta do pavimento como tensão e deformação (WSDOT, 2005). Dentro do conjunto de ferramentas EVERSERIES destaca-se o Evercalc 5.0. Este software visa utilizar os módulos de resiliência não lineares das camadas do pavimento em

distintas situações de carga. Ele incorpora uma sub-rotina do programa Weslea para calcular as tensões, deformações e deflexões (WSDOT, 2005). Outra contribuição relevante é o Bisar 3.0, que habilita cálculos estruturais e dimensionamento de pavimentos. Nesse contexto, são ponderados fatores ambientais, padrões de tráfego e propriedades dos materiais.

Entre um dos primeiros programas desenvolvidos encontra-se o ELSYM5, concebido pelo Instituto de Transportes e Engenharia de Tráfego da Universidade da Califórnia (Berkeley). Este software adota uma abordagem que considera o pavimento como um sistema tridimensional elástico, com camadas sobrepostas. A análise é conduzida de acordo com a lei de Hooke generalizada, assumindo isotropia e homogeneidade dos materiais. Tal abordagem utiliza um modelo elástico-linear para calcular os deslocamentos, tensões e deformações nas estruturas simuladas (SEVERI *et al.*, 1998).

Outro software que teve uma importância significativa foi o MEPDG, que resultou de uma pesquisa conduzida pelo *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), no âmbito do projeto 1-37 A. Esta iniciativa introduziu um novo paradigma, fundindo aspectos empíricos e mecanicistas para o dimensionamento de pavimentos novos e reabilitados. Inicialmente conhecido como AASHTO- 2002, esse enfoque incluiu o programa computacional MEPDG. Uma alteração significativa neste método foi a caracterização do tráfego, que passou a ser considerada através de espectros de carga por eixo (Axle Load Spectra). O MEPDG avalia o desempenho do pavimento com base em critérios pré-definidos, permitindo análises de sensibilidade para compreender os efeitos das variações ao longo da vida útil do pavimento (SCHWARTZ *et al.*, 2013).

O HDM-4 (Highway Development and Management Model) merece destaque como um dos métodos para a tomada de decisão em pavimentos. É uma abordagem baseada em aspectos funcionais para avaliar o desempenho de pavimentos e planejar estratégias de gestão. Ele considera um paradigma de hierarquização embasado na premissa da avaliação de relação custo-benefício ao longo do ciclo de vida do pavimento. Prevê o desempenho do pavimento, correlacionando-o com o volume de tráfego em consonância com a capacidade estrutural, diretrizes de manutenção e questões ambientais na rede viária (LIMA, 2007).

No contexto nacional, merece menção o software McDiNa, desenvolvido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Ele opera com dois softwares em sub-rotina, o BackMedina e o AEMC, almejando análises de camadas elásticas. O AEMC realiza cálculos de tensões, deformações e deslocamentos. De acordo com Franco e Motta (2020), este software simula as solicitações no pavimento por meio de cargas de roda, dadas as condições uniformes de aplicação entre o pneu e a superfície do pavimento. Ressalta-se que

essas soluções tecnológicas enfocam pavimentos flexíveis, representando marcos notáveis na aplicação de abordagens das camadas elásticas para projeto e análise.

Contudo, a tomada de decisão em projetos de pavimentação rodoviária vai além da otimização de custos e desempenho. Fatores socioambientais e considerações políticas certamente podem exercer um papel significativo. Nesse cenário, a abordagem de multicritério se destaca, harmonizando diversos critérios para alcançar uma solução alinhada com o contexto. Uma área que está em constante evolução, tanto por métodos estabelecidos quanto por softwares especializados, que viabilizam a modelagem, análise e visualização das alternativas. A convergência de métodos avançados e softwares intuitivos faz com que a tomada de decisão em projetos de pavimentação se torne mais embasada, abrangente e adaptável às complexidades socioambientais e políticas, contudo, apresentando aos tomadores de decisão a solução ótima para os aspectos definidos pelo agente.

2.6 Métodos de otimização

A otimização é um processo que busca encontrar a melhor solução possível dentro das contingências e condicionantes impostas por um dado problema. No entanto, essa procura sistemática da solução ótima está intrinsecamente ligada ao contexto e às necessidades inerentes ao problema em análise. A otimização não é apenas um método para encontrar o melhor absoluto, mas sim para explorar um espaço de soluções em busca de alternativas que possam oferecer um equilíbrio aceitável entre os diferentes aspectos do problema, até que não seja possível encontrar uma solução melhor.

De acordo com Novaes (1978), o ideal prático da otimização aplicada deve corresponder aos seguintes objetivos:

1. Encontrar uma configuração física ou operacional que seja mais adequada para resolver os problemas em questão.
2. Estabelecer os limites físicos (capacidades, restrições) para a formulação escolhida, de maneira a reproduzir com fidelidade a realidade em questão.
3. Definir um modelo matemático apropriado e otimizá-lo, realizando uma análise de sensibilidade dos resultados obtidos.

A formulação de um problema de otimização envolve a construção de uma função objetivo que estabeleça conexões entre as variáveis envolvidas, além das restrições impostas a cada uma delas. O processo de otimização busca determinar a solução ou os valores das variáveis que resultam em maximizar ou minimizar, de acordo com a natureza do problema.

Essa busca é realizada de forma a garantir que nenhuma outra solução possa alcançar um valor maior ou menor da função objetivo, respeitando as restrições específicas do problema.

De forma geral, a formulação de um problema de otimização pode ser descrita na Equação 4 (RAO, 2009):

$$\text{Encontrar } X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \text{ que minimiza } f(x) \quad (4)$$

Sujeita as restrições

$$g_j(X) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$l_j(X) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p$$

Onde X é um vetor n -dimensional, $f(x)$ é a função objetivo a ser minimizada, e as demais funções são as chamadas restrições do problema (restrições de desigualdade g , de igualdade l e espaço de possíveis valores de X). O número de variáveis n e o número de restrições $m + p$ não precisam estar relacionados. O problema em questão se trata de um problema de otimização restrita. Certamente, a compreensão da otimização é facilitada pelo entendimento das terminologias fundamentais que a constituem (GOLDSCHMIDT, PASSOS & BEZERRA, 2015):

- Função objetivo: A função que se quer otimizar, podendo ser maximizada ou minimizada no contexto do problema. $m + p$
- Restrições: São expressões matemáticas de igualdade ou desigualdade que descrevem situações indesejáveis ou critérios limitantes do projeto. São divididas em dois grupos, as laterais e as comportamentais, onde as laterais impõem limites diretos sobre as variáveis do problema, estabelecendo faixas de valores aceitáveis e as comportamentais definem condições desejáveis, como limites de tensões seguros, visando a conformidade com critérios de segurança.
- Valor ótimo: Refere-se ao valor alcançado pela função objetivo no ponto ótimo do problema.
- Solução ótima: Corresponde ao ponto no espaço de busca das variáveis onde a função objetivo é otimizada, de acordo com as restrições impostas.
- Variáveis de decisão: São aquelas que estão sujeitas a modificações durante o processo de otimização. Podendo ser contínuas (assumindo valores reais), inteiras (números inteiros) ou discretas (conjunto limitado de valores).

A otimização é uma área de estudo bastante aplicada em diversas disciplinas, como ciência da computação, economia e planejamento, engenharia, entre outras. Existem inúmeras técnicas e abordagens para realizar a otimização, cada uma com suas características e aplicações

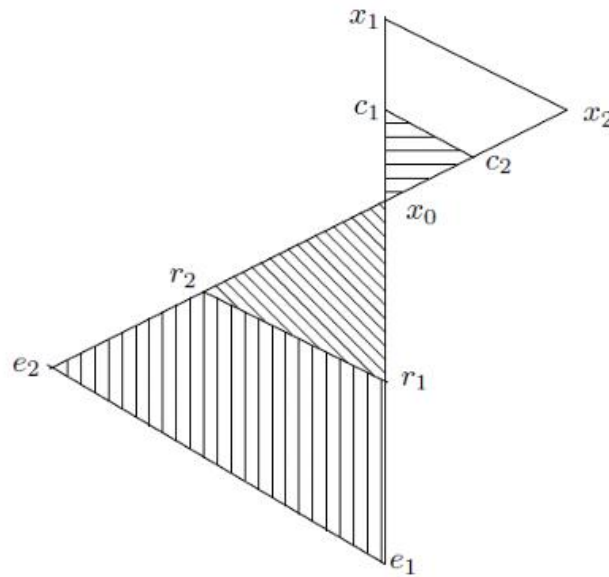
específicas. Na escolha do método apropriado, depara-se com uma diversidade de abordagens, que se dividem em dois principais âmbitos: os métodos exatos e os métodos aproximados. Os métodos exatos exploram sistematicamente todo o espaço de solução possível em busca do melhor resultado. Exemplos dessa categoria são a programação linear e a programação não linear. Estes métodos são reconhecidos pela capacidade de fornecer soluções precisas ao resolver um modelo matemático, resultando em valores exatos para o problema de programação. No entanto, essa abordagem pode ser considerada inviável em problemas com um grande número de soluções possíveis (OLUKANNI *et al.*, 2018).

Nesse contexto, é comum direcionar a atenção para métodos aproximados, os quais por sua vez se subdividem em categorias como métodos estocásticos e heurísticos. Os métodos estocásticos baseiam-se na introdução de elementos aleatórios no processo de busca, visando explorar uma ampla gama de cenários possíveis. Esses métodos são especialmente eficazes quando a natureza do problema ou os dados disponíveis estão sujeitos a variações aleatórias (DROZDOWSKI *et al.*, 2020; KOLDA *et al.*, 2019). Já os métodos heurísticos estabelecem abordagens mais flexíveis e orientadas pela intuição. Eles são frequentemente empregados em problemas complexos em que a exploração exaustiva do espaço de soluções é inviável devido ao tamanho ou à natureza combinatória do problema (FISTER *et al.*, 2018). Dentro desta última categoria, encontram-se os algoritmos bioinspirados, os quais se fundamentam em analogias extraídas do mundo biológico. Entre essas abordagens, estão o método de otimização por enxame de partículas (PSO), o algoritmo de recozimento simulado (SA) e a Estratégia de Evolução com Adaptação de Matriz de Covariância (CMA-ES). As seções seguintes dão uma visão geral sobre alguns algoritmos de otimização investigados nesta pesquisa.

2.6.1 Pesquisa direta multidirecional

O algoritmo *Multidirectional direct search* (MDSearch) é uma técnica de otimização introduzida por Dennis e Torczon (1989). Este método foi desenvolvido como um primeiro passo em direção a um algoritmo de otimização de uso geral, com propriedades promissoras para computação paralela. São uma família de algoritmos de busca direta que utilizam estratégias simples para maximizar a eficiência dos processadores disponíveis. A Figura 5 é um exemplo do funcionamento do MDSearch.

Figura 5-Multidirectional search



Fonte: Tawhid e Ali (2018)

Os passos principais do algoritmo de busca multidirecional são assim descritos:

- Iniciação:** O MDSearch pertence à classe dos algoritmos de busca por padrões e é baseado no conceito de simplex, onde o padrão de pontos pode ser expresso como um simplex S (composto por vértices x_i) baseado na iteração atual, onde $i = 0, 1, \dots, n$. Um exemplo disso é considerar $n=2$. Os vértices são ordenados em ordem crescente de acordo com a função objetivo, de modo $f(x_0) \leq f(x_1) \leq \dots \leq f(x_n)$.
- Reflexão:** Nesta etapa, os vértices x_1 e x_2 são refletidos através do melhor vértice x_0 , resultando em novos vértices refletidos r_1 e r_2 , que são avaliados. Se algum desses novos vértices tiver um valor de função objetivo melhor que o do melhor vértice atual, o algoritmo procede para a etapa de expansão.
- Expansão:** Cada aresta refletida é expandida usando o fator de expansão γ , criando novos vértices expandidos e_1 e e_2 . Esses novos vértices são então avaliados e, se algum deles apresentar um valor de função objetivo melhor que todos os vértices refletidos, o novo simplex será o simplex expandido. Se as etapas de reflexão e expansão não melhorarem a solução, o algoritmo inicia a etapa de contração.
- Contração:** novos vértices contraídos c_1 e c_2 são gerados, reduzindo o tamanho do passo com o fator de contração β , que normalmente reduz o simplex refletido pela metade na próxima iteração.
- Avaliação:** Os novos vértices contraídos são avaliados, reordenados de acordo com os valores da função objetivo, e um novo simplex é construído. O processo se repete até que

um critério de término seja atingido, como um número máximo de iterações ou uma convergência satisfatória dos valores da função objetivo.

Dor Atzmon *et al.*, (2020) exploram o uso do MDSearch para resolver o problema do encontro de múltiplos agentes (MAM) em grafos ponderados. Ele é aplicado para encontrar soluções ótimas, minimizando o custo total ou o makespan, que é uma métrica que calcula o tempo de processo de uma mensagem no processo de interação, das rotas dos agentes até um ponto de encontro. O estudo compara diferentes heurísticas, incluindo aquelas baseadas em distâncias, como a distância Manhattan e heurísticas que requerem pré-processamento para calcular distâncias reais. Os resultados destacam a eficácia do MDSearch em explorar eficientemente o espaço de busca para encontrar soluções competitivas em diferentes configurações de problemas, mostrando suas aplicações e limitações em contextos práticos. Benmansour (2023) propôs o MD-HACO, um algoritmo híbrido de otimização por colônia de formigas (ACO) aplicado com procedimento de MDSearch e, assim, evoluiu para uma estrutura multidirecional. O MD-HACO desenvolvido otimiza a qualidade geral da aproximação do conjunto de Pareto usando diferentes configurações da abordagem híbrida por meio de diferentes vetores direcionais. Uma solução é considerada ótima de Pareto quando não pode ser melhorada em um objetivo sem prejudicar outro. O MD-HACO utiliza essa abordagem para melhorar a aproximação das soluções na fronteira de Pareto, explorando diferentes direções no espaço de soluções e otimizando as soluções com base na dominância de Pareto. O MDSearch foi essencial para permitir que o MD-HACO explorasse eficazmente o espaço de soluções em várias direções, melhorando a aproximação das soluções ótimas de Pareto.

Uma característica deste método é a sua capacidade de convergência global, comprovada em estudos subsequentes. Isso significa que o MDsearch pode encontrar a solução ótima global, mesmo em problemas complexos de otimização. O algoritmo realiza uma exploração do espaço de busca em múltiplas direções a partir do simplex inicial, ajustando os pontos de acordo com a avaliação da função objetivo, buscando minimizar ou maximizar essa função.

2.6.2 Algoritmo de recozimento simulado

O *Simulated Annealing* (SA) é um método de otimização estocástica inspirado no processo de recozimento utilizado na metalurgia, que envolve aquecer um sólido a uma alta temperatura e, em seguida, resfriá-lo gradualmente para reduzir defeitos e atingir um estado de energia mínima. Proposto inicialmente por Metropolis *et al.* (1953) e posteriormente estendido por Kirkpatrick *et al.* (1983) para problemas combinatórios. O algoritmo SA aplica este princípio a problemas de otimização, com o objetivo de encontrar um ótimo global ou quase

global, explorando o espaço de soluções de maneira análoga ao rearranjo molecular em sólidos em resfriamento.

No contexto matemático, o sistema termodinâmico representa a solução atual do problema combinatório, onde a função objetivo equivale à energia do sistema. O objetivo é encontrar o mínimo global da função, equivalente ao estado de menor energia no sistema termodinâmico. Segundo Brito Júnior (2018) o processo da têmpera do metal consiste em três fases principais, refletindo o processo físico de recozimento:

1. Aquecimento: O sistema começa o aquecimento a uma dada temperatura.
2. Alta temperatura: A temperatura é mantida em um nível elevado por um período suficiente para permitir que o sistema explore e mova-se em direção a estados de baixa energia.
3. Arrefecimento: A temperatura é gradualmente diminuída para aumentar o tamanho dos cristais e reduzir defeitos na estrutura do material.

O algoritmo SA realiza múltiplas iterações de seu ciclo de resfriamento. A quantidade dessas repetições é determinada pelo usuário, que ajusta diferentes parâmetros essenciais para o bom funcionamento do algoritmo. Ele substitui a solução atual por uma solução próxima, escolhida de acordo com uma função objetivo e uma variável T (temperatura). Quanto maior for T , maior será a componente aleatória incluída na próxima solução escolhida. À medida que o algoritmo progride, o valor de T é decrementado, fazendo com que o algoritmo comece a convergir para uma solução ótima, geralmente local.

O algoritmo começa com uma solução inicial qualquer e, a cada iteração, gera aleatoriamente um novo vizinho s' da solução atual s , onde é testada a variação de Δ no valor da função objetivo, $\Delta = f(s') - f(s)$, que determina a aceitação da nova solução:

- Se $\Delta < 0$: A nova solução é melhor e é aceita.
- Se $\Delta = 0$: A situação é estável e a aceitação da solução é indiferente.
- Se $\Delta > 0$: A nova solução é pior, pois houve um aumento no estado da energia.

Para calcular a probabilidade de aceitar uma nova solução pior, usa-se o fator de Boltzmann, expresso como $e^{-\frac{\Delta}{T}}$, onde T é a temperatura que influencia essa probabilidade. Um número aleatório é gerado dentro do intervalo $[0, 1]$. Se esse número for menor ou igual ao valor calculado pelo fator de Boltzmann, a nova solução é aceita; caso contrário, é rejeitada. A temperatura T começa com um valor elevado (T_0) e diminui gradualmente após um número fixo de iterações, de acordo com um fator de resfriamento α ($0 < \alpha < 1$). Esse resfriamento controlado permite ao algoritmo escapar de mínimos locais iniciais e, conforme T se aproxima

de zero, a probabilidade de aceitar soluções piores diminui, tornando o algoritmo similar a um método de descida. O processo termina quando a temperatura é próxima de zero e não há mais aceitação de soluções piores, indicando estabilidade (BURIOL & RITT, 2018).

Uma das principais dificuldades na implementação do algoritmo é a ausência de um parâmetro análogo à temperatura nos problemas combinatórios. Para evitar que o algoritmo fique preso em mínimos locais é essencial definir uma programação adequada de recozimento. Isso inclui determinar a temperatura inicial, o número de iterações a serem executadas com a mesma temperatura e a estratégia de redução gradual da temperatura ao longo da execução do algoritmo (ASKARZADEH, 2016).

No estudo de Brito Júnior (2018), a otimização multiobjetivo foi aplicada ao despacho econômico ambiental (DEA) de usinas térmicas utilizando o recozimento simulado. Os resultados foram comparados com outras técnicas metaheurísticas. O SA demonstrou a menor emissão de poluentes em comparação com as demais técnicas. Além disso, para o caso de estudo, a aplicação do recozimento simulado resultou em uma redução de 20,14% no custo total com combustível. Mao *et al.*, (2023) utilizaram o SA para desenvolver uma estratégia de reconfiguração de painéis fotovoltaicos de pavimento, baseada no problema do caixeiro-viajante (TSP) e os resultados das simulações e experimentos demonstraram que essa abordagem não apenas reduziu o número de pontos de potência máxima localizados, mas também aumentou a potência máxima global do arranjo fotovoltaico. Oliveira, Silva e Souza (2018) verificaram o tempo gasto na obtenção dos minimizadores globais de funções e compararam PSO (ver Seção 2.6.3) e SA, constatando que o SA obteve melhores resultados não apenas em termos de tempo computacional, mas também na precisão das soluções. Da mesma forma, Pimenta, Silva e Martins (2021) compararam o SA com o algoritmo genético e observaram que o SA se destacou pela sua maior eficiência e menor índice médio de erro em relação aos algoritmos genéticos.

Esta abordagem destaca-se pela sua capacidade de explorar espaços de soluções complexos, sendo adequada para uma vasta gama de problemas tanto combinatórios quanto contínuos. Contudo, para garantir a convergência para soluções de alta qualidade, é fundamental realizar a afinação cuidadosa dos seus parâmetros, pois seu desempenho depende da escolha do cronograma de temperatura e da taxa de resfriamento. Escolhas inadequadas de parâmetros podem levar a soluções sub-ótimas ou tempo de computação excessivo.

2.6.3 Otimização por enxame de partículas

A *particle swarm optimization* (PSO) é uma técnica de otimização inspirada no comportamento coletivo de enxames de pássaros. Proposta por Kennedy e Eberhart (1995), a PSO busca otimizar uma função objetivo movendo uma população de soluções candidatas, chamadas partículas, através de um espaço de busca multidimensional. Cada partícula ajusta sua posição e velocidade com base no seu próprio desempenho passado e no desempenho coletivo do enxame.

A PSO caracteriza-se por simular uma forma de inteligência coletiva, ou inteligência de enxame, onde as partículas interagem entre si de maneira colaborativa, compartilhando experiências e cooperando em busca das melhores soluções. Cada partícula tem sua própria experiência individual (componente cognitiva) e também se beneficia do conhecimento adquirido pelo grupo (componente social). Existem dois princípios importantes na PSO: o princípio g_B , onde todas as partículas da população estão conceitualmente conectadas e influenciam-se mutuamente, e o princípio p_B , onde cada partícula considera sua própria melhor posição e a dos seus vizinhos mais próximos (SENA, 2015).

As partículas em um algoritmo PSO são representadas por pontos no espaço de soluções e possuem uma aptidão avaliada pela função objetivo. Cada partícula tem uma velocidade que direciona seu movimento e, a cada iteração, essa velocidade é ajustada com base na melhor posição já encontrada pela própria partícula (p_B) e na melhor posição encontrada pelo enxame (g_B). Multiplicadores aleatórios são utilizados para introduzir variação e evitar a convergência prematura.

A PSO começa com uma população inicial aleatória de partículas. A cada iteração, as partículas são atualizadas movendo-se em direção às melhores posições conhecidas até então. Esse movimento é determinado pela velocidade das partículas, que é ajustada dinamicamente para equilibrar a exploração do espaço de busca com a exploração das melhores soluções encontradas.

O processo de atualização de velocidades e posições ocorre em cada iteração do algoritmo até que um critério de término seja atingido. De acordo com Serapião (2009) o pseudocódigo do algoritmo é descrito da seguinte forma:

1. Defina o número de partículas P da população.
2. Inicialize aleatoriamente a posição inicial ($\mathbf{x}$) de cada partícula p de P .
3. Atribua uma velocidade inicial ($\mathbf{v}$) igual para todas as partículas.
4. Para cada partícula p em P :
 - a. Calcule sua aptidão $f_p = f(p)$

- b. Calcule a melhor posição da partícula até o momento (p_B).
5. Encontre a partícula com melhor aptidão de toda a população (g_B).
6. Para cada partícula p em P :
 - a. Atualize a velocidade da partícula.
 - b. Atualize a posição da partícula.
7. Se a condição de término não for alcançada, retorne ao passo 4.

Li *et al.* (2021) desenvolveram um modelo de previsão de desempenho de pavimentos com base no algoritmo de otimização por enxame de partículas e no algoritmo de regressão de máquina de vetores de suporte (SVR). A pesquisa demonstrou que o modelo utilizando PSO apresenta uma velocidade de convergência rápida, enquanto a máquina de vetores de suporte otimizada exibe melhor desempenho preditivo e uma generalização mais eficiente. A precisão e a confiabilidade da previsão foram superiores às do modelo SVR não otimizado. Além disso, foi proposto um método PSO_SVM para prever a vida de fadiga da mistura asfálticas modificadas por SBS, o qual melhorou a eficiência da seleção de parâmetros e apresentou resultados de previsão mais precisos do que redes neurais artificiais (ANN) e SVM não otimizado. Xiao (2023) propôs um modelo de previsão utilizando uma rede neural de retropropagação aprimorada (BPNN), otimizada pelo algoritmo PSO, para prever seis parâmetros de desempenho de pavimento asfáltico, cobrindo aspectos funcionais e estruturais. As descobertas indicaram que o modelo otimizado pelo PSO apresentou uma velocidade de convergência mais rápida, melhor capacidade preditiva e um efeito de generalização mais robusto.

Um desafio comum enfrentado pela PSO é a convergência prematura, onde o enxame pode parar de explorar o espaço de busca antes de encontrar soluções melhores. Isso ocorre quando as partículas convergem rapidamente para uma região do espaço de busca sem explorar outras possíveis soluções, limitando assim a capacidade do algoritmo de encontrar soluções ótimas globais.

2.6.4 Estratégia de evolução com adaptação de matriz de covariância

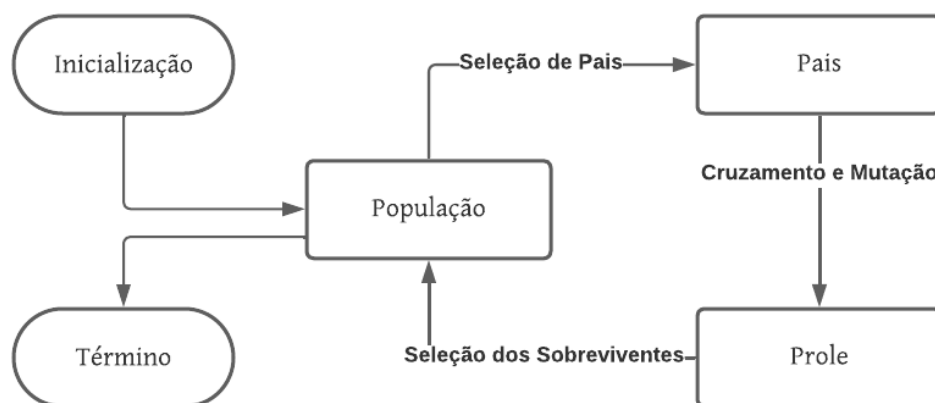
A *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy* (CMA-ES) é um tipo de estratégia de evolução, utilizada em problemas de otimização mono-objetivo. Ela é reconhecida por sua capacidade de obter soluções eficazes com baixo custo. Criada por Hansen e Ostermeier (1996), e aprimorada ao longo dos anos, a CMA-ES se destaca por utilizar informações acumuladas ao longo das etapas de busca para modificar a matriz de covariância das mutações (operador típico dos algoritmos evolucionários para manutenção da diversidade da população de possíveis

soluções) de forma dirigida, promovendo variações bem-sucedidas no espaço de busca. Esse método consegue minimizar problemas comuns em algoritmos evolucionários, como baixa performance em funções objetivo difíceis e necessidade de grandes populações para problemas complexos, através da atualização da matriz de covariância e do controle do passo de mutação (LOSHCHILOV, GLASMACHERS e BEYER, 2019).

O desenvolvimento do CMA-ES remonta ao trabalho pioneiro de Hansen e Ostermeier (1996), que buscavam uma solução que pudesse adaptar a direção da busca em resposta ao feedback obtido das iterações anteriores, permitindo ao algoritmo navegar por paisagens de solução altamente irregulares e encontrar ótimos globais com maior eficiência. O CMA-ES foi uma evolução natural das estratégias de evolução (ES), que já eram utilizadas para resolver problemas de otimização desde os anos 1960.

A computação evolucionária, base na qual o CMA-ES se fundamenta, é uma abordagem inspirada pela teoria biológica da evolução, forma de computação que opera por meio de um processo iterativo que simula a seleção natural. De modo geral, o processo envolve a seleção de dois ou mais indivíduos dentro de uma população inicial, que se cruzam para produzir novos descendentes. Esses descendentes, por sua vez, passam por mutações que introduzem variações, e os mais aptos são selecionados para formar a próxima geração. Esse ciclo de seleção, cruzamento, mutação e seleção se repete até que um critério de parada, como o número máximo de gerações ou uma solução satisfatória, seja atingido. Figura 6 ilustra o esquema básico de um algoritmo evolucionário.

Figura 6-Esquema básico de um algoritmo evolucionário



Fonte: Adaptado de Eiben e Smith (2015)

No contexto do CMA-ES, essa estrutura evolucionária é aprimorada pela adaptação da matriz de covariância, que ajusta as direções de mutação com base na história evolutiva das soluções, permitindo uma exploração mais eficaz do espaço de busca e uma maior

probabilidade de encontrar soluções ótimas. Hansen (2016) descreve o funcionamento do CMA-ES da seguinte forma:

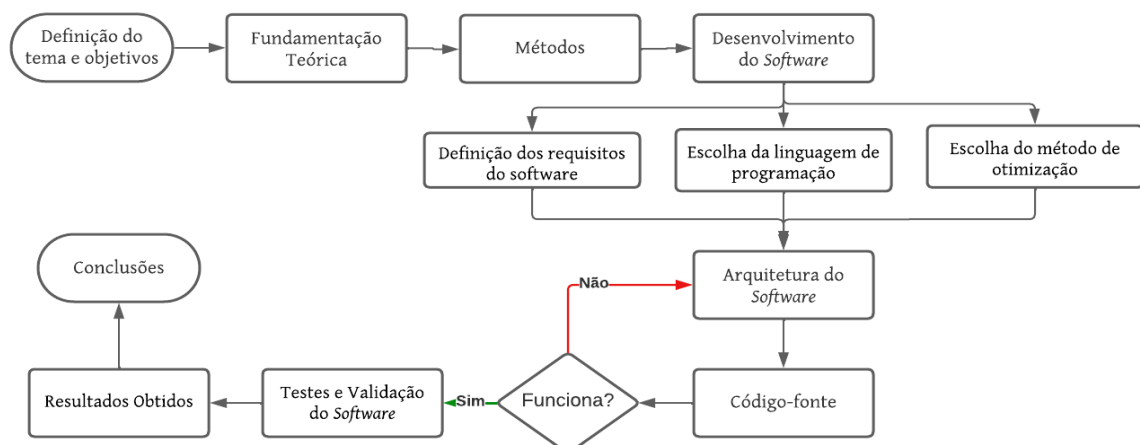
1. **Geração Inicial:** O algoritmo começa com uma população inicial de soluções geradas a partir de uma distribuição normal multivariada.
2. **Avaliação e Seleção:** As soluções geradas são avaliadas em função da sua aptidão (ou seja, do valor da função objetivo).
3. **Recombinação:** A média das melhores soluções é calculada para formar a base da próxima geração.
4. **Adaptação da Matriz de Covariância:** A matriz de covariância é atualizada com base nas mudanças observadas nas soluções ao longo das iterações. Esta matriz determina a direção e a escala das variações aplicadas para gerar novas soluções.
5. **Mutação e Seleção de Sobreviventes:** Novas soluções são geradas a partir da distribuição adaptada e o ciclo recomeça até que um critério de parada seja atingido.

No entanto, o CMA-ES não está isento de limitações. Problemas como a atualização ineficaz do passo de mutação em funções objetivo ruidosas e a convergência prematura em funções multimodais são notáveis. Estudos recentes têm buscado mitigar essas limitações incorporando mecanismos de exploração no CMA-ES. Por exemplo, a integração com algoritmos exploratórios como o *Differential Evolution* (DE) ou a aplicação de processos de reinicialização têm sido exploradas para evitar convergências prematuras e melhorar a exploração do espaço de busca. Loshchilov et al. (2019) e Hansen (2016) destacam-se na literatura recente por abordar essas melhorias e demonstrar a eficácia do CMA-ES em diferentes contextos de otimização, consolidando-o como uma ferramenta robusta e adaptável.

3. METODOLOGIA

Em conjunto com o referencial teórico apresentado e no intuito de alcançar os objetivos propostos neste estudo, todas as etapas planejadas para o desenvolvimento dessa pesquisa estão detalhadas no capítulo em questão. A presente pesquisa visa estruturar um método de otimização para o dimensionamento de pavimentos, propondo espessuras ótimas, considerando tanto aspectos mecânicos quanto funcionais, com o intuito de proporcionar um projeto mais econômico e eficiente. Seguindo os preceitos da metodologia de pesquisa científica, tal como elucidada por Prodanov e Freitas (2013), este projeto é categorizado como de natureza aplicada. Tal categorização advém do fato de que seu desiderato reside na geração de conhecimento voltado para aplicação prática, visando a solução de problemáticas específicas. Quanto à finalidade desta investigação, é factível classificá-la como exploratória, visto que visa proporcionar maior familiaridade com a problemática em análise, tornando-a mais patente e compreensível. A metodologia empregada na consecução do método proposto (contendo um software como produto) e na implementação do modelo de programação matemática é ancorada na pesquisa operacional. Tal abordagem apresenta um caráter descritivo e exploratório, o que viabiliza o levantamento e a compreensão das complexidades inerentes ao problema analisado em um ambiente real, de acordo com as categorizações delineadas por Gil (2017). A pesquisa operacional, enquanto campo específico da ciência, concentra-se na aplicação de métodos quantitativos, modelos matemáticos e técnicas de otimização com vistas a embasar tomadas de decisão eficientes em contextos de processos complexos. Em outras palavras, ela analisa diferentes cenários a fim de encontrar soluções ótimas para tornar os processos mais eficientes possíveis. Do ponto de vista de execução, esta pesquisa foi desenvolvida conforme o fluxograma mostrado na Figura 7.

Figura 7- Fluxograma da metodologia



Fonte: Autora (2023)

Inicialmente, procedeu-se à condução de uma revisão bibliográfica envolvendo autores no campo de estratégias de otimização, com o objetivo de fundamentar o desenvolvimento da rotina proposta. Entre as referências utilizadas, destaca-se o trabalho de Benmansour (2023), que apresentou uma solução com um algoritmo híbrido de otimização por colônia de formigas aplicado com procedimento de MDSearch para melhorar a eficiência do algoritmo. Também foi relevante a contribuição de Oliveira, Silva e Souza (2018), que compararam os métodos otimização por enxame de partículas e recozimento simulado na minimização de funções não lineares, oferecendo uma análise comparativa que ajudou a entender as vantagens e limitações de cada abordagem. Além disso, o estudo de Gopalakrishnan et al. (2010), foi fundamental ao explorar a aplicação da estratégia de adaptação da matriz de covariância na retroanálise dos módulos de elasticidade das camadas de pavimento, demonstrando a superioridade do método em termos de precisão e eficiência computacional. Estes artigos foram incorporados como fontes de referência na elaboração da rotina proposta, com a finalidade de possibilitar uma posterior comparação entre os resultados alcançados.

3.1 Desenvolvimento da rotina

A apresentação do código em rotina gráfica desempenha um papel fundamental na compreensão e no funcionamento do software desenvolvido. Essa etapa envolve a exposição da estrutura do código, incluindo a definição da linguagem de programação, a descrição das sub-rotinas e a especificação dos algoritmos de otimização que serão empregados. A fim de cumprir com o principal propósito do software, que consiste na otimização das espessuras de camadas de pavimentos, será empregada a linguagem de programação GNU Octave (<<https://octave.org/>>). Essa escolha se fundamenta na sua natureza de código aberto e na compatibilidade com o MATLAB, conferindo-lhe uma ampla gama de recursos de pacotes para a implementação de algoritmos de otimização (GONZALEZ *et al.*, 2017).

As rotinas gráficas englobam a capacidade de gerar diversos tipos de gráficos, o que simplifica a comunicação de resultados e conclusões em relatórios técnicos e apresentações, tornando a compreensão dos dados mais acessível. Além disso, essas rotinas são essenciais para a análise de dados complexos, permitindo que os usuários visualizem tendências, padrões e relações em seus conjuntos de dados. Isso é fundamental no contexto do projeto de pavimentos, pois ajuda os engenheiros a avaliar o desempenho potencial de diferentes configurações de pavimentos e a tomar decisões informadas com base nos resultados das simulações. Além disso, o Octave é altamente flexível e personalizável. Ele pode ser estendido por meio de funções criadas pelo usuário, escritas na própria linguagem Octave ou implementadas como módulos dinamicamente carregados em outras linguagens, como C++, C ou Fortran. Esse recurso

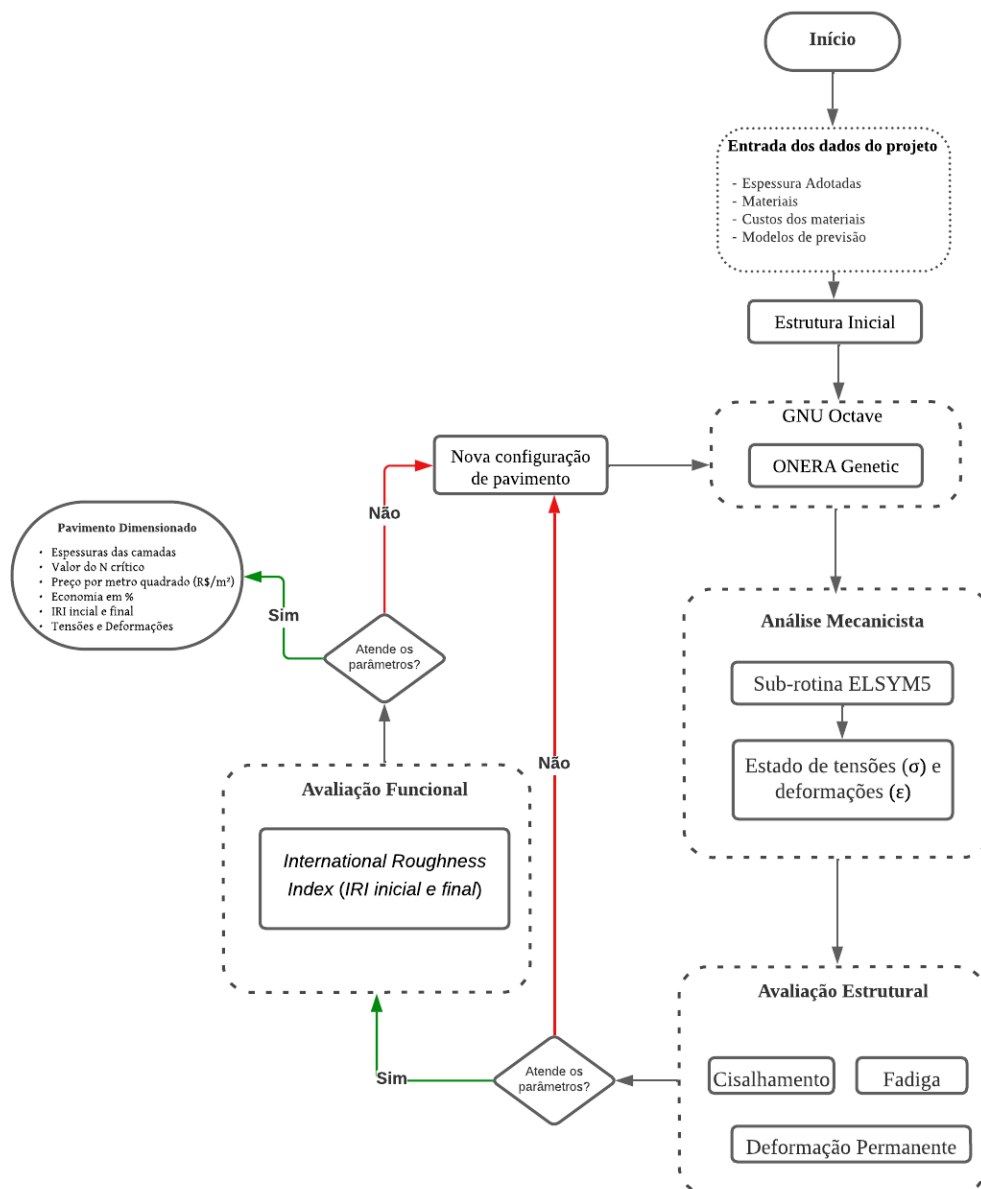
possibilita a adaptação do Octave às necessidades específicas de cada projeto e a incorporação de funcionalidades personalizadas, ampliando ainda mais sua utilidade em uma variedade de aplicações técnicas e científicas.

Logo após a escolha da linguagem e do ambiente de desenvolvimento, foi feita a definição da rotina de cálculo computacional. Essa etapa envolveu a identificação dos principais componentes do sistema, a definição das suas interações e a estruturação do código-fonte. Como parte integrante do desenvolvimento do software, foi incorporado como sub-rotina o executável do software ELSYM5 (1962), desempenhando um papel essencial no cálculo das tensões e deformações críticas no pavimento. O ELSYM5 é um programa fundamentado no modelo de Burmister, que aborda a estrutura do pavimento como um sistema composto por múltiplas camadas horizontais de materiais elásticos-lineares e isotrópicos. Esse programa é caracterizado pela inclusão de parâmetros como o número de camadas, suas respectivas espessuras, os módulos elásticos (E) e os coeficientes de Poisson (ν). Sua inclusão no software se justifica pela sua capacidade de fornecer análises precisas e detalhadas do comportamento estrutural do pavimento, contribuindo significativamente para a avaliação do desempenho das diferentes configurações nas camadas do pavimento. O ELSYM5 é um software gratuito e de código aberto, amplamente reconhecido por sua precisão e versatilidade. O software é geralmente utilizado em projetos de engenharia civil, especialmente em análises de pavimentos, e é conhecido por sua confiabilidade. Sua inclusão como sub-rotina oferece a vantagem de que os usuários do software podem se beneficiar das capacidades do ELSYM5 já que é de código aberto, tornando-o mais acessível e conveniente.

O funcionamento do ELSYM5 no software ocorre como uma sub-rotina especializada para cálculos de tensões e deformações críticas no pavimento. Uma sub-rotina de um programa é um trecho de código que realiza uma tarefa específica e pode ser chamado de diferentes partes do programa principal. Elas podem aceitar parâmetros como entrada de dados, realizar processamentos e retornar dados. A rotina de dimensionamento otimizado desenvolvida nesta pesquisa é, de fato, um modelo de simulação-otimização em que o processo de simulação fica a cargo do ELSYM5 e o de otimização é realizado por um algoritmo evolucionário. Os dados fornecidos pelo usuário, como as características do pavimento e as cargas esperadas, são utilizados como entrada para o ELSYM5. Em seguida, o ELSYM5 executa análises detalhadas, calculando as tensões e deformações em diferentes pontos do pavimento. Os resultados dessas análises são essenciais para a tomada de decisões informadas no dimensionamento do pavimento, garantindo que as espessuras e os materiais escolhidos sejam adequados para suportar as condições de carga previstas e maximizar a durabilidade da infraestrutura

rodoviária. Essa integração entre os programas traz benefícios para ambas as partes, pois além de permitir uma maior reutilização de código, resulta em uma economia de tempo e esforço de desenvolvimento. Outro ponto é que ao utilizar o ELSYM5 como sub-rotina, traz à rotina de simulação-otimização maior confiabilidade e precisão nas funcionalidades executadas, já que o ELSYM5 é um programa que já passou por testes e validações, o que pode garantir a qualidade e a exatidão dos resultados obtidos. O funcionamento integrado do software com o ELSYM5 pode ser visualizado na Figura 8, que esquematiza o fluxo de processos das diferentes partes do sistema.

Figura 8- Fluxograma de funcionamento da rotina de simulação-otimização



A arquitetura da rotina que incorpora o ELSYM5 como sub-rotina inclui várias partes detalhadas a seguir:

- **Interface de Usuário:** A interface de usuário é processo pelo qual os usuários interagem com a rotina. Nesta interface, os usuários fornecem informações relevantes sobre o projeto de pavimento, como informações acerca da rede viária onde será realizado o dimensionamento e informações gerais, como número de camadas do pavimento, tipo de material, custo dos materiais, espessura inicial e módulo de resiliência linear inicial de cada camada e subleito.
- **Pré-Processamento:** Este processo organiza as informações fornecidas pelo usuário e realiza os cálculos dos custos de construção e conservação para a seção transversal definida pela experiência do usuário.
- **Análise mecanicista:** Os dados de entrada alimentam o programa de análise de sistema de camadas elásticas ELSYM5.
- **Avaliação Estrutural:** É realizada para assegurar que o projeto atenda aos critérios de danos estabelecidos como restrições, considerando fatores como cisalhamento de camadas granulares finitas, deformações permanentes no subleito e dano por fadiga em camadas cimentadas (cimento asfáltico ou hidráulico). Os modelos de previsões de desempenhos estruturais escolhidos fazem parte do Manual de Engenharia de Pavimentos da República Sul-africana (SAPEM, 2014), por ser um método consolidado e com muitas semelhanças de clima e geologia com a região Nordeste do Brasil. Contudo, qualquer outro conjunto de modelos de previsão de desempenho poderia compor a análise, sendo uma escolha do usuário. Se todos esses critérios são atendidos, o software avança para a avaliação funcional.
- **Avaliação Funcional:** São realizadas avaliações de Irregularidade Longitudinal do pavimento dimensionado, calculando-se o IRI (*International Roughness Index*) tanto para a abertura ao tráfego, quanto para o final do período de projeto. O modelo para previsão de IRI em misturas asfálticas de Albuquerque (2007) foi escolhido para proceder as análises dessa pesquisa, pois foi ajustado com dados coletados na própria região Nordeste do Brasil.
- **A Rotina de Otimização** utiliza o pacote ONERA Genetic (<https://github.com/onera/GENETIC>) para implementar métodos de otimização, como MDSeach, SA, PSO e CMA-ES. Essa rotina foi projetada para minimizar os custos totais de construção e conservação do pavimento, garantindo que as restrições

técnicas sejam atendidas. O programa realiza reconfigurações automáticas das espessuras das camadas do pavimento com base na função objetivo de custo da obra.

A otimização considera múltiplos fatores, incluindo:

- Custos diretos de materiais, mão de obra e equipamentos, obtidos através do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do DNIT.
- Custos indiretos, como o custo de conservação ao longo do ciclo de vida do pavimento.

O processo segue o seguinte fluxo: Cada algoritmo de otimização busca a melhor combinação de espessuras das camadas que satisfaça os critérios de desempenho definidos (por exemplo, o "N crítico"). O custo total por metro quadrado (R\$/m²) é calculado para cada configuração gerada. As configurações são comparadas com a seção inicial definida pelo usuário, destacando a economia obtida em porcentagem. Para garantir a solução mais econômica, a rotina não avalia apenas os custos de implantação. São considerados os custos acumulados ao longo de uma janela de tempo pré-definida, abrangendo manutenção e conservação. Esses custos são calculados com base na evolução da irregularidade longitudinal (IRI) e no desempenho estrutural ao longo do período de projeto.

- Pavimento Dimensionado: Representa a saída de dados, contendo os resultados finais da otimização realizada, incluindo as espessuras ideais das camadas do pavimento, custo da pavimentação (R\$/m²) e a economia obtida com a seção otimizada em comparação à seção inicialmente definida pelo usuário. São apresentados também o N crítico, o IRI inicial e final do projeto e o resumo da análise mecanicista. Tudo isso permite que os engenheiros possam tomar decisões baseadas em evidências quantitativas.

3.1.1 Coleta de dados

Para estimar o custo de construção, conservação e manutenção, as informações relacionadas aos custos dos materiais foram coletadas através do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), disponibilizado pelo DNIT e Fundação Getúlio Vargas. Os dados estão disponíveis para download em formato de planilhas Excel, contendo os custos dos materiais, mão de obra e equipamentos para cada item de serviços.

3.1.2 Processo de Desenvolvimento

O dimensionamento otimizado é um processo que busca encontrar a configuração ideal para um sistema, levando em consideração um conjunto de variáveis de projeto e restrições. No contexto do projeto de pavimentos, requer os seguintes passos:

- Uma função objetivo a ser otimizada.
- Um conjunto de variáveis de projeto que afetam o valor da função objetiva.
- Um conjunto de restrições de projeto.

Para a rotina de simulação-otimização, foi definido que:

- A função objetivo deve ter como objetivo minimizar os custos de construção e conservação do pavimento. Após determinar a espessura das várias camadas, o custo total do pavimento é calculado para cada arranjo;
- A variável de tomada de decisão inicialmente é a espessura da camada do pavimento;
- As restrições de projeto são os padrões que devem ser considerados para garantir a capacidade e qualidade do pavimento. Com isso, as restrições são as espessuras mínimas e máximas de cada camadas e a capacidade do pavimento de suportar um determinado nível de tráfego (obtidos através de modelos de previsão de desempenho);
- A saída do sistema é formada pelos valores ótimos das variáveis de decisão, o número de camadas; a combinação de materiais; a espessura de cada camada, bem como o custo total da pavimentação.

Em resumo, cada camada possui um único parâmetro a ser analisado, a espessura. O usuário define a espessura inicial, onde o mesmo tem a flexibilidade de incorporar dados próprios provenientes de ensaios laboratoriais. Um projeto ótimo é definido como aquele que atende melhor economicamente a esses requisitos de desempenho.

3.1.3 Função objetivo, variáveis e restrições do projeto

Na avaliação econômica de estratégias de pavimentação, é fundamental considerar todos os custos e benefícios que ocorrem ao longo da vida da rodovia. A determinação do custo do ciclo de vida das estruturas de pavimentos é conduzida com base em um conjunto de dados obtidos por meio da avaliação das diferentes alternativas de pavimentação estudadas durante a rotina. Além disso, são utilizados os custos extraídos das tabelas do SICRO (Sistema de Custos Rodoviários) e informações fornecidas pelos usuários na fase inicial da ferramenta.

Neste contexto, a função objetivo desempenha um papel central na busca pela melhor configuração de pavimento. A função objetivo adotada visa minimizar o custo total do ciclo de vida (CCV) do pavimento, considerando não apenas os custos de construção inicial, mas também os custos contínuos de conservação e manutenção ao longo de sua vida útil. A função objetivo é expressa pela equação 5.

$$CCV = CC + CTC - \frac{VR}{(1 + r)^{n-1}} \quad (5)$$

Onde:

CCV= custo do ciclo de vida (R\$/m²)

CC= custo construção (R\$/m²)

CTC = Custo de conservação do pavimento (R\$/m²)

n= número de períodos considerados na análise em anos;

i= i-ésima camada;

r= taxa de retorno;

VR= Valor residual, como uma função da vida restante e do custo inicial (R\$/m²)

Destrichando a equação apresentada, temos que:

- Custo de Construção (CC)

O custo de construção é uma componente fundamental do CCV e é calculado como:

$$CC = \sum_{i=1}^{NEL} C_i \cdot (1 + BDI_i) \cdot h_i \quad (6)$$

Onde:

CC= Custo de Construção (R\$/m²)

C_i = Custo unitário da i-ésima camada (R\$/m³)

h_i = espessura da i-ésima camada do pavimento (m)

BDI_i = Benefícios e despesas indiretas da i-ésima

- Custo Total de Conservação (CTC)

O custo total de conservação do pavimento ao longo de sua vida útil é dado por:

$$CTC = \sum_{t=1}^n \frac{CAC}{(1 + r)^{t-1}} \quad (7)$$

Onde:

CTC = Custo Total de conservação (R\$/m²)

CAC = Custo anual de conservação (R\$/m²)

r= taxa de retorno.

t= tempo (anos).

- Valor Residual (VR)

O valor residual do pavimento, que representa o valor remanescente ao final de sua vida útil, é calculado como:

$$VR = CC \cdot \left(\frac{N_c - N_p}{N_p} \right) \quad (8)$$

Onde:

VR= Valor Residual (R\$/m²)

CC= Custo construção (Eq. 06) (R\$/m²)

N_c = Número N Crítico

N_p = Número N de projeto

A otimização opera iterativamente para encontrar a configuração de pavimento que atenda aos critérios de convergência do algoritmo. Isso assegura que o projeto final seja tecnicamente adequado e econômico de acordo com os parâmetros definidos pelo usuário. Para otimizar, são necessárias variáveis de projeto, as quais podem ser categorizadas em variáveis geométrico-estruturais (espessuras das camadas), mecânicas (Tensão-Deformação) e funcionais (índice de irregularidade longitudinal), cada qual desempenhando um papel específico na definição do problema de otimização.

Esses fatores podem ser variados a fim de obter o projeto ótimo que minimize o custo de construção e tenha a configuração ideal para as espessuras das camadas do pavimento. A otimização desse projeto está sujeita ao seguinte conjunto de restrições:

- Espessura mínima e máxima ($e_{min} \leq e_i \leq e_{max}$), que definem os limites permitidos de espessuras das diferentes camadas do pavimento;
- Vida útil do projeto (N), número de repetições de um eixo-padrão
- Falha por fadiga, deformação permanente, irregularidade longitudinal, etc. ($N_{adm} \leq N$).

Essas restrições são calculadas usando os modelos de previsão de desempenho escolhidos pelo usuário.

3.2 Modelos de desempenho

O fim da vida útil de pavimentos asfálticos engloba uma diferenciação entre fim da serventia estrutural e funcional. O fim da serventia estrutural, que implica o colapso direto da estrutura, resulta na incapacidade do pavimento de suportar cargas externas. Já o fim da serventia funcional, que pode ocorrer de forma isolada ou concomitante à ruptura estrutural, se caracteriza pelo desconforto ao rolamento dos veículos, pela redução da segurança operacional, pelo aumento do risco de aquaplanagem, ocorrência de irregularidades e defeitos de superfície. Manifestações de danos, como deformação plástica no subleito, afundamento de trilha de roda e trincamento por fadiga em camadas com alguma cimentação, são indicadores empregados em métodos consolidados de dimensionamento. Critérios específicos para indicar fim de serventia estrutural envolvem ruptura de camadas por cisalhamento, deformação permanente ou fadiga,

enquanto, o fim da serventia funcional, consideram-se, por exemplo, níveis de irregularidade inaceitáveis na superfície do pavimento.

Modelos de previsão de desempenho são utilizados no dimensionamento para facilitar a inferência da durabilidade de um pavimento. Isto é possível pela comparação entre os valores de “N” derivados do tráfego de veículos pesados (projetado no horizonte de análise) e o “N” obtido por regressões estatísticas em função de variáveis mensuráveis (estrutural ou funcional).

Com o intuito de observar o comportamento dos pavimentos, levando-se em consideração as distintas restrições adotadas nas análises, optou-se por uma abordagem que emprega modelos específicos para cada uma dessas restrições. Essa estratégia possibilitou uma avaliação mais detalhada e adaptada a cada contexto.

3.2.1 Fadiga em Camadas Asfálticas

Para avaliação de camadas asfálticas, utilizou-se o modelo da *South African Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014), que detalha a função de transferência e as constantes aplicáveis para diferentes espessuras de camadas asfálticas. Esse modelo foi escolhido devido à sua robustez e precisão na representação do comportamento mecânico das camadas asfálticas sob carregamento. Ele é fundamentado no conceito de que as camadas asfálticas flexionam com a aplicação do carregamento, induzindo fissuras na fibra inferior da camada, que tendem a se propagarem até a superfície. Esse processo é crucial para compreender a resistência à formação de fissuras (resistência à fadiga), que é uma medida importante da durabilidade do pavimento. O modelo define funções de transferência específicas para camadas de superfície finas (< 50 mm) e bases asfálticas espessas (> 75 mm), conforme equação 09:

$$N_f = SF \cdot 10^{\alpha(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{\beta})} \quad (9)$$

Onde:

N_f = Número de repetições do eixo padrão até atingir o limite de vida de fadiga

α e β = Constantes obtidas no Sapem (2014) (Capítulo 10, Tabela 28)

ε_t = Deformação de tração horizontal na parte inferior da camada asfáltica ($\times 10^{-6}$ mm/mm)

SF = Função transferência:

- Se a espessura da camada for < 25 mm, então SF = 1
- Se a espessura da camada for ≥ 25 mm, então SF = $0,0489 \times t - 0,2225$
t = espessura da camada (mm)

3.2.2 Esmagamento e Fadiga em Camadas Cimentadas

Para a análise de esmagamento por compressão nas camadas cimentadas, foi adotado o modelo do SAPEM (2014). Esse modelo prevê a degradação dos materiais cimentados ao longo do tempo, permitindo a identificação de falhas potenciais:

$$N_{ci/ca} = 10^{a(1 - \frac{\sigma_v}{b \cdot UCS})} \quad (10)$$

Onde:

$N_{ci/ca}$ = Número de repetições do eixo padrão até o limite de esmagamento avançado

σ_v = Tensão de compressão vertical no topo da camada (kpa)

UCS = Resistência a compressão não confinada (MPa)

a, b = Constantes obtidas em SAPEM (2014) (Capítulo 10, Tabela 35)

A avaliação de dano por fadiga se dá através da equação 11, de acordo com o modelo SAPEM (2014):

$$N_{eff} = SF \cdot 10^{c(1 - \frac{\varepsilon}{d \cdot \varepsilon_b})} \quad (11)$$

Onde:

N_{eff} = Número repetições do eixo padrão até atingir o limite de vida de fadiga efetiva

ε = Deformação por tração horizontal na fibra inferior da camada ($\times 10^{-6}$ mm/mm)

ε_b = Deformação limite de ruptura (Capítulo 10, Tabela 35).

c, d = Constantes obtidas no SAPEM (2014) (Capítulo 10, Tabela 35)

SF = Função transferência:

- Se a espessura da camada for < 102 mm, então $SF = 1$
- Se a espessura da camada for entre 102 mm a 319 mm, então $SF = 10^{(0,00285t - 0,293)}$
- Se a espessura da camada for ≥ 419 mm, então $SF = 8$

t = espessura da camada (mm).

3.2.3 Cisalhamento em Camadas Granulares Finitas

No que concerne à deformação permanente nas camadas granulares de base e sub-base, a modelagem é pautada no método de dimensionamento de pavimentos da República Sul-Africana (SAPEM, 2014). Esse modelo determina o estado de tensão de cisalhamento (através da relação de tensões principais) no centro da camada, e o compara com a resistência ao cisalhamento do material:

$$N_{cis} = 10^{(\alpha F + \beta)} \quad (12)$$

Onde:

N_{cis} = número de repetições do eixo padrão no limite de falha por cisalhamento

β e α = Constantes obtidas no Sapem (2014), (Capítulo 10, Tabela 30).

F = Relação de Tensão, dada por:

$$F = \frac{\sigma_3 \Phi_{term} + C_{term}}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (13)$$

Onde:

σ_1 e σ_3 = tensões principais maior e menor, respectivamente

Φ_{term} e C_{term} = constantes relacionadas com o ângulo de atrito e a coesão, obtidas em SAPEM (2014) para condições específicas de umidade (Capítulo 10, Tabela 30).

3.2.4 Ruptura do Subleito

A avaliação do subleito envolve a análise da deformação permanente, que se manifesta na superfície do pavimento. Essa deformação permanente é calculada com base apenas na deformação do topo subleito, permitindo prever o número de repetições de eixo padrão necessários para atingir tal limite (SAPEM, 2014), conforme expresso por:

$$N_{DP} = 10^{(a - 10 \log \varepsilon_v)} \quad (14)$$

Onde:

N_{DP} = número de repetições do eixo padrão até atingir o limite da deformação permanente

a = constante obtida em SAPEM (2014) (Capítulo 10, Tabela 37).

ε_v = deformação vertical de compressão no topo do subleito.

Heukelom e Klomp (1962) estudaram como as tensões do tráfego geram a ruptura do subleito e, conseqüentemente, deformações plásticas no mesmo. Para tanto, definiram um modelo para a estima da tensão vertical admissível no topo do subleito:

$$\sigma_{adm} = \frac{0,0006 \cdot M_R}{1 + 0,7 \cdot \log N} \quad (15)$$

Onde:

σ_{adm} = é a tensão vertical admissível no topo do subleito, em MPa;

M_R = é o módulo de resiliência do subleito, em Mpa;

N = é o número de aplicações de carga.

3.2.5 Irregularidade Longitudinal

Para avaliação funcional do pavimento, o *International Roughness Index* (IRI) foi estimado para as condições de abertura ao tráfego e fim da vida de serviço. O modelo escolhido

para tanto é estatístico, e foi obtido por Albuquerque (2007) para a malha rodoviária do estado do Ceará executada em mistura asfáltica, levando em conta parâmetros relacionados ao clima local, rigidez do pavimento e tráfego que solicita a via ao longo da vida de serviço:

$$IRI = -173,35 + e^{5,177+0,0011 \cdot C - 0,0023 \cdot \left(\frac{SNC-3,39}{1,93}\right) + 0,0046 \cdot \left(\frac{N_{acum}-5,58 \cdot 10^6}{5,47 \cdot 10^6}\right)} \quad (16)$$

Onde:

IRI = índice de irregularidade longitudinal (m/km);

C = parâmetro representativo das condições climáticas da UNESCO, onde: Úmido ($C = -1$); Sub-Úmido Úmido ($C = -0,5$); Sub-Úmido Seco ($C = 0$); Semi-Árido ($C = +0,5$); Árido e Hiper-Árido ($C = +1$);

SNC = número estrutural corrigido;

N_{acum} = número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf, calculado pelo método da AASHTO.

$$R^2 = 0,79$$

Para o cálculo do Número Estrutural Corrigido (SNC), seguiu-se o método da pesquisa PIRC (Queiroz, 1981; DNER-PRO 159/85; Paterson, 1987), considerando a contribuição do subleito. No entanto, os coeficientes estruturais das camadas foram calculados pelo método da AASHTO (Ullidtz, 1998) e HDM-4 (2000), utilizando os módulos de resiliência das camadas do pavimento. O modelo utilizado para o cálculo do SNC é:

$$SNC = \sum a_i \times H_i + 3,5 \times \log ISC_{SL} - 0,85(\log ISC_{SL})^2 - 1,43 \quad (16)$$

Onde:

H_i = espessura da i -ésima camada (cm);

ISC_{SL} = índice de suporte do subleito (%) = 7%

a_i = coeficiente estrutural da i -ésima camada (cm^{-1}), segundo Ullidtz (1998):

- Mistura Asfáltica: $a_1 = \frac{(0,40 \times \log(\frac{E_1}{3000}) + 0,44)}{2,54}$, com $0,079 \leq a_1 \leq 0,173$;
 - Para bases granulares: $a_2 = \frac{(0,25 \times \log(\frac{E_2}{160}) + 0,11)}{2,54}$, com $0,024 \leq a_2 \leq 0,079$;
 - Para sub-bases granulares: $a_3 = \frac{(0,23 \times \log(\frac{E_3}{160}) + 0,15)}{2,54}$, com $0,024 \leq a_3 \leq 0,079$;
- a_i = coeficiente estrutural da i -ésima camada (cm^{-1}), segundo HDM-4 (2000):
- Para bases cimentadas $a_2 = 0,075 + 0,039 \cdot UCS - 0,00088(UCS)^2$
- E_i = Módulo de Resiliência da i -ésima camada (MPa);

UCS = Resistência à Compressão não-confinada da camada cimentada de base aos 14 dias (MPa).

Todos os modelos utilizados nesse trabalho levam em consideração que o acúmulo de dano é acarretado pela perda de serventia ao longo do tempo. Portanto, o número de repetições do eixo padrão (N) de 8,2 tf foi obtido pelos modelos de equivalência de eixo da AASHTO.

Cabe ressaltar que, inicialmente, o modelo de análise aqui proposto foi configurado especificamente para a avaliação de pavimentos semirrígidos, utilizando os modelos estabelecidos para o estudo de caso de um trecho monitorado em pavimento semirrígido. Contudo, qualquer outra seção transversal (pavimento flexível ou semirrígido) poderia ser avaliada.

3.3 Comparação dos métodos de otimização

A escolha do método de otimização adequado desempenha um papel crucial na melhoria de processos e na obtenção de resultados eficientes. Neste contexto, foram avaliados diversos métodos de otimização amplamente reconhecidos na literatura, tais como: Algoritmo de Recozimento Simulado (*Simulated Annealing* – SA), Algoritmo de Otimização de Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO), Estratégia de Evolução de Adaptação da Matriz de Covariância (*Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy* – CMA-ES) e Pesquisa Direta Multidirecional (*Multidirectional Direct Search* – *mdSearch*). Para esta análise, foi utilizada a biblioteca ONERA Genetic, desenvolvida pela ONERA, uma empresa voltada a pesquisa aeronáutica e espacial. Esta biblioteca, sob a Licença Pública Geral GNU, reúne métodos de otimização mono e multiobjetivo, proporcionando uma plataforma robusta para a análise comparativa.

Outros algoritmos de otimização incluídos no pacote Genetic, tais como o método Nelder-Mead Simplex e um algoritmo de busca local foram considerados, mas não demonstraram eficiência para resolver problemas de dimensionamento de pavimentos, que é uma solução para fenômeno não linear. A ineficácia desses métodos em lidar com a não linearidade complexa do problema corrobora a escolha de métodos evolucionários na resolução do problema de dimensionamento ótimo de pavimentos. Estes métodos demonstraram ser mais robustos e adaptáveis às características intrínsecas do problema, proporcionando resultados mais precisos e eficientes.

A análise baseou-se em um método criterioso com diversos parâmetros chave, cada um dos quais descreve aspectos específicos da eficiência e da eficácia do método em questão:

- a) **Tempo Computacional:** Refere-se ao tempo necessário para que o algoritmo encontre uma solução satisfatória ou atinja um critério de parada pré-definido. Métodos que demandam menos tempo computacional são geralmente preferidos em aplicações onde a velocidade de convergência é crucial, como em sistemas em tempo real ou em grandes volumes de dados.
- b) **Espessura Final da Camada Crítica:** A espessura final da camada crítica está intimamente ligada à durabilidade e à vida útil da estrutura. Métodos de otimização que conseguem minimizar a espessura crítica, mantendo ou melhorando o desempenho estrutural, são preferidos, pois reduzem o uso de materiais e os custos de construção.
- c) **Custo:** O custo de ciclo de vida é um dos critérios mais significativos na seleção de métodos de otimização para pavimentos. Inclui não apenas os custos iniciais de construção, mas também os custos de manutenção ao longo da vida útil da estrutura. Métodos que resultam em pavimentos mais duráveis, com necessidade reduzida de manutenção e reabilitação ao longo do tempo, são mais adequados devido aos menores custos totais de ciclo de vida.

A análise detalhada desses critérios é essencial para a seleção informada de métodos de otimização de pavimentos rodoviários. Métodos que oferecem um equilíbrio ideal entre desempenho estrutural e custo de ciclo de vida são fundamentais para garantir a sustentabilidade econômica e operacional das estruturas de pavimentação ao longo de sua vida útil.

3.4 Otimização de alternativas

A biblioteca ONERA Genetic, utilizada no processo de otimização, oferece uma série de parâmetros ajustáveis que permitem refinar o processo de otimização de acordo com as necessidades específicas do projeto. Essa abordagem utiliza diversas técnicas de otimização para realizar essa análise detalhada, garantindo que as soluções propostas atendam aos requisitos de desempenho e viabilidade econômica esperados. A biblioteca ONERA Genetic se destaca por permitir a modificação de parâmetros tanto gerais quanto específicos dos métodos de otimização utilizados. Entre os parâmetros gerais, que são comuns a todos os métodos e foram utilizados no desenvolvimento da rotina, estão:

- **x:** Dimensão do problema ou ao ponto/população inicial, essencial para iniciar a otimização em uma região promissora.
- **method:** Método de otimização a ser utilizado, influenciando a estratégia de busca e a qualidade das soluções encontradas.
- **maxFunEval:** Número máximo de avaliações da função, com valor padrão de 5000.

- **verbosity**: Nível de verbosidade do algoritmo, com valor padrão de 0.
- **popSize**: Tamanho da população (para métodos baseados em população), calculado por padrão como $\text{round}(10 + 2 * \text{sqrt}(n))$, sendo n o tamanho da população.
- **targetY**: Valor alvo da função objetivo, com valor padrão $-\infty$.

Além desses parâmetros, o processo de otimização considerou restrições específicas.

- Os limites são caracterizados pelos campos x_{Min} e x_{Max} , definindo os limites inferiores e superiores das variáveis, respectivamente.
- Restrições não-lineares são incorporadas por meio de uma função anônima c , assegurando que a condição $c(x) \leq 0$ seja atendida.

Durante a execução do algoritmo, soluções que violavam as restrições predefinidas foram imediatamente descartadas, o que garantiu que apenas soluções viáveis fossem consideradas. Essa prática foi essencial para assegurar que as soluções propostas fossem não apenas teoricamente corretas, mas também aplicáveis na prática, atendendo plenamente aos objetivos do projeto.

A aplicação dessas metodologias permitiu uma análise detalhada e criteriosa, resultando em soluções otimizadas que satisfazem as condições de desempenho e viabilidade econômica esperadas para o projeto de pavimentação.

3.5 Estrutura analisada

Para avaliar a eficácia da ferramenta desenvolvida, utilizou-se como referência uma estrutura de pavimento de Trecho Monitorado analisada por Mendonça (2014) e Nascimento (2017). Mendonça (2014) avaliou o desempenho do pavimento através de um monitoramento composto de levantamentos funcionais, incluindo defeitos de superfície, macro e microtextura e o Índice de Regularidade Internacional (IRI), bem como levantamentos estruturais, incluindo módulos de resiliência obtidos por retroanálise de bacias deflectométricas ou ensaios de carga repetida. Nascimento (2017) investigou o mecanismo de dano por fadiga na base de brita graduada tratada com cimento (BGTC), determinando a vida de fadiga em laboratório, bem como estabelecendo uma função transferência para o desempenho estrutural desse trecho monitorado da BR-101/SE.

O Trecho Monitorado A (TMA) foi construído em 2012, classificando-se como pavimento semirrígido. Este segmento está localizado próximo à faixa litorânea do estado de Sergipe, caracterizado por um clima quente e úmido com chuvas predominantes no outono e inverno.

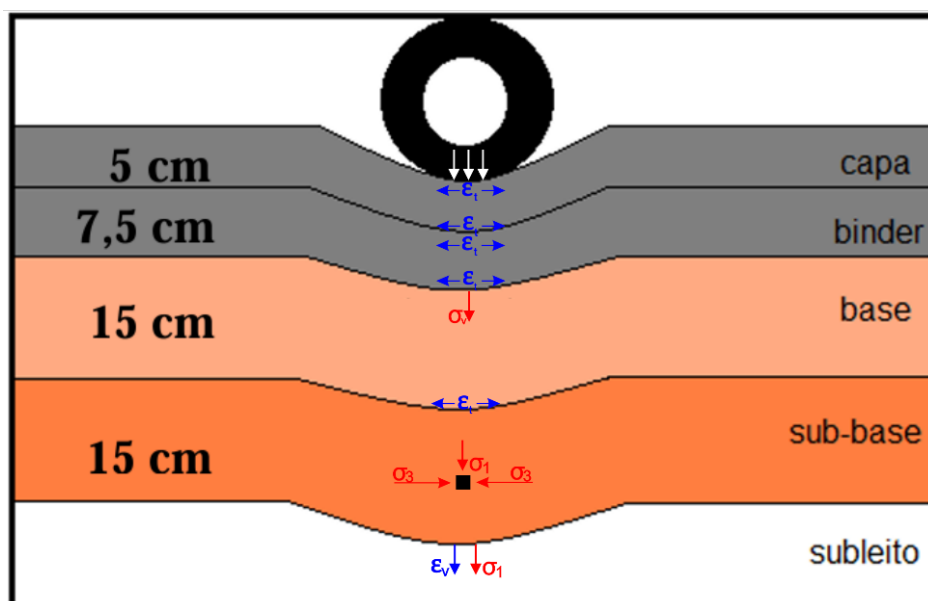
O TMA possui uma extensão de 280 metros, situado no segmento sul da BR-101/SE, entre as estacas 650 (coordenada UTM: 8.787.926 N; 691.048 E, SIRGAS2000, 24S) e 664 (coordenada UTM: 8.787.836 N; 690.783 E, SIRGAS2000, 24S). localizado no município de São Cristóvão – SE. Este foi entregue em 2012, e consiste de uma sub-base de material granular, com uma base de BGTC contendo 3% de cimento Portland tipo CP-II-F32. Adicionalmente, possui uma camada asfáltica intermediária de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) na faixa B de granulometria do DNIT, e uma camada superior de CAUQ com polímero elastomérico do tipo SBS (*Styrene-Butadiene-Styrene*) na faixa C do DNIT. O subleito é composto de material areno-argiloso, com 19% de argila, 45% de limite de liquidez e 20% de limite de plasticidade.

Neste estudo, os parâmetros críticos de cada camada são assim descritos:

- Camadas de Capa e Binder: Foram avaliadas as deformações específicas de tração (ϵ_t) no topo e na base de cada camada.
- Base Cimentada: Os parâmetros críticos para a camada de base cimentada incluem a tensão vertical no topo da camada (σ_1) e a deformação específica de tração (ϵ_t) na base da camada.
- Sub-base: Os parâmetros analisados nesta camada foram as tensões principais maior e menor (σ_1 e σ_3) no centro da camada.
- Subleito: Para o subleito, os parâmetros críticos são a deformação específica vertical (ϵ_v) e a tensão vertical (σ_1) no topo do subleito.

Esses parâmetros críticos podem ser observados na Figura 9.

Figura 9- Parâmetros críticos das camadas



Fonte: Adaptado (MENDONÇA, 2014)

As camadas do pavimento e suas respectivas características elásticas, determinadas por ensaios laboratoriais ou não-destrutivos de campo, são apresentadas na Tabela 1. A caracterização elástica dos materiais inclui os módulos de resiliência e os coeficientes de Poisson, essenciais para a análise do desempenho estrutural do pavimento.

Tabela 1- Disposição e propriedades mecânicas das camadas no TMA

Camada	Espessura (cm)	Material	Coef. Poisson	Módulo (MPa) *
Capa	5,0	CBUQ com polímero SBS – Faixa C do DNIT	0,3	4273,00
Binder	7,5	CBUQ – Faixa B do DNIT	0,3	9309
Base	15,0	Brita Graduada Tratada com Cimento – BGTC - 3% CP – Faixa C do DNIT	0,25	4582,68
Sub-base	15,0	Solo A-2-7 – CBR $\geq$ 20%	0,35	1965,40
Subleito	∞	Solo A-2-6 - CBR $\geq$ 7%	0,45	445,78

* Módulos de Resiliência Obtidos por Retroanálises (FWD) para o TMA

Fonte: Mendonça (2014)

3.6 Validação da rotina

A validação da rotina no contexto de dimensionamento de pavimentos é uma etapa crucial para assegurar a precisão e confiabilidade das saídas geradas pelo programa. Esta validação foi conduzida através da comparação das saídas do software com dados provenientes de fontes confiáveis e em conformidade com requisitos técnicos específicos. Diversas abordagens e fontes de dados relevantes foram consideradas para esta validação.

Primeiramente, foi realizada a estimativa de desempenho da estrutura de pavimento do TMA através da rotina desenvolvida. Essa estimativa foi comparada com o real desempenho do TMA da BR-101/SE, com o objetivo de promover a validação do código ELSYM5 da análise mecanicista e da precisão dos modelos de previsão de desempenho empregados.

Após a validação inicial, o processo de otimização foi testado para cada um dos 04 métodos testados, sempre utilizando as espessuras de camadas originais do TMA como partida. Cada método gerou uma nova estrutura de camadas, com diferentes espessuras, de forma que permitisse a comparação do custo das soluções. Nesse momento pôde-se distinguir o método mais eficaz para as condições de contorno utilizadas.

Para complementar a validação, também foi realizado um teste de sensibilidade. Este teste envolve alterar propositalmente uma camada do pavimento para verificar se essa mudança

resulta em uma melhoria ou degradação no desempenho previsto pelo software, foram considerados diferentes pontos de partida para a validação, como espessuras iniciais variadas, abrangendo valores mínimos, máximos e médios. Este procedimento permite verificar se, independentemente das condições iniciais, o software converge consistentemente para a espessura ótima. A convergência consistente para soluções ótimas sob diversas condições iniciais é um indicativo forte da confiabilidade e precisão do software.

A validação é considerada bem-sucedida se o software fornecer resultados viáveis com custos inferiores aos obtidos por métodos convencionais e se houver consistência na convergência para espessuras ótimas a partir de diferentes condições iniciais.

Portanto, considerando as quatro técnicas de otimização testadas, a comparação foi realizada com base nos seguintes critérios:

1. Métricas de Desempenho: Avaliação com base na redução do custo total do ciclo de vida (CCV) e nas espessuras finais das camadas. O método que resultou na maior redução de custo e em espessuras otimizadas foi considerado mais eficaz. Métodos de otimização que conseguem minimizar a espessura crítica, mantendo ou melhorando o desempenho estrutural, são preferidos, pois reduzem o uso de materiais e o CCV.
2. Eficácia: Verificação da capacidade das técnicas em convergir para espessuras ótimas de pavimento a partir de diferentes condições iniciais. Consistência na obtenção de soluções ideais é um indicativo de confiabilidade.
3. Eficiência: Medição do tempo de processamento necessário para cada técnica. Isso ajuda a determinar qual método é mais eficiente em termos de recursos computacionais. Tempo computacional é um fator crucial, pois métodos que requerem menos tempo de processamento são mais vantajosos em termos de custo e produtividade.

A técnica de otimização que se destaca será aquela que fornecer resultados viáveis com custos inferiores aos obtidos pelo dimensionamento com os valores reais do estudo de caso e que mostre consistência na convergência para espessuras ótimas a partir de diferentes condições iniciais. A análise comparativa inclui gráficos e tabelas que ilustram o desempenho de cada técnica em relação aos critérios mencionados, facilitando a visualização das vantagens e desvantagens de cada método.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a ferramenta de otimização desenvolvida, bem como as análises de validação realizadas para o método. Na primeira parte do capítulo, realiza-se uma análise mecanicista e de desempenho estrutural do pavimento, baseada no dimensionamento efetuado, conforme os modelos de desempenho apresentados. O objetivo é comparar a análise funcional e estrutural com os valores otimizados pelos métodos utilizados, avaliando a eficácia dos resultados obtidos em relação aos requisitos técnicos e de desempenho estabelecidos.

A segunda parte aborda o processo de entrada de dados e os resultados gerados pela rotina desenvolvida. São detalhadas as espessuras calculadas e os custos associados, além de uma comparação entre os métodos de otimização utilizados. A comparação considera as métricas de análise do tempo computacional, teste de convergência e desempenho. O capítulo também destaca os benefícios de cada técnica de otimização, comparando os resultados do projeto original com os obtidos pelo software para avaliar a melhoria em termos de custo e desempenho.

4.1 Interface da rotina

A rotina foi implementada no Octave, utilizando a biblioteca ONERA Genetic. A interface começa com o arquivo de entrada para o ELSYM5 (Figura 10), que possui uma estrutura específica na qual as informações são organizadas em colunas delimitadas. Este arquivo de entrada contém dados essenciais para a análise de pavimentos, como propriedades dos materiais das camadas, espessuras das camadas, e cargas aplicadas, conforme versão original de código aberto e desenvolvida na Universidade da Califórnia.

A técnica de cálculo utilizada para determinar tensões e deformações no pavimento é baseada na teoria da elasticidade linear, que é uma abordagem comum em análises de pavimentos. O ELSYM5 utiliza um modelo de camadas múltiplas para calcular essas respostas, considerando as interações entre diferentes camadas do pavimento. O ELSYM5 por padrão, considera que as camadas do pavimento são totalmente aderidas, ou seja, esse cenário geralmente resulta em uma distribuição mais uniforme de tensões e deformações, contribuindo para um desempenho mais homogêneo e deformações calculadas menores no pavimento. Este software opera em segundo plano, permitindo a criação de rotinas com loops para automação de tarefas repetitivas e complexas. Isso facilita a realização de várias iterações de otimização, onde o método de otimização pode ajustar parâmetros, como a espessura das camadas do pavimento, para encontrar a configuração que minimiza os custos ou maximiza a durabilidade.

Figura 10- Impressão dos dados de entrada para sub-rotina do Elsym5

```

1 1
2 999 ELSYM5 Projeto1
3 5 2 2 8
4 1 5.0 0.30 42730
5 2 7.5 0.30 93090
6 3 15.0 0.25 45827
7 4 15.0 0.35 19654
8 5 0.45 4458
9 5.6 10.8
10 0. 0.
11 32.4 0.
12 0. 0.
13 16.2 0.
14 0.01 4.99 5.0112.4912.5127.4935.0042.51

```

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

As unidades de medida adotadas para os cálculos são centímetros (cm) para as espessuras, pontos de saída e profundidade, e quilogramas-força por centímetro quadrado (kgf/cm²) para os módulos das camadas e pressão de inflação dos pneus ao pavimento. No entanto, antes de realizar os cálculos de tensões e deformações, é necessário converter as unidades de entrada de megapascal (MPa) para kgf/cm², e vice-versa, procedimento esse realizado automaticamente no programa desenvolvido.

O processo se inicia com a interpretação desse arquivo de entrada pela rotina, a qual imprime e formata o arquivo de entrada para que o ELSYM5 realize a sub-rotina de análise mecanicista da seção do pavimento. Após a análise, a rotina utiliza o arquivo de saída gerado pelo ELSYM5 para extrair tensões ou deformações críticas em cada camada da estrutura, de forma que seja possível aplicar esses valores nos modelos de previsão de desempenho selecionados nessa pesquisa. Com os modelos, realiza-se a previsão de desempenho estrutural do pavimento sob diversas condições operacionais e ambientais, obtendo o número N crítico de cada camada da estrutura. Além da avaliação de serventia estrutural, o programa calcula o custo do ciclo de vida (CCV) do pavimento (R\$/m²) e utiliza os dados de rigidez e espessuras de camadas, o clima local e o número N projetado ao longo do período de projeto para calcular o *International Roughness Index* (IRI) inicial e final, conforme identificado na Figura 11 para a seção de pavimento aplicada no trecho monitorado da BR-101/SE.

Figura 11- Conteúdo do arquivo de saída da rotina

```

=====
Configuração inicial:
=====
- Espessuras (cm) = [5.0; 7.5; 15.0; 15.0]
- Custo (R$/m2) = CCV = 436.76
- Valores de [N]:

  1. Nf_capa_sup    = Inf
  2. Nf_capa_inf    = Inf
  3. Nf_binder_sup  = Inf
  4. Nf_binder_inf  = 2.1420e+10
  5. N_ci_ca        = 8.3967e+07
  6. N_eff          = 9.8181e+06
  7. N_sb           = 6.3755e+11
  8. N_sl_epsilon   = 1.7661e+18
  9. N_sl_sigma     = 6.2699e+119

  * Crítico         = 9.8181e+06
  * Projeto         = 2.6000e+07

- Valores de [IRI] (m/km):
  * Obtidos          = [1.46; 5.33]
  * Critério (máx.) = [2.70; 6.00]
=====

```

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Após a saída dos dados iniciais, a otimização é então realizada através dos métodos testados nessa pesquisa, que permitem encontrar a configuração ótima do pavimento. Durante esse processo, a implementação do programa desenvolvido no Octave fornece detalhes sobre o número de gerações e os resultados da função objetivo para cada iteração até que a solução ótima seja alcançada. É essencial destacar que os métodos de otimização utilizados são de busca aleatória, ou seja, eles exploram aleatoriamente o espaço de soluções para encontrar a melhor configuração, resultando em variações no número de gerações a cada execução da rotina. Como é possível observar nas Figuras 12 e 13, ocorrem variações no número de gerações (nGen) apresentadas, e os valores da função objetivo (f^*) diferem em cada nGen, pois, como mencionado anteriormente, os métodos tendem a explorar diferentes pontos aleatórios durante cada execução. Apesar dessas variações nos resultados intermediários, é observado que o valor final da função objetivo converge para o mesmo ponto ótimo, independentemente das diferenças nos números de gerações entre as execuções.

Figura 12- Número de gerações 1ª execução

method : Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (key: 'cmaes')						
dimensions : x:4, y:1						
init : user-defined						
Optimisation started...						
I	nGen	f*	nEval/maxFunEval	funDecr	xMove	cstViolation
*	0	5.09089e+02	50/5000	-	-	2.18906e+06
*	1	4.17517e+02	100/5000	9.15719e+01	1.10339e+01	0.00000e+00
*	4	4.01237e+02	250/5000	7.78721e+00	9.37077e+00	0.00000e+00
*	6	3.91850e+02	350/5000	9.38722e+00	1.09148e+01	0.00000e+00
*	10	3.84573e+02	550/5000	7.27686e+00	4.25240e+00	0.00000e+00
*	11	3.74736e+02	600/5000	9.83711e+00	3.30218e+00	1.46972e+07
*	14	3.58268e+02	750/5000	1.64681e+01	2.72097e+00	2.06062e+07
*	17	3.56215e+02	900/5000	2.05297e+00	4.65023e-01	0.00000e+00
*	19	3.55667e+02	1000/5000	5.48633e-01	3.40330e-01	2.55423e+06
Optimisation done.						

Fonte:

Elaborado pela autora (2024)

Figura 13- Número de gerações 2ª execução

method : Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (key: 'cmaes')						
dimensions : x:4, y:1						
init : user-defined						
Optimisation started...						
I	nGen	f*	nEval/maxFunEval	funDecr	xMove	cstViolation
*	0	5.37799e+02	50/5000	-	-	5.74090e+05
*	1	4.12145e+02	100/5000	1.25654e+02	1.25000e+01	0.00000e+00
*	3	3.79838e+02	200/5000	3.23065e+01	6.28118e+00	2.79374e+06
*	4	3.74970e+02	250/5000	4.86806e+00	8.74117e-01	0.00000e+00
*	16	3.55667e+02	850/5000	1.93039e+01	1.25523e+00	0.00000e+00
Optimisation done.						

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

ade espessura, o CCV por metro quadrado, os valores de N da análise de desempenho estrutural e os valores inicial e final de IRI, além da redução percentual de custo obtida com essa nova configuração (Figura 14).

Figura 14- Configuração ótima encontrada

- Espessuras (cm) = [3.0; 2.5; 29.0; 10.0]	
- Custo (R\$/m2) = CCV = 355.67	
- Valores de [N]:	
1. Nf_capa_sup	= 1.0839e+08
2. Nf_capa_inf	= Inf
3. Nf_binder_sup	= Inf
4. Nf_binder_inf	= 1.9124e+13
5. N_ci_ca	= 3.7195e+07
6. N_eff	= 2.6045e+07
7. N_sb	= 2.7002e+12
8. N_sl_epsilon	= 4.7922e+18
9. N_sl_sigma	= 8.2724e+131
* Crítico	= 2.6045e+07
* Projeto	= 2.6000e+07
- Valores de [IRI] (m/km):	
* Obtidos	= [1.28; 5.14]
* Critério (máx.)	= [2.70; 6.00]
=====	
Redução de Custo (%) = 18.57	

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Por fim, a rotina gera três arquivos de saída: iniOUT.DAT, otimDADOS.DAD e otimOUT.DAT. O primeiro arquivo, iniOUT.DAT, contém os dados de saída iniciais, antes da otimização. Este arquivo é fundamental para comparação, pois oferece uma linha de base (sugestão do usuário) que mostra a performance do pavimento sem qualquer ajuste otimizado.

O segundo arquivo, otimDADOS.DAD, apresenta os dados de entrada já com as espessuras otimizadas. Este arquivo reflete as alterações feitas durante o processo de otimização, documentando as novas especificações do pavimento que atendem aos critérios de desempenho e custo. O último arquivo, otimOUT.DAT, contém os dados de saída da configuração ótima, incluindo as tensões, deformações e deslocamentos calculados pelo ELSYM5. Este arquivo é crucial para a validação final do projeto otimizado, pois fornece as informações detalhadas sobre a resposta estrutural do pavimento sob as condições de carga simuladas.

Esses arquivos de saída são essenciais para documentar as etapas inicial e final do processo de otimização, permitindo uma análise detalhada e a validação dos resultados obtidos. Eles também facilitam a comparação entre a configuração inicial e a otimizada, demonstrando os benefícios e as melhorias alcançadas através da rotina do método de otimização. Dessa forma, o processo assegura uma abordagem rigorosa e eficiente para o dimensionamento de pavimentos, promovendo soluções de infraestrutura mais duráveis e economicamente viáveis.

No entanto, é importante reconhecer as limitações operacionais do sistema desenvolvido, nesta versão inicial, pois foi específico para atender à análise do TMA. Há restrições relacionadas à configuração inicial do sistema de camadas e materiais fornecidos pelo usuário na entrada de dados. Isso limita a flexibilidade do sistema para explorar novas alternativas de materiais e número de camadas que possam ser mais adequadas para diferentes condições de projeto. Além disso, a inclusão de diferentes modelos de previsão de desempenho pode ser necessárias para capturar adequadamente a complexidade do comportamento do pavimento em condições distintas.

Outro ponto é que o modelo de comportamento utilizado pelo ELSYM5 baseia-se na teoria da elasticidade linear. Embora seja uma abordagem comumente aceita, ela pode não capturar completamente o comportamento não linear dos materiais ou as condições extremas de carregamento que ocorrem em campo. Essa limitação pode afetar a precisão das previsões de desempenho, especialmente em situações onde os materiais exibem comportamentos não lineares ou quando o pavimento é submetido a cargas muito elevadas. Outra limitação significativa é a suposição de que todas as camadas do pavimento são aderidas. Embora isso simplifique a modelagem, pode não refletir com precisão as condições reais do pavimento. As

condições de aderência entre as camadas influenciam significativamente a relação tensão e deformação e, consequentemente, o comportamento estrutural estimado do pavimento. Afeta, inclusive, as deflexões admissíveis estimadas por meio da análise tensão-deformação para o controle deflectométrico por camada (SANTANA *et al.*, 2023). A escolha dos modelos de previsão de desempenho que tenham se baseado nessas condições de contorno, conforme os selecionados nessa pesquisa, são fundamentais para a realização de estimativa adequada.

4.2 Avaliação de Desempenho do TMA

O dimensionamento do trecho monitorado A (TMA) da BR-101/SE foi realizado por empresa contratada pelo DNIT, utilizando o método da resistência, também conhecido como método do Eng. Murilo Lopes de Souza ou método do DNER (1981). Contudo, para avaliar o desempenho desse projeto inicial de estrutura de pavimento, aplicou-se aqui nesse trabalho o método mecanístico-empírico, incluindo a análise de tensões e deformações e previsão de desempenho, utilizando-se modelos descritos na Seção 3.2. A configuração inicial escolhida baseia-se nas características do TMA da BR-101/SE, conforme executado em campo e descrito anteriormente. A Tabela 2 contém as características das camadas do pavimento, obtidas em monitoramentos durante a execução do trecho (MENDONÇA, 2014).

Tabela 2- Características do projeto

Camada	Espessura(cm)	Material	Módulo
Capa	5,0	CBUQ com polímero SBS – Faixa C do DNIT	4273,00
Binder	7,5	CBUQ – Faixa B do DNIT	9309,00
Base	15,0	Brita Graduada Tratada com Cimento – BGTC – 3% CP – Faixa C do DNIT	4582,68
Sub-base	15,0	Solo A-2-7 – CBR $\geq$ 20%	1965,40
Subleito	∞	Solo A-2-6 – CBR $\geq$ 7%	445,78
Características			Valor
Extensão			280,00 m
Largura Total			7,20 m
N de projeto			$2,6 \times 10^7$

Fonte: Adaptado (MENDONÇA, 2014)

Nas análises realizadas, assumiu-se perfeita aderência entre as camadas de revestimento e a BGTC, como sugerido pelos modelos mecanicistas adotados. Essa suposição tem impacto direto na redistribuição de tensões e deformações, podendo superestimar o desempenho estrutural do pavimento em relação a condições reais de campo. Embora idealizada, a análise permite avaliar o comportamento teórico ideal, sendo um ponto de referência para futuras simulações com condições de aderência parcial, especialmente na camada de binder, onde descontinuidades podem ser mais frequentes.

O estudo de fadiga e deformação em pavimentos asfálticos é essencial para garantir a durabilidade e a eficiência estrutural das rodovias. Esta análise permite uma compreensão detalhada do comportamento estrutural do pavimento, contribuindo para a otimização dos projetos de infraestrutura viária.

Com base nos dimensionamentos realizados através dos métodos estabelecidos e utilizando os dados obtidos pelo software ELSYM5, foram analisadas as tensões e deformações nas camadas do pavimento. O software forneceu as informações necessárias sobre tensões e deformações nos pontos críticos do pavimento, especificamente na fibra inferior do revestimento asfáltico, no topo e na fibra inferior da base de brita graduada tratada com cimento (BGTC), no centro da camada de sub-base e no topo do subleito. Utilizando os modelos de estimativa de desempenho estrutural mencionados no subtópico 3.2 deste trabalho, foi possível analisar o comportamento e a integridade da estrutura dimensionada com a configuração inicial do pavimento estudado por Mendonça (2014).

A análise de fadiga da camada de revestimento asfáltico foi dispensada, visto que essa camada apresenta apenas tensões de compressão, que são absorvidas pelo concreto asfáltico. Para as demais camadas, foram determinados os valores de N_f (número de repetições do eixo padrão de 8,2 tf) correspondente ao dano previsto em cada modelo de previsão.

Para a camada de binder em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), o parâmetro crítico considerado foi a deformação específica de tração nas fibras superior e inferior da camada asfáltica. Pelo fato da fibra superior estar comprimida e a deformação específica de tração ser significativamente reduzida na fibra inferior, a ruptura é evitada, devido à baixa solicitação, conforme mostra na Tabela 3.

Tabela 3- Dano previsto para a camada de Binder

Nível de Confiabilidade		80%
Binder		
Profundidade (cm)	ϵ_t ($\times 10^6$ m/m)	N
5,01	Compressão	∞
12,49	15,73	$2,14 \times 10^{10}$

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Na base cimentada, os parâmetros críticos avaliados foram a tensão de compressão vertical no topo da camada e a deformação específica de tração na fibra inferior da camada. Esses parâmetros são essenciais para avaliar o esmagamento e a fadiga na base cimentada, assegurando a integridade estrutural do pavimento ao longo de sua vida útil. As análises de esmagamento avançado e de fadiga da camada cimentada, conforme descrito nas Equações 10 e 11 do subitem 3.2, estão detalhadas na Tabela 4.

Tabela 4- Dano previsto para a camada de BGTC

Profundidade (cm)	ϵ_t ($\times 10^6$ m/m)	σ_v (kPa)	N	Nível de Confiabilidade
12,51	-	280	$8,397 \times 10^7$	80%
27,49	27,05	-	$9,818 \times 10^6$	50%

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Para a análise de fadiga, foi utilizado um nível de confiança de 50%, conforme recomendado pelo estudo de Mendonça (2014), devido ao desempenho da BGTC no TMA se aproximar à previsão desse modelo. Esta análise revelou que a durabilidade estimada da camada cimentada é significativamente reduzida, com a fadiga apresentando um número N crítico inferior à metade do N de projeto ($2,6 \times 10^7$). Além disso, a camada cimentada mostra um alto índice de trincamento, o que facilita a infiltração de água no pavimento. Essa infiltração pode acelerar os afundamentos plásticos, comprometendo a integridade estrutural e reduzindo drasticamente a vida útil do pavimento (MENDONÇA, 2014). Além disso, a repetida ação das cargas de tráfego pode intensificar a propagação de trincas existentes e gerar novas fissuras, aumentando a complexidade do reparo e a necessidade de manutenção frequente. Com o avanço do processo de fadiga, a camada cimentada pode perder sua capacidade de distribuir adequadamente as cargas aplicadas, resultando em deformações permanentes e desníveis na superfície do pavimento.

Para a camada de sub-base, o parâmetro crítico analisado foi a deformação permanente causada pelo cisalhamento da camada. A avaliação realizada indicou que a sub-base não apresentaria danos significativos à estrutura do pavimento, pois demonstrou um número N superior ao valor projetado inicialmente, conforme mostra na Tabela 5. Isso sugere que a

camada de sub-base possui uma capacidade de suporte adequada para resistir às cargas aplicadas pelo tráfego rodoviário, sem comprometer sua integridade ao longo do tempo, pois está bem protegida pelas camadas sobrejacentes.

Tabela 5-Dano previsto para a camada de Sub-base

Nível de Confiabilidade			80%
Sub-Base			
Profundidade (cm)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	N
35,00	44,58	49,35	$6,37 \times 10^{11}$

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

A avaliação do subleito incluiu a análise da deformação vertical de compressão e a tensão vertical no topo do subleito, exibindo valores significativamente elevados que indicam boa capacidade de suporte, conforme é mostrado na Tabela 6. As magnitudes de ε_v e σ_v sugerem o baixo nível de dano, também pela alta proteção realizadas pelas rígidas camadas sobrejacentes.

Tabela 6-Dano previsto para a camada do Subleito

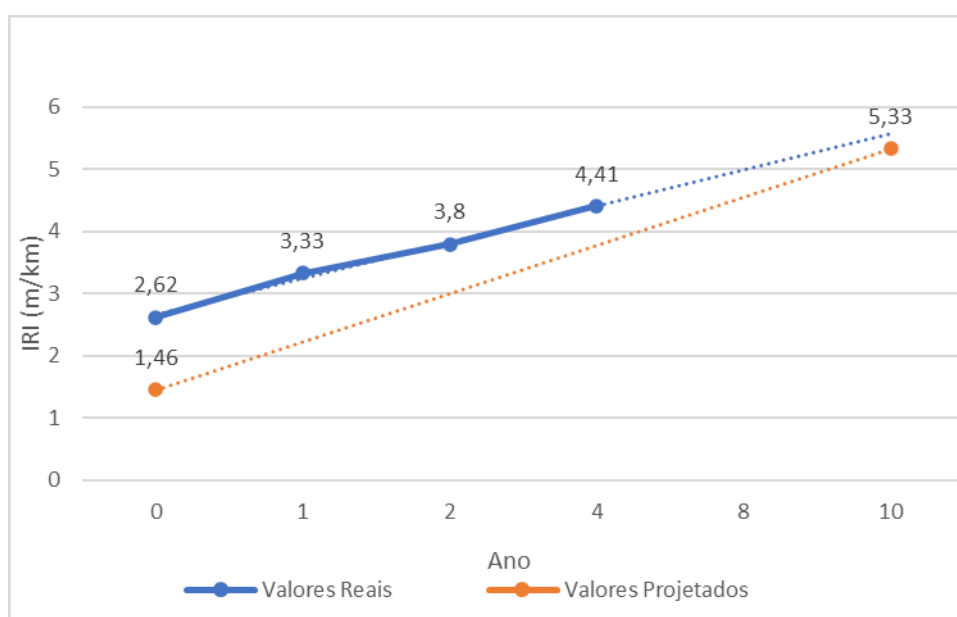
Profundidade (cm)	ε_t ($\times 10^6$ m/m)	σ_v (kPa)	N	Nível de Confiabilidade
42,51	66,42	-	$1,766 \times 10^{18}$	80%
	-	31,89	$6,26 \times 10^{119}$	

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

A avaliação da irregularidade longitudinal do trecho monitorado foi realizada utilizando o Índice de Irregularidade Internacional (IRI), conforme o modelo de Albuquerque (2007), e calculado a partir dos dados obtidos nos estudos de Mendonça (2014) e Nascimento (2017). Os valores dos dados reais foram obtidos por meio de um perfilômetro inercial a laser instalado em um veículo e conectado a um computador, conforme descrito no estudo de Nascimento (2017). Nos valores reais, os levantamentos indicaram um aumento da irregularidade longitudinal ao longo dos anos. Apenas na primeira medição, realizada logo após a conclusão e entrega do trecho ao tráfego, o valor estava abaixo do exigido pelo DNIT (2006). Embora a primeira medição tenha mostrado um valor abaixo, os resultados ainda apresentaram valores altos de IRI, classificados no limite da categoria "bom". Na última medição, no quinto ano desde abertura do tráfego o valor de IRI (3,8 m/km) já era considerado "ruim", de acordo com a classificação do DNIT (2006). Já os valores projetados, calculados aqui com o modelo de Albuquerque (2007) a partir dos dados do estudo de Mendonça (2014), apresentaram um IRI inicial menor. De acordo com a projeção mesmo após 10 anos, o IRI permaneceu abaixo do limite estabelecido pelo DNIT (2006) para pavimentos antigos, que é de 6,0 m/km (Figura 15). Essa diferença significativa entre as condições projetadas e as observadas para o início do

período de projeto do pavimento destaca a importância de ajustes nos parâmetros de projeto ou no controle de execução para melhorar a durabilidade e o desempenho do pavimento ao longo do tempo. A projeção do gráfico de IRI de campo mostrou convergência com os valores estimados pelo modelo de Albuquerque (2007) ao final do 10º ano. Contudo, o modelo apresenta um caráter mais arrojado em relação aos dados de campo, pois considera cenários otimizados de desempenho. Essa discrepância foi analisada detalhadamente, ressaltando tanto as limitações quanto as vantagens da aplicação do modelo teórico em diferentes condições práticas.

Figura 15- Evolução da irregularidade longitudinal com o tempo



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

O aumento da irregularidade longitudinal ao longo do tempo sugere um desgaste significativo do pavimento, muito devido aos danos estruturais também previstos à BGTC, refletindo problemas de manutenção e a necessidade de intervenções para garantir a segurança e o conforto dos usuários. A irregularidade excessiva pode resultar em desconforto para os motoristas, maior desgaste dos veículos e potencialmente aumentar os riscos de acidentes. Em resumo, a análise do IRI revelou que, embora o pavimento tenha inicialmente atendido aos requisitos de irregularidade longitudinal do DNIT, houve um aumento significativo da irregularidade ao longo do tempo, superando os limites recomendados ao final da vida útil do projeto. Isso destaca a necessidade de ajustes no dimensionamento do pavimento para assegurar sua durabilidade e desempenho adequado.

Após a análise de desempenho identificou-se que a base cimentada é a camada crítica do pavimento, sendo suscetível a danos precoces por fadiga. Isso implica que, do ponto de vista mecânico, o pavimento não está atendendo plenamente às suas funções projetadas. Recomenda-

se, portanto, considerar a modificação das espessuras das camadas do pavimento para um dimensionamento estrutural mais adequado. A otimização das espessuras pode envolver ajustes na espessura da base cimentada, das camadas asfálticas ou da camada de sub-base, dependendo das necessidades específicas identificadas pela análise estrutural. Esse processo visa melhorar a distribuição de cargas e reduzir os efeitos adversos da fadiga sobre o pavimento, aumentando sua durabilidade e prolongando sua vida útil.

4.3 Comparação dos métodos de otimização

No processo de aplicação dos algoritmos de otimização para dimensionamento, tanto as serventias estruturais e funcionais funcionaram como restrições para a obtenção de soluções factíveis do ponto de vista técnico. Contudo, a otimização da solução no ponto de vista econômico, pode fornecer uma solução de engenharia que responda aos requisitos técnicos no menor custo possível.

Portanto, para realizar a comparação entre os métodos de otimização, também foi realizada a análise de custos no ciclo de vida (CCV) do pavimento. A análise do CCV baliza a eficácia dos métodos de otimização em obter a solução mais viável do ponto de vista econômico. A função objetivo da Equação 12 foi utilizada em conformidade com a Equação 5 para determinar o custo por metro quadrado do pavimento. Para garantir a precisão dos cálculos, foram utilizados os valores da tabela SICRO de outubro de 2023, conforme mostrado na Tabela 7, incluindo os valores de Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) e a taxa SELIC do período. As características específicas do projeto, como a extensão e a largura total da via, estão detalhadas na Tabela 2.

Além disso, foi adotado o valor médio anual fornecido pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) para o custo de conservação ao longo de 12 meses em uma rodovia com extensão de 60 km e 4 faixas de tráfego, totalizando R\$ 11.673.055,19, para medir o custo total de conservação.

$$CCV = (1661,66 \cdot h_1 + 12993,93 \cdot h_2 + 1751,82 \cdot h_3 + 109,73 \cdot h_4) + 106,60 - CC \cdot \frac{\left(\frac{N_c - 2,6x 10^7}{2,6x 10^7}\right)}{(1 + 0,1125)^{n-1}} \quad (12)$$

Onde:

CCV = Custo no Ciclo de Vida (R\$/m²);

h_i = Espessura da i-ésima camada do pavimento (m)

CC = Custo de Construção (R\$/m²)

t = tempo (anos);

n = número de camadas do pavimento

N_C = número N Crítico, ou seja, o menor número N;

Tabela 7- Custos dos materiais

Material	Unid.	Valor Unitário (R\$)	Valor por m ³ (R\$)
CBUQ com polímero SBS – Faixa C do DNIT	t	602,05	1.444,92
CBUQ – Faixa B do DNIT	t	541,28	1.299,072
Brita Graduada Tratada com Cimento – BGTC – 3% CP – Faixa C do DNIT	m ³	422,51	422,51
Solo A-2-7 – CBR $\geq$ 20%	m ³	89,10	89,10
Solo A-2-6 – CBR $\geq$ 7%	m ³	-----	-----
BDI	23,15%		
BDI diferenciado	15%		
Selic	11,25%		

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Para a seção transversal original do TMA (conforme executada em campo), o CCV resultante foi de R\$ 436,76 R\$/m², refletindo o investimento unitário (m²) necessário para a construção do pavimento em 2023, considerando tanto os custos iniciais quanto às necessidades constantes de manutenção dessa estrutura subdimensionada ao longo do tempo.

A análise comparativa das espessuras das camadas do pavimento foi conduzida conforme as restrições estabelecidas pelo SAPEM (2014) e as exigências técnicas específicas de cada camada. Para a camada de capa (Faixa C) e binder (Faixa B), compostas por Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) com polímero SBS e CAUQ sem adição de polímero, respectivamente, a espessura mínima estabelecida foi de 2,5 cm, com uma espessura máxima permitida de 17,5 cm.

Os métodos de otimização aplicados resultaram em ajustes significativos na espessura inicial da camada de capa, inicialmente de 5 cm. Os métodos Otimização por Enxame de Partículas (PSO) e Adaptação de Matriz de Covariância (CMA-ES) alcançaram 3 cm, o Algoritmo de recozimento simulado (SA) atingiu 3,5 cm, enquanto o método Pesquisa Direta Multidirecional (MDSearch) obteve a menor espessura de 2,5 cm, conforme detalhado na Tabela 8. A camada de binder também foi ajustada em todos os métodos, destacando a convergência realizada de 7,5 cm para 2,5 cm pelos métodos AS, PSO e CMA-ES. Essas modificações conciliaram os requisitos de resistência e durabilidade do pavimento, atribuindo

maior função estrutural à camada de BGTC, para proporcionar a economia na aplicação de misturas asfálticas, que representam os materiais mais onerosos da seção.

Tabela 8- Comparativo de espessuras do pavimento

Camada	Material	Espessura Inicial (cm)	Espessura Otimizada (cm)			
			SA	PSO	CMA-ES	MDSearch
Capa	CBUQ com polímero SBS – Faixa C do DNIT	5,0	3,5	3,0	3,0	2,5
Binder	CBUQ – Faixa B do DNIT	7,5	2,5	2,5	2,5	5,0
Base	Brita Graduada Tratada com Cimento – BGTC – 3% CP – Faixa C do DNIT	15,0	31,0	29,0	29,0	30,0
Sub-base	Solo A-2-7 – CBR $\geq$ 20%	15,0	10,0	10,0	10,0	15,0

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Para a camada de base, que utiliza BGTC contendo 3% de cimento Portland, a espessura inicial foi estabelecida em 15,0 cm. Conforme especificado pelo SAPEM (2014), a espessura mínima recomendada é de 10,0 cm, com um limite máximo permitido de 41,9 cm. Durante a aplicação dos métodos de otimização, observou-se um aumento nas espessuras, como exemplificado pelos métodos PSO e CMA-ES que obtiveram 29,0 cm e o método SA que alcançou até 31,0 cm, proporcionando uma camada de base substancialmente mais robusta. Esta camada foi identificada como crítica na análise de desempenho do pavimento. Os métodos de otimização, ao aumentarem a espessura da camada de base para valores superiores ao aplicado no TMA e em direção ao limite superior permitido pelo SAPEM (2014), visaram aumentar sua capacidade de suportar esforços de fadiga ao longo da vida útil projetada do pavimento, fazendo dela a camada crítica da estrutura.

A sub-base, composta por solo do tipo A-2-7 com CBR superior a 20%, iniciou com uma espessura de 15,0 cm. Os limites mínimo e máximo de espessura são os mesmos que foram estabelecidos para a base. Todos os métodos de otimização ajustaram a espessura para valores entre 10 cm e 15 cm, destacando que os métodos que geram mais iterações (SA, PSO e CMA-ES) reduziram ao limite mínimo, já que a contribuição estrutural dessa camada era mínima na seção dimensionada. Certamente poderia ser suprimida numa análise com alteração dos materiais da seção transversal.

Logo após, foram realizadas as análises estruturais de desempenho, que consistiram em comparar o período de vida útil do projeto original com o estimado pelos modelos de desempenho incorporados neste método para as diversas camadas do pavimento. Foram determinados os valores de Nf (número de repetições do eixo padrão de 8,2 tf – AASHTO) correspondentes ao dano previsto em cada modelo de previsão, conforme a Tabela 9. A análise dos resultados demonstra que os métodos de otimização foram eficazes em ajustar as espessuras

das camadas do pavimento conforme as restrições estabelecidas pelo SAPEM (2014), garantindo a durabilidade e o desempenho estrutural necessários para todo o período de projeto do TMA, diferentemente da seção efetivamente construída (seção de Projeto).

A análise de fadiga da camada de revestimento foi realizada de acordo com o método do SAPEM (2014). Observou-se que, na configuração inicial do pavimento, a tensão foi dispensada, uma vez que esta apresenta apenas tensões de compressão, que são absorvidas pelo concreto asfáltico tanto na parte superior quanto na inferior da camada. No entanto, quando otimizamos a camada, percebe-se que há tensões na camada superior, embora significativamente reduzidas, não havendo ruptura *top-down* da camada ao longo da vida útil do pavimento. Contudo, percebe-se que é factível a avaliação da fibra superior de misturas asfálticas para a detecção de possibilidade de trincamentos *top-down* em camadas de baixa espessura.

Tabela 9- Comparativo de análise de desempenho

N	Projeto	SA	PSO	CMA-ES	MDSearch
Revestimento (Mistura Asfáltica)					
$N_{fcapasup}$	Compressão	$2,35 \times 10^8$	$1,08 \times 10^8$	$1,08 \times 10^8$	$3,62 \times 10^8$
$N_{fcapainf}$	Compressão	Compressão	Compressão	Compressão	Compressão
Binder					
$N_{fbindersup}$	Compressão	Compressão	Compressão	Compressão	Compressão
$N_{fbinderinf}$	$2,14 \times 10^{10}$	$1,50 \times 10^{12}$	$1,91 \times 10^{13}$	$1,91 \times 10^{13}$	$8,56 \times 10^{10}$
Base (Cimentada)					
$N_{ci/ca}$	$8,40 \times 10^7$	$3,94 \times 10^7$	$3,72 \times 10^7$	$3,72 \times 10^7$	$4,79 \times 10^7$
N_{eff}	$9,818 \times 10^6$	$2,73 \times 10^7$	$2,60 \times 10^7$	$2,60 \times 10^7$	$3,03 \times 10^7$
Sub-base (Granular)					
N_{sb}	$6,37 \times 10^{11}$	$5,75 \times 10^{12}$	$2,70 \times 10^{12}$	$2,70 \times 10^{12}$	$1,05 \times 10^{15}$
Subleito					
$N_{slepsilon}$	$1,77 \times 10^{18}$	$7,17 \times 10^{18}$	$4,79 \times 10^{18}$	$4,79 \times 10^{18}$	$6,37 \times 10^{19}$
$N_{slsigma}$	$6,26 \times 10^{119}$	$8,28 \times 10^{137}$	$8,27 \times 10^{131}$	$8,27 \times 10^{131}$	$1,76 \times 10^{175}$

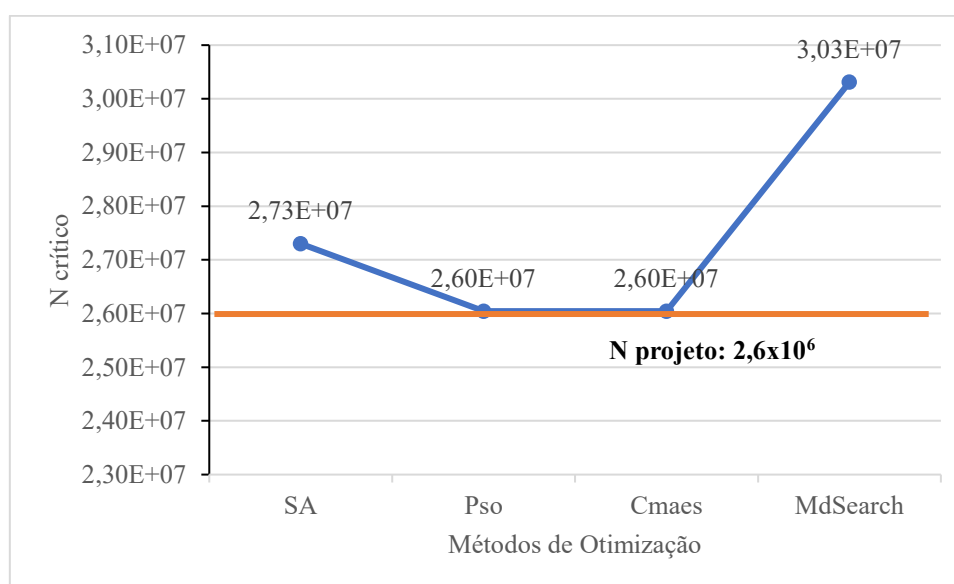
Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Para a camada de binder em (CAUQ), o parâmetro crítico considerado foi a deformação específica de tração na fibra inferior da camada asfáltica. A análise mostrou que as deformações foram reduzidas, não havendo ruptura da camada ao longo da vida de projeto do pavimento.

A camada cimentada revelou-se crítica tanto na configuração inicial quanto nos métodos de otimização. A diferença é que, na aplicação dos modelos de otimização, a camada consegue durar até o fim da vida de projeto do pavimento. Outro ponto importante avaliado foi um conjunto de camadas cujo valor do N de projeto ($2,6 \times 10^7$) seja menor ou igual ao Nf

($N_{adm} \leq N$). Na análise do N crítico, observou-se que cada método convergiu para magnitudes distintas. Os métodos PSO e CMA-ES, em particular, apresentaram valores ajustados ao N de projeto. A relação Benefício/Custo foi incorporada nesta etapa, considerando o benefício como o Número N e o custo o valor total obtido na solução. Essa análise permite evidenciar a eficácia técnica das configurações otimizadas em termos econômicos. Os resultados de N crítico para cada método são apresentados na Figura 16.

Figura 16 - N crítico obtido por cada método de otimização



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Para a camada de sub-base, o parâmetro crítico analisado foi a deformação permanente por cisalhamento. A avaliação indicou que a sub-base não apresentaria danos significativos à estrutura do pavimento, pois demonstrou um número N muito superior ao valor projetado inicialmente, muito pela limitação da espessura mínima de 10,0 cm. A análise Benefício/Custo reforçou que, apesar do desempenho elevado, o método MDSearch apresentou menor eficácia em termos econômicos, devido ao maior custo associado a essa camada.

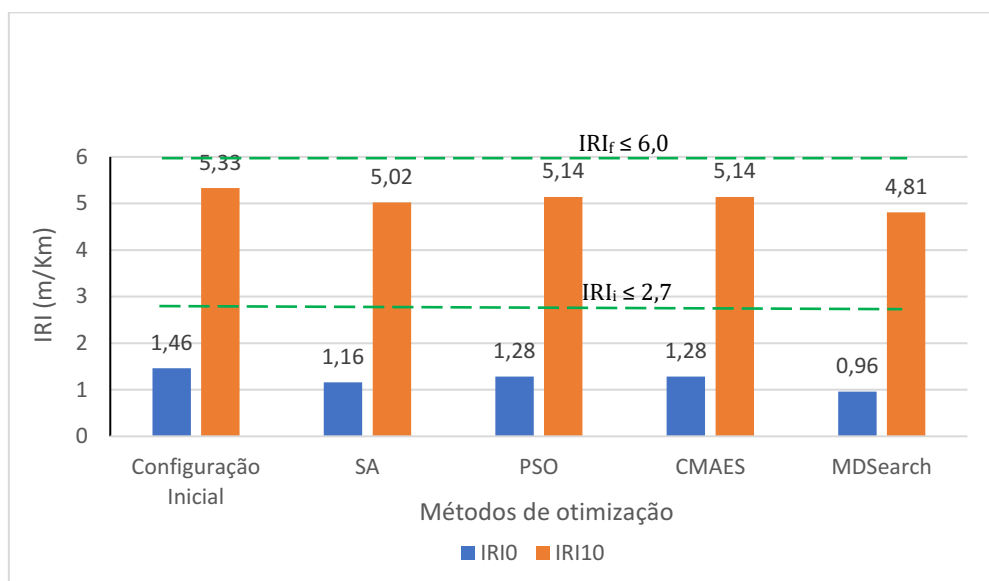
A avaliação do subleito incluiu a análise da deformação específica vertical e tensão vertical no topo do mesmo. Esta análise revelou valores significativamente elevados, indicando uma boa capacidade de suporte em todos os modelos, muito pela grande proteção realizada pelas camadas sobrejacentes.

Após a análise de desempenho estrutural, foi conduzida a análise funcional, conforme o modelo de Albuquerque (2007). A disposição das camadas com diferentes rigidezes influencia significativamente na capacidade estrutural do pavimento, embora não seja considerada em seu cálculo (ALBUQUERQUE, 2007). O IRI é um parâmetro eficaz para prever o desempenho funcional do pavimento, abrangendo aspectos de conforto, segurança e economia. Nesta etapa,

também foi considerada a relação Benefício/Custo, avaliando como diferentes configurações influenciam na economia ao longo da vida útil do pavimento.

Os valores do IRI foram estimados para os diferentes métodos de otimização, conforme ilustrado na Figura 17. De acordo com o DNIT (2006a), os valores máximos aceitáveis de IRI são de 2,7 m/km na abertura do pavimento ao tráfego e pode atingir 6,0 m/km para pavimentos antigos (BERNUCCI, *et al.*, 2022).

Figura 17- Comparativo valores de IRI



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

O IRI na abertura ao tráfego para a configuração inicial do pavimento foi de 1,46 m/km. Após a otimização, os métodos de SA, PSO e CMA-ES resultaram em reduções significativas no IRI, alcançando valores de 1,16, 1,28 e 1,28 m/km, respectivamente. O método MDSearch obteve o menor IRI na abertura da via, com 0,96 m/km, indicando uma possibilidade de melhoria substancial no conforto e na segurança do pavimento desde o início.

Já o IRI ao final do período de projeto para a configuração inicial do pavimento aumentou para 5,33 m/km. Com a aplicação dos métodos de otimização, observa-se que SA, PSO e CMA-ES conseguiram reduzir o IRI para 5,02, 5,14 e 5,14 m/km, respectivamente. O método MDSearch também proporcionou uma melhoria significativa, resultando em um IRI de 4,81 m/km após 10 anos. Esses resultados indicam que os métodos de otimização têm potencial de contribuir para a minimização do IRI ao longo do tempo, promovendo um melhor desempenho funcional do pavimento em termos de conforto para os usuários e prolongando sua vida útil efetiva conforme os padrões estabelecidos pelo DNIT (2006a). No entanto, para a aplicação prática em redes rodoviárias completas, é essencial considerar o dimensionamento de sucessivas seções, adaptando a rotina de otimização às condições regionais específicas, como

variações de solo, clima e demanda de tráfego. A análise de múltiplas seções permitiria explorar a flexibilidade dos métodos de otimização, avaliando a viabilidade de configurações ajustadas às diferentes realidades encontradas em grandes malhas viárias.

Além disso, a relação Benefício/Custo foi integrada ao processo, considerando o Número N como benefício e o custo total como métrica econômica. Essa análise permitiu identificar que, embora o método MDSearch tenha apresentado melhores resultados funcionais, os métodos PSO e CMA-ES se destacaram na maximização da relação Benefício/Custo, fornecendo soluções economicamente mais vantajosas. Essa combinação de benefícios promove uma análise mais equilibrada entre os custos e o desempenho funcional do pavimento. A camada de binder (CAUQ) e a camada cimentada demonstraram impactos significativos na análise estrutural. No caso da camada cimentada, os métodos PSO e CMA-ES ajustaram melhor os valores do Número N crítico às condições de projeto, prolongando a vida útil da camada até o fim do período de projeto. A sub-base, com sua espessura mínima de 10 cm, não apresentou danos significativos, mas o método MDSearch, com seu número N superior, revelou menor eficiência em termos econômicos. Essas análises demonstram que os métodos evolucionários, como PSO e CMA-ES, são eficazes não apenas para otimizar a configuração de camadas de pavimento em seções específicas, mas também para dimensionamentos amplos e integrados. A aplicação desses métodos em sucessivas seções reforça a capacidade de fornecer soluções robustas e economicamente viáveis, atendendo às exigências técnicas e promovendo um desempenho sustentável ao longo do ciclo de vida do pavimento.

A aplicação da rotina de otimização foi inicialmente conduzida para um trecho específico, mas o método proposto pode ser expandido para o dimensionamento de sucessivas seções. Esse processo envolve a consideração de variações regionais de tráfego, tipos de solo e condições climáticas, que podem ser incorporadas ao modelo ajustando os parâmetros de entrada. Assim, o método oferece flexibilidade para atender a demandas mais amplas na gestão de pavimentos.

4.4 Análise de desempenho dos métodos de otimização estudados

Nesta seção, são analisados os métodos de otimização testados nessa pesquisa, focando na eficiência e eficácia de cada técnica. A avaliação foi realizada com base em três critérios principais: tempo computacional, espessura final da camada crítica e custo total. Cada um desses critérios é essencial para determinar a viabilidade, eficiência e eficácia dos métodos de otimização utilizados, proporcionando uma compreensão abrangente sobre o desempenho e a aplicabilidade de cada técnica. Na sequência, são detalhados esses critérios, discutindo as implicações e os resultados obtidos para cada método de otimização.

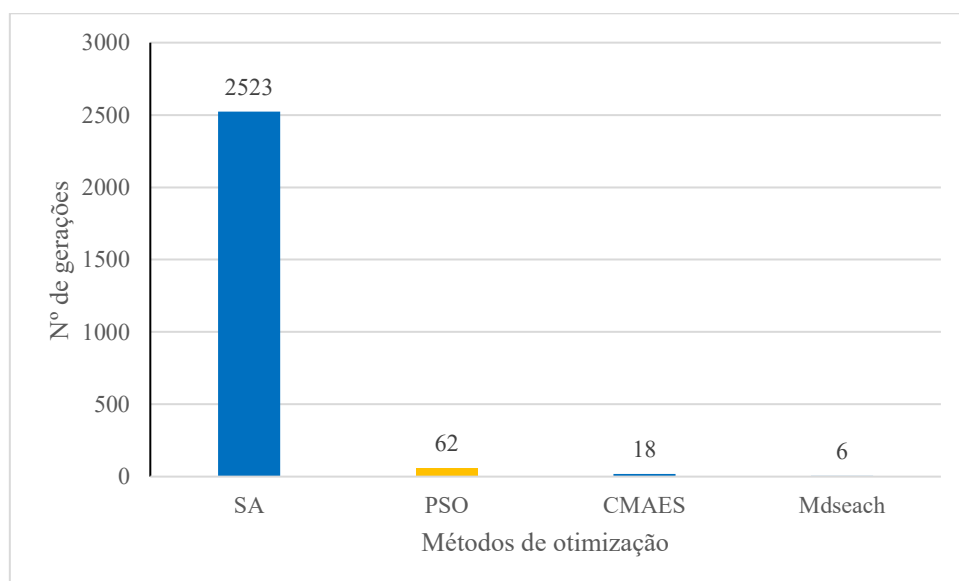
4.4.1 Eficiência (tempo/gerações)

Para uma análise completa, é essencial considerar tanto a eficiência quanto a eficácia de cada método. A eficiência avalia a dinâmica do processo, ou seja, os recursos utilizados para alcançar a solução, incluindo o número de gerações e o tempo computacional necessários para alcançar a convergência. A eficácia, por sua vez, refere-se à capacidade do método em convergir ao objetivo do projeto (N de projeto). O número de gerações está estreitamente relacionado ao tamanho da população e ao tempo computacional disponível para a execução do algoritmo, onde o tempo computacional refere-se ao tempo médio necessário para a obtenção dos minimizadores globais.

A rotina foi executada em um notebook com processador Intel Core i5-8265U 64bits rodando Windows 11. Este tipo de especificação é relevante para entender as limitações e capacidades do hardware utilizado, pois o desempenho dos algoritmos de otimização pode variar significativamente dependendo do poder de processamento disponível. Isso é especialmente importante quando se avalia o tempo computacional, uma vez que diferentes configurações de hardware podem alterar os resultados de maneira significativa.

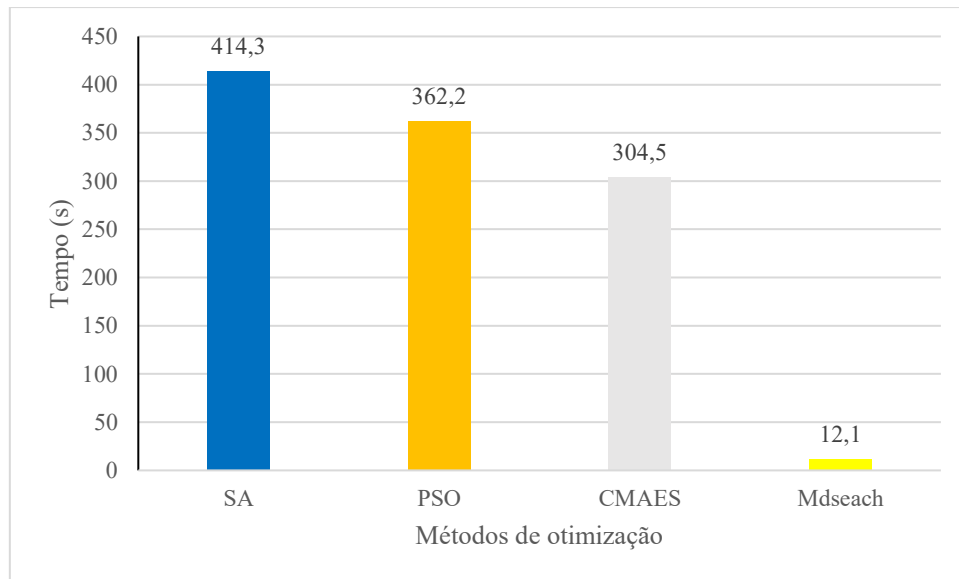
Conforme ilustrado nas Figuras 18 e 19, a comparação entre o número de gerações e o tempo computacional para cada método mostra que, quando requerem um maior número de gerações para convergir, tendem a ter tempos computacionais ligeiramente maiores, mas não é um impacto decisivo nem um fenômeno linear, já que outros fatores também influenciam o tempo total.

Figura 18 - Número de gerações médio gerados pelos métodos de otimização.



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Figura 19- Tempo computacional médio utilizado pelos métodos de otimização



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Os resultados foram obtidos a partir de seis tentativas de processamento para cada método, e, na Tabela 10, é apresentada a média e o desvio padrão do tempo e do número de gerações, bem como a relação tempo/gerações.

O método MDSearch se destaca significativamente no contexto da análise de eficiência dos métodos de otimização testados. Sua principal vantagem reside no menor tempo computacional médio e no menor desvio padrão entre os métodos avaliados, o que reflete uma alta consistência em seu desempenho. Essa eficiência torna o MDSearch especialmente atrativo para aplicações onde o tempo de execução é um fator crítico, permitindo que ele resolva o problema proposto com notável rapidez. Essa consistência e velocidade são vitais em cenários de engenharia onde decisões rápidas e confiáveis são essenciais, especialmente em contextos como o dimensionamento de pavimentos, onde a otimização precisa ser realizada de maneira eficaz e em prazos limitados.

Comparando com outros métodos, como o SA, observa-se que, apesar desse método necessitar de um tempo computacional maior e um número substancialmente mais elevado de gerações (média de 2523,83), ele demonstra uma notável produtividade. O SA processa 6,04 gerações por segundo, destacando-se por sua capacidade de gerar soluções rapidamente por unidade de tempo. Essa característica pode ser vantajosa em situações onde é desejável uma rápida exploração do espaço de soluções, embora o tempo total de processamento ainda seja consideravelmente maior. Essa relação entre o tempo por geração e a eficiência global do método SA indica que ele pode ser adequado para cenários onde a rápida geração de soluções é mais valorizada do que a simples minimização do tempo computacional.

Tabela 10- Comparação da eficiência computacional

Tempo Computacional (s)				
Estatísticas	SA	PSO	CMA-ES	Mdseach
Média	414,35	362,18	304,48	12,07
Desv. Padrão	25,70	46,51	1,09	0,55
Nº de Gerações				
Estatísticas	SA	PSO	CMA-ES	Mdseach
Média	2523,83	61,67	18,33	6,00
Desv. Padrão	6,01	3,14	2,16	1,41
N crítico				
Projeto	SA	PSO	CMA-ES	Mdseach
$9,818 \times 10^6$	$2,730 \times 10^7$	$2,600 \times 10^7$	$2,600 \times 10^7$	$3,030 \times 10^7$
Análises				
⁽¹⁾ Saldo de N	$1,48 \times 10^7$	$1,62 \times 10^7$	$1,62 \times 10^7$	$1,19 \times 10^7$
tempo/geração	0,17	5,84	16,92	2,02
geração/tempo	6,04	0,17	0,06	0,50
⁽²⁾ Eficácia (%)	92,0%	100,0%	100,0%	73,4%
⁽³⁾ Eficiência (%/s)	0,22%	0,28%	0,33%	6,07%
⁽⁴⁾ Eficiência (%/geração)	0,04%	1,61%	5,56%	12,24%

Obs.:

⁽¹⁾ Saldo de N = (N crítico) – (N projeto)

⁽²⁾ Eficácia (%) = Saldo de N / (N crítico) – (N projeto)

⁽³⁾ Eficiência (%/s) = Eficácia / Tempo de processamento

⁽⁴⁾ Eficiência (%/geração) = Eficácia / Número de gerações.

As cores aplicadas na tabela indicam a avaliação qualitativa dos resultados apresentados, conforme descrito abaixo:

- **Verde:** Representa os melhores resultados para o critério avaliado. Indica desempenho altamente eficiente ou eficaz, sendo os valores mais desejáveis dentro do contexto analisado.
- **Amarelo:** Representa resultados intermediários, indicando um desempenho aceitável, mas que pode ser otimizado. Valores nesta categoria apresentam uma performance moderada.
- **Vermelho:** Representa os piores resultados para o critério avaliado. Indica desempenho abaixo do ideal, sugerindo necessidade de melhorias ou ajustes para alcançar a eficiência desejada.

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Por outro lado, os métodos CMA-ES e PSO se destacam não pela eficiência temporal, mas pela eficácia, que é um aspecto igualmente crucial em estudos de otimização. Ambos os métodos alcançaram uma eficácia de 100%, conforme evidenciado na Tabela 10, o que indica uma capacidade robusta de convergir para soluções que estão muito próximas do objetivo de projeto, ou seja, o valor crítico de N. Essa alta eficácia é um forte indicativo da competência desses métodos em explorar o espaço de busca de maneira mais precisa, resultando em soluções de alta qualidade. Apesar de o CMA-ES e o PSO apresentarem uma eficiência intermediária quando comparados ao MDSearch, é importante ressaltar que essa característica não deve ser

interpretada como uma desvantagem crítica. Em muitos casos, a escolha entre eficiência e eficácia depende do contexto específico do projeto. Por exemplo, em situações onde a qualidade do resultado final é mais importante do que o tempo de processamento, os métodos CMA-ES e PSO seriam naturalmente preferidos devido à sua alta capacidade de convergência. Em contraste, o MDSearch seria mais adequado em situações onde a rapidez é o principal requisito, como em operações de otimização em tempo real ou em cenários onde recursos computacionais são limitados.

Em estudos de otimização, é crucial equilibrar a velocidade de processamento com a capacidade de encontrar soluções ótimas e a robustez do método. Apesar das variações nos tempos computacionais entre os métodos, essa diferença não é decisiva quando o foco é o processo decisório para pavimentação, onde métodos convencionais podem demandar horas para gerar decisões confiáveis. Nesse cenário, o tempo de processamento de aproximadamente 7 minutos para obter a melhor solução representa um avanço significativo, melhorando a eficiência geral do projeto em comparação à execução manual.

Além disso, a próxima seção da análise se concentrará em uma avaliação mais detalhada da eficácia dos métodos de otimização, por meio de uma análise de sensibilidade. Essa análise é fundamental para compreender melhor como os métodos respondem a variações nos parâmetros e como isso afeta sua capacidade de convergir para soluções que se aproximem ao máximo do valor crítico de N .

4.4.2 Eficácia na convergência da otimização

A capacidade dos métodos de otimização para convergir ao N de projeto é um aspecto crucial na avaliação de seu desempenho. A consistência dos métodos de otimização foi avaliada pela capacidade das técnicas em convergir para espessuras ótimas de pavimento a partir de diferentes condições iniciais. Esta análise é crucial para assegurar que os métodos não apenas encontrem soluções ótimas, mas que estas soluções sejam robustas e independentes do ponto de partida. Para isso, foram testadas três diferentes espessuras iniciais. O primeiro exemplo foi com as espessuras mínimas permitidas, o segundo com as espessuras máximas e o terceiro com a média das espessuras. A comparação dos diferentes métodos de otimização com essas espessuras iniciais testadas e os resultados de convergência podem ser vistos nas Tabelas 11, 12 e 13 respectivamente.

a) Exemplo com as espessuras mínimas das camadas

Observa-se na Tabela 11 que o método MDSearch não conseguiu convergir para o N de projeto, resultando em um valor menor e, conseqüentemente, subdimensionando a estrutura do pavimento. Em contrapartida, os métodos CMA-ES e PSO conseguiram convergir para a

mesma seção transversal e atender ao N de projeto, demonstrando sua eficácia no dimensionamento. O método SA, embora não tenha convergido exatamente para a mesma seção transversal dos demais, apresentou um N crítico muito próximo ao de projeto, indicando que seus resultados são relevantes.

É importante destacar que o uso das espessuras mínimas neste exemplo resultou em um aumento do custo total do ciclo de vida (CCV) porque as espessuras mínimas violam as restrições do projeto e, portanto, nunca seriam implementadas na prática. Esse aumento de custo deve ser interpretado no contexto de que as espessuras mínimas, por não serem viáveis, exigiram um aumento necessário para cumprir as especificações do projeto. Assim, o aumento do CCV não reflete uma falha na otimização pelos métodos SA, PSO e CMA-ES, mas sim a necessidade de ajustar as espessuras para atingir um N crítico viável. Os métodos PSO e CMA-ES convergiram para soluções economicamente otimizadas, com o menor aumento no CCV. O método SA, embora não tenha convergido para a mesma seção transversal dos demais, apresentou um N crítico muito próximo ao de projeto, indicando resultados relevantes. Enquanto isso, o método MDSearch apresentou rápido ponto de parada, permanecendo com a mesma espessura inicial e subdimensionando o pavimento.

Tabela 11- Otimização a partir das espessuras mínimas das camadas (Exemplo 1)

Camada	Espessuras das Camada (cm)				
	Input (usuário)	Output (otimização)			
		SA	PSO	CMA-ES	MDSearch
Capa	2,5	3,5	3,0	3,0	2,5
Binder	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Base	10,0	28,0	29,0	29,0	10,0
Sub-base	10,0	19,5	10,0	10,0	10,0
Tempo (s)		418,0	376,7	552,1	6,6
Geração		794,0	58,0	19,0	8,0
Aumento de Custo		34,49%	29,57%	29,57%	0,00%
Avaliação de Desempenho					
Camada Crítica	Tipo	BGTC	BGTC	BGTC	BGTC
	$N_{crítico}$	$2,61 \times 10^7$	$2,60 \times 10^7$	$2,60 \times 10^7$	$4,80 \times 10^6$
	Dano	Fadiga	Fadiga	Fadiga	Fadiga
Categoria do Dimensionamento					
Técnica		Otimizado	Otimizado	Otimizado	Subdimensionado
Econômica		Superdimensionado	Otimizado	Otimizado	Subdimensionado

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

b) Exemplo com as espessuras médias das camadas

No exemplo com as espessuras médias (Tabela 12), novamente os métodos PSO e CMA-ES convergiram tanto para a mesma seção transversal quanto para as mesmas tensões e deformações já apresentadas na Tabela 9. Esses métodos foram os que obtiveram as maiores reduções de custo, demonstrando eficácia na otimização do dimensionamento do pavimento.

Por outro lado, a aplicação do método MDSearch não tornou capaz de convergir o dimensionamento para o número N de projeto, resultando em valor abaixo e subdimensionando o pavimento. Este método mais uma vez apresentou falhas relevantes ao otimizar o dimensionamento com as restrições definidas para os parâmetros do projeto.

A aplicação do método SA, embora tenha convergido para o N crítico que atende às restrições de projeto, acabou superdimensionando a estrutura, gerando um ônus maior ao projeto.

A análise dos resultados destaca que, ao utilizar as espessuras médias iniciais, os métodos PSO e CMA-ES não apenas mantiveram a consistência ao dimensionar a seção transversal e encontrar desempenho estrutural ótimo, mas também alcançaram as maiores reduções no custo total do ciclo de vida (CCV). Em contrapartida, a aplicação do MDSearch novamente apresentou dificuldades em atingir os objetivos e restrições do projeto.

Tabela 12 - Otimização a partir das espessuras média das camadas (Exemplo 2)

Camada	Espessuras das Camada (cm)				
	Input (usuário)	Output (otimização)			
		SA	PSO	CMA-ES	MDSearch
Capa	10,0	3,5	3,0	3,0	10,0
Binder	8,8	2,5	2,5	2,5	9,0
Base	26,0	40,0	29,0	29,0	26,0
Sub-base	26,0	21,0	10,0	10,0	13,0
Tempo (s)		407,2	397,7	338,2	6,7
Geração		2022	74	19	15
Redução de Custo		40,87%	45,72%	45,72%	14,26%
Avaliação de Desempenho					
Camada Crítica	Tipo	BGTC	BGTC	BGTC	BGTC
	$N_{crítico}$	$2,92 \times 10^7$	$2,60 \times 10^7$	$2,60 \times 10^7$	$2,47 \times 10^7$
	Dano	Fadiga	Fadiga	Fadiga	Fadiga
Categoria do Dimensionamento					
Técnica		Superdimensionado	Otimizado	Otimizado	Subdimensionado
Econômica		Superdimensionado	Otimizado	Otimizado	Subdimensionado

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

c) Exemplo com as espessuras máximas das camadas

No terceiro exemplo (Tabela 13), foram utilizadas as espessuras máximas permitidas para as camadas. O método MDSearch apresentou a menor redução de custo, com apenas 0,07%, mantendo as espessuras das camadas praticamente inalteradas e reduzindo apenas as espessuras da base e sub-base, proporcionando um superdimensionamento expressivo ao projeto.

A aplicação do método SA novamente apresentou boa convergência ao N de projeto, tendo uma redução de custo próxima dos métodos PSO e CMA-ES, quando comparada ao custo do “input do usuário”. Os métodos PSO e CMA-ES mantiveram, consistentemente, o mesmo resultado em todos os exemplos, tanto em termos de tensões e deformações, quanto nas espessuras convergência ao N de projeto, demonstrando serem os métodos mais robustos e eficazes na otimização dos dimensionamentos realizados.

Esses resultados destacam que, mesmo com as espessuras máximas iniciais, os métodos PSO e CMA-ES foram capazes de otimizar as camadas do pavimento de maneira eficaz, mantendo a uniformidade nos parâmetros críticos de projeto. Por outro lado, embora o método MDSearch tenha alcançado um N crítico acima do N de projeto, sua eficácia na redução de custos foi significativamente inferior. O método SA, apesar de ter atingido a convergência para o N de projeto, não mostrou a mesma consistência nos resultados em comparação com os métodos PSO e CMA-ES.

Tabela 13 - Otimização a partir das espessuras máxima das camadas (Exemplo 3)

Camada	Espessuras das Camada (cm)				
	Input (usuário)	Output (otimização)			
		SA	PSO	CMA-ES	MDSearch
Capa	17,5	2,5	3,0	3,0	17,5
Binder	15,0	4,5	2,5	2,5	15,0
Base	41,9	28,5	29,0	29,0	40,0
Sub-base	41,9	16,0	10,0	10,0	40,0
Tempo (s)		415,0	334,4	329,8	6,3
Geração		3794	41	23	12
Redução de Custo		64,05%	66,46%	66,46%	0,07%
Avaliação de Desempenho					
Camada Crítica	Tipo	BGTC	BGTC	BGTC	BGTC
	$N_{crítico}$	$2,70 \times 10^7$	$2,60 \times 10^7$	$2,60 \times 10^7$	$8,40 \times 10^7$
	Dano	Fadiga	Fadiga	Fadiga	Fadiga
Categoria do Dimensionamento					
Técnica		Superdimensionado	Otimizado	Otimizado	Superdimensionado
Econômica		Otimizado	Otimizado	Otimizado	Superdimensionado

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

4.4.3 Métricas de desempenho

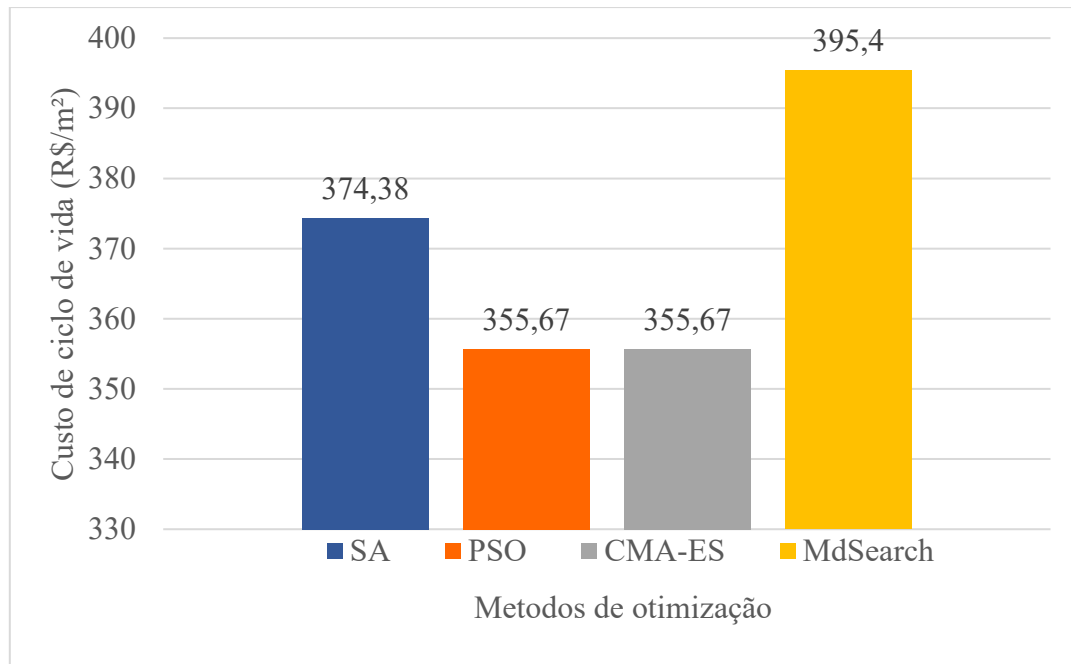
Neste tópico foi realizada uma análise detalhada dos métodos de otimização com base na redução do custo total do ciclo de vida (CCV), em função de alteração nas combinações das espessuras finais das camadas de pavimento. A redução do CCV aqui verificada foi a partir da comparação ao CCV da seção transversal efetivamente aplicada ao TMA (436,77 R\$/m²), e é um critério fundamental para a avaliação, pois um projeto de pavimentação economicamente viável deve minimizar os custos ao longo de todo o período de análise. Foram examinados os CCVs dos diferentes métodos de otimização estudados, e o método que apresentou a maior redução de custos em relação à alternativa aplicada no TMA foi considerado o mais eficaz em termos econômicos.

Além da análise do custo, também foram avaliadas as combinações resultantes de espessuras finais das camadas de pavimento. Isso se deve ao fato de que os métodos precisam encontrar um equilíbrio adequado entre os custos e o desempenho estrutural. A espessura das camadas de pavimento é um fator crítico que influencia diretamente a durabilidade e a capacidade de carga do pavimento. Portanto, uma análise que considere apenas a redução de custos sem avaliar o desempenho estrutural pode resultar em um projeto subdimensionado.

Nesse contexto, os métodos PSO e CMA-ES demonstraram maior eficácia, pois atingiram valores muito próximos ao objetivo de minimizar o CCV enquanto mantinham a integridade estrutural. Os valores de CCV podem ser vistos na Figura 20, demonstrando-se que os métodos PSO e CMA-ES obtiveram soluções com espessuras de camadas idênticas, resultando em um CCV de 355,67 R\$/m², o que representa uma redução significativa de 18,57% em relação ao CCV do TMA, conforme apresentado na Figura 21. O método SA também conseguiu reduzir o CCV, embora um pouco menor aos métodos PSO e CMA-ES, aproximadamente 4% inferior a esses. O método com a menor redução de CCV foi o MDSearch (9,47%).

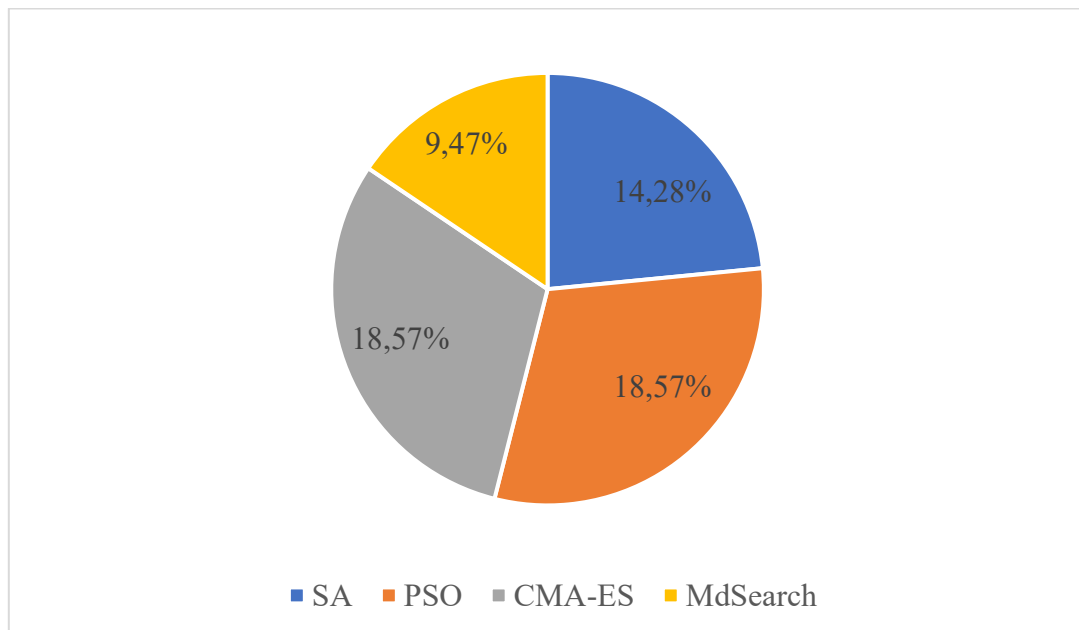
Embora o método SA seja útil para evitar mínimos locais, devido à sua capacidade de explorar uma ampla gama de soluções, seu custo mais alto e tempo computacional mais longo podem ser desvantagens em cenários onde a eficiência e o custo-benefício são críticos. O método MDSearch, embora extremamente eficiente em concluir a otimização, apresentou o maior CCV entre os métodos estudados, totalizando 395,4 R\$/m² e, consequentemente, a menor redução do CCV em relação ao TMA (9,47%). Isso sugere que, apesar de sua eficiência computacional, ele apresentou a menor eficácia na atividade de busca pela melhor combinação de espessuras de camadas.

Figura 20-Comparativo de CCV



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Figura 21-Comparativo de redução de custos



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Os métodos PSO e CMA-ES apresentam um desempenho superior em termos de otimização do CCV. Ambos são métodos evolutivos, conhecidos por sua forte capacidade de exploração e exploração eficiente do espaço de soluções. Essa característica permite que esses algoritmos refinem continuamente as soluções, até alcançar uma combinação ideal de espessuras que resulta em um CCV mínimo.

Além disso, ambos os métodos demonstram uma habilidade superior para encontrar o equilíbrio ideal entre a redução do CCV e a análise do desempenho estrutural adequado das

camadas de pavimento. Ao otimizar as espessuras das camadas, eles garantem que a solução final não apenas minimiza o custo, mas também atende aos requisitos de durabilidade e capacidade de carga, fatores cruciais para a viabilidade econômica de longo prazo de um projeto de pavimentação. Outro fator importante é a robustez que ambos os métodos demonstram em termos de convergência para soluções ótimas. Eles são projetados para evitar o aprisionamento em mínimos locais, um problema comum em métodos de otimização. Essa robustez é crucial para garantir que as soluções encontradas estejam o mais próximo possível do mínimo global, resultando em uma otimização mais eficaz e confiável.

Além disso, os métodos PSO e CMA-ES atingiram valores idênticos de CCV, sugerindo uma consistência elevada nas soluções geradas, o que é essencial em contextos práticos onde a previsibilidade e a repetibilidade dos resultados são importantes para a implementação de projetos de engenharia.

Destacam-se aqui as principais vantagens e desvantagens observadas na operacionalização de cada método de otimização:

a) CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy):

- Vantagens:
 - Alta eficácia na otimização (convergência ao N de projeto), com desempenho estrutural bastante ajustado.
 - Robustez em diferentes inputs iniciais de espessuras da seção transversal.
 - Maior redução no CCV.
 - Entre os menores tempos de processamento.
- Desvantagens:
 - Maior IRI comparado ao MDSearch e SA.
 - Complexidade do algoritmo.

b) PSO (Particle Swarm Optimization):

- Vantagens:
 - Alta eficácia na otimização (convergência ao N de projeto), com desempenho estrutural bastante ajustado.
 - Robustez em diferentes inputs iniciais de espessuras da seção transversal.
 - Maior redução no CCV.
- Desvantagens:
 - Maior IRI comparado ao MDSearch e SA.
 - Tempo de processamento intermediário.

c) **SA (Simulated Annealing):**

- Vantagens:
 - Eficaz em evitar mínimos locais, o que resulta em uma pequena folga no desempenho estrutural.
 - Capacidade de explorar uma ampla gama de soluções.
 - Convergência intermediária em N de projeto.
- Desvantagens:
 - Maior CCV em comparação com PSO e CMA-ES.
 - Tempo computacional elevado.
 - Variabilidade no resultado da seção transversal de acordo com os inputs iniciais do usuário.

d) **MDSearch (Multi-Directional Search):**

- Vantagens:
 - Baixíssimo tempo computacional para gerar soluções.
 - Menor IRI no início e no final do período de projeto.
- Desvantagens:
 - Menor eficácia na otimização, podendo resultar em subdimensionamento ou expressivos superdimensionamentos.
 - Maior CCV entre os métodos estudados a partir de inputs de espessuras mais elevadas.
 - Falta de consistência na convergência, o que sugere bloqueios durante a operacionalização da otimização.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de otimização para o dimensionamento estrutural de camadas de pavimentos flexíveis e semirrígidos, empregando uma abordagem integrada que combina critérios mecanísticos-empíricos, funcionais e econômicos. O modelo proposto foi fundamentado em uma análise detalhada dos fatores técnicos e econômicos relevantes, considerando diferentes condições de projeto. A identificação desses fatores foi crucial para a construção de um modelo de otimização aplicável em situações reais.

O desenvolvimento do modelo de otimização utilizou quatro técnicas distintas, cada uma avaliada em termos de sua eficácia e eficiência na determinação das espessuras ideais das camadas de pavimento para atingirem às restrições de projeto. A comparação entre os métodos demonstrou que o PSO e o CMA-ES apresentaram resultados semelhantes em termos de eficácia na otimização, pois atingiram os mesmos valores, de acordo com o objetivo de minimizar o CCV enquanto mantinham o desempenho estrutural e funcional necessários. A validação dos modelos foi realizada por meio de um estudo de caso real, conforme descrito por Mendonça (2014), que destacou deficiências na estrutura do pavimento original devido a falhas na concepção e desempenho. As novas configurações propostas pelos modelos de otimização resultaram em maiores espessuras na camada de base cimentada (BGTC), promovendo maior durabilidade e resistência à fadiga dessa camada e do pavimento, já que ela é crítica nessa configuração estrutural.

A análise dos resultados dos CCVs demonstrou que os métodos PSO e CMA-ES foram os que obtiveram as maiores reduções de custos em relação ao TMA, com redução de 18,57% no CCV ao longo do período de projeto. Além de melhorar o desempenho mecânico, ambos apresentaram valores de N crítico ajustados ao N de projeto. Além do CCV, foi avaliado o IRI inicial e final no período de projeto para os resultados de cada método. O método MDSearch obteve os menores IRIs inicial e final, seguido pelo SA, devido às seções transversais resultantes serem superdimensionadas. Os métodos PSO e CMA-ES apresentaram IRI superiores, mas ainda dentro das restrições adotadas nessa pesquisa.

Os testes de sensibilidade realizados indicaram que o PSO e o CMA-ES mantiveram alto grau de convergência no processo de otimização, convergindo para o mesmo N de projeto e configuração da seção transversal, mesmo com grandes variações de inputs das espessuras iniciais de análise. O método MDSearch foi o menos eficaz, chegando a não convergir por paradas prematuras.

O modelo aqui adotado, com restrições técnicas amplamente conhecidas, incluindo análise mecanicista com utilização do ELSYM5 e a aplicação de modelos de previsão de desempenho selecionados especificamente para as necessidades dessa análise (mas não exclusivos no modelo desenvolvido), tornou a aplicação da função objetivo (que relaciona custos e espessuras das camadas) mais racional e aplicável à análise de dimensionamento. Proporciona, portanto, a solução ótima para o dimensionamento em tempos inferiores a 10 minutos, reduzindo uma ampla atividade exigida pela operacionalização tradicional.

Em suma, o modelo de otimização desenvolvido cumpriu os objetivos inicialmente definidos para a pesquisa, proporcionando uma abordagem integrada e eficiente para o dimensionamento de pavimentos, equilibrando critérios mecanicistas, funcionais e econômicos. Cada método de otimização testado no sistema desenvolvido apresenta suas vantagens e desvantagens, e a escolha do método mais adequado deve ser pautada com base nos objetivos específicos do projeto. O modelo e programa desenvolvido nesta pesquisa abrem novas possibilidades para futuros avanços na engenharia de pavimentos, sublinhando a necessidade de constante evolução e aprimoramento das metodologias de otimização.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, identificaram-se diversos tópicos que podem ser explorados mais profundamente em pesquisas futuras, complementando os resultados obtidos e expandindo a aplicabilidade da ferramenta desenvolvida. As sugestões para trabalhos futuros incluem:

1. **Melhoria da interface e transformação em software:** A rotina atual pode ser aprimorada para se transformar em um software completo com uma interface gráfica de usuário (GUI) mais intuitiva e atraente. Isso facilitará o uso por engenheiros e técnicos, promovendo uma adoção mais ampla da ferramenta em diferentes contextos de projeto.
2. **Incorporação detalhada dos custos de manutenção:** Por se tratar de uma ferramenta mais genérica, os custos de manutenção foram abordados de forma simplificada. Em trabalhos futuros, recomenda-se a inclusão de uma análise mais detalhada e regionalizada desses custos, considerando fatores específicos de diferentes regiões, como preços de materiais e mão de obra. Além disso, é importante contemplar o custo dos usuários que impactam significativamente o custo total ao longo do ciclo de vida do pavimento.
3. **Desenvolvimento de um banco de dados de materiais:** A criação de um banco de dados abrangente de materiais de pavimentação, com propriedades mecânicas e custos associados, seria uma valiosa adição à ferramenta. Isso permitiria que os usuários

selecionassem materiais já estudados e validados, facilitando a análise e a tomada de decisão.

4. **Expansão para outros tipos de pavimentos:** A metodologia desenvolvida pode ser expandida para incluir outros tipos de pavimentos, como pavimentos rígidos e pavimentos intertravados. Isso aumentaria a versatilidade da ferramenta, permitindo sua aplicação em uma gama mais ampla de projetos de infraestrutura viária. Estudos específicos para cada tipo de pavimento podem ser realizados para adaptar os critérios de dimensionamento e os modelos de desempenho às suas particularidades.
5. **Implementação e análise de algoritmos de otimização baseados em aprendizado de máquina:** Uma área promissora para estudos futuros é a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina, como as redes neurais artificiais (ANN) ou algoritmos de otimização inspirados em aprendizado profundo, como o Deep Q-Learning. Esses algoritmos têm o potencial de aprimorar a capacidade de exploração de soluções ótimas. Além disso, podem aprender com dados históricos de projetos anteriores, melhorando a eficiência e a eficácia das soluções propostas.
6. **Utilização de outros softwares de análise tensões-deformações:** Sugere-se a adaptação da rotina de simulação para operar com modelos mais modernos, como o AEMC Medina (<<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/manual-aemc-2-4-6.pdf>>), em substituição ao ELSYM5. Por ter mais funcionalidades, como a não linearidade de camadas e a possibilidade de editar se a camada tem aderência ou não, podendo melhorar os resultados e ampliar a funcionalidade do programa, exigindo também pesquisa adicional para integrá-lo ao Octave de forma eficiente.

Essas sugestões têm o potencial de enriquecer significativamente a ferramenta desenvolvida, tornando-a mais robusta, precisa e aplicável a uma variedade maior de contextos e necessidades do setor de pavimentação.

REFERÊNCIAS

- _____. DNER-PRO 159/85. **Projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos**. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1985.
- _____. DNER-PRO 269/94. **Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV**. MT. Rio de Janeiro – RJ, 1994.
- _____. DNIT – IPR 719. **Manual de Pavimentação**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. DNIT 005/2003 – **TER. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos**. Brasília – DF, 2003.
- _____. DNIT 006/2003-PRO. **Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos**. Brasília – DF, 2003.
- _____. DNIT 008/2003 – **PRO. Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos**. Brasília – DF, 2003.
- _____. DNIT 009/2003 -**PRO. Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento**. Brasília – DF, 2003.
- _____. DNIT 442/2023 – **PRO. Pavimentação – Levantamento do perfil longitudinal de pavimentos com perfilômetro inercial – Procedimento**. Brasília – DF, 2023.
- _____. 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.
- AASHTO. **Guide for Mechanistic-empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures**, NCHRP 1-37A. Washington, DC: Transportation Research Board, 2004.
- AHMED, M. S.; HOQUE, M. A.; KHATTAK, A. J. **Demo: Real-time vehicle movement tracking on Android devices through Bluetooth communication with DSRC devices**. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC). Columbus, OH, EUA, 2016, pp. 1-2. 2016. DOI: 10.1109/VNC.2016.7835956.
- ALBUQUERQUE, F. S. **Sistema de Gerência de Pavimento para Departamentos de Estradas no Nordeste Brasileiro**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS. Porto Alegre. 2007.
- ALBUQUERQUE, F. S.; CALVALCANTE, F. P.; NÚÑEZ, W. P.; MACEDO, J. A. G. **Avaliação do EVERCALC5 na retroanálise de pavimentos brasileiros**. 37ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) e 11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária ENACOR, p. 1-12, 2006.
- ANTUNES, M.; MARECOS, V.; NEVES, J.; MORGADO, J. **Decision to Paving Solutions in Road Infrastructures Based on Life-Cycle Assessment**. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2016, vol. 11, pp. 43-52. DOI: 10.3846/bjrbe.2016.05.

APS, M. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI - International Friction Index para revestimentos asfálticos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento Engenharia de Transportes, 2006.

ASKARZADEH, A.; COELHO, L.; KLEIN, C.; MARIANI, V. A population-based simulated annealing algorithm for global optimization. **Systems, Man, and Cybernetics (SMC)**, 2016 IEEE International Conference on, 2016, IEEE. p. 004626-004633.

ASTM. **D6433 – 18. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys**. American Society for Testing and Materials. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2018.

ASTM. **E1845-15: Standard practice for calculating pavement macrotexture mean profile depth**. USA, American Society of Testing and Materials, 2015.

ASTM. **E965: Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture using a Volumetric Technique**. ASTM International, Pennsylvania, Estados Unidos, 1996.

ATZMON, D.; LI, J.; FELNER, A.; NACHMANI, E.; SHPERBERG, S.; STURTEVANT, N.; KOENIG, S. Multi-Directional Heuristic Search. **International Joint Conference on Artificial Intelligence**. 2020. DOI: 10.24963/ijcai.2020/558.

AUSTROADS. **Pavement Design: A Guide to the Structural Design of Road Pavements**. Sidney, 2004.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo. Oficina de Textos, 2007.

BASSO, L. C. G. **Aplicação de algoritmos genéticos na otimização de estratégias de manutenção e reabilitação de pavimentos flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2021.

BENMANSOUR, I. An Effective Hybrid Ant Colony Optimization for the Knapsack Problem Using Multi-Directional Search. **SN Computer Science**, v. 4, 164, 2023. DOI: 10.1007/s42979-022-01564-5.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.

BRITO JÚNIOR, J. A. **Solução para o despacho econômico ambiental de um sistema de geração térmica por recozimento simulado**. 2018. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/9997>. Acesso em: 20 de junho de 2024.

BRITO JÚNIOR, J.D.A.B.; NUNES, M.V.A.; NASCIMENTO, M.H.R.; RODRÍGUEZ, J. L. M.; LEITE, J. C. Solution to economic emission load dispatch by simulated annealing: case study. **Electrical Engineering**, v. 100, p. 749–761, 2018. DOI: 10.1007/s00202-017-0544-0.

BURIOL, L.; RITT, M. Notas de aula. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Informática, Departamento de Informática Teórica**, 2018.

CABRAL, M. F. F. C. **Avaliação de ruído de tráfego na interface pneu-pavimento em revestimentos asfálticos de Sergipe**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2013.

CABRAL, W. S.; BARROSO, S. H. DE A.; SILVA, S. DE A. T. E. **Consideração da deformação permanente de solos ocorridos na região nordeste na análise mecanística-empírica de pavimentos**. *Matéria* (Rio de Janeiro), 26(4), e13096, 2021.

CHIARELLO, G. P.; PASCOAL, P. T.; SANTOS, T. A.; PEREIRA, D. S.; BARONI, M.; GERGING, R. P. **Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo método do DNER (1981) e MeDiNa (2019): estudo de caso da duplicação da BR-287 - trecho Santa Cruz do Sul à Tabai/RS**. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 33., Balneário Camboriú, SC. Anais eletrônicos [...]. Balneário Camboriú, SC. Disponível em: <http://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/>. Acesso em: 6 set. 2023.

CNT. **Confederação Nacional do Transporte. Boletim estatístico CNT 2022**. Confederação Nacional do Transporte – CNT, Brasília – DF, 2022. Disponível na Web em: <http://www.cnt.org.br/>. Consultado em julho de 2022.

CNT. **Confederação Nacional do Transporte. Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Confederação Nacional do Transporte – CNT. Brasília – DF, 2022.

COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E.; WITT, R. J. **Concepts and applications of finite element analysis**. John Wiley & Sons, 4ª ed. 2007.

DENNIS JÚNIOR., J.; TORCZON, V. Direct search methods on parallel machines. **SIAM Journal on Optimization**, v. 1, p. 448-474, 1989.

DER-PB - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado da Paraíba. **Web Site. Informações sobre rodovias do estado da Paraíba**. Disponível na Web em: <http://www.der.pb.gov.br>. Consultado em agosto de 2022.

DROZDOWSKI, M.; DUARTE, A.; & RESENDE, M. G. C. **Stochastic Local Search Algorithms for the Maximum K-Covering Location Problem**. *European Journal of Operational Research*. vol. 285(1), pp. 87-103. 2020.

DUNCAN, J. M.; MONISMITH, C. L.; WILSON, E. L. **Finite Element Analysis of Pavements**. Highway Research Record, n. 228, p. 18-33, 1968.

EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. **Introduction to Evolutionary Computing**. 2ª. ed. [S.l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2015. ISBN 3662448734, 9783662448731.

FAARFIELD. **FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design**. 1991.

FISTER, I.; FISTER JR, I.; & YANG, X. S. **A Brief Review of Nature-Inspired Algorithms for Optimization**. *Elektrotehniski Vestnik*, 2018, vol. 85(3), pp. 129-137.

FRANCO, F. A. C. DE P. **Um Sistema para Análise Mecânica de Pavimentos Asfálticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2000.

FRANCO, F. A. C. P. **MeDiNa: Método de Dimensionamento Nacional. Manual para utilização do Método Mecânico-Empírico**. Versão 1.1.4. Rio de Janeiro, 78p. 2020.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV**. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 2007.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos**. Tese (doutorado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2016.

GIL, C. A. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**, 6ª edição. São Paulo: Atlas, 2017.

GOH, D. M.; TAN, S. **A multi-objective functional pavement design framework considering environmental impacts and life cycle assessment**. Journal of Cleaner Production, vol. 313, 2021.

GOLDSCHMIDT, R.; PASSOS; BEZERRA, E. **Data Mining. Conceitos, técnicas, algoritmos, orientações e Aplicações**. 2ª ed. Ed. Campus. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

GONZALEZ, J.; TRIGUEROS, C.; FERNÁNDEZ, L.; CANO, A. **Comparison between MATLAB and Octave in computational simulation**. Journal of Physics: Conference Series, vol. 819(1), 012056. 2017.

GOPALAKRISHNAN, K; MANIK, A. Co-variance matrix adaptation evolution strategy for pavement backcalculation. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2177-2187, 2010. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.040.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. **Modern Pavement Management**. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida/USA, 1994. 581p.

HADI, M. N. S.; ARFIADI, Y. **Optimum rigid pavement design by genetic algorithms**. Computers & Structures, vol. 79(17), pp. 1617-1624. 2001.

HANNA, A. M.; TONIOLO, G. R. **Flexible Pavement Design Using AASHTO 1993, 1998, 2002, and 2014 Design Guide Specifications**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, no. 2620, 2019.

HANSEN, N. **The CMA evolution strategy: A tutorial**. arXiv preprint arXiv:1604.00772, 2016.

HANSEN, N.; OSTERMEIER, A. **Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies: The covariance matrix adaptation**. In: IEEE. Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation. [S.l.], 1996. p. 312–317.

HANSEN, N.; ROS, R.; MAUNY, N.; SCHOENAUER, M.; AUGER A. Impacts of Invariance in Search: When CMA-ES and PSO Face Ill-Conditioned and Non-Separable

Problems. *Applied Soft Computing* 11, pp.5755-5769. 2011. DOI: [10.1016/j.asoc.2011.03.001](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.03.001).

HDM-4-a. **Volume 4 – Analytical framework & model descriptions: Part C – road deterioration models.** International Study of Highway Development and Management Tools (ISOHDM), The World Bank, Washington, USA, 2000.

HEUKELOM, W.; KLOMP, A.J.G. **Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavement during and after Construction.** Proceedings of the 1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, Ann Arbor, Michigan, 20-24 August, p. 667-685. 1962.

HUANG, Y.H. **Pavement Analysis and Design.** Pearson Prentice Hall, New York, N.Y., 2004.

HUDSON, W. R.; HAAS, R.; PERDIGO, R. D. **Pavement management system development.** National Cooperative Highway Research Program Report 215, Transportation Research Board, National Research Council, Ohio. 1979.

IMOUSSATEN, A.; COUTURIER, P.; MONTMAIN, J. **Introducing the difficulty of implementing alternatives in the multiple criteria decision problems.** In: IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Glasgow, UK. Proceedings, p. 1-7. 2020. DOI: 10.1109/FUZZ48607.2020.9177721.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle Swarm Optimization.** Proceedings of the International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, pp. 1942-1948. 1995.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. *Science*, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 1983. ISSN 0036-8075.

KOLDA, T. G.; LEWIS, R. M.; TORCZON, V. **Optimization by Direct Search: New Perspectives on Some Classical and Modern Methods.** *SIAM Review*, vol. 61(2), pp. 335-362. 2019.

LI, J.; HE, D.; SUN, Y. The PSO optimisation SVM prediction model for the asphalt pavement environment and service fatigue life. *IJICT*, v. 1, n. 1, p. 1, 2021. DOI: 10.1504/ijict.2021.10036635.

LI, J.; WANG, F.; ZHANG, Y.; HUANG, Y. **Experimental and numerical analysis of semi-rigid pavement structures.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10), 04017126, 2017.

LI, Z.; ZHANG, J.; LIU, T.; WANG, Y.; PEI, J.; WANG, P. Using PSO-SVR Algorithm to Predict Asphalt Pavement Performance. *ASCE*, v. 35, n. 6, 2021. DOI: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001666.

LIMA, J.P. **Modelo de previsão para a priorização de vias candidatas às atividades de manutenção e reabilitação de pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil com ênfase em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

LIRA, E. DE S. **Contribuição ao projeto otimizado de pavimentos rígidos pelo guia da AUSTROADS baseado no método PCA de 1984.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2017.

LOSHCHILOV, I.; GLASMACHERS, T.; BEYER, H. G. **Large Scale Black-Box Optimization by Limited-Memory Matrix Adaptation.** IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 23, no. 2, pp. 353-358, April 2019, doi: 10.1109/TEVC.2018.2855049.

MAHDI, M. I. **Performance Evaluation and Development of Mechanistic Empirical Pavement Design Procedure of Thin RCC Pavements.** LSU Doctoral Dissertations, 2017. Disponível em: https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/4104. Acesso em: 1 jun. 2023.

MAO, M.; CHEN, S.; ZHAO, L.; FENG, X.; MA, F. Pavement PV array reconfiguration strategy based on traveling salesman problem. **Energy**, v. 284, p. 129324, 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129324.

MEDINA, J. DE. **Mecânica dos pavimentos.** Rio de Janeiro (RJ): Editora UFRJ, 1997.

MENDONÇA, A.T. **Avaliação Preliminar de Trechos Monitorados na Rodovia BR-101/SE.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2014.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H.; TELLER, E. Equation of state calculations by fast computing machines. **The journal of chemical physics**, v. 21, n. 6, p. 1087-1092, 1953. ISSN 0021-9606.

MONISMITH, C.L.; OGAWA, N.; FREEME, C.R. **Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading.** Transportation Research Record. n. 5. 1975.

MOTTA, L. M. G. DA. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de carga repetidas.** Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1991.

MUSUNURU, G.K., HAIDER, S.W., BUCH, N. **Detecting Significant Changes in Traffic Patterns for Pavement Design.** In: Raab, C. (Ed.) Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements—Mairepav9. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 76. Springer, Cham, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-48679-2_17.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil.** Doctor of Philosophy. North Carolina State University. 2015.

NASCIMENTO, R.S. **Estudo de Desempenho à Fadiga de Base Cimentada Tipo BGTC na BR-101/SE.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2017.

NOVAES, A. G. **Métodos de otimização.** Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, SP, 1978.

NUNES, D. F. **Procedimento para análise de sensibilidade do Programa HDM-4.** Dissertação (Mestrado em Infra-Estrutura de Transportes) - Escola de Engenharia de São

Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. DOI: 10.11606/D.18.2012.tde-20062012-160119.

OLIVEIRA, J.; SILVA, H.; FERREIRA, A. **Optimization of asphalt pavement layer thicknesses using a genetic algorithm**. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 12(5), p. 506-514, 2019.

OLIVEIRA, M. B.; SILVA, A. A. M.; SOUZA, J. S. **Comparação entre os métodos PSO e Simulated Annealing na minimização de funções não lineares**. *Revista Cereus*, v. 10, n. 2, p. 376-388, 2018. DOI: 10.18605/2175-7275/cereus.v10n2p376-388.

OLUKANNI, D.O.; ADEJUMO, T.A.; SALAMI, A.W.; ADEDEJI, A.A. **Optimization-based reliability of a multipurpose reservoir by Genetic Algorithms: Jebba Hydropower Dam, Nigeria**. *Cogent Engineering*, 2018.

OSETRIN, M.; TARASYUK, V.; BESPALOV, D.; BESPALOVA, V.; MYROSHNYCHENKO, O. **Análise multicriterial como método de fundamentação da escolha de soluções de engenharia e planejamento para interseções de rodoviárias municipais**. *Problemas contemporâneos de Arquitetura e Urbanismo*, (59), 215–231, 2021.

PARANÁ. **Departamento de Estradas e Rodagens – DER. Norma de Pavimentos Flexíveis e Rígidos**. 2008.

PATERSON, W. D.O. **Road deterioration and maintenance effects**. World Bank Publications, Washington-DC, USA, 1987. Disponível em: <http://www.worldbank.org>. Acesso em: maio 2024.

PIMENTA, C. D.; SILVA, M. B.; MARINS, F. A. S. **Aplicação de algoritmo genético e da metaheurística simulated annealing em um processo siderúrgico**. *Revista Produção Online*, 21(1), 178–202. 2021. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v21i1.4200>

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. Novo Hamburgo, RS: Feevale, 2013.

PRYKE, A.; EVDORIDES, H.; ERMAILEH, R. **Optimization of pavement design using a genetic algorithm**. *IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2006*, p. 1095-1098, 2006.

QUEIROZ, C. A. V. **Performance prediction models for pavement management in Brazil**. 1981. 317 p. **Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy**, University of Texas, Austin-Texas, USA.

RAAD, L.; FIGUEROA, J.L. Load response of transportation support system. *Journal of Transportation Engineering*. ASCE, v. 106, pp. 111–128, 1980.

RAO, S. S. **Engineering optimization: theory and practice**. 4th ed. **John Wiley Sons**, 2009.

RODRIGUES, A. **Uso do MeDiNa em soluções básicas de pavimentos asfálticos no Distrito Federal. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)**. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 189 p., 2023.

SAPEM. South African Pavement Engineering Manual. **South African National Roads Agency Ltd**, 2014.

SCHWARTZ, W. C.; LI, R.; CEYLAN, H.; KIM, S.; GOPALAKRISHNAN, K. Global Sensitivity Analysis of Mechanistic-Empirical Performance Predictions for Flexible Pavements. **Transportation Research Board. TRB 2013 Annual Meeting CD-ROM**. Washington, D. C. 2013.

SENA, R. W. R. **Otimização de sistema e configuração de pavimentos de concreto pré-moldado via algoritmos evolucionários**. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

SENÇO, W. Manual de técnicas de pavimentação. 2 ed. Vol. II. **São Paulo: Editora Pini**, 2018.

SEVERI, A. A.; BALBO J. T.; RODOLFO M. P.; SESTINI, V. M.; PRIETO, V. Verificação à Fadiga de Revestimentos Asfálticos e Bases Cimentadas 'Programa Pavimentos Asfálticos v. 1.0'. **São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, 1998.

SHAHIN, M. Y.; KHON, S. D. Development of a Pavement Condition Rating Procedure for Roads, Streets and Parking Lots. Vol.2 – Distress Identification Manual. **CERLTR-M-268**, U.S. 2005.

SHIR, Ofer M.; YEHUDAYOFF, Amir. On the covariance-Hessian relation in evolution strategies. **Theoretical Computer Science**, v. 801, p. 157-174, 2020. ISSN 0304-3975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2019.09.002>.

SHRP. Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project. **Strategic Highway Research Program, National Academy of Science**, Washington, DC. 1993.

SOUZA JUNIOR, J. G. Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 218 p. 2018.

SOUZA, M. L. DE. Método de projeto de pavimentos flexíveis. **IPR. Publ**, v. 667, n. 3, 1981.

TIRATURYAN, A.N.; LYAPIN, A.A.; UGLOVA, E.V. Improvement of the non-destructive method for determining the mechanical characteristics of elements of multilayer structures on the example of pavements. **PNRPU Mechanics Bulletin**, n. 1, p. 56-65, December 2023. ISSN 2224-9893 (Print) 2226-1869 (Electronic). DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06.

TOHIDI, M.; KHAYAT, N.; TELVARI, A. The use of intelligent search algorithms in the cost optimization of road pavement thickness design. **Ain Shams Engineering Journal**, Volume 13, Supl., ISSN 2090-4479, 2022.

UDDIN, W. Pavement management systems. In: Fwa TF (Ed.) **The Handbook of Highway Engineering**. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis, 2006.

ULLIDTZ, P. Modelling Flexible Pavement Response and Performance, **Polyteknisk Forlag**, 1998.

USACE. Bearing Capacity of Soils: Engineering Manual. **United States Army Corps of Engineers**, Washington DC. 1982.

VIEIRA, S.A.; PINHO JR, A.A.E.; OLIVEIRA, F.H.L.; AGUIAR, M.F.P. Análise comparativa de metodologias de avaliação de pavimentos através do IGG e PCI. **Revista Conexões. Ciência e Tecnologia**, 10, n. 3, 20-30pp. 2016. DOI: 10.21439/conexoes.v10i3.799.

WAMBOLD, J. C.; HENRY, J. J. NASA Wallops Tie/Runway Friction: Workshops 1993-2002. **Montreal: TDC**, 2002. 155p. (Publication, TP14190E).

WSDOT. Everseries Users Guide: Pavement analysis computer software and case studies. **Washington State Department of Transportation**, Washington, D.C, USA, 2005.

XIAO, M.; LUO, R.; CHEN, Y.; GE, X. Prediction model of asphalt pavement functional and structural performance using PSO-BPNN algorithm. **Freedom**, v. 407, p. 133534, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133534.

YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. Principles of pavement design. **New York: Wiley**, 1975.