Instituto de Pesquisas em Transportes

Relatório de Pesquisa IPR RP – 038

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO OBTIDOS COM USO DE DIFERENTES SOFTWARES ABRANGENDO APRECIAÇÃO DE IMPACTO ECONÔMICO

BRASÍLIA/DF
NOVEMBRO/2026

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
DIRETORIA-GERAL
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA
INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES

Relatório de Pesquisa IPR RP – 038

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO OBTIDOS COM USO DE DIFERENTES SOFTWARES ABRANGENDO APRECIAÇÃO DE IMPACTO ECONÔMICO

Elaboração: Universidade Federal do Ceará

Contrato: TED nº 679/2020

Processo: 50600.017767/2026-24

DOI: 10.70859/IPR-RP-038/2026

Brasília/DF

Novembro/2026

AUTORIA:

Ana Noemy Fernandes Moreira, Graduanda em Engenharia Civil – Universidade Federal do Ceará – UFC

Arthur Veras Moreira, Graduando em Engenharia Civil – Universidade Federal do Ceará – UFC

Engª Beatriz Chagas Silva Gouveia, D.Sc. – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT

Engº Iuri Sidney Bessa, D.Sc. – Universidade Federal do Ceará – UFC

Engº Jardel Andrade de Oliveira, D.Sc. – Universidade Federal do Ceará – UFC

Engº Jorge Barbosa Soares, Ph.D. – Universidade Federal do Ceará – UFC

Engº Jorge Luiz Oliveira Lucas Júnior, D.Sc. – Universidade Federal do Ceará – UFC

Engª Juceline Batista dos Santos Bastos, D.Sc. – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará – IFCE

Engº Lucas Aragão Lira, Mestrando em Engª de Transportes – Universidade Federal do Ceará – UFC

Engº Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos, Ph.D. – Universidade Federal do Ceará – UFC

Moisés Braga Martins, Graduando em Engenharia Civil – Universidade Federal do Ceará – UFC

Engª Suzane Nogueira da Silva, M.Sc., Doutoranda em Engª de Transportes – Universidade Federal do Ceará – UFC

REVISÃO:

Eng.ª Beatriz Chagas Silva Gouveia – IPR/DPP/DNIT

Eng.º Nelson Wargha Filho – IPR/DPP/DNIT

Eng.º Luiz Heleno Albuquerque Filho – IPR/DPP/DNIT

Eng.º Galileu Silva Santos – IPR/DPP/DNIT

EDITORAÇÃO:

Eng.ª Simoneli Fernandes Mendonça – IPR/DPP/DNIT

Eng.ª Thália Raelly de Lima Romeiro Mattos – Progen/HPT

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
Diretoria-geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa.
Instituto de Pesquisas em Transportes.

Análise comparativa entre resultados de dimensionamento obtidos com uso de diferentes softwares abrangendo apreciação de impacto econômico. Brasília-DF, 2026.

52p. (Relatório de Pesquisa – IPR RP 038)

O conteúdo apresentado neste documento é de inteira responsabilidade dos autores.
A reprodução completa ou parcial desta publicação é permitida, sem alterar seu conteúdo, desde que não tenha fim comercial e que seja citada a referência bibliográfica completa.

RESUMO

A Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV) constitui uma ferramenta utilizada no planejamento e gestão de pavimentos rodoviários por permitir a avaliação econômica de diferentes alternativas de projeto e manutenção ao longo da vida útil da infraestrutura. Contudo, metodologias tradicionais não consideram o desempenho estrutural das soluções, o que desconecta o projeto do acompanhamento de pavimentos, e que pode comprometer a precisão das estimativas e a durabilidade dos pavimentos. Neste contexto, este estudo propõe e avalia uma metodologia para ACCV com base em previsão mecanístico-empírica de desempenho, chamada e-ACCV ("e" para "estrutural"), que incorpora o parâmetro estrutural conhecido como percentual de área trincada por fadiga (%AT) como critério técnico para definição das ações de manutenção e reabilitação. Para isso, a metodologia foi aplicada em três rodovias federais, com avaliação de diferentes cenários estruturais, utilizando os *softwares* MeDiNa e FlexPAVE™ v.1.1, ambos baseados na análise mecanístico-empírica. Como estratégia de manutenção padronizada, adotou-se a fresagem e recomposição integral da camada de rolamento sempre que o pavimento atingisse o limite crítico de área trincada, considerando que a cada início de deterioração após a recomposição o pavimento recupera toda sua capacidade. Os resultados demonstraram que a e-ACCV evidencia a influência da capacidade estrutural nos custos e na frequência das manutenções previstas. As estruturas redimensionadas apresentaram maiores custos iniciais de implantação, mas reduziram significativamente o número de intervenções ao longo do tempo, diminuindo os custos equivalentes totais em aproximadamente 28 a 63% em relação às estruturas originais nas rodovias analisadas com redimensionamento (BR-020 e BR-316). A metodologia e-ACCV mostrou-se aplicável a qualquer mecanismo de previsão de %AT, desde que essa estimativa seja confiável. No entanto, a escolha do software influencia diretamente os resultados, uma vez que cada modelo capta de forma distinta o comportamento dos materiais. Por fim, dadas as incertezas associadas à previsão de desempenho, recomenda-se o desenvolvimento de guias técnicos de dimensionamento e de previsão de custos equivalentes de ciclo de vida, ambos fundamentados em princípios sólidos da análise mecanístico-empírica.

Palavras-chave: ACCV, e-ACCV, análise mecanístico-empírica, pavimentos.

ABSTRACT

The Life Cycle Cost Analysis (LCCA) is a tool used in the planning and management of road pavements, allowing the economic evaluation of different design and maintenance alternatives throughout the infrastructure's service life. However, traditional methodologies do not consider the structural performance of the solutions, which disconnects design from pavement monitoring and may compromise the accuracy of cost estimates and pavement durability. In this context, this study proposes and evaluates an LCCA methodology based on mechanistic-empirical performance prediction, called s-LCCA ("s" for "structural"), which incorporates the structural parameter known as the percentage of fatigue-cracked area (%CA) as a technical criterion for defining maintenance and rehabilitation actions. The methodology was applied to three federal highways, evaluating different structural scenarios using the MeDiNa and FlexPAVE™ v.1.1 software, both based on mechanistic-empirical analysis. As a standardized maintenance strategy, full milling and replacement of the surface layer were adopted whenever the pavement reached the critical cracked-area threshold, assuming that, after each intervention, the pavement fully recovers its capacity before deterioration restarts. The results showed that s-LCCA highlights the influence of structural capacity on costs and maintenance frequency. The redesigned structures had higher initial equivalent construction costs but significantly fewer maintenance interventions over time, lowering total equivalent life-cycle costs by approximately 28 % to 63 % relative to the original structures in the highways analyzed with redesign (BR-020 and BR-316). The methodology proved applicable to any %CA prediction model, provided that %CA is reliably estimated. However, the choice of software directly influences the results, as each model captures material behavior differently. Finally, given the uncertainties associated with performance prediction, the development of technical guides for design and for the prediction of equivalent life-cycle costs is recommended, both adopting sound principles of mechanistic-empirical analysis.

Keywords: LCCA, s-LCCA, mechanistic-empirical analysis, pavements.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ACCV – Análise de Custo do Ciclo de Vida

ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Testes e Materiais)

$\%AT$ – Percentual de Área Trincada

ATR – Afundamento da Trilha de Roda

BCA – Benefit-Cost Analysis (Análise de Custo-Benefício, em inglês)

BR – Rodovia Federal (ex.: BR-020, BR-222, BR-316)

C – Integridade Estrutural da Mistura

C vs. S – Relação entre Integridade Estrutural e Progressão do Dano

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR – California Bearing Ratio (Índice de Suporte Califórnia)

CD – Compressão Diametral à Tensão Controlada

CENPES – Centro de Pesquisas da Petrobras

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CSIR – Council for Scientific and Industrial Research (Conselho de Pesquisa Científica e Industrial, África do Sul)

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DP – Deformação Permanente

e-ACCV – Análise de Custo do Ciclo de Vida com incorporação do parâmetro estrutural

EICM – Enhanced Integrated Climatic Model (Modelo Climático Integrado Aprimorado)

FHWA – Federal Highway Administration (Administração Federal de Rodovias, EUA)

FN – Flow Number (Número de Fluxo)

GC – Grau de Compactação

GC Baixo – Grau de Compactação Baixo

GC Ótimo – Grau de Compactação Ótimo

GR – Taxa de Dissipação de Energia de Pseudo-Deformação

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPR – Instituto de Pesquisas em Transportes

ISTEA – Intermodal Surface Transportation Efficiency Act (Lei de Eficiência no Transporte Superficial Intermodal, EUA)

JTG D50 – Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement (Especificações para Projeto de Pavimentos Asfálticos, China)

LCCA – Life Cycle Cost Analysis (Análise de Custo do Ciclo de Vida, em inglês)

LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Laboratório Central de Pontes e Estradas, França)

LVECD – Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses (Análise de Pavimentos Viscoelásticos em Camadas para Danos Críticos)

M&R – Manutenção e Reabilitação

MC – Mês Crítico

ME – Método Empírico

MEPDG – Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (Guia de Projeto de Pavimentos Mecanístico-Empírico)

MR – Módulo de Resiliência

N – Número de Repetições de um Eixo-Padrão de 8,2 Toneladas

N/Nf – Relação entre Número de Ciclos e Número de Ciclos até a Falha

NCHRP – National Cooperative Highway Research Program (Programa Nacional de Pesquisa Cooperativa em Rodovias, EUA)

NCSU – North Carolina State University (Universidade Estadual da Carolina do Norte, EUA)

Nf – Número de Ciclos até a Falha

NHS – National Highway System (Sistema Rodoviário Nacional, EUA)

RAP – Reclaimed Asphalt Pavement (Pavimento Asfáltico Reciclado)

S – Progressão do Dano

S-VECD – Simplified Viscoelastic Continuum Damage (Modelo Simplificado de Dano Viscoelástico Contínuo)

SAMDM – South African Mechanistic-Empirical Design Method (Método de Projeto Mecanístico-Empírico da África do Sul)

SATCC – South African Transportation and Communication Commission (Comissão de Transportes e Comunicações da África do Sul)

SICRO – Sistema de Custos de Referência de Obras

SISPAV – Sistema de Projeto de Pavimentos Asfálticos

SSR – Stress Sweep Rutting (Ensaio de Varredura de Tensão para Deformação Permanente)

T/C – Tração-Compressão Uniaxial

TEA-21 – Transportation Equity Act for the 21st Century (Lei de Equidade de Transporte para o Século XXI, EUA)

UFC – Universidade Federal do Ceará

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

USCS – Unified Soil Classification System (Sistema Unificado de Classificação de Solos)

VECD – Viscoelastic Continuum Damage (Dano Viscoelástico Contínuo)

VMD – Volume Médio Diário

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Variação da serventia de um pavimento com o acúmulo do tráfego e impacto de medida de manutenção 14

Figura 2.1 – Tensões no interior de um pavimento.....20

Figura 2.2 – Lógicas de dimensionamento 21

Figura 2.3 – a) Grade metálica de 1 m × 1 m (aberturas de 10 cm × 10 cm) para mapeamento de trincas e b) esquema de grade sobre a via em análise.....23

Figura 2.4 – Esquema de mapeamento de defeitos nos trechos da Ilha do Fundão-RJ ...24

Figura 2.5 – Comparativo entre o MeDiNa e o FLEXPAVE™ 1.1 28

Figura 3.1 – Resultados da e-ACCV nas condições de campo (GC baixo, cenário 1) em comparação à condição conforme projeto (GC ótimo, cenário 2), considerando 1 km de rodovia.....32

Figura 3.2 – Fluxograma representativo da metodologia de ACCV usada no presente relatório.....33

Figura 4.1 – Custos dos cenários considerados na BR-020.....36

Figura 4.2 – Custos dos cenários considerados na BR-222.....38

Figura 4.3 – Custos dos cenários considerados na BR-316 PI.....40

Figura 5.1 – Resultados dos cenários avaliados pelos métodos 43

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros físicos e construtivos usados nas avaliações de custo.....30

Tabela 3.2 – Valores usados no cálculo dos custos de implantação das estruturas dos pavimentos analisados 31

Tabela 3.3 – Estrutura das alternativas de pavimentos e informações para a e-ACCV 32

Tabela 4.1 – Soluções e suas características estruturais (BR-020) 34

Tabela 4.2 – Parâmetros mecânicos da estrutura (BR-020).....35

Tabela 4.3 – Soluções, MCs e número de manutenções e custos (BR-020).....35

Tabela 4.4 – Soluções e suas características estruturais (BR-222) 37

Tabela 4.5 – Parâmetros mecânicos da estrutura (BR-222).....37

Tabela 4.6 – Soluções, MCs e número de manutenções e custos (BR-222).....38

Tabela 4.7 – Soluções e suas características estruturais (BR-316) 39

Tabela 4.8 – Parâmetros mecânicos da estrutura (BR-316).....39

Tabela 4.9 – Soluções, MCs e número de manutenções e custos (BR-316).....40

Tabela 5.1 – Soluções e suas características estruturais (BR-316) 42

Tabela 5.2 – Parâmetros mecânicos da estrutura (BR-316).....42

Tabela 5.3 – Soluções, MCs e número de manutenções e custos (BR-316).....43

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Comparativo entre o MeDiNa e o FlexPAVE™ 1.1.....27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO 16
2 REFERENCIAL TEÓRICO 18
2.1 CONSIDERAÇÕES ACERCA DA ANÁLISE MECANÍSTICO-EMPÍRICA 18
2.2 SOFTWARES DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO 21
2.2.1 *SOFTWARE* MEDINA 21
2.2.2 SOFTWARE FLEXPAVE™ 1.1 24
2.2.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS 27
3 ANÁLISE DE CUSTO DE CICLO DE VIDA (ACCV) 29
3.1 METODOLOGIA PROPOSTA: E-ACCV 29
3.1.1 EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA NESTE RELATÓRIO 31
4 E-ACCV PARA TRÊS RODOVIAS FEDERAIS DISTINTAS 34
4.1 E-ACCV DA BR-020 34
4.2 E-ACCV DA BR-222 37
4.3 E-ACCV DA BR-316 39
5 E-ACCV USANDO OUTRO MECANISMO DE ANÁLISE (FLEXPAVE™ 1.1) 42
5.1 E-ACCV DA BR-316 PI 42
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 45

APRESENTAÇÃO

Este documento relata parte do conjunto de atividades de pesquisa no escopo do projeto “Aprimoramento de métodos mecanístico-empíricos no dimensionamento de pavimentos; Plataforma integrada de estruturação e Análise de dados através da Inteligência Artificial e Avaliação de resultados de campo em relação aos previstos em projeto e Elaboração de modelo de certificação de obras”, financiado pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) por meio do Termo de Execução Descentralizada 679/2020 TED/IPR/DPP/DNIT SEDE. A execução do projeto é liderada pela Universidade Federal do Ceará (UFC), com início em novembro de 2020. As atividades aqui apresentadas são parte da execução do “Subprojeto 1 - Contribuições para o aprimoramento de métodos de dimensionamento”, que tem como objetivo contribuir para o aprimoramento contínuo da lógica e dos fundamentos para sistemas de dimensionamento de pavimentos asfálticos, tomando como referência as lógicas atualmente disponíveis para o dimensionamento de pavimentos (vantagens/desvantagens, alternativas, variáveis, propriedades mecânicas, software, impactos técnico-econômicos etc.), especificamente o Produto 2, entregue sob a forma deste Relatório de Pesquisa intitulado “Análise comparativa entre resultados de dimensionamento obtidos com uso de diferentes softwares abrangendo apreciação de impacto econômico.”

1 INTRODUÇÃO

Com o encerramento da fase de execução das obras e posterior liberação das rodovias para o tráfego de veículos, inicia-se o que normalmente recebe o nome de fase de pós-execução (METM, 2010; DNIT, 2020), que engloba esforços de manutenção e reabilitação (M&R). Como é sabido, o custo de M&R em estradas cresce de forma acelerada com o agravamento de seus defeitos (Vasconcelos, 2013). Assim, é essencial que os esforços financeiros e os ciclos de M&R nas infraestruturas sejam adequados à vida útil e ao desempenho esperados pela infraestrutura (Haas *et al*., 2015).

Como um conceito, o surgimento da análise custo-benefício (do inglês Benefit-Cost Analysis – BCA) se deu na década de 1950 (Babashamsi *et al*., 2016). Inicialmente, foi aplicada como meio para auxiliar na seleção de opções de projeto de pavimento (AAPTP, 2006). Duas décadas depois, os princípios da Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV), ou, do inglês, Life Cycle Cost Analysis (LCCA), começaram a ser implementados em alguns projetos-chave, como ferramenta para selecionar tipos de pavimento a serem executados (AAPTP, 2006).

Hoje, a LCCA é uma ferramenta capaz de auxiliar na seleção de projetos e na avaliação de estratégias de M&R de pavimentos (Babashamsi *et al*., 2016). As agências de transportes utilizam o arcabouço da LCCA como um conjunto de ferramentas capazes de auxiliar na tomada de decisão em seus planos plurianuais de investimento em infraestrutura (Bajaj *et al*., 2002; Babashamsi *et al*., 2016; Feitosa e Oliveira, 2018; Carneiro, 2021). A Figura 1.1, adaptada de Walls e Smith (1998), representa o decréscimo na capacidade do pavimento de atender bem aos usuários com o passar do tempo e/ou tráfego de veículos, até que esta condição atinja um mínimo aceitável (linha horizontal pontilhada). Então, com a implementação de alguma atividade de M&R, parte da condição inicial do pavimento é revitalizada, mas destacando que, mesmo com essas ações, há queda na qualidade do pavimento reabilitado, ao compará-lo com um novo.

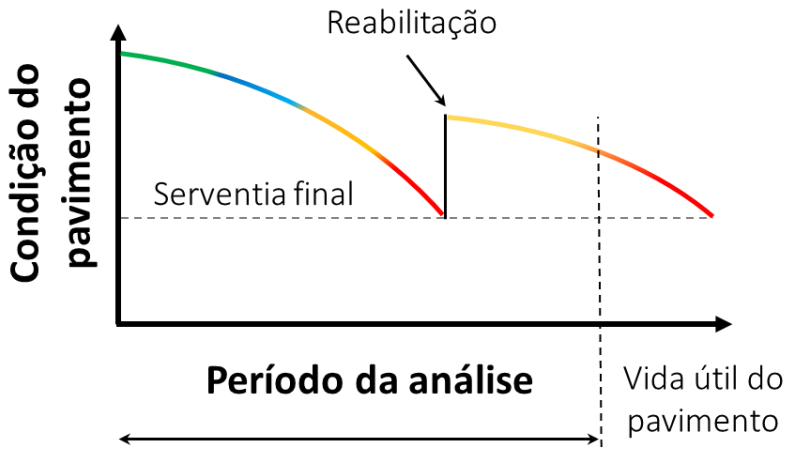


Figura 1.1 – Variação da serventia de um pavimento com o acúmulo do tráfego e impacto de medida de manutenção

Fonte: Adaptado de Walls e Smith (1998)

Prarche (2007) destaca que as despesas com manutenção de rodovias normalmente compreendem cerca de metade dos fundos anuais de infraestrutura viária, por isso deve-se priorizar a eficiência nos serviços de reabilitação. Segundo Feitosa e Oliveira (2018), a LCCA, nos últimos anos, tem sido recorrentemente empregada, devido à sua capacidade de arrolar possíveis impactos nos custos advindos de escolhas de técnicas construtivas e de manutenção.

Em 1991, por exemplo, a aplicação da LCCA foi determinada por uma lei federal norte-americana (ISTEA, 1991) durante o projeto e a construção de túneis, pontes e/ou pavimentos (Babashamsi *et al*., 2016). A agência de estradas norte-americana *Federal Highway Administration* (FHWA) estimulou os departamentos estaduais de transporte a empregar a LCCA em projetos de pavimentação com custos acima de US$ 25 milhões (Lamptey *et al*., 2005). De acordo com a Lei de Designação do Sistema Rodoviário Nacional (*National Highway System* – NHS) de 1995, os referidos departamentos devem fazer uso da LCCA em projetos com custo elevado (Kane, 1996). É apresentado na seção 303 do NHS que a LCCA é uma abordagem que deve analisar o valor econômico total de um segmento de projeto viável, avaliando os custos iniciais e futuros, tais como: manutenção, reabilitação, reconstrução, recapeamento e restauração, durante toda a vida do projeto (Babashamsi *et al*., 2016).

A FHWA incentiva que a LCCA seja empregada para avaliar as principais decisões de investimento, independentemente de existir alguma exigência legal neste sentido, entendendo que o emprego da LCCA pode otimizar as decisões de investimento, independentemente de os requisitos indicados serem atingidos em sua totalidade (FHWA, 1998a).

Segundo Walls e Smith (1998), a exigência de que as agências estaduais utilizem a LCCA foi removida pela Lei de Equidade de Transporte para o século XXI de 1998 (do inglês, *Overview of the Transportation Equity Act for the 21st Century* – TEA-21) (FHWA, 1998 b). No entanto, a utilização da LCCA como ferramenta de apoio à decisão ainda é defendida na política da FHWA, enfatizando que os resultados não são exatamente decisões finais.

Durante a fase de projeto (pré-execução) de uma rodovia, é esperado que o projetista avalie os impactos da adoção de diferentes soluções para as camadas da estrutura, tais como o custo de implantação, as estratégias técnica e financeira de manutenção, entre outros. Carneiro (2021) pondera que deve ser de interesse dos gestores ter acesso a formas imparciais e justas de avaliação das diferentes estratégias disponíveis. Corroborando a afirmação da referida autora, Lamptey *et al*. (2005) destacam a procura, por parte de gestores de rodovias e ferrovias, por ferramentas pautadas em conceitos operacionais-econômicos, capazes de sublinhar os investimentos mais adequados a longo prazo. Karnikowski (2019) indica ainda que a LCCA pode ser usada para demonstrar o comprometimento dos gestores com um modelo de administração mais transparente e eficiente.

A LCCA aplicada à pavimentação deve buscar considerar todos os custos significativos relacionados à construção, manutenção, reabilitação e operações ao longo da vida útil do pavimento (Xu e Tsai, 2012). Existem duas categorias distintas de custos a serem consideradas pela LCCA, os (i) custos dos gestores, expressos como os valores empregados na implantação e manutenção dos pavimentos e os (ii) custos dos usuários, que representam custos operacionais dos veículos, custos relacionados ao tempo de viagem, desconforto e riscos de acidentes (Soares *et al*., 2001; Carneiro, 2021). Segundo Zhang, Keoleian e Lepech (2008), e Han e Do (2015), é possível ainda identificar os custos ambientais, como uma terceira categoria. No presente trabalho, apenas o item (i) custos dos gestores será analisado, por falta de informações suficientes neste momento para a consideração dos custos dos usuários.

Ainda segundo Carneiro (2021), não é trivial considerar com precisão os custos relacionados às atividades de manutenção, mesmo que estas compreendam uma parcela considerável do custo de ciclo de vida de um pavimento, pois envolve a previsão do desempenho do mesmo e da disponibilidade de insumos. Haider e Dwaikat (2011) alertam para a necessidade de se escolher um indicador qualificado de desempenho, uma etapa fundamental que apoia a LCCA (Khurshid *et al.,* 2009).

Podem-se citar alguns casos de sucesso no uso da LCCA. Rangaraju *et al*. (2008) compararam alternativas de conservação e manutenção de rodovias considerando a variação de índices econômicos, utilizando dados do estado norte-americano da Carolina do Sul. Os referidos autores sublinham a importância do desenvolvimento de um protocolo

probabilístico da LCCA, ainda que outras estratégias já estejam em uso por agências estaduais, com particular popularidade do *software* REALCOST desenvolvido com apoio da FHWA. Outro trabalho que pode ser destacado foi desenvolvido por Swei, Gregory e Kirchain (2016), abordando aspectos probabilísticos e de avaliação dos riscos envolvendo projeções de desempenho de técnicas de reabilitação. Os autores investigaram particularmente o impacto da adoção de métodos mecanístico-empíricos, sublinhando que podem ter impactos maiores nas projeções de custos que outros fatores como a vida de projeto planejada, por exemplo.

Diante desse contexto, o objetivo deste relatório é propor e avaliar uma metodologia para ACCV com base em previsão mecanístico-empírica de desempenho, chamada e-ACCV (“e” para “estrutural”), que incorpora o parâmetro estrutural conhecido como percentual de área trincada por fadiga (%AT) como critério técnico para definição das ações de manutenção e reabilitação. Para isso, o *software* MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional) foi usado para previsão do trincamento, sendo este o método de dimensionamento mecanístico-empírico reconhecido pelo DNIT. Os orçamentos foram baseados em instruções orçamentárias nacionais (tabelas SICRO nº 01/2017), além de uma hipótese de estratégia de reabilitação que mantenha os cenários comparáveis (fresagem e recomposição total da camada de revestimento asfáltico). Também foi utilizado o *software* FlexPAVE™ 1.1, desenvolvido na *North Carolina State University*, reconhecido como um programa capaz de captar os danos desenvolvidos pelas misturas asfálticas ao longo do ensaio de fadiga por tração-compressão, utilizando dados de módulo dinâmico, o que permite uma análise viscoelástica do dano por fadiga.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Este relatório está estruturado em seis partes, que abordam de forma sistemática a metodologia e os resultados obtidos na e-ACCV de pavimentos rodoviários. A seguir, apresentam-se as principais seções:

Capítulo 1 – Introdução: Introduz o conceito de ACCV, incluindo uma breve revisão da literatura, destacando a importância da ACCV na gestão da infraestrutura viária. São considerados os fundamentos teóricos da metodologia e a sua aplicação na avaliação das previsões econômicas de diferentes estratégias de manutenção e reabilitação de pavimentos. Ademais, são apresentados os objetivos e a proposta e-ACCV.

Capítulo 2 – Referencial Teórico: apresenta uma breve revisão da literatura com considerações sobre a análise mecanicista e sua evolução durante os anos. Além disso, também discorre sobre os métodos de dimensionamento usados neste relatório.

Capítulo 3 – Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV): apresenta a metodologia utilizada para a realização das análises, detalhando os critérios adotados para a definição dos cenários, a seleção dos parâmetros de desempenho e os procedimentos para o cálculo dos custos de implantação e manutenção dos pavimentos. Também inclui um exemplo ilustrativo da aplicação da metodologia.

Capítulo 4 – e-ACCV para Três Rodovias Federais Distintas: apresenta a aplicação da metodologia e-ACCV, proposta neste relatório, em três rodovias federais específicas (BR-020, BR-222 e BR-316). São comprovadas diferentes configurações estruturais e suas respectivas implicações no custo equivalente, com base nos resultados obtidos por meio de simulações no *software* MeDiNa.

Capítulo 5 – e-ACCV usando outro Mecanismo de Análise (FlexPAVE^{TM}1.1): apresenta a aplicação da metodologia e-ACCV agora com outro motor de previsão de área trincada. Para isso, a BR-316 é usada como exemplo, a fim de comparar a análise proposta pelo software MeDiNa e o software FlexPAVE^{TM}.

Capítulo 6 – Considerações Finais: apresenta as principais conclusões e implicações do estudo, destacando as vantagens e limitações da abordagem adotada. São feitas recomendações para futuras aplicações da e-ACCV e sugestões para aprimoramento dos sistemas de dimensionamento de pavimentos rodoviários.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONSIDERAÇÕES ACERCA DA ANÁLISE MECANÍSTICO-EMPÍRICA

Os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos evoluíram significativamente com o tempo, passando de abordagens empíricas para metodologias mecanístico-empíricas. Os métodos empíricos, tradicionalmente utilizados desde meados do século XX, baseavam-se principalmente em dados observacionais e ensaios laboratoriais, sem considerar plenamente o comportamento dos materiais de pavimentação sob condições variáveis de tráfego e clima. Franco (2007) e Soares *et al.* (2009), entre outros autores, corroboram a ideia de que a abordagem empírica, por um longo período, mostrou-se eficaz. Contudo, na atualidade, essa metodologia demonstra-se insuficiente para representar as reais condições das rodovias, levando a falhas prematuras e custos elevados de manutenção.

Conforme Motta (1991), o método empírico surgiu durante a Segunda Guerra Mundial e foi a principal metodologia adotada mundialmente por quase três décadas. Um exemplo notável é o método do CBR (*California Bearing Ratio*), desenvolvido pela Divisão de Rodovias da Califórnia em 1928 e adotado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA em 1945. Este método utiliza o índice de suporte de uma brita padrão da Califórnia para avaliar a capacidade de suporte do subleito, que, por sua vez, guia o dimensionamento das camadas do pavimento. Tal metodologia deixou de ser usada há mais de cinquenta anos internacionalmente.

Com o desenvolvimento dos métodos mecanístico-empíricos, houve uma mudança paradigmática na forma como os pavimentos são projetados. Esses métodos combinam análises teóricas da resposta estrutural dos materiais (tensões e deformações) com dados empíricos de desempenho observados em campo, proporcionando uma compreensão mais detalhada do comportamento dos pavimentos sob cargas repetidas e condições ambientais adversas. Essa integração permite a concepção de projetos mais duráveis e ajustados às especificidades locais (Motta, 1991; Franco, 2007; Medina e Motta, 2015).

Os primórdios da abordagem mecanístico-empírica para o projeto de pavimentos podem ser atribuídos a Kerkhoven e Dormon (1953), que sugeriram a deformação compressiva vertical no subleito como indicador de falha para mitigar deformações permanentes superficiais. Saal e Pell (1960), por sua vez, propuseram o uso da deformação horizontal de tração no fundo da camada asfáltica como critério para prevenir fissuração por fadiga. Tais estudos introduziram a análise do comportamento estrutural dos pavimentos.

Essa base teórica foi consolidada por Dormon e Metcalf (1965), que desenvolveram um método de projeto completo, essencialmente, analisando as tensões e deformações internas da estrutura em resposta às solicitações. Essa parte, considerada mecanicista, era então correlacionada com o desempenho real dos pavimentos em serviço, conferindo ao método um caráter mecanístico-empírico. Posteriormente, Claessen *et al.* (1977) no método de dimensionamento Shell, Shook (1982) no método Asphalt Institute, o método Francês LCPC na metodologia francesa e Powell *et al.* (1984) na abordagem inglesa, fizeram contribuições significativas ao aprimorar e adaptar essa abordagem, resultando em métodos de projeto específicos para diferentes contextos e aplicações.

A *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), por sua vez, desenvolveu entre 1996 e 2004 o *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), este foi lançado como programa computacional que integra toda a metodologia proposta nos Guias AASHTO, bem como atualizações. O MEPDG é um dos principais no mundo, sendo inclusive usado como base para o desenvolvimento de outras metodologias de mesmo cunho em diversos países (Li *et al.*, 2011).

A França consolidou o método *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), baseado em uma abordagem mecanístico-empírica, como o método de dimensionamento de pavimentos mais abrangente em uso na Europa (Pereira e Pais, 2017). Já na África do Sul, a metodologia mais usada é *South African Mechanistic-Empirical Design Method* (SAMDM), este é utilizado como referência para a elaboração de catálogos em outros países da África Austral (CSIR, 1998).

A Ásia e a Oceania adotam dois principais métodos de dimensionamento: o *Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement* (JTG D50), na China, e o *Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design*, na Austrália. O JTG D50 atualmente está em sua terceira versão, disponibilizado em 2017, consolidando quatro décadas de desenvolvimento e incorporando novos modelos de previsão de desempenho, resistência a deformações e trincas térmicas (JTG D50, 2017). Por outro lado, a Austrália teve sua última atualização no ano de 2024 e representa a contribuição mais recente desenvolvida pela *AustRoads* de caráter mecanicista.

Diversos países da América do Sul têm buscado desenvolver métodos próprios de dimensionamento baseados em princípios mecanísticos, levando em consideração suas necessidades regionais. A tendência inicial é adaptar o método MEPDG, dos Estados Unidos, conforme evidenciado por países como Argentina, Chile, Colômbia, Costa Rica e Peru (Albitres *et al*., 2013). Dessa forma, esse movimento reflete um esforço global na formulação e aprimoramento de metodologias de dimensionamento mecanístico-empírico.

De acordo com Franco (2007), os métodos em construção ou já concebidos buscam aprimorar a análise estrutural, fazendo uso de resultados de ensaios laboratoriais relativos ao comportamento mecânico dos materiais a serem empregados. Conforme Santiago (2017), a eficiência dessas novas metodologias está diretamente ligada à quantidade e qualidade dos dados disponíveis sobre as infraestruturas rodoviárias locais.

A maior parte dos trabalhos desenvolvidos são baseados em variantes dos mesmos dois critérios de deformação, desenvolvidos anteriormente por Kerkhoven e Dormon (1953) e Saal e Pell (1960): tração horizontal na fibra inferior do revestimento e compressão vertical no topo do subleito. Esses critérios, respectivamente, procuram reduzir as falhas quanto ao trincamento por fadiga e à deformação permanente. Conforme Soares *et al*. (2009), a fadiga asfáltica é o processo de deterioração do material submetido a repetidos estados de tensão e deformação. O cansaço do material é refletido no chamado trincamento por fadiga. A deformação permanente, por sua vez, é o acúmulo do dano plástico oriundo da passagem dos veículos, resultando no afundamento da trilha de roda (ATR). A Figura 2.1 representa a distribuição das tensões no interior da estrutura.

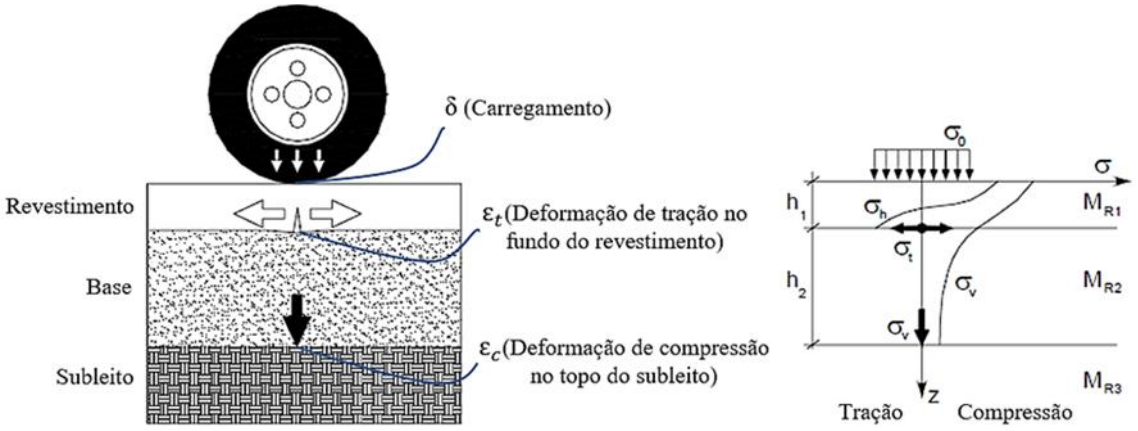


Figura 2.1 – Tensões no interior de um pavimento

Fonte: Adaptado de Medina e Motta (2015)

No Brasil, os pavimentos podem ser dimensionados conforme a abordagem puramente empírica (método do CBR) baseada na capacidade de suporte do subleito e no tráfego, e pela abordagem mecanístico-empírica (MeDiNa), este com análise mais robusta, comparado ao método empírico, e preocupado com a previsão de desempenho. Em contrapartida, estuda-se acerca do método mecanístico-empírico simplificado, onde o foco é verificação da capacidade estrutural, assegurando que o pavimento atenda aos requisitos de resistência à fadiga e deformação permanente durante sua vida útil, mas sem uma modelagem avançada de deterioração gradual e previsão de desempenho. A Figura 2.2 ilustra as lógicas de dimensionamento citadas.

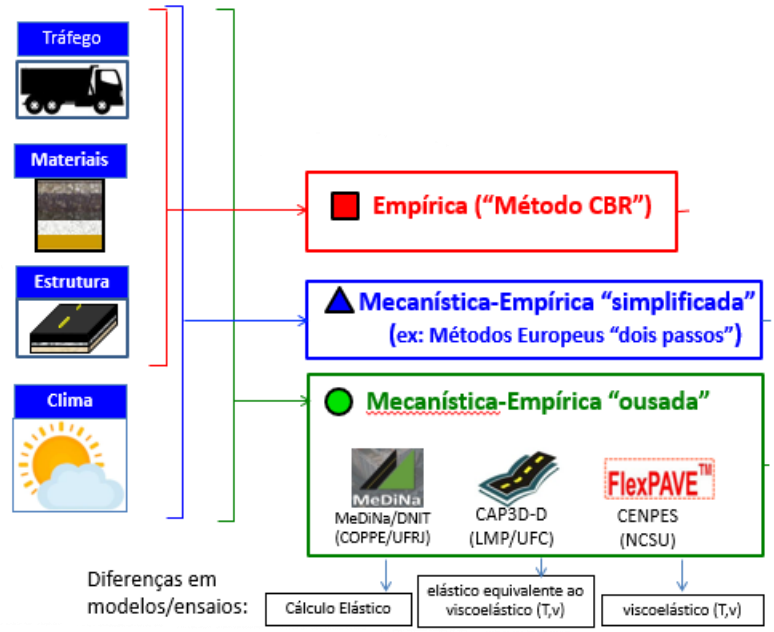


Figura 2.2 – Lógicas de dimensionamento

Fonte: Autores (2025)

2.2 SOFTWARES DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

O dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos é amplamente adotado em diversos países, assim, diferentes *softwares* foram criados ao redor do mundo para atender às particularidades locais. Neste referencial teórico, serão abordados apenas o FlexPAVE™ 1.1 e o MeDiNa, uma vez que são os *softwares* utilizados na análise apresentada neste relatório. O FlexPAVE™ 1.1 é um programa norte-americano que analisa estruturas de pavimentos, enquanto o MeDiNa é o método de dimensionamento de caráter mecanicista brasileiro.

2.2.1 *Software* MeDiNa

2.2.1.1 Introdução ao método

O Método MeDiNa representa um avanço significativo no âmbito dos pavimentos asfálticos brasileiros, contrastando com o método estritamente empírico, conhecido como método do CBR, proposto pelo Eng.º Murillo Lopes de Souza (Souza, 1981). Desenvolvido a partir de uma colaboração entre o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e o Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES), o MeDiNa utiliza uma abordagem mecanístico-empírica.

O MeDiNa é um programa computacional utilizado para projetar e avaliar pavimentos flexíveis, tanto novos quanto aqueles que necessitam de reforços. A introdução no Brasil à análise mecanicista foi o elemento-chave da proposta, aumentando a confiabilidade do dimensionamento e diminuindo os custos atrelados à manutenção. O software é uma atualização do programa SISPAV, desenvolvido por Franco (2007) em sua tese de doutorado e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) liberou sua primeira versão em 2018 (Franco e Motta, 2020).

A estimativa do tráfego no MeDiNa é feita utilizando o conceito do número de repetições de um eixo-padrão de 8,2 toneladas (Número N), que quantifica a intensidade e a frequência das cargas aplicadas ao pavimento. Entretanto, o software não considera explicitamente o clima em seus cálculos. A metodologia baseia-se em parâmetros como tensão, deformação e propriedades dos materiais, que são influenciados indiretamente pelas condições climáticas (Franco e Motta, 2020).

2.2.1.2 Ensaios laboratoriais

O MeDiNa considera, para materiais asfálticos, o módulo de resiliência linear, sendo determinado conforme o ensaio DNIT 135/2018 – ME. Outros parâmetros essenciais da mistura, como faixa granulométrica, teor de ligante asfáltico (CAP), volume de vazios e abrasão Los Angeles, podem ser inseridos pelo projetista para controle de qualidade na execução da obra. Para avaliar o dano por fadiga, o MeDiNa utiliza a curva de fadiga, obtida pelo ensaio DNIT 183/2018 – ME, e calcula o estado de tensões em vinte pontos distribuídos na superfície e na fibra inferior da última camada asfáltica. O dano médio nesses pontos é utilizado para estimar a área trincada com base na função de transferência calibrada a partir de misturas ensaiadas em laboratório e aplicadas em campo. Já a deformação permanente da camada asfáltica não é utilizada no cálculo do afundamento de trilha de roda (ATR), desde que a mistura atenda aos requisitos do ensaio *Flow Number* (DNIT 184/2018 – ME), que classifica a resistência da mistura à deformação permanente sob carregamento repetido (DNIT, 2023).

Ainda conforme DNIT (2023), os materiais granulares, solos finos, siltosos e argilosos são caracterizados pelo módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e deformação permanente. Esses materiais apresentam frequentemente comportamento não linear na relação tensão-deformação, podendo ser modelados no MeDiNa como elástico linear ou não linear, sendo o módulo de resiliência determinado pelo ensaio DNIT 134/2018 – ME. Já a deformação permanente é avaliada conforme o modelo de Guimarães (2009), com parâmetros obtidos por meio do ensaio DNIT 179/2018 – IE. O programa calcula a deformação permanente a partir do estado de tensões nos pontos sob a roda e entre as rodas, somando os valores de cada camada para obter a deformação total no dimensionamento.

A estrutura é considerada aprovada pelo MeDiNa quando, ao final da vida útil (10 anos), a área trincada por fadiga não ultrapassa 30 % e o afundamento de trilha de roda não excede 10 mm a 12,5 mm, conforme o tipo de via (DNIT, 2023).

2.2.1.3 Trincamento por fadiga em campo

O fenômeno de trincamento em campo é traduzido como porcentagem de área trincada (%AT) do pavimento. A determinação deste parâmetro pode ser realizada por meio de técnicas avançadas, como o processamento digital de imagens e sistemas de fotogrametria de pavimentos (Kertész *et al.*, 2008). Alternativamente, métodos mais simples, como os usados na calibração do MeDiNa, também podem ser empregados para essa avaliação.

A Figura 2.3 apresenta a estimativa da %AT em campo a partir de grades metálicas. O uso da grade consiste em posicioná-la ao longo da trilha de roda e marcar os pontos com trincas, independentemente da severidade. A marcação pode ser feita com giz ou tinta, sendo possível usar cores diferentes para diferenciar períodos de medição. A coleta é realizada na extensão desejada, e em trechos com poucas trincas, a nota é aplicada apenas onde elas são identificadas.

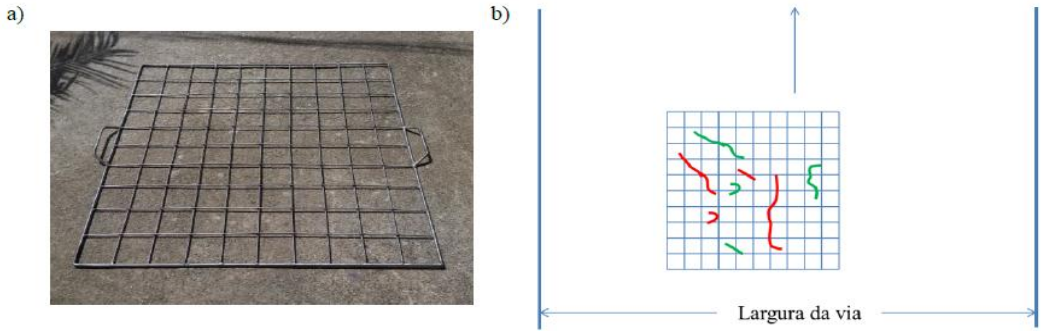


Figura 2.3 – a) Grade metálica de 1 m × 1 m (aberturas de 10 cm × 10 cm) para mapeamento de trincas e b) Esquema de grade sobre a via em análise

Fonte: Santiago (2017)

O acompanhamento visual é outra forma de determinar o %AT em campo. A via é dividida em mini trechos de 20 m, subdivididos em 30 células (2 m × 1/3 da largura da via) para facilitar a coleta de dados. Dois técnicos percorrem a extensão do trecho, identificando células com trincas. Se uma célula apresentar trincas, ela é considerada 100 % trincada, e se a trinca se estender para outras células, todas são contabilizadas. Essa metodologia, apesar de simples, proporciona uma estimativa razoável da integridade do pavimento acerca do trincamento por fadiga. A abordagem descrita foi utilizada para medir a %AT nos trechos monitorados na Ilha do Fundão – RJ (Nascimento, 2015) e pelo Laboratório de Pavimentação da UFRGS. A Figura 2.4 ilustra o método em campo.



Figura 2.4 – Esquema de mapeamento de defeitos nos Trechos da Ilha do Fundão-RJ

Fonte: Nascimento (2015)

2.2.2 Software FlexPAVE™ 1.1

2.2.2.1 Introdução ao método

O FlexPAVE™ 1.1, anteriormente denominado *Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses* (LVECD), foi desenvolvido na América do Norte por um grupo de pesquisa da North Carolina State University (NCSU), com financiamento da Federal Highway Administration (FHWA). Este método é um programa de análise de desempenho de pavimentos, que usa elementos finitos tridimensionais para avaliar os efeitos do carregamento, materiais e clima (Eslaminia *et al*., 2012).

Conforme a North Carolina State University (2014), os dados de entrada do software são organizados em cinco categorias principais: informações gerais, estrutura do pavimento, condições climáticas, características do tráfego, parâmetros de análise e resultados. Cada uma dessas categorias pode ser acessada por meio do painel de navegação, que apresenta de forma clara os dados necessários para entrada no sistema. Essa interface estruturada facilita a interação do usuário com o software, proporcionando um uso intuitivo e eficiente.

O FlexPAVE™ 1.1 considera os dados de tráfego a partir de dois aspectos: a configuração geométrica da carga e as características do tráfego da via. O usuário pode selecionar um veículo de projeto diretamente do banco de dados do software ou inserir manualmente suas especificações, incluindo tipo de eixo (simples, tandem, triplo ou quádruplo), tipo de roda (simples ou dupla), carga por eixo, velocidade de projeto, largura do eixo, espaçamento entre pneus duplos, pressão do pneu e área de contato pneu/pavimento. Já a caracterização do tráfego da via é baseada no volume médio diário (VMD), taxa de crescimento do tráfego, fator de distribuição espacial, fator de ajuste mensal e percentual de distribuição horária.

No que se refere aos dados climáticos, foi incorporada a metodologia denominada *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM), a qual simula o comportamento do pavimento sob diferentes condições climáticas. Esse modelo é alimentado por dados de aproximadamente 1000 estações meteorológicas distribuídas pelo país (Witczak, 2011). Esses dados climáticos são utilizados para prever a temperatura e o teor de umidade em cada camada do pavimento, além de serem integrados aos modelos de previsão de desempenho do pavimento (AASHTO, 2008).

Diferentemente do software MeDiNa, o FlexPAVE™ 1.1 não é um programa específico para o dimensionamento, mas sim destinado à análise mecanicista das estruturas. A análise estrutural emprega a Transformada de Fourier, uma vez que, a utilização desse ferramental de cálculo permite detectar os efeitos da viscoelasticidade do material, a temperatura e as características do carregamento do tráfego. A modelagem da fadiga é estimada a partir da porcentagem de dano e a deformação permanente com base na vida de projeto do pavimento (Wang *et al*., 2021).

2.2.2.2 Ensaios laboratoriais

Para sua correta utilização, são necessários ensaios laboratoriais que fornecem parâmetros fundamentais para a simulação do comportamento dos materiais do pavimento. Um dos principais ensaios utilizados é o Ensaio de Módulo Dinâmico (*Dynamic Modulus Test*), que mede a resposta viscoelástica do concreto asfáltico sob diferentes frequências de carregamento. Os resultados deste ensaio são utilizados para determinar a curva mestre do módulo dinâmico e a série de Prony, e os dados obtidos são fornecidos em função da temperatura e da frequência de carregamento.

Para a análise do comportamento à fadiga do concreto asfáltico no FlexPAVE™, são utilizados os coeficientes específicos do modelo *Viscoelastic Continuum Damage* (VECD), obtidos a partir do processamento de dados experimentais. Esses dados são ajustados conforme a relação entre integridade e dano da mistura asfáltica, considerando o critério de falha baseado na taxa de liberação de energia de pseudo-deformação (GR), em função do número de ciclos de carregamento. Para a modelagem da deformação permanente, é necessária a determinação dos parâmetros do Shift Model, cujos aprofundamentos teóricos podem ser encontrados em Choi e Kim (2014) e, no âmbito nacional, em Borges (2014). Ressalta-se que, no FlexPAVE™, os parâmetros de rigidez da mistura são obtidos a partir dos resultados do ensaio de módulo dinâmico (|E*|), conduzido em diferentes frequências e temperaturas, de modo a capturar o comportamento viscoelástico característico das misturas asfálticas (Underwood *et al*., 2012; Nascimento, 2015).

A caracterização do solo também é determinada com base do Módulo de Resiliência linear (MR), geralmente realizada por meio do ensaio triaxial de carga repetida, além da classificação do solo conforme os sistemas AASHTO ou USCS, para definir adequadamente as condições de suporte do pavimento. Além desses ensaios, o software também utiliza dados climáticos e de temperatura, que podem ser obtidos por medições locais ou pelo *Enhanced Integrated Climate Model* (EICM), um banco de dados que fornece perfis de temperatura baseados em séries históricas. Os ensaios laboratoriais citados são essenciais para alimentar os modelos viscoelásticos e de dano do FlexPAVE™, permitindo a simulação precisa do desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil (Eslaminia *et al*., 2012).

2.2.2.3 Trincamento por fadiga em campo

Não foram encontrados na literatura ensaios de campo específicos para a calibração do software FlexPAVE™, contudo, um dos principais métodos usados nos Estados Unidos para o monitoramento de trincas são os equipamentos automatizados, como veículos equipados com câmeras e sensores, para quantificar a extensão e a severidade das trincas. Esses dados ajudam a entender como as trincas se iniciam e se propagam ao longo do tempo (FHWA, 2016; ASTM D6433, 2020). Além disso, a medição de deformações com sensores, como os *strain gauges*, permite monitorar as deformações horizontais na base da camada asfáltica, que são críticas para o desenvolvimento de trincas por fadiga (NCHRP, 2004; AASHTO, 2020).

O FlexPAVE™ transforma os dados de fadiga em percentual de área trincada por meio de um processo baseado na mecânica do dano contínuo e em funções de transferência calibradas experimentalmente. Tal método foi validado no Brasil por estudos como os de Nascimento (2015) e Santiago (2017), que demonstraram a capacidade do modelo S-VECD de prever o desempenho de misturas asfálticas sob carregamentos cíclicos.

Primeiramente, o software recebe os dados de ensaios laboratoriais, como o módulo dinâmico (AASHTO T 342) e os testes de fadiga (AASHTO TP 107), que caracterizam o comportamento viscoelástico da mistura asfáltica e sua resistência à fadiga. Esses dados são utilizados no modelo S-VECD (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*), desenvolvido por Kim e Little (1990) e aprimorado por Sabouri e Kim (2014), que quantifica a degradação do material sob carregamentos repetidos.

O resultado principal desse modelo é a curva característica de dano (C *vs*. S), que descreve a relação entre a integridade estrutural da mistura e a progressão do dano, independentemente do histórico de carga e da temperatura (Underwood *et al.*, 2010). Com base nesse modelo, o FlexPAVE™ utiliza um critério de falha chamado G^R (taxa de dissipação de energia de pseudo-deformação), desenvolvido por Zhang *et al*., (2013) e

refinado por Sabouri e Kim (2014), que correlaciona o dano acumulado ao longo do tempo com o número de ciclos de carregamento (N/N_f). O software simula a evolução desse dano ao longo da vida útil do pavimento, considerando fatores como o tráfego, a variação de temperatura e a estrutura do pavimento (Eslaminia *et al*., 2012). Neste relatório, adotou-se como critério de mês crítico o momento em que o FlexPAVE™ prevê 20 % de área trincada, enquanto no MeDiNa adotou-se o limite de 30 % (DNIT, 2023), conforme o Quadro 2.1.

2.2.3 Análise comparativa entre os métodos

O MeDiNa e o FlexPAVE™ 1.1 apresentam distinções significativas quanto à abordagem dos ensaios laboratoriais e à forma de análise das estruturas de pavimento. Enquanto o MeDiNa é um software de dimensionamento e análise mecanístico-empírica, o FlexPAVE™ se caracteriza como uma ferramenta avançada de análise de desempenho estrutural, com ênfase na modelagem viscoelástica. O MeDiNa utiliza procedimentos mais simplificados, ao passo que o FlexPAVE™ adota uma modelagem mais robusta, especialmente para as camadas asfálticas, integrando parâmetros que consideram os efeitos do tempo, da temperatura e da viscoelasticidade dos materiais. O Quadro 2.1 e a Figura 2.5, sintetizam o comparativo entre as duas metodologias.

Quadro 2.1 – Comparativo entre o MeDiNa e o FlexPAVE™ 1.1

Método	Tráfego	Clima	Análise		Critério de fadiga
			Granular e Solo	Asfáltica	
MeDiNa	N	-	MR, DF	MR, CD, FN	30 %
FlexPAVE™	VMD	EICM	MR	E*, T/C, SSR, S-VECD	20 %

N: número de repetições de um eixo-padrão ‖ VMD: volume médio diário ‖ MR: módulo de resiliência ‖ DF: deformação permanente ‖ FN: *flow number* ‖ CD: compressão diametral à tensão controlada ‖ T/C: tração-compressão uniaxial ‖ S-VECD: *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* ‖ ‖E*‖: módulo complexo ‖ SSR: *Stress Sweep Rutting.*

Fonte: Autores (2025)

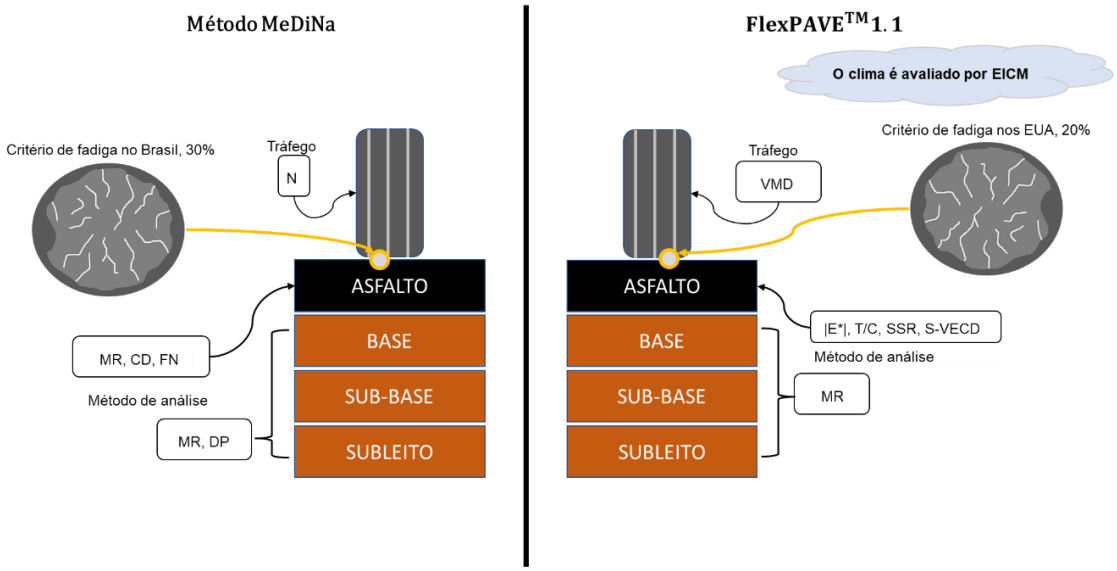


Figura 2.5 – Comparativo entre o MeDiNa e o FlexPAVE™ 1.1

Fonte: Autores (2025)

Em relação à rigidez das camadas asfálticas, o MeDiNa adota o módulo de resiliência (MR), considerando uma única temperatura e frequência de carregamento. Já o FlexPAVE™ utiliza o módulo dinâmico (|E*|), avaliando o comportamento viscoelástico da mistura asfáltica em diferentes temperaturas e frequências, o que resulta em uma caracterização mais completa da resposta mecânica do material. No que se refere à fadiga, o MeDiNa emprega um modelo baseado na relação entre número de ciclos e deformação resiliente específica utilizando o ensaio de compressão diametral à tensão controlada (CD), regulamentado no Brasil pela norma DNIT 183 – ME (DNIT, 2018). Enquanto o FlexPAVE™ faz uso do tração-compressão uniaxial (T/C) associado ao modelo *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD), que considera a liberação de energia de pseudo-deformação (G^R) para prever a evolução do dano ao longo do tempo (Eslaminia *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2018).

Quanto à deformação permanente, o MeDiNa estabelece critérios de aceitação com base no *Flow Number* (FN), sem modelar sua evolução ao longo do tempo. O FlexPAVE™, por outro lado, adota o ensaio *Stress Sweep Rutting* (SSR), permitindo prever a evolução da deformação viscoplástica ao longo da vida útil do pavimento. Essas diferenças demonstram que o FlexPAVE™ oferece uma abordagem mais detalhada e dinâmica, enquanto o MeDiNa adota critérios mais simplificados.

3 ANÁLISE DE CUSTO DE CICLO DE VIDA (ACCV)

3.1 METODOLOGIA PROPOSTA: e-ACCV

A ACCV é uma ferramenta útil para avaliar o desempenho técnico e econômico de infraestruturas ao longo de sua vida útil, abrangendo desde a fase de implantação até as ações de manutenção e reabilitação. Essa técnica permite identificar soluções mais eficientes e sustentáveis, otimizando o uso de recursos financeiros e materiais. Entre seus principais benefícios estão a capacidade de reduzir custos no longo prazo, ao minimizar a frequência de intervenções de manutenção, e de comparar alternativas tecnológicas, incluindo diferentes métodos de dimensionamento e novos materiais. Além disso, a ACCV facilita o planejamento estratégico de investimentos, garantindo que decisões tomadas na fase de projeto considerem o impacto econômico de todo o ciclo de vida da infraestrutura.

A metodologia e-ACCV proposta e usada baseia-se em uma sequência estruturada de etapas que permite a análise integrada de custos e desempenho. Inicialmente, são definidos os cenários a serem avaliados, que podem incluir diferentes condições de tráfego, configurações estruturais e materiais. Esses cenários são projetados para representar as condições reais de operação e possibilitar a análise comparativa entre soluções distintas.

O desempenho do pavimento é monitorado pela observação do percentual de área trincada (%AT). Este parâmetro define o momento em que uma intervenção de manutenção deve ser realizada. Quando o %AT atinge um limite preestabelecido, normalmente de 30 %, é acionada uma ação padronizada de manutenção, que consiste na fresagem a frio de toda a espessura da camada de revestimento asfáltico, seguida de sua recomposição com o mesmo material utilizado na execução inicial. Essa estratégia garante a comparabilidade entre as alternativas avaliadas, assegurando que todas sigam os mesmos critérios de intervenção.

Para determinar o momento ideal de manutenção, utiliza-se o conceito de Mês Crítico (MC), que corresponde ao instante em que o pavimento atinge o limite de desempenho estabelecido. O MC é identificado por meio de simulações computacionais que avaliam a evolução do %AT ao longo do tempo. Com base no MC, calcula-se a quantidade de ciclos de manutenção necessários durante a vida útil da estrutura, dividindo-se o período total de análise pelo MC.

Os custos associados ao ciclo de vida incluem tanto os custos iniciais de implantação quanto os custos de manutenção ao longo do tempo. Esses cálculos são baseados em tabelas padronizadas de composições de custos (ex.: SICRO), garantindo uniformidade e comparabilidade. As intervenções de manutenção são planejadas considerando critérios técnicos e econômicos. Considera-se como hipótese simplificadora que as condições

estruturais e funcionais do pavimento sejam completamente restauradas após cada ciclo de reabilitação. No modelo de e-ACCV proposto na parceria do DNIT com a UFC, propôs-se o cálculo de custos de manutenção que mantenham comparabilidade entre cenários bastante diversos, que não necessariamente correspondem a estratégias do cotidiano de manutenção, ainda que sejam plausíveis. Especificamente, trata-se da fresagem e recomposição total do revestimento a cada vez que atinja 30 % de área trincada. Chama-se de mês crítico o mês em que se atinge a previsão mecanístico-empírica de 30 % de área trincada. A cada atingimento do mês crítico, planeja-se a execução da estratégia de manutenção hipotética, partindo-se do princípio de que toda a capacidade do pavimento é inteiramente restaurada, o que permite repetir indefinidamente os ciclos de vida. Sendo assim, calcula-se um custo de manutenção de um cenário que poderia existir, ainda que não corresponda à prática. Porém, trata-se, portanto, de um custo “equivalente” a esse cenário hipotético, e não ao custo real com outras estratégias.

Por fim, as simulações estruturais (avaliação das estruturas/cenários) são realizadas com o uso de softwares especializados, como o MeDiNa, que permitem prever o desempenho do pavimento ao longo do tempo. Programas como o FlexPAVE™ e o MEPDG podem também ser usados para essa mesma finalidade. Para garantir a comparabilidade entre as alternativas avaliadas, é comum utilizar apenas a função "avaliar a estrutura" do MeDiNa, evitando que o programa altere automaticamente as espessuras ou configurações originais dos cenários analisados, o que ocorreria com a utilização da função “dimensionar”. Nas avaliações apresentadas neste relatório fez-se sempre a consideração de um pavimento com 1.000,00 m de comprimento e 7,00 m de largura. As Tabelas 3.1 e 3.2 trazem os valores de parâmetros físicos e financeiros utilizados nas análises.

Tabela 3.1 – Parâmetros físicos e construtivos usados nas avaliações de custo

Parâmetros	Unidades	Valores
Comprimento da estrutura do pavimento	m	1.000,00
Largura da estrutura do pavimento	m	7,00
Área da estrutura do pavimento	m^2	7.000,00
Massa específica aparente (camada de superfície)	t/m^3	2,396
Massa específica aparente (camada binder)	t/m^3	2,468
Massa específica aparente (tratamento superficial duplo)	t/m^3	2,300
Massa específica aparente (emulsão)	t/m^3	0,980
Taxa de aplicação de imprimação e pintura de ligação	l/m^2	1,0
Teor de asfalto (camada de superfície)	%	5,5
Teor de asfalto (camada binder)	%	4,0
Distância média de transporte	km	5,0

Fonte: Autores (2025)

Tabela 3.2 – Valores usados no cálculo dos custos de implantação das estruturas dos pavimentos analisados

Itens/materiais	Unidades	Valores unitários (R$)
Camada de superfície (concreto asfáltico)	t	200,26
Pintura de ligação	m^2	0,28
Camada binder (concreto asfáltico)	t	195,85
Tratamento superficial duplo	m^2	5,86
Imprimação	m^2	0,41
Base (brita tratada com cimento)	m^3	264,66
Sub-base (solo fino, silto-argiloso)	m^3	11,54
Aquisição de cimento asfáltico (camadas asfálticas)	t	3.678,99
Aquisição de emulsão asfáltica (pintura de ligação)	t	2.755,39
Aquisição de emulsão asfáltica (imprimação)	t	2.397,57
Transporte de CAP (camadas asfálticas)	$t.km$	1,98
Transporte de emulsão asfáltica (pintura de ligação)	$t.km$	1,98
Transporte de emulsão asfáltica (imprimação)	$t.km$	1,98
Fresagem da camada de superfície	m^3	57,81
Fresagem da camada binder	m^3	50,37
Fresagem do tratamento superficial duplo	m^3	88,11
Transporte de RAP	t	3,14

Fonte: Autores (2025)

3.1.1 Exemplo de utilização da metodologia proposta neste relatório

Utiliza-se como exemplo uma rodovia cearense não federal, com um número N de $1{,}35\times10^7$. Neste exemplo compararam-se os Cenários 1 e 2, o primeiro representando a condição de campo, com espessuras menores em relação ao segundo, o que resultou em uma vida útil reduzida e maior necessidade de manutenções ao longo do tempo. O MC foi atingido após 40 meses, com um total de 3 ciclos de manutenção durante o período analisado (10 anos). Essa condição reflete a influência negativa das inconsistências na execução da obra, resultando em aceleração da deterioração do pavimento devido ao desempenho estrutural comprometido, e aumento na frequência de ações de manutenção.

Por outro lado, o Cenário 2, representando a condição ideal, apresenta espessuras maiores, conforme as recomendações do método de dimensionamento empírico do DNIT. Essa estrutura alcançou um MC de 82,8 meses, com 1,5 ciclos de manutenção durante o período analisado. Isso demonstra que o dimensionamento adequado e o controle rigoroso dos parâmetros construtivos resultam em uma maior durabilidade do pavimento e redução significativa dos custos de manutenção equivalentes (cenário hipotético da fresagem e recomposição total do revestimento) ao longo do ciclo de vida.

Além disso, o custo de implantação do Cenário 2 foi 37 % superior em comparação ao Cenário 1, devido ao maior consumo de materiais e ao rigor construtivo. No entanto, o custo total do ciclo de vida do Cenário 1 foi 13 % maior em comparação ao Cenário 2, evidenciando que a economia inicial é anulada pelos custos elevados de manutenção ao longo da vida útil do pavimento. A Tabela 3.3 e a Figura 3.1 apresentam os detalhes do exemplo ilustrativo.

Tabela 3.3 – Estrutura das alternativas de pavimentos e informações para a e-ACCV

Cenário	Solução	Espessuras (cm)			MC	Nº de manutenções
		Revestimento	Base	Sub-base		
1	Condição de campo	7,0	15,0	19,0	40,0	3,0
2	Condição ideal	10,0	18,0	24,0	82,8	1,5

Fonte: Autores (2025)

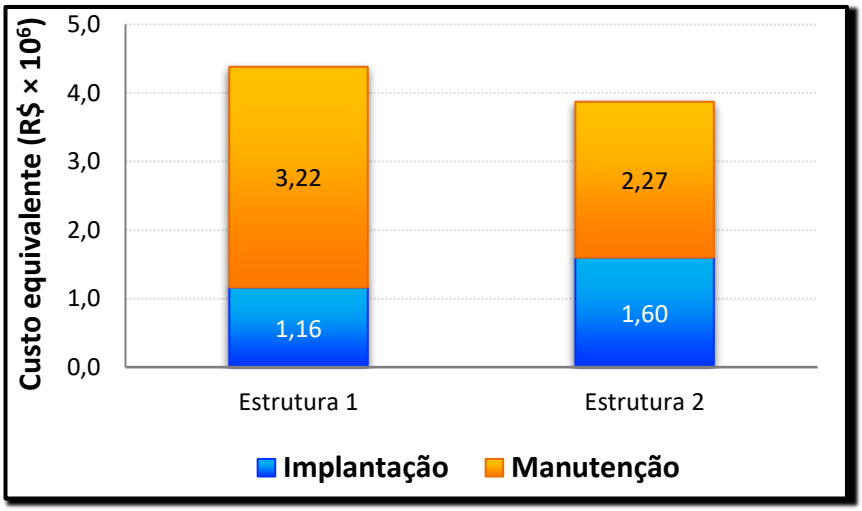


Figura 3.1 – Resultados da e-ACCV nas condições de campo (GC Baixo, Cenário 1) em comparação à condição conforme projeto (GC Ótimo, Cenário 2), considerando 1 km de rodovia

Fonte: Autores (2025)

Nesse sentido, utilizou-se esta metodologia para as análises e-ACCV dos cenários propostos em cada rodovia presente neste relatório. Foram avaliadas as estruturas originais de cada BR, considerando a diferença entre os materiais de projeto e de campo, além de que em alguns casos fez-se também o redimensionamento da estrutura com a utilização do MeDiNa. Seguiu-se o ciclo representado na Figura 3.2.

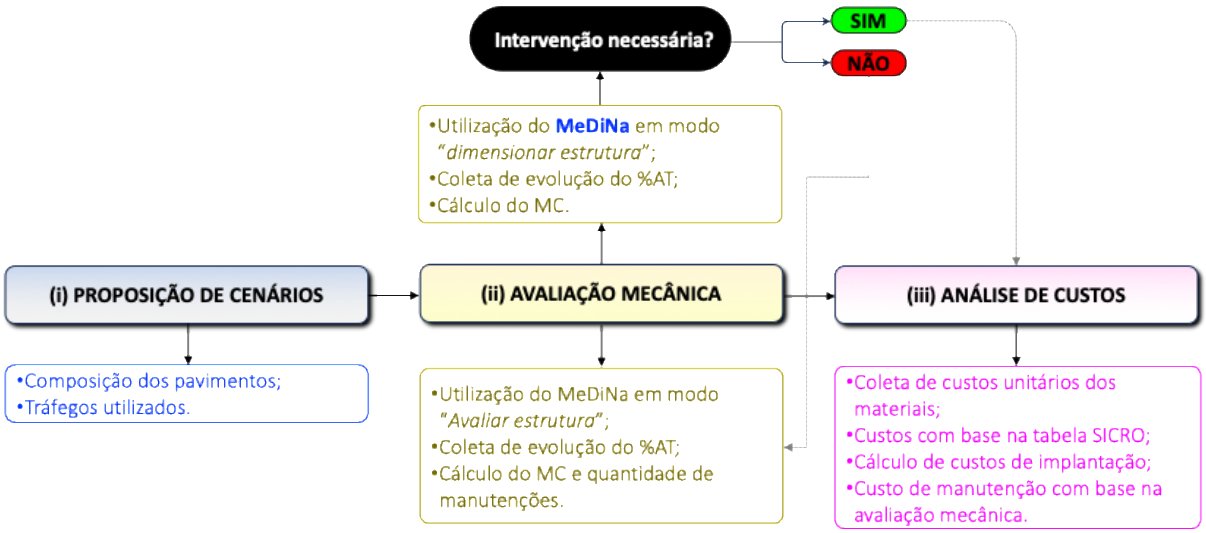


Figura 3.2 – Fluxograma representativo da metodologia de ACCV usada no presente relatório

Fonte: Autores (2025)

4 e-ACCV PARA TRÊS RODOVIAS FEDERAIS DISTINTAS

4.1 e-ACCV DA BR-020

Os cenários testados na BR-020 avaliaram a influência das variações de espessura e materiais no desempenho e nos custos do ciclo de vida dos pavimentos. O Cenário 1 representa a estrutura original projetada pelo método empírico baseado no CBR, com as camadas especificadas em projeto. Os Cenários 2 e 3 utilizam as espessuras medidas em campo na Janela 1, sendo que o primeiro considera os materiais reais da construção e o segundo, os materiais especificados no projeto.

Da mesma forma, os Cenários 4 e 5 analisam as espessuras da Janela 2, com variação entre materiais reais e de projeto. O Cenário 6 representa o redimensionamento da estrutura utilizando o método mecanístico-empírico MeDiNa, visando alcançar 30 % de AT ao final de 10 anos, o que é premissa do método. Por fim, os Cenários 7 e 8 exploram variações de espessura das camadas asfálticas e modificando a base e sub-base no último caso. Essa abordagem possibilita uma análise comparativa entre o desempenho estrutural e os custos associados às diferentes configurações de pavimentos. A Tabela 4.1 traz as espessuras utilizadas nas análises dos diferentes cenários, a Tabela 4.2, os parâmetros mecânicos utilizados, enquanto a Tabela 4.3 e a Figura 4.1 trazem os dados dos e-ACCVs.

Tabela 4.1 – Soluções e suas características estruturais (BR-020)

Solução	Cenário	Capa (cm)	Binder (cm)	Anti Trincas (cm)	Base (cm)	Sub-base (cm)
1	Projeto	5,0	6,0	2,5	15,0	15,0
2	Construído (janela 1, materiais de campo)	9,0	-	2,5	15,0	27,0
3	Construído (janela 1, materiais de projeto)	9,0	-	2,5	15,0	27,0
4	Construído (janela 2, materiais de campo)	9,5	-	2,5	15,0	27,0
5	Construído (janela 2, materiais de projeto)	9,5	-	2,5	15,0	27,0
6	Redimensionado (MeDiNa)	11,0	-	-	17,5	15,0
7	Redimensionado (espessura reduzida)	6,4	13,5	2,5	15,0	15,0
8	Redimensionado (espessura aumentada)	7,8	16,5	2,5	30,0	30,0

Fonte: Autores (2025)

Tabela 4.2 – Parâmetros mecânicos da estrutura (BR-020)

Camada	Módulo de Resiliência (MPa)	Poisson
Capa	4650	0,30
Binder	6114	0,30
Camada anti-trincas	1000	0,20
Base (projeto)	Sigmoidal	0,20
Base (construído)	Sigmoidal	0,20
Sub-base (projeto)	Resiliente não linear	0,35
Sub-base (construído)	Resiliente não linear	0,35
Subleito	Resiliente não linear	0,45

Fonte: Autores (2025)

Tabela 4.3 – Soluções, MCs e número de manutenções e custos (BR-020)

Cenário	Solução	MC	Nº de Manutenções	Custo (R$ x 10⁶)		
				Implantação	Manutenção	Total
1	Projeto	13,6	8,8	1,05	7,95	9,00
2	Construído (janela 1, materiais de campo)	25,5	4,7	0,93	3,55	4,48
3	Construído (janela 1, materiais de projeto)	15,1	8,0	0,93	6,00	6,93
4	Construído (janela 2, materiais de campo)	27,1	4,4	0,96	3,55	4,48
5	Construído (janela 2, materiais de projeto)	16,2	7,4	0,96	5,88	6,84
6	Redimensionado (MeDiNa)	123,8	1,0	1,72	1,68	3,40
7	Redimensionado (espessura reduzida)	83,8	1,4	1,59	2,13	3,72
8	Redimensionado (espessura aumentada)	191,3	0,6	2,15	1,15	3,30

Fonte: Autores (2025)

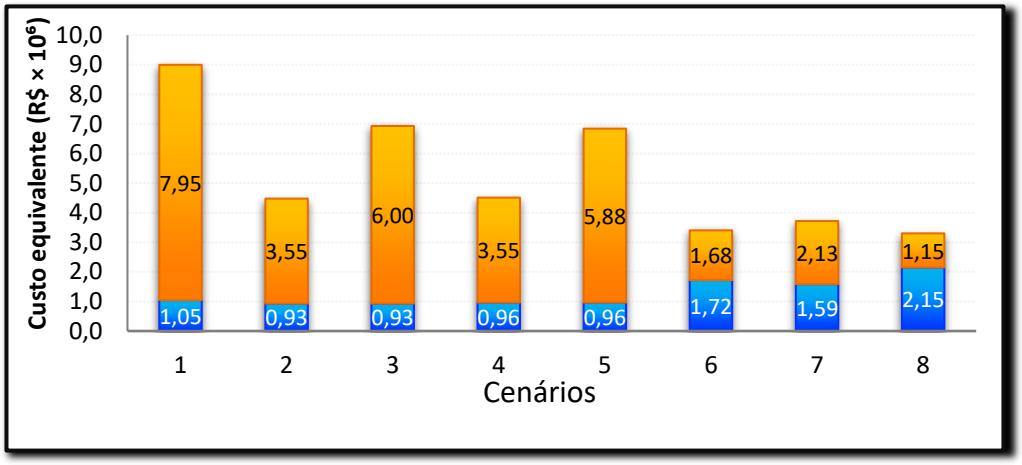


Figura 4.1 – Custos dos cenários considerados na BR-020

Fonte: Autores (2025)

Os resultados obtidos evidenciam as vantagens técnicas e econômicas das estruturas redimensionadas e o impacto das variações de espessura e materiais no desempenho dos pavimentos. O Cenário 1, projetado pelo método empírico baseado no CBR, apresentou o pior desempenho, com 8,8 manutenções ao longo de 10 anos e custo total de R$ 9,00 milhões, sendo 164 % maior do que o custo total do Cenário 6 (MeDiNa), que foi de R$ 3,40 milhões. Isso evidencia a ineficiência do método empírico tradicional, resultando em maior necessidade de manutenções e custos elevados.

Nos Cenários 2 e 3 (Janela 1), a utilização de materiais reais no Cenário 2 proporcionou uma redução de 35 % no custo total (de R$ 6,93 milhões no Cenário 3 para R$ 4,48 milhões no Cenário 2). A melhoria foi impulsionada pelas características mecânicas dos materiais encontrados em campo, que reduziram as intervenções de manutenção de 8,0 para 4,7 ciclos. Esse comportamento foi similar nos Cenários 4 e 5 (Janela 2), onde o Cenário 4, com materiais reais e maior espessura na camada de superfície, reduziu o número de manutenções de 7,4 para 4,4 ciclos e resultou em um custo total aproximadamente 35 % menor (R$ 4,51 milhões contra R$ 6,84 milhões).

O Cenário 6, redimensionado pelo método mecanístico-empírico MeDiNa, apresentou uma única manutenção em 10 anos e o menor custo total entre os cenários, de R$ 3,40 milhões. Isso representa uma redução de 62 % nos custos totais em comparação ao Cenário 1, reforçando a eficiência do dimensionamento avançado, que proporciona estruturas robustas e de maior durabilidade.

Nos Cenários 7 e 8, que simulam variações de espessura, os impactos foram claros. A redução de 10 % da camada de revestimento no Cenário 7 resultou em um aumento de 9,4 % no custo total (de R$ 3,40 milhões no Cenário 6 para R$ 3,72 milhões), além de aumentar o número de manutenções para 1,4 ciclos.

Por outro lado, o Cenário 8, com um aumento de 35 % nas espessuras das camadas e reforço das camadas de base e sub-base, apresentou o menor custo total de R$ 3,30 milhões, uma economia de 3 % em relação ao Cenário 6, e apenas 0,6 manutenções, confirmando o benefício das camadas mais espessas.

4.2 e-ACCV DA BR-222

Para comparar os custos de implantação e manutenção nos dois cenários considerados neste relatório para a BR-222, sejam eles o projeto teórico (cenário 1) e o projeto prático (cenário 2), realizaram-se suas e-ACCVs. Em seguida pretendia-se, no entanto, partindo do projeto prático (cenário 2), utilizar a função "dimensionar" do MeDiNa para considerar os materiais realmente utilizados em campo e observar as possíveis alterações nas espessuras propostas pelo programa, bem como suas implicações nos custos. Entretanto, o software indicou não ser possível dimensionar o pavimento com esses materiais, pois a camada 4 (sub-base) mostrou-se muito susceptível à deformação permanente. A Tabela 4.4 traz as soluções propostas com a espessura de suas camadas constituintes, a Tabela 4.5, seus parâmetros mecânicos, a Tabela 4.6, os MCs e manutenções aplicadas na rodovia BR-222 e a Figura 4.2, os seus respectivos custos.

Tabela 4.4 – Soluções e suas características estruturais (BR-222)

Cenário	Soluções	Revestimento (cm)	Base (cm)	Sub-base (cm)
1	BR-222 (projeto teórico)	12,5	20	15
2	BR-222 (projeto aplicado)	12,5	20	15

Fonte: Autores (2025)

Tabela 4.5 – Parâmetros mecânicos da estrutura (BR-222)

Camada	Módulo de Resiliência (MPa)	Poisson
Capa (Projeto)	4000	0,30
Capa (Aplicado)	3008	0,30
Base (Aplicado e Projeto)	Sigmoidal	0,20
Sub-base (Projeto)	513	0,35
Sub-base (Aplicado)	396	0,35
Subleito	403	0,45
Subleito (projeto)	100	0,45

Fonte: Autores (2025)

Tabela 4.6 – Soluções, MCs e número de manutenções e custos (BR-222)

Cenário	Soluções BR-222	MC	Nº de manutenção	Custo (R$ x 10⁶)		
				Implantação	Manutenção	Total
1	BR-222 (projeto teórico)	95,7	1,25	1,27	1,32	2,59
2	BR-222 (projeto aplicado)	124,9	0,96	1,27	1,01	2,28

Fonte: Autores (2025)

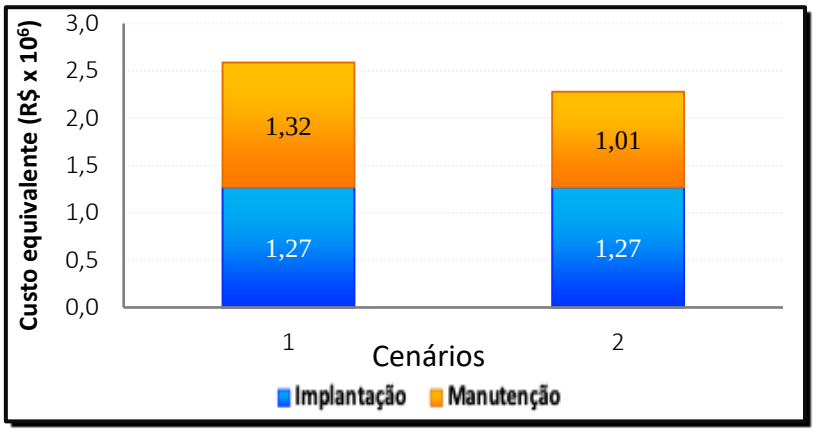


Figura 4.2 – Custos dos cenários considerados na BR-222

Fonte: Autores (2025)

O projeto aplicado (cenário 2) apresentou redução de 23,5 % no custo de manutenção em comparação com o projeto teórico (cenário 1). Isso resultou em uma economia total de aproximadamente 12 % no custo do ciclo de vida, indicando que o cenário 2 mostrou-se mais eficiente e econômico. Observe-se, porém, que os valores das constantes da Curva de Wöhler provenientes dos ensaios de fadiga por compressão diametral realizados em laboratório foram adotados idênticos para ambos os cenários, tendo os módulos de resiliência provocado as diferenças observadas.

O número de intervenções de manutenção também foi reduzido em 23,2 % (de 1,25 para 0,96), demonstrando que o projeto aplicado requer menor necessidade de manutenção ao longo do período de análise. Os custos de implantação são iguais, pois as mesmas espessuras foram usadas nos dois cenários. Já o projeto prático (cenário 2) mostrou-se mais econômico tendo um custo de manutenção aproximadamente 25 % menor do que o projeto teórico (cenário 1). Já ao se observar os custos totais (implantação e manutenção), o cenário 2 é 12 % menor, aproximadamente.

4.3 e-ACCV DA BR-316

Na rodovia piauiense estudada pela UFC, foram avaliados, por meio da metodologia de e-ACCV proposta, os cenários ilustrados: BR-316_I, BR-316_II e BR-316_III. Cada cenário foi avaliado com as espessuras verificadas em campo, porém, com as mesmas camadas/materiais foram dimensionadas propostas alternativas de pavimentos no MeDiNa, assim o software alterou as espessuras da camada de revestimento, de forma que o %AT não atingisse o limite de 30 % no período de simulação, mas se aproximasse o máximo possível. Assim, a e-ACCV da rodovia BR-316 considerou 6 cenários, apresentados com as dimensões de suas camadas (Tabela 4.7), parâmetros mecânicos (Tabela 4.8) e os parâmetros de ACCV e custos obtidos para os cenários avaliados, Tabela 4.9 e Figura 4.3, respectivamente.

Tabela 4.7 – Soluções e suas características estruturais (BR-316)

Cenário	Soluções BR-316 PI	Revestimento (cm)	Base (cm)	Sub-base (cm)
1	BR-316_I	15,0	15,0	15,0
2	BR-316_I_redimensionada	15,0	5,0	38,0
3	BR-316_II	7,0	-	38,0
4	BR-316_II redimensionada	16,5	-	38,0
5	BR-316_III	5,0	-	40,0
6	BR-316_III redimensionada	11,5	5,0	40,0

Fonte: Autores (2025)

Tabela 4.8 – Parâmetros mecânicos da estrutura (BR-316)

Camada	Módulo de Resiliência (MPa)	Poisson
Capa	8042	0,30
Base	Resiliente não linear	0,35
Sub-base	Resiliente não linear	0,45
Subleito	Resiliente não linear	0,45

Fonte: Autores (2025)

Tabela 4.9 – Soluções, MCs e número de manutenções e custos (BR-316)

Cenário	Soluções BR-316 PI	MC	Nº de manuten-ções	Implantação	Manutenção	Total
1	BR-316_I	55,9	2,15	1,13	2,55	3,68
2	BR-316_I_redimensionada	123,5	0,97	1,28	1,33	2,61
3	BR-316_II	18,7	6,41	0,52	3,62	4,14
4	BR-316_II redimensionada	122,8	0,98	1,17	1,27	2,44
5	BR-316_III	16,1	7,44	0,39	3,04	3,43
6	BR-316_III redimensionada	121,0	0,99	1,17	1,29	2,46

Fonte: Autores (2025)

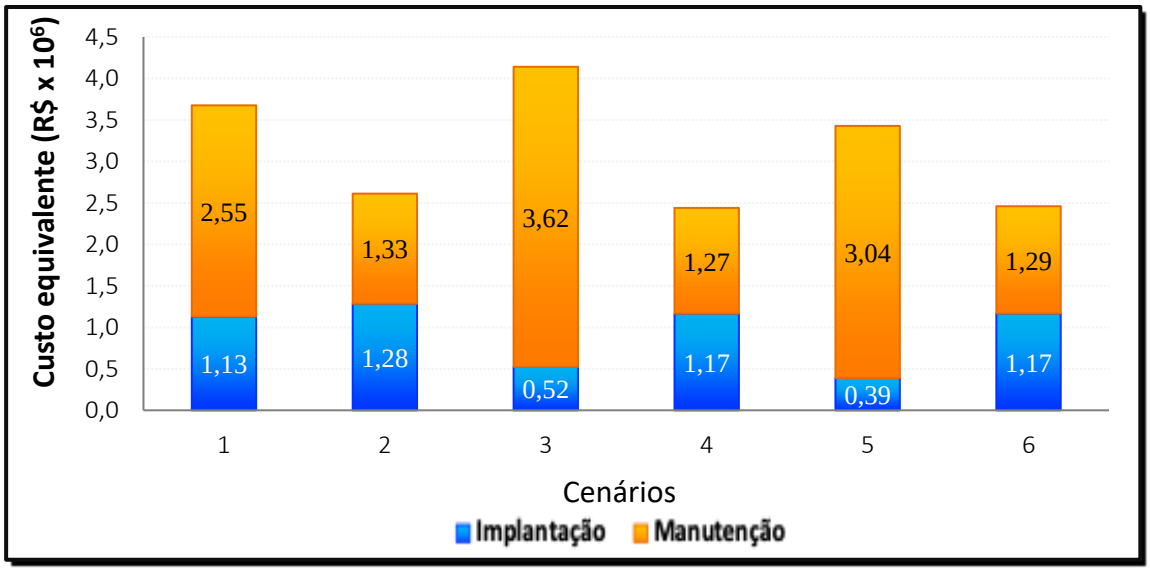


Figura 4.3 – Custos dos cenários considerados na BR-316 PI

Fonte: Autores (2025)

Observa-se que os cenários redimensionados apresentaram custos de implantação mais elevados, porém custos de manutenção e custos totais reduzidos em comparação aos respectivos cenários originais.

Na comparação entre os Cenários 1 (BR-316_I) e 2 (BR-316_I_redimensionada), o custo de implantação aumentou em 13,3 % (de R$ 1,13 para R$ 1,28 milhão). Em contrapartida, o custo de manutenção foi reduzido em 47,8 % (de R$ 2,55 para R$ 1,33 milhão), resultando em redução de 29,1 %.

Entre os Cenários 3 (BR-316_II) e 4 (BR-316_II_redimensionada), o custo de implantação aumentou 125,0 % (de R$ 0,52 para R$ 1,17 milhão). O custo de manutenção caiu 64,9 % (de R$ 3,62 para R$ 1,27 milhão), com redução de 41,1 % no custo total (de R$ 4,14 para R$ 2,44 milhões).

Entre os Cenários 5 (BR-316_III) e 6 (BR-316_III_redimensionada), o custo de implantação triplicou (de R$ 0,39 para R$ 1,17 milhão, +200 %). O custo de manutenção caiu 57,6 % (de R$ 3,04 para R$ 1,29 milhão), com redução de 28,3 % no custo total (de R$ 3,43 para R$ 2,46 milhões).

Os resultados indicam que, embora o redimensionamento das estruturas aumente os custos de implantação, ele proporciona reduções expressivas nos custos de manutenção e, consequentemente, no custo total do ciclo de vida. Esse comportamento confirma a premissa do MeDiNa, que busca estruturas mais robustas para reduzir a necessidade de manutenção ao longo dos 10 anos de projeto.

O Cenário 3 (BR-316_II original) apresentou o maior custo total devido ao elevado custo de manutenção, demonstrando que soluções com custos iniciais baixos, por terem baixa capacidade estrutural, devem ser desestimuladas em obras futuras. Os cenários redimensionados (2, 4 e 6) apresentaram desempenho técnico e financeiro similar, mostrando-se alternativas viáveis e econômicas no longo prazo.

Assim, pode-se concluir que o investimento inicial em soluções redimensionadas é compensado pela significativa redução nos custos de manutenção, tornando essas alternativas mais sustentáveis e economicamente vantajosas ao longo do ciclo de vida da estrutura.

5 e-ACCV USANDO OUTRO MECANISMO DE ANÁLISE (FLEXPAVE™ 1.1)

5.1 e-ACCV DA BR-316 PI

Para comparar os resultados das análises de custos provenientes de diferentes motores de dimensionamento, foi utilizada uma estrutura já conhecida (Cenário 5 da rodovia BR-316). Esta estrutura foi replicada no *software* FlexPAVE™, utilizando os dados de entrada necessários para determinar o dano na camada de revestimento (%) e, posteriormente, a área trincada através da função de transferência (Wang *et al.*, 2021). Assim, foi possível identificar o mês crítico para a análise, definido, no método norte-americano, como o momento em que a área trincada alcançou 20 %.

Com base nos resultados obtidos, uma nova estrutura foi dimensionada no MeDiNa, ajustando a camada de revestimento para alcançar o mesmo mês crítico identificado na análise do FlexPAVE™. Por meio da metodologia da e-ACCV, foram comparados os custos de implantação e manutenção das estruturas propostas. A Tabela 5.1 apresenta as dimensões das camadas adotadas, enquanto a Tabela 5.2 descreve suas características mecânicas. Já os resultados da e-ACCV são mostrados na Tabela 5.3, e a Figura 5.1 detalha os custos considerados.

Tabela 5.1 – Soluções e suas características estruturais (BR-316)

Cenário	Soluções BR-316 PI	Revestimento (cm)	Sub-base (cm)
1	BR-316_III (MeDiNa)	5	40
2	BR-316_III (FlexPAVE™)	5	40
3	BR-316_III (MC 44)	13,2	40

Fonte: Autores (2025)

Tabela 5.2 – Parâmetros mecânicos da estrutura (BR-316)

Camada	Rigidez (MPa)	Poisson
Capa	E* / 8042	0,30
Sub-base	502 (Médio)	0,45
Subleito	301 (Médio)	0,45

Fonte: Autores (2025)

Tabela 5.3 – Soluções, MCs e número de manutenções e custos (BR-316)

Cenário	Soluções BR-316 PI	MC	Nº de manutenção	Implantação	Manutenção	Total
1	BR-316_III_ MeDiNa	16,1	7,44	0,39	3,04	3,43
2	BR-316_III_ FlexPAVE™	44,0	2,73	0,39	1,12	1,51
3	BR-316_III_ MeDiNa – MC 44	43,9	2,73	0,94	2,86	3,80
4	BR-316_III_ FlexPAVE™	120,0	0,98	0,40	0,44	0,84

Fonte: Autores (2025)

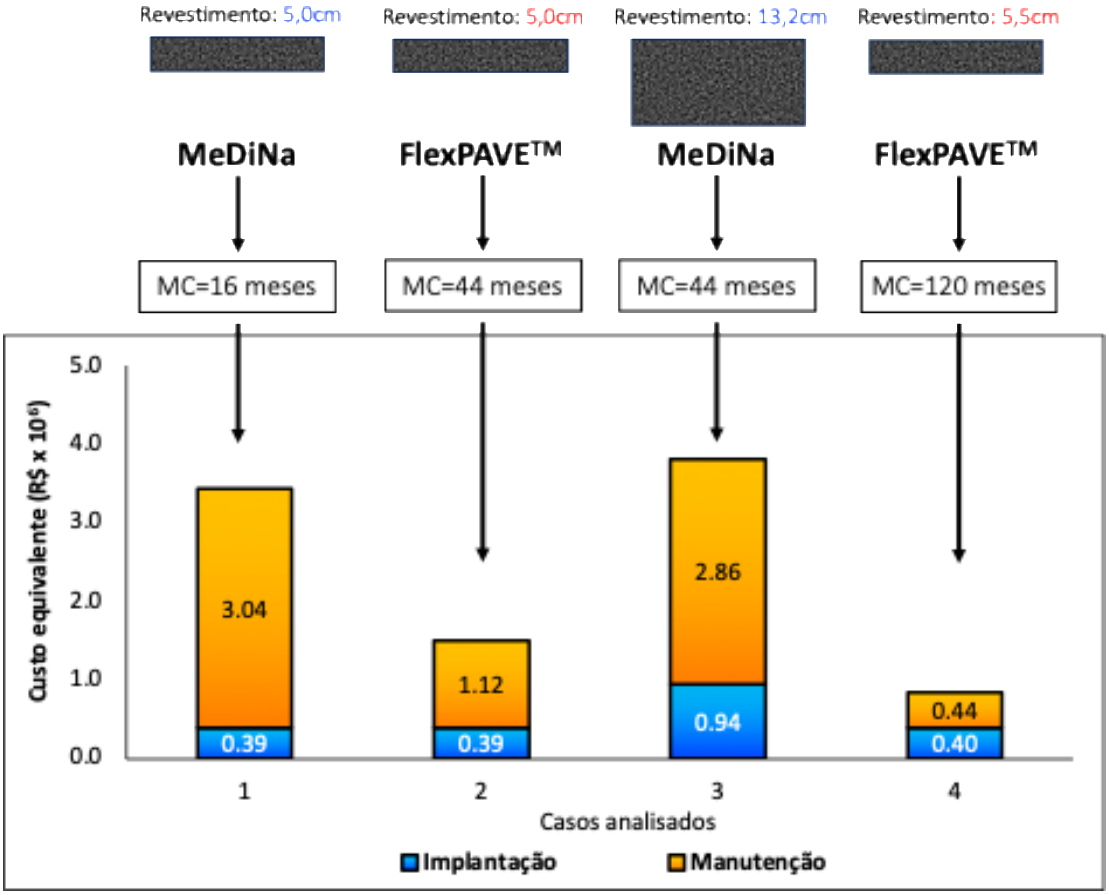


Figura 5.1 – Resultados dos cenários avaliados pelos métodos

Fonte: Autores (2025)

Ao comparar o custo de uma mesma estrutura entre o MeDiNa e o FlexPAVE™, observa-se que, embora o valor de implantação seja equivalente devido às mesmas espessuras adotadas, a evolução do trincamento por fadiga impacta significativamente os custos de manutenção ao longo da vida útil. Esse impacto é evidenciado pelo aumento de aproximadamente 170 % nos gastos com manutenção na estrutura dimensionada no MeDiNa. Ao considerar a estrutura dimensionada no MeDiNa, para o mês crítico ser o 44°, da mesma forma que a estrutura inicial no FlexPAVE™, observou-se a necessidade de usar espessuras de revestimento 2,64 vezes maiores (saindo de 5,0 cm de revestimento asfáltico para 13,2 cm) que passou a ter custo ao fim da vida útil maior que a estrutura proposta inicialmente.

No Cenário 4, no qual a espessura do revestimento da BR-316_III foi ajustada no FlexPAVE™ até que o mês crítico (20 % de área trincada) ocorresse aos 120 meses, equivalente à vida de projeto de 10 anos, resultando em 1,00 manutenção no período. Com custo total de R$ 0,84 milhão, esse cenário é cerca de 76 % inferior ao da estrutura original avaliada no MeDiNa (R$ 3,43 milhões), o que reforça a influência do mecanismo de previsão de %AT no custo equivalente.

As grandes diferenças entre os resultados de e-ACCV dos motores de dimensionamento podem sugerir que falhas nas metodologias adotadas pelo MeDiNa na previsão de área trincada, ou que a função de transferência utilizada para transformar o dano acumulado do FlexPAVE™ em área trincada não se ajusta aos materiais brasileiros, ou mesmo as duas possibilidades em concomitância.

A previsão de área trincada, por se tratar de metodologia mecanicista, mas ainda com parte empírica (%AT), é preponderante para a precisão da metodologia de previsão de desempenho econômico da estrutura do pavimento, onde a escolha da metodologia correta de evolução de trincas pode determinar quão bem gastos os recursos estão sendo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste relatório, buscou-se propor e validar uma nova metodologia de ACCV, baseada na avaliação estrutural, aqui denominada e-ACCV. As análises foram realizadas para três rodovias federais (BRs) distintas, com o uso de diferentes materiais e de diferentes estruturas. Para avaliar a degradação das estruturas inicialmente propostas, fez-se uso da previsão de trincamento por fadiga (%AT) calculada por diferentes metodologias (MeDiNa e FlexPAVE™ 1.1). Conforme anunciado anteriormente, como critério de manutenção, adotou-se a fresagem e recomposição total da camada de rolamento, de modo a conseguir zerar a porcentagem de área trincada, sendo a única diferença, o critério adotado para se atingir o critério de mês crítico (20 % a 30 % de área trincada por fadiga, para FlexPAVE™ e MeDiNa, respectivamente). Uma vez que foi definida uma alternativa de manutenção comum a todos os cenários, foi possível avaliar os custos de implantação e manutenção.

A incorporação do parâmetro estrutural na ACCV sugere uma estratégia eficaz para aprimorar o planejamento e a avaliação de pavimentos, aproximando tecnologias de projeto de tecnologias de acompanhamento de pavimentos, e favorecendo a redução dos custos de M&R ao longo da vida útil da estrutura. Apesar de os cenários redimensionados apresentarem custos iniciais de implantação mais elevados, esse aumento é compensado durante o ciclo de vida, visto que as soluções subdimensionadas, embora mais econômicas na fase inicial, resultam em maiores investimentos em manutenção ao longo de sua vida útil. A análise dos resultados demonstrou que o redimensionamento estrutural proporcionou uma redução superior a 50 % no número de intervenções de manutenção necessárias em todos os cenários simulados, refletindo diretamente na diminuição dos custos totais ao longo do período de análise.

Ademais, é possível concluir que a metodologia e-ACCV proposta funciona com qualquer mecanismo de previsão de área trincada, uma vez que basta a estimativa de %AT associada ao valor crítico desse parâmetro. Contudo, os resultados evidenciam que a escolha do motor de análise, seja MeDiNa, FlexPAVE™ ou qualquer outra metodologia, influencia diretamente no resultado final, que também é diretamente dependente de como o programa recebe os dados referentes às características dos materiais componentes da estrutura.

A abordagem de e-ACCV apresentada neste relatório pode auxiliar os analistas do DNIT na tomada de decisões ainda na fase de projeto, como também na gestão racionalizada de recursos financeiros, mas ainda ligada a um caráter mecanicista de análise dos materiais empregados. Para uso mais preciso dessa metodologia, no entanto, é imprescindível conhecer como os motores de análise utilizam os parâmetros de entrada para cálculo da área trincada, além da definição do que é considerado área trincada propriamente dita, já que o conteúdo deste relatório esclarece que elas determinam os valores absolutos obtidos nas análises de cada cenário, que só são comparáveis para premissas idênticas e que permitam comparabilidade coerente entre eles.

Em síntese, os resultados evidenciam que uma das principais implicações está nas incertezas associadas à previsão de desempenho dos pavimentos. Dada a diversidade de materiais, os diferentes tipos de ensaios utilizados na caracterização e as particularidades dos modelos de análise empregados pelas metodologias mecanicistas de dimensionamento, suscitam questionamentos quanto à precisão das estimativas de desempenho em uma escala global. Nesse contexto, a hipótese de análise mecanístico-empírica simplificada apresenta-se como uma alternativa viável. Recomenda-se, portanto, a elaboração de um guia técnico de dimensionamento que adote os princípios fundamentais da abordagem mecanístico-empírica, garantindo o atendimento aos critérios de resistência à fadiga e à deformação permanente ao longo da vida útil do pavimento, porém sem a necessidade de modelagens avançadas de deterioração gradual e previsão de desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRFIELD ASPHALT PAVEMENT TECHNOLOGY PROGRAM (AAPTP). Life cycle cost analysis for airport pavements. Relatório final. Auburn, AL: Applied Research Associates Inc., 2006.

ALBITRES, C. M. C. et al. Aplicabilidad del Método Mecanístico-Empírico de Diseño de Pavimentos (MEPDG) AASHTO 2008 en Latinoamérica. In: Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, 2013.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO TP 107: Standard method of test for determining the damage characteristic curve of asphalt mixtures from direct tension cyclic fatigue tests. Washington, DC: AASHTO, 2014.

_____. AASHTO T 342: Standard method of test for determining dynamic modulus of hot mix asphalt (HMA). Washington, DC: AASHTO, 2022.

_____. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. Washington, DC, 2020.

_____. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice (MEPDG-1). Washington, DC, 2008

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6433: Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. West Conshohocken, PA, 2020.

_____. ASTM D4694: Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements. West Conshohocken, PA, 2021a.

_____. ASTM D4695: Standard Test Method for Fundamental Deflection in Pavements. West Conshohocken, PA, 2021b.

BABASHAMSI, P. et al. Evaluation of pavement life cycle cost analysis: review and analysis. International Journal of Pavement Research and Technology, 2016.

BAJAJ, A.; GRANSBERG, D. D.; GRENZ, M. D. Parametric estimating for design costs. In: Annual Meeting AACE International, 2002.

BORGES, R. L. Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do Shift Model viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida. 2014. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11168.

CARNEIRO, R. S. Análise do custo do ciclo de vida para otimização de estratégias de manutenção e reabilitação em pavimento aeroportuário. TCC – Universidade Federal do Ceará, 2021.

CHOI, Y.-T.; KIM, Y. R. Implementation and verification of a mechanistic permanent deformation model (shift model) to predict rut depths of asphalt pavement. Road Materials and Pavement Design, v. 15, n. sup1, p. 195-218, 2014.

CLAESSEN, A. I. M. et al. Projeto de pavimento asfáltico – O método Shell. In: International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, 1977.

CSIR. Code of practice for the design of road pavements. Pretoria, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 134/2018 – ME – Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.

_____. DNIT 135/2018 – ME – Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.

_____. DNIT 179/2018 – IE – Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio.

_____. DNIT 183/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio.

_____. DNIT 184/2018 – ME – Pavimentação – Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio.

_____. Publicação IPR – 749 – Guia para execução de segmentos experimentais – PRO-MeDiNa, 2020.

_____. Manual de Ajuda do Programa MeDiNa – versão 1.1.6, 2023.

_____. Informativo SICRO nº 01/2017. Brasília, 2017.

DORMON, G. M.; METCALF, C. T. Design curves for flexible pavements based on layered system theory. Highway Research Record, 1965.

ESLAMINIA, M. et al. Accelerated pavement performance modeling using layered viscoelastic analysis. In: RILEM International Conference on Cracking in Pavements, 2012.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. FHWA. Pavement Management System Participant's Manual. Washington, DC, 1998a.

_____. The Transportation Equity Act for the 21st Century. Washington, DC, 1998b.

_____ . Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program. Washington, DC, 2016.

FEITOSA, L. A.; OLIVEIRA, F. H. L. Análise econômica do custo de ciclo de vida para manutenção e reabilitação em rodovias. In: Congresso ANPET, 2018.

FRANCO, F. A. C. P. Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV. Tese (Doutorado), UFRJ, 2007.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. Manual para utilização do método mecanístico-empírico MeDiNa. Rio de Janeiro, 2020.

GUIMARÃES, A. C. R. Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais. Tese (Doutorado), UFRJ, 2009.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; FALLS, L. C. Pavement Asset Management. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

HAIDER, S. W.; DWAIKAT, M. B. Estimating optimum timing for preventive maintenance treatment to mitigate pavement roughness. Transportation Research Record, 2011.

HAN, D.; DO, M. Life cycle cost analysis on pavement inspection intervals considering maintenance work delay. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015.

ISTEA. Intermodal Surface Transportation Efficiency Act of 1991. U.S. Department of Transportation, 1991.

JTG D50. Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement. Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2017.

KANE, A. R. National Highway System Designation Act: Life-Cycle Cost Analysis Requirements. Washington, DC, 1996.

KARNIKOWSKI, T. Seleção de estratégias de manutenção e reabilitação de pavimentos urbanos baseada na análise do custo do ciclo de vida. Dissertação (Mestrado), UDESC, 2019.

KERKHOVEN, R. E.; DORMON, G. M. Some considerations on the California bearing ratio method for the design of flexible pavements. Shell Petroleum Company, 1953.

KERTÉSZ, I.; LOVAS, T.; BARSI, A. Photogrammetric pavement detection system. In: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress, 21., 2008, Pequim. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XXXVII, parte B5, p. 897-902, 2008.

KIM, Y. R.; LITTLE, D. N. One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, v. 116, n. 4, p. 751-772, abr. 1990. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1990)116:4(751).

KHURSHID, M. B.; IRFAN, M.; LABI, S. Comparison of methods for evaluating pavement interventions. Transportation Research Record, 2009.

LAMPTEY, G. et al. Life cycle cost analysis for INDOT pavement design procedures. Purdue University, 2005.

LI, Q. et al. Guia de projeto de pavimento mecanístico-empírico (MEPDG): uma visão panorâmica. Journal of Modern Transportation, 2011.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos Pavimentos. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

METM. Manual de execução de trechos monitorados: rede temática de asfalto. Rio de Janeiro, 2010.

MOTTA, L. M. G. Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Tese (Doutorado), UFRJ, 1991.

NASCIMENTO, L. A. H. Implementation and validation of the viscoelastic continuum damage theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil. Tese (Doutorado), North Carolina State University, 2015.

NCHRP. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Washington, DC, 2004.

NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses: LVECD 1.0 Beta. Raleigh, 2014.

PEREIRA, P.; PAIS, J. Main flexible pavement and mix design methods in Europe. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017.

POWELL, W. D. et al. O projeto estrutural de estradas betuminosas. Monografia LR 1132, 1984.

PRARCHE, S. Infrastructure management and the use of public private partnerships. In: CSCE Annual Meeting, 2007.

RANGARAJU, P. R.; AMIRKHANIAN, S.; GUVEN, Z. Life cycle cost analysis for pavement type selection. FHWA, 2008.

SAAL, R. N. J.; PELL, P. S. Fatigue of bituminous road mixes. Kolloid-Zeitschrift, 1960.

SABOURI, M.; KIM, Y. R. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2447, p. 117-125, 2014. DOI: 10.3141/2447-13.

SANTIAGO, L. S. Contribuições para o desenvolvimento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Tese (Doutorado), UFC, 2017.

SHOOK, J. F. Thickness design of asphalt pavements – the Asphalt Institute method. In: International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, 1982.

SOARES, J. B.; MORENO, A. M.; MOTTA, L. M. G. Aspectos gerais de métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Revista Pavimentação, 2009.

SOARES, J. B.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. A.; LOUREIRO, C. F. G. Análise de viabilidade econômica de sistema de pesagem. In: International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements, 2001.

SOUZA, M. L. Método de projeto de pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 1981.

SWEI, O.; GREGORY, J.; KIRCHAIN, R. Probabilistic life-cycle cost analysis of pavements. Transportation Research Record, 2016.

UNDERWOOD, B. S.; BAEK, C.; KIM, Y. R. Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2296, p. 36-45, 2012. DOI: 10.3141/2296-04.

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R.; GUDDATI, M. N. Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model. International Journal of Pavement Engineering, v. 11, n. 6, p. 459-476, 2010. DOI: 10.1080/10298430903398088.

VASCONCELOS, M. A. G. Estudo sobre o emprego do CAPE SEAL em revestimentos rodoviários do Estado do Ceará. Dissertação (Mestrado), UFC, 2013.

WALLS, J.; SMITH, M. R. Life-cycle cost analysis in pavement design. FHWA, 1998.

WANG, Y. D. et al. Development of preliminary transfer functions for performance predictions in FlexPAVE™. Construction and Building Materials, 2021.

WANG, Y. D.; KESHAVARZI, B.; KIM, Y. R. Fatigue performance prediction of asphalt pavements with FlexPAVE™. Transportation Research Record, 2018.

WITCZAK, M. W. Should Latin America develop their own LAMPA? In: Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, 2011.

XU, Y.; TSAI, Y.-C. Financial consequences of delaying pavement rehabilitation. Journal of Transportation Engineering, 2012.

ZHANG, H.; KEOLEIAN, G. A.; LEPECH, M. D. An integrated life cycle assessment and life cycle cost analysis model for pavement overlay systems. In: International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, 2008.

ZHANG, J.; SABOURI, M.; KIM, Y. R.; GUDDATI, M. N. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under fatigue loading. Road Materials and Pavement Design, v. 14, supl. 2, p. 1-15, 2013.