

Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) em rodovias estaduais do Ceará

Life Cycle Cost Analysis (LCCA) on highways in the state of Ceará

José Levi Chaves de Sousa¹, Francisco Heber Lacerda de Oliveira¹

¹Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil

Contato: levi.chaves@det.ufc.br,  (JLCS); heber@det.ufc.br,  (FHLO)

Recebido:

2 de dezembro de 2024

Revisado:

29 de agosto de 2025

Aceito para publicação:

4 de setembro de 2025

Publicado:

11 de novembro de 2025

Editores de Área:

José Geraldo Vidal Vieira,
Universidade Federal de São Carlos,
Brasil

Josiane Palma Lima, Universidade
Federal de Itajubá, Brasil

Palavras-chave:

ACCV.

Manutenção e Reabilitação (M&R).

Árvore de Decisão.

IRI.

Keywords:

LCCA.

Maintenance and Rehabilitation
(M&R).

Decision Tree.

IRI.

DOI: 10.58922/transportes.v33.e3071

RESUMO

A infraestrutura rodoviária brasileira enfrenta desafios em planejamento, manutenção e reabilitação (M&R), o que impacta diretamente na sua qualidade funcional e nos custos de operação das rodovias. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar se é possível estabelecer estratégias racionais de M&R para rodovias estaduais no Ceará, com base na Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV), aliada ao uso de árvores de decisão e à avaliação de sua condição funcional. A pesquisa abrangeu três rodovias estaduais, utilizando dados de tráfego, idade dos pavimentos e o Índice de Irregularidade Internacional (IRI) coletados em 2023. O método de pesquisa incluiu uma análise estatística descritiva para caracterizar as condições funcionais das rodovias e projeções temporais do IRI considerando cenários sem intervenções de M&R em períodos de 2, 4 e 6 anos. Para a ACCV, foram utilizados dados de custos obtidos de relatórios do SICRO e SEINFRA, com cálculo do Valor Presente Líquido e Valor Anual Equivalente Uniforme. As árvores de decisão utilizadas foram baseadas em critérios técnicos como classificação do IRI, idade do pavimento e Volume Médio Diário. Os resultados evidenciam a deterioração progressiva das rodovias nos cenários analisados, com aumento dos segmentos classificados como Ruim e Péssimo. A integração da ACCV com árvores de decisão mostrou-se eficaz para auxiliar gestores na seleção de estratégias de M&R, promovendo decisões mais racionais e economicamente viáveis.

ABSTRACT

Brazil's road infrastructure faces challenges in planning, maintenance, and rehabilitation (M&R), which directly affect its functional quality and operational costs. In this context, the objective of this study was to evaluate whether it is possible to establish rational M&R strategies for state highways in Ceará, based on Life Cycle Cost Analysis (LCCA), combined with decision trees and an assessment of their functional condition. The research focused on three state highways, using data on traffic, pavement age, and the International Roughness Index (IRI) collected in 2023. The research method included a descriptive statistical analysis to characterize the highways' functional conditions and temporal projections of the IRI, considering scenarios without M&R interventions over 2, 4, and 6 years. For the LCCA, cost data were obtained from SICRO and SEINFRA reports, with calculations of Net Present Value and Equivalent Uniform Annual Value. The decision trees were based on technical criteria such as IRI classification, pavement age, and Average Daily Traffic. The results reveal the progressive deterioration of the highways in the analyzed scenarios, with an increase in segments classified as Poor and Very Poor. The integration of LCCA with decision trees proved effective in assisting managers in selecting M&R strategies, enabling more rational and economically viable decision-making.



1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura de transportes brasileira possui carências no seu planejamento, projeto, execução e, especialmente, na limitada manutenção de suas rodovias. A partir disso, a utilização eficiente

de recursos financeiros torna-se essencial na gestão e manutenção das rodovias, considerando sua degradação ao longo do ciclo de vida. As rodovias são essenciais para o desenvolvimento econômico e social, e requerem investimentos para manter sua operacionalidade e segurança (Figueredo, 2015; Han et al., 2017).

A Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) é uma técnica que pode ser usada para a gestão racional dos recursos financeiros destinados à Manutenção e Reabilitação (M&R) das rodovias (Walls e Smith, 1998). Essa abordagem junto com árvores de decisão, torna possível avaliar não apenas os custos iniciais, mas, também, os custos associados à manutenção periódica ou uma possível reconstrução do pavimento.

De forma global, novos projetos de pavimentação enfrentam atrasos e custos muito excessivos, o que leva ao uso ineficiente dos recursos financeiros (Johnson e Babu, 2020; Musarat et al., 2020). As causas principais são a falta de transparência, a falta de preparação dos projetos, o “efeito silo” em entidades públicas na avaliação de estudos de viabilidade e a falta de capacidade do setor público para desenvolver plenamente um *pipeline* de projetos financiáveis (Toriola-Coker, 2018; Bisbey et al., 2020). Além disso, a falta de planejamento a longo prazo e a necessidade de manutenção preventiva em estágios iniciais do ciclo de vida dos pavimentos aumentam os custos totais (Wubuli et al., 2025).

Para lidar com essas questões, torna-se necessária uma abordagem de investimento mais inteligente e eficaz. Para isso, são necessárias políticas severas para realização desses investimentos. Com as limitações financeiras, as agências precisam utilizar metodologias de tomada de decisão que ofereçam informações sobre a viabilidade econômica de longo prazo dos pavimentos.

Uma dessas abordagens é a ACCV, que mede o risco econômico dos projetos de pavimentação (Bryce et al., 2017; Giunta, 2017; Alaloul et al., 2021). No entanto, a implementação funcional da ACCV depende de uma variedade de fatores, como a disponibilidade de documentação de suporte do projeto, as informações de degradação sobre o estado do pavimento e a disponibilidade de orientação para calcular os custos de uso (Subedi, 2019; Moins et al., 2020).

A ACCV é uma ferramenta capaz de prever e avaliar a relação custo-benefício ao longo do tempo de diferentes projetos de rodovias, ajudando os gestores em suas tomadas de decisões quanto à construção e conservação das rodovias, com base nas condições técnicas e econômicas de cada caso. A ACCV também é considerada uma metodologia adequada pelos tomadores de decisão para avaliar as consequências econômicas e socioambientais de um projeto de pavimentação sustentável (Bragança et al., 2010; Dwaikat e Ali, 2018; Ingrao et al., 2018). Estudos sobre a ACCV aplicada à reabilitação de pavimentos (Abaza, 2023; Carneiro et al., 2023) demonstram como essa ferramenta pode ser eficiente para prever os custos ao longo do ciclo de vida e orientar as decisões de manutenção.

A partir disso, para alcançar uma maior eficácia nas decisões relacionadas ao projeto e às atividades de M&R, é essencial o uso de ferramentas como a ACCV e as árvores de decisão, que permitem uma avaliação mais precisa e eficiente das alternativas disponíveis (Wubuli et al., 2025). Tais decisões devem ser tomadas sempre visando uma melhor gestão dos recursos financeiros que estão disponíveis no momento. A ACCV pode ser usada para demonstrar o comprometimento dos gestores com a administração adequada para tornar o processo analítico mais transparente e eficiente (Karnikowski, 2019).

Nesse contexto, diversos trabalhos acadêmicos abordam a ACCV em pavimentos, destacando sua relevância. A ACCV foi aplicada com o *software RealCost* v2.5 em uma extensão de 61 km da rodovia A23, em Portugal, considerando cenários de manutenção e seus impactos nos custos. Constatou-se que o cenário com intervenções periódicas realizadas em três momentos distintos

ao longo do período de análise minimiza os custos de usuários e de administração, resultando em reduções para ambas as partes (Morais, 2014).

A maioria das ACCV existentes baseia-se em cenários hipotéticos de atividades de manutenção, os quais podem não representar com precisão as práticas reais. Um modelo realista de ACCV, fundamentado em padrões sequenciais típicos de atividades de manutenção de pavimentos, foi desenvolvido e comparado ao modelo convencional baseado em cenários hipotéticos. Os resultados indicaram que o modelo realista proporciona estimativas mais precisas e confiáveis dos custos do ciclo de vida dos pavimentos, além de oferecer uma compreensão mais detalhada das relações entre as atividades de manutenção (Pour e Jeong, 2012).

A ACCV de rodovias com pavimentos flexíveis convencionais e perpétuos foi comparada para avaliar a viabilidade econômica de cada sistema em diferentes condições de tráfego e clima em rodovias iranianas. Os resultados indicaram que a construção de pavimentos perpétuos pode reduzir os custos do ciclo de vida dos pavimentos em uma faixa de 4 a 20% (Amini et al., 2012).

Uma aplicação que integra o BIM e a ACCV foi desenvolvida para a fase inicial de um projeto de pavimento rodoviário, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais. A metodologia, implementada com uma ferramenta de programação visual, retorna o custo total de manutenção atualizado para o ano de construção, o número de intervenções e o valor residual do dano acumulado por fadiga. A integração entre o BIM e a ACCV demonstrou ser uma ferramenta eficaz para apoiar a tomada de decisão na manutenção de pavimentos rodoviários, abrangendo benefícios econômicos, sociais e ambientais (Oreto et al., 2022).

A partir dos estudos supramencionados, pode-se perceber que a ACCV é uma ferramenta fundamental para a gestão eficiente de pavimentos rodoviários, permitindo avaliar os custos ao longo de todo o ciclo de vida do projeto e orientar decisões baseadas na viabilidade econômica. Sua aplicação contribui para o controle rigoroso dos investimentos, identificando soluções que minimizem custos de manutenção e operação, sem comprometer a qualidade e a durabilidade da infraestrutura.

A presente pesquisa aplica a ACCV às rodovias estaduais do Ceará, utilizando dados reais de tráfego, idade dos pavimentos e irregularidade longitudinal. Essa abordagem fornece uma análise da infraestrutura rodoviária local, contribuindo para uma gestão mais efetiva dos recursos disponíveis. Fundamentado em dados e custos reais, o estudo oferece uma ferramenta para os gestores rodoviários, permitindo a adoção de estratégias de M&R mais adequadas às suas realidades financeira e operacional. Desse modo, o objetivo desta pesquisa é avaliar se é possível estabelecer estratégias racionais de M&R para rodovias estaduais no Ceará, com base na ACCV, aliada ao uso de árvores de decisão e à avaliação de sua condição funcional.

2. MÉTODO DE PESQUISA

O método de pesquisa foi estruturado em seis etapas principais. Inicialmente, foi formada a base de dados necessária para a análise. Em seguida, realizou-se a caracterização estatística das condições funcionais das rodovias por meio do Índice de Irregularidade Internacional (*International Roughness Index* - IRI). Com base nesses dados, foi proposta uma taxa de crescimento temporal para o IRI. A partir disso, foram definidos cenários de estratégias de Manutenção e Reabilitação (M&R), e, para cada cenário, empregaram-se árvores de decisão com o objetivo de estimar os custos associados. Por fim, foram realizadas análises detalhadas dos custos do ciclo de vida das rodovias, considerando os cenários estabelecidos.

Para adquirir dados do IRI das três rodovias estaduais, equipes de técnicos utilizaram a metodologia descrita por DNIT (2023). Além disso, os dados de tráfego referentes ao Volume Médio Diário (VMD) foram adquiridos por meio de relatórios de projeto das rodovias fornecidos pela Secretaria da Infraestrutura do Governo do Estado do Ceará (SEINFRA/CE). Os dados referentes à idade dos pavimentos analisados também foram obtidos por meio de relatórios de projeto executivo disponibilizados pela SEINFRA/CE. Por fim, para obtenção de dados de custos de M&R foram utilizados relatórios das Tabelas de Custos SEINFRA/CE e, quando da sua ausência, do Sistema de Custos Rodoviários do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (SICRO/DNIT). O período da análise compreende o ano de 2023.

O *software Microsoft Excel®* 2023 foi utilizado para tabulação dos dados de IRI, para cálculos de ACCV das rodovias avaliadas e, também, para a construção do banco de dados utilizado pelo *software R*. A versão 4.2.2 do *software R* foi utilizada para a análise descritiva dos dados e elaboração dos gráficos, além disso, também se utilizou o *RStudio* 2023. Com o intuito de otimizar a sua utilização foram utilizadas 4 bibliotecas (pacotes). Para a análise descritiva dos dados e elaboração dos gráficos foram utilizados os pacotes *readxl*, *ggplot2*, *investr* e *reshape2*. Por fim, para elaboração do orçamento para as atividades de M&R, recorreu-se ao OrçaFascio 2023.

A planilha contendo os dados do IRI obtida por meio das coletas de campo apresenta os valores do IRI em segmentos de 200 metros e fornece dados do ano de 2023. Os dados do IRI foram submetidos a uma análise estatística, que compreendeu a utilização de medidas de tendência central, avaliação da variação e dispersão dos dados.

Esse procedimento permitiu adquirir informações sobre o comportamento dos dados, incluindo o tamanho da variação entre a média e o desvio padrão, mediana, valor mínimo e máximo, intervalo, coeficiente de variação e curtose. Para complementar a análise, foram realizadas representações gráficas, empregando gráficos do tipo *boxplot*.

Para estabelecer uma taxa de crescimento temporal para o IRI, partiu-se da premissa de que, considerando o estado atual do pavimento, a ausência de atividades de M&R resultaria no aumento do IRI nos segmentos. Dessa forma, a projeção de desempenho do pavimento adotada reflete a deterioração do índice, expressa pela elevação percentual anual do IRI observada em cada segmento das rodovias avaliadas neste subprojeto. Ou seja, optou-se por adotar uma abordagem linear para modelar a evolução do IRI (Equação 1). Por fim, estima-se um aumento de 5,0% no IRI a cada ano para os segmentos do pavimento.

$$IRI_n = IRI_{2023}(1 + 0,05(n - 2023)) \quad (1)$$

onde: IRI_n = IRI do segmento para o ano analisado; n = período da análise (ano).

Dado que este artigo tem por finalidade efetuar uma avaliação econômica das diversas estratégias de M&R disponíveis, torna-se necessário propor cenários para analisar. Nesse contexto e com base na literatura (Lima, 2007; Oliveira, 2013; Zanchetta, 2005), foram sugeridas ações de M&R (Tabela 1).

Com o intuito de selecionar a abordagem de M&R mais adequada para cada rodovia, as estratégias adotadas envolveram a criação de quatro árvores de decisão. Nesse contexto, estudos recomendam a tomada de decisões relacionadas às estratégias de M&R por meio do uso de árvores de decisão (Fernandes Jr., Oda e Zerbini, 2006; Albuquerque, 2007; Baldissera e Gouveia, 2022). Essa abordagem oferece uma maneira eficaz de selecionar as intervenções mais apropriadas para as condições específicas de um pavimento, contribuindo para a gestão eficiente de rodovias e a otimização dos recursos disponíveis.

Tabela 1: Estratégias de M&R

Código	Geral	Específica
NF	Nada a fazer	Não necessita de intervenção
MP	Manutenção Preventiva	Lama asfáltica, microrrevestimento
MC	Manutenção Corretiva	Pré-misturados a quente ou a frio, recapeamento CAUQ, tratamento superficial, fresagem e recomposição do revestimento
RF	Reforço	Fresagem e recomposição com revestimento novo ou reciclado
RC	Reconstrução	Demolição da estrutura do pavimento com reconstrução da base e novo revestimento asfáltico

Fonte: Adaptado de Lima (2007); Oliveira (2013); Zanchetta (2005).

As quatro árvores foram elaboradas com base em critérios que incluíram as classificações do IRI, a idade do pavimento e o VMD. As árvores de decisão elaboradas, segmentam o IRI nas quatro classificações distintas (DNIT, 2011): Bom, Regular, Ruim e Péssimo. Para a classificação da idade do pavimento, utilizaram-se as classificações: Muito Novo, Novo, Regular, Velho e Muito Velho, e para o VMD em uma escala que varia desde Muito Baixo até Muito Alto (Karnikowski, 2019).

Na elaboração dos cenários, considerou-se que as rodovias avaliadas permaneceriam isentas de quaisquer atividades de M&R ao longo de três diferentes períodos temporais denominados neste trabalho como cenários: 2, 4 e 6 anos, correspondentes aos anos 2025, 2027 e 2029, respectivamente. A partir dos resultados obtidos, a aplicação de árvores de decisão foi desenvolvida para a formulação de estratégias de M&R. O propósito consiste em avaliar as disparidades econômicas entre os mencionados cenários propostos. As árvores de decisão estão disponibilizadas de forma *online* pelo drive acessado pelo *link* em Google (2024).

Os custos associados a cada atividade de M&R das rodovias avaliadas, foram calculados utilizando relatórios das Tabelas de Custos SEINFRA/CE e, quando na sua ausência, do SICRO/DNIT. Utilizou-se o ano de 2022 para a estimativa dos custos referente aos cenários propostos. Na Tabela 2 são apresentados os custos de M&R dos últimos cinco anos até o ano considerado.

Os valores apresentados na Tabela 2 englobam os custos relativos à mão de obra, equipamentos, atividades auxiliares, tempos fixos e momentos de transporte. As espessuras recomendadas para o revestimento asfáltico situam-se entre 5 cm e 12,5 cm, e as espessuras máxima e mínima para a compactação das camadas granulares são de 20 cm e 10 cm, respectivamente (DNIT, 2006). Com base nesses critérios, os custos calculados para os trechos analisados, consideraram uma espessura de 5 cm para o revestimento asfáltico e 15 cm de espessura para camadas granulares.

Na fase de avaliação do custo do ciclo de vida, empregou-se as abordagens do Valor Presente Líquido (VPL) e do Valor Anual Equivalente Uniforme (VAEU). Essas abordagens são indicadores de eficiência econômica essencial para a ACCV (Walls e Smith, 1998). Dessa forma, após a obtenção dos custos associados a todas as atividades de M&R propostas, pode-se calcular o VPL e o VAEU. Os valores recomendados para a taxa de desconto (*i*) é entre 3 e 5% (Walls e Smith, 1998); nesta pesquisa utilizou-se a taxa de 4%. A taxa de desconto no VPL serve para

ajustar o valor de custos e benefícios futuros para o seu equivalente atual, refletindo o valor do dinheiro no tempo.

Tabela 2: Custos de M&R (valores em R\$)

	Estratégia de M&R	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	NADA A FAZER						
	-	0	0	0	0	0	0
2	MANUTENÇÃO PREVENTIVA						
	Lama asfáltica - faixa III - areia e brita comerciais (m ²)	3,99	4,14	4,39	3,77	4,15	4,44
	MRAF com emulsão modificada com polímero de 0,8 cm - brita comercial(m ²)	5,05	5,25	5,51	5,37	6,01	6,52
3	MANUTENÇÃO CORRETIVA						
	PMF - faixa C - areia e brita comerciais(m ³)	346,82	366,9	387,1	388,1	437,1	514,2
	Recapeamento CBUQ (Fresagem contínua de revestimento betuminoso (m ³); Recomposição de camada granular do pavimento com material de jazida (m ³); Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais (t))	229,71	244,3	265,9	276,5	316,6	434,4
	TSD com emulsão - brita comercial(m ²)	13,5	14,01	19,35	21,2	22,86	24,24
	Tapa buraco com demolição manual(m ³)	349,25	392,1	381,3	340	320,2	387,9
4	REFORÇO						
	Pintura de ligação(m ²); Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais (t)	195,7	207,1	228	236,5	269,1	326,7
5	RECONSTRUÇÃO						
	Fresagem contínua do revestimento Betuminoso (m ³); Remoção mecanizada da camada granular pavimento(m ³); Regularização do subleito(m ²); Reforço do subleito(m ³); Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida (m ³); Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial (m ³); Imprimação(m ²); Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais (t))	380,56	404,5	433,9	432,1	502,8	629,7

Fonte: Ceará (2018, 2021); DNIT (2017, 2021, 2022).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização estatística das condições funcionais das rodovias avaliadas

A Tabela 3 detalha a caracterização estatística das condições funcionais das rodovias avaliadas. Nela estão constam as informações sobre o comportamento dos dados, incluindo o número de segmentos, a média, o desvio padrão, a mediana, os valores mínimo e máximo, o intervalo, o coeficiente de variação e a curtose, fundamentadas por meio do IRI.

Tabela 3: Análise descritiva do IRI das Rodovias 1, 2 e 3

IRI	Rodovia 1	Rodovia 2	Rodovia 3
Nº de Segmentos	294	159	184
Média (m/km)	2,26	4,36	3,05
Desvio Padrão (m/km)	0,47	2,58	1,06
Mediana (m/km)	2,19	3,75	2,88
Mínimo (m/km)	1,49	2,21	1,21
Máximo (m/km)	4,94	19,63	7,34
Intervalo (m/km)	3,45	17,42	6,13
Curtose	7,28	14,26	1,26
CV (%)	20,8	59,2	34,8

CV: Coeficiente de Variação.

Destacam-se, na análise estatística da Tabela 3, valores máximos de IRI bastante elevados, como na Rodovia 2 que apresentou valor (19,63 m/km) sendo quase 4 vezes maior que o limite mínimo da classificação Péssima ($IRI > 5,5$ m/km). Essa rodovia ainda apresentou a maior média de IRI (4,36 m/km) dentre todas as rodovias avaliadas, indicando ser a rodovia com as condições funcionais (conforto ao rolamento) com classificação Ruim.

Em termos de valores médios, a Rodovia 1 foi a que apresentou a melhor condição funcional (classificado como Bom), com IRI menor que 2,7 m/km, limite da classificação Bom. A Rodovia 3 apresentou IRI médio de 3,05 m/km, classificando como de condição Regular.

Por sua vez, a curtose, que descreve a forma da distribuição dos dados em relação à curva normal, indica que a Rodovia 3 se aproxima mais de uma distribuição normal. Além disso, os coeficientes de variação (CV) das rodovias avaliadas, com exceção da Rodovia 1, foram superiores para a garantia de homogeneidade dos segmentos, o que demonstra rodovias com uma dispersão entre as classificações do IRI.

3.2. Análise das condições funcionais das rodovias avaliadas

A Figura 1 apresenta a condição funcional de conforto ao rolamento das três rodovias analisadas no ano de 2023, com base no IRI. Os *boxplots* de cada rodovia fornecem uma visão clara das distribuições das classificações Bom, Regular, Ruim e Péssimo, permitindo uma análise das condições de cada uma.

A Rodovia 1 exibe uma predominância de segmentos classificados como Bom, que representam, aproximadamente, 87% do total avaliado. Os segmentos classificados como Regular, Ruim e Péssimo estão distribuídos ao longo da rodovia, sendo os dados concentrados majoritariamente na categoria Bom. A média, indicada pelo ponto vermelho, também se encontra nesta classificação, enquanto os *outliers* são observados nas classificações Regular e Ruim.

Por outro lado, a Rodovia 2 apresenta condições funcionais predominantemente Regular e Ruim, com apenas cerca de 17% de trechos classificados como Bom. A maior concentração de dados ocorre nessas duas categorias representando 66% dos segmentos, indicando uma condição funcional inferior quando comparada à Rodovia 1. A média de 4,36 m/km está situada na classificação Ruim, e os *outliers* estão na classificação Péssimo.

A Rodovia 3 apresenta uma distribuição de condições de conforto ao rolamento concentrada nas classificações Bom e Regular, que correspondem a aproximadamente 74% dos segmentos

avaliados. Os segmentos classificados como Péssimo estão em menor proporção, com cerca de 3%, e sua média está posicionada na classificação Regular. *Outliers* estão presentes na classificação Péssimo, evidenciando segmentos isolados com condições funcionais inferiores.

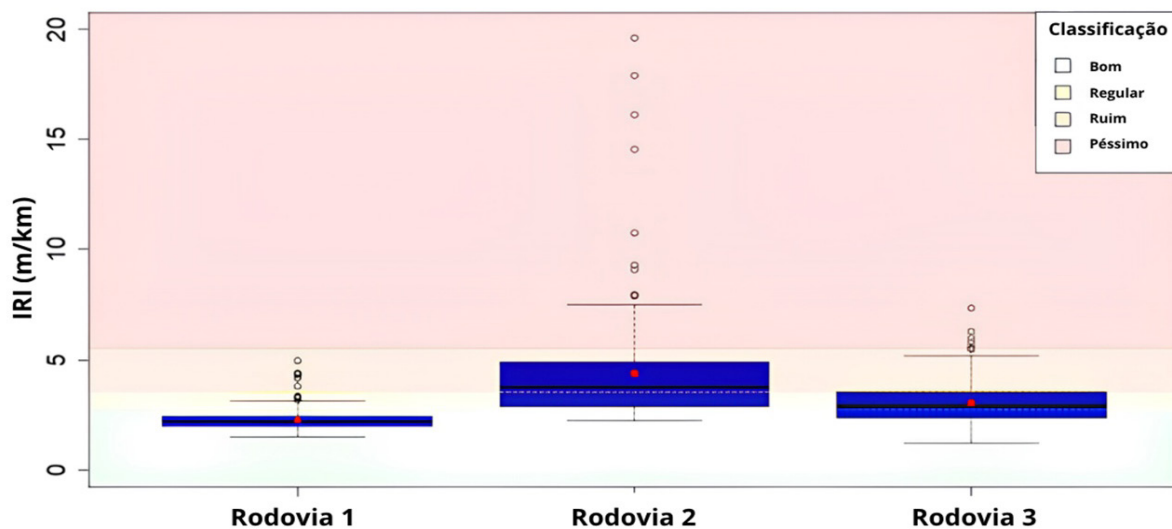


Figura 1. Boxplot do IRI para as Rodovias 1, 2 e 3.

3.3. Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) das rodovias avaliadas

Para iniciar a ACCV, realizou-se uma análise da classificação dos segmentos ao longo dos anos, visando identificar padrões. Os cenários propostos pressupõem que as rodovias não serão submetidas às atividades de M&R. A Tabela 4 apresenta a evolução da classificação dos segmentos nos anos correspondentes aos cenários 1, 2 e 3 das rodovias.

A Tabela 4 apresenta uma análise sobre como os segmentos das rodovias foram classificados ao longo do tempo, utilizando o IRI como base para previsões. A análise da Tabela 4 revela uma deterioração das condições das três rodovias avaliadas entre 2025 e 2029, com redução dos segmentos classificados como Bom e aumento das classificações Ruim e Péssimo. A Rodovia 1 apresenta a menor degradação, enquanto a Rodovia 2 sofre a pior deterioração, com a classificação Bom desaparecendo em 2027 e aumento dos segmentos Péssimos. Na Rodovia 3, observa-se um padrão intermediário, com aumento de segmentos Ruins sendo predominante.

Os detalhes das rodovias analisadas são apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7, as quais contêm informações sobre os custos totais por classificação funcional, além dos custos correspondentes de VPL e de VAEU. A Tabela 5 apresenta as informações associadas aos três cenários da Rodovia 1. Destaca-se que os valores de custos totais de M&R obtidos estão vinculados às árvores de decisão propostas nesta pesquisa, as quais subsidiam os tomadores de decisão na identificação do cenário mais adequado ao longo do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários analisados.

Os resultados da ACCV da Rodovia 1 revelam diferenças relevantes entre os cenários avaliados. No Cenário 1, os custos totais de M&R foram de aproximadamente R\$ 8,05 milhões, com um VPL de R\$ 7,44 milhões e um VAEU de R\$ 3,95 milhões. Este cenário evidenciou que a maior parte dos segmentos foi classificada como Regular e Ruim, com custos de R\$ 2,06 milhões e R\$ 5,98 milhões, respectivamente. Essa distribuição reflete padrões de deterioração bem estabelecidos, como abordado por Hamim et al. (2021), que destacaram a importância de analisar as condições iniciais dos pavimentos para prever o impacto financeiro a longo prazo.

Tabela 4: Classificação dos segmentos ao longo dos anos das rodovias 1, 2 e 3

RODOVIA 1				
CLASSIFICAÇÃO/ANO	2023	2025 (Cenário 1)	2027 (Cenário 2)	2029 (Cenário 3)
BOM	261	227	142	82
REGULAR	26	55	129	167
RUIM	7	12	21	40
PÉSSIMO	0	0	2	5
RODOVIA 2				
CLASSIFICAÇÃO/ANO	2023	2025(Cenário 1)	2027(Cenário 2)	2029(Cenário 3)
BOM	26	15	0	0
REGULAR	49	47	35	22
RUIM	55	59	69	69
PÉSSIMO	29	38	55	68
RODOVIA 3				
CLASSIFICAÇÃO/ANO	2023	2025 (Cenário 1)	2027 (Cenário 2)	2029 (Cenário 3)
BOM	74	56	36	25
REGULAR	62	64	45	42
RUIM	43	53	80	89
PÉSSIMO	5	11	23	28

Tabela 5: Cenários da ACCV da Rodovia 1

2025 (Cenário 1)			
CLASSIFICAÇÃO	CUSTO	VPL	VAEU
BOM	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
REGULAR	R\$ 2.064.316,32	R\$ 1.908.576,48	R\$ 1.011.919,76
RUIM	R\$ 5.984.383,68	R\$ 5.532.899,11	R\$ 2.933.521,41
PÉSSIMO	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
TOTAL	R\$ 8.048.700,00	R\$ 7.441.475,59	R\$ 3.945.441,18
2027 (Cenário 2)			
CLASSIFICAÇÃO	CUSTO	VPL	VAEU
BOM	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
REGULAR	R\$ 4.841.760,10	R\$ 4.138.756,82	R\$ 1.140.186,30
RUIM	R\$ 10.472.671,44	R\$ 8.952.083,44	R\$ 2.466.209,87
PÉSSIMO	R\$ 997.397,28	R\$ 852.579,38	R\$ 234.877,13
TOTAL	R\$ 16.311.828,82	R\$ 13.943.419,64	R\$ 3.841.273,31
2029 (Cenário 3)			
CLASSIFICAÇÃO	CUSTO	VPL	VAEU
BOM	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
REGULAR	R\$ 6.268.015,01	R\$ 4.953.703,31	R\$ 944.977,87
RUIM	R\$ 19.947.945,60	R\$ 15.765.151,17	R\$ 3.007.390,23
PÉSSIMO	R\$ 2.493.493,20	R\$ 1.970.643,90	R\$ 375.923,78
TOTAL	R\$ 28.709.453,81	R\$ 22.689.498,37	R\$ 4.328.291,88

No Cenário 2, a deterioração das condições rodoviárias elevou os custos totais de M&R para R\$ 16,3 milhões, mais que o dobro do Cenário 1. O VPL aumentou para R\$ 13,94 milhões, enquanto o VAEU apresentou um declínio para R\$ 3,84 milhões. Destaca-se o crescimento dos segmentos Regulares em 134,5%, resultando em um custo de R\$ 4,84 milhões, e dos segmentos Ruins em 75%, com custos alcançando R\$ 10,47 milhões. Além disso, surgiram dois segmentos classificados como Péssimos, contribuindo com um custo adicional de cerca de R\$ 997 mil. Esse fenômeno é esperado em cenários onde a infraestrutura de pavimentos não recebe manutenção preventiva suficiente, como destacado por Kedarisetty et al. (2022), que observaram que a falta de manutenção regular acelera a deterioração e eleva os custos de reabilitação.

No Cenário 3, a situação piora, com custos totais de M&R atingindo R\$ 28,7 milhões, um aumento de 76% em relação ao Cenário 2. O VPL chega a R\$ 22,69 milhões e o VAEU sobe para R\$ 4,33 milhões. O número de segmentos Ruins aumentou 90,5%, resultando em custos de R\$ 19,95 milhões, enquanto os segmentos Péssimos cresceram para cinco, representando um aumento de 150%, com um custo total de R\$ 2,49 milhões. O número de segmentos Regulares também continuou em crescimento, contribuindo com R\$ 6,27 milhões para os custos de M&R.

Esses resultados reforçam a ideia de que, para mitigar os custos crescentes ao longo do ciclo de vida das rodovias, é essencial adotar estratégias de manutenção preventiva, como defendido por Thoft-Christensen (2012), que enfatizou a importância de uma análise de custos do ciclo de vida para otimizar a alocação de recursos em projetos de infraestrutura. Na Tabela 6 são apresentados os detalhes referentes aos cenários Rodovia 2.

Tabela 6: Cenários da ACCV da Rodovia 2

2025 (Cenário 1)			
CLASSIFICAÇÃO	CUSTO	VPL	VAEU
BOM	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
REGULAR	R\$ 1.764.052,13	R\$ 1.630.965,36	R\$ 864.731,44
RUIM	R\$ 29.423.219,76	R\$ 27.203.420,64	R\$ 14.423.146,94
PÉSSIMO	R\$ 18.950.548,32	R\$ 17.520.847,19	R\$ 9.289.484,47
TOTAL	R\$ 50.137.820,21	R\$ 46.355.233,18	R\$ 24.577.362,85
2027 (Cenário 2)			
CLASSIFICAÇÃO	CUSTO	VPL	VAEU
BOM	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
REGULAR	R\$ 1.313.655,84	R\$ 1.122.918,52	R\$ 309.352,87
RUIM	R\$ 34.410.206,16	R\$ 29.413.988,44	R\$ 8.103.261,01
PÉSSIMO	R\$ 27.428.425,20	R\$ 23.445.932,81	R\$ 6.459.121,09
TOTAL	R\$ 63.152.287,20	R\$ 53.982.839,77	R\$ 14.871.734,98
2029 (Cenário 3)			
CLASSIFICAÇÃO	CUSTO	VPL	VAEU
BOM	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
REGULAR	R\$ 825.726,53	R\$ 652.583,67	R\$ 124.488,10
RUIM	R\$ 34.410.206,16	R\$ 27.194.885,76	R\$ 5.187.748,15
PÉSSIMO	R\$ 33.911.507,52	R\$ 26.800.756,98	R\$ 5.112.563,39
TOTAL	R\$ 69.147.440,21	R\$ 54.648.226,41	R\$ 10.424.799,64

Os resultados da ACCV da Rodovia 2 indicam uma piora crescente entre os cenários analisados. No Cenário 1, os custos totais de M&R somaram cerca de R\$ 50,1 milhões, com um VPL de R\$ 46,35 milhões e um VAEU de R\$ 24,58 milhões. A maior parte dos custos foi gerada pelos segmentos classificados como Ruins e Péssimos, responsáveis por aproximadamente R\$ 29,42 milhões e R\$ 18,95 milhões, respectivamente.

No Cenário 2, a deterioração das condições rodoviárias elevou os custos totais de M&R para R\$ 63,15 milhões, um aumento de 26% em relação ao Cenário 1. O VPL aumentou para R\$ 53,98 milhões, enquanto o VAEU reduziu para R\$ 14,87 milhões. O número de segmentos Ruins aumentou 16,9%, elevando os custos para R\$ 34,41 milhões. Por sua vez, os segmentos classificados como Péssimos cresceram 44,7%, com custos de R\$ 27,43 milhões, o que representa uma parcela relevante do aumento geral. Esse padrão de crescimento reflete uma evolução comum em sistemas rodoviários, conforme estudos como o de Chen e Ni (2019), que apontaram o impacto das limitações orçamentárias sobre a qualidade dos pavimentos e os custos de manutenção associados. Segundo os autores, a redução nos investimentos tende a resultar em maior deterioração e, consequentemente, custos mais altos no longo prazo.

No Cenário 3, os custos totais de M&R atingiram R\$ 69,15 milhões, um crescimento de cerca de 9,5% em relação ao Cenário 2. O VPL foi de R\$ 54,65 milhões e o VAEU diminuiu para R\$ 10,42 milhões, refletindo a piora nas condições gerais. A classificação Péssimo apresentou o maior crescimento proporcional, com um aumento de 78,9% no número de segmentos em relação ao Cenário 1, alcançando custos de R\$ 33,91 milhões. Por outro lado, os segmentos Regulares diminuíram continuamente, representando apenas R\$ 825 mil em custos no último cenário.

Esses resultados destacam uma deterioração acentuada nas condições da Rodovia 2 ao longo do tempo, com impacto crescente nos custos de manutenção, especialmente nas classificações Ruim e Péssimo. A tendência evidencia a necessidade de intervenções mais frequentes para mitigar o aumento nos custos associados às piores condições rodoviárias. O fenômeno foi estudado por Lee et al. (2013), que discutem como a deterioração acelerada dos pavimentos, causada pela falta de manutenção preventiva, gera aumentos substanciais nos custos de reabilitação. A Tabela 7 reúne os dados correspondentes aos três cenários analisados na Rodovia 3.

A análise da ACCV da Rodovia 3 evidencia uma piora nas condições ao longo dos cenários. Esse aumento nos custos, conforme a deterioração do pavimento, é um fenômeno descrito por Han e Do (2015), que afirmam que a escolha do intervalo de inspeção e a resposta imediata à deterioração podem ter um impacto nos custos de ciclo de vida de uma rodovia. No Cenário 1, os custos totais de M&R somaram aproximadamente R\$ 34,32 milhões. Desse total, cerca de R\$ 26,43 milhões foram atribuídos aos segmentos classificados como Ruim, enquanto os segmentos classificados como Péssimo representaram R\$ 5,49 milhões. Segmentos na condição Regular contribuíram com R\$ 2,40 milhões, e os classificados como Bom não geraram custos associados. O VPL alcançou R\$ 31,73 milhões, enquanto que o VAEU foi de R\$ 16,82 milhões.

No Cenário 2, a deterioração das condições resultou em um aumento nos custos, que totalizaram R\$ 53,05 milhões, representando um crescimento de 55% em relação ao cenário anterior. Os segmentos classificados como Ruim foram responsáveis por R\$ 39,89 milhões, enquanto na categoria Péssimo chegaram a R\$ 11,47 milhões. Por outro lado, os segmentos Regulares reduziram sua participação nos custos para R\$ 1,69 milhão. O VPL nesse cenário foi de R\$ 45,35 milhões, com o VAEU diminuindo para R\$ 12,49 milhões.

No Cenário 3, os custos totais de M&R atingiram R\$ 59,92 milhões, com um acréscimo de 13% em relação ao Cenário 2. A maior parte desse total foi gerada pelos segmentos classificados como Ruim, com R\$ 44,38 milhões, seguidos pelos da condição Péssimo, que representaram R\$ 13,96

milhões. Os segmentos Regulares contribuíram com R\$ 1,58 milhão, enquanto os classificados como Bom permaneceram sem custos associados. O VPL alcançou R\$ 47,36 milhões, e o VAEU foi de R\$ 9,03 milhões, evidenciando o impacto financeiro crescente da deterioração.

Tabela 7: Cenários da ACCV da Rodovia 3

2025 (Cenário 1)			
CLASSIFICAÇÃO	CUSTO	VPL	VAEU
BOM	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
REGULAR	R\$ 2.402.113,54	R\$ 2.220.888,99	R\$ 1.177.506,64
RUIM	R\$ 26.431.027,92	R\$ 24.436.971,08	R\$ 12.956.386,24
PÉSSIMO	R\$ 5.485.685,04	R\$ 5.071.824,19	R\$ 2.689.061,29
TOTAL	R\$ 34.318.826,50	R\$ 31.729.684,26	R\$ 16.822.954,16
2027 (Cenário 2)			
CLASSIFICAÇÃO	CUSTO	VPL	VAEU
BOM	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
REGULAR	R\$ 1.688.986,08	R\$ 1.443.752,38	R\$ 397.739,41
RUIM	R\$ 39.895.891,20	R\$ 34.103.175,00	R\$ 9.395.085,23
PÉSSIMO	R\$ 11.470.068,72	R\$ 9.804.662,81	R\$ 2.701.087,00
TOTAL	R\$ 53.054.946,00	R\$ 45.351.590,20	R\$ 12.493.911,64
2029 (Cenário 3)			
CLASSIFICAÇÃO	CUSTO	VPL	VAEU
BOM	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
REGULAR	R\$ 1.576.387,01	R\$ 1.245.841,55	R\$ 237.659,10
RUIM	R\$ 44.384.178,96	R\$ 35.077.461,34	R\$ 6.691.443,26
PÉSSIMO	R\$ 13.963.561,92	R\$ 11.035.605,82	R\$ 2.105.173,16
TOTAL	R\$ 59.924.127,89	R\$ 47.358.908,71	R\$ 9.034.275,53

Os resultados destacam uma deterioração acelerada na Rodovia 3, com um aumento constante de segmentos nas condições Ruim e Péssimo, responsáveis por mais de dois terços dos custos no último cenário. Esse panorama ressalta a urgência de intervenções eficazes para conter a piora das condições e otimizar os custos ao longo do ciclo de vida da infraestrutura. Esse padrão de aumento é consistente com os achados de Martin (2001), que demonstram que a deterioração dos pavimentos sem a devida manutenção preventiva resulta em custos mais altos de M&R. Além disso, a análise de Amini et al. (2012) sugere que pavimentos com maior investimento inicial, como os de pavimentos perenes, podem ser mais vantajosos a longo prazo, uma vez que evitam os custos elevados de reabilitação frequentemente necessários em pavimentos convencionais.

A comparação entre as três rodovias ao longo dos cenários analisados evidência que a Rodovia 1 apresenta o melhor desempenho, mantendo a maior proporção de segmentos classificados como Bom e os menores custos de M&R, mesmo com uma deterioração gradual. Em contrapartida, a Rodovia 2 demonstra uma piora mais acentuada, com predominância das classificações Ruim e Péssimo a partir do segundo cenário, resultando em altos custos de reconstrução e tornando-se a rodovia com a maior necessidade de recursos financeiros ao final do período.

A Rodovia 3, por sua vez, embora tenha custos intermediários em relação às outras duas, apresenta uma deterioração contínua, com uma crescente concentração de segmentos nas condições Ruim e Péssimo, o que a posiciona em pior estado no longo prazo. Enquanto a Rodovia 1 exige menos recursos e se mantém em melhores condições, as rodovias 2 e 3 enfrentam desafios maiores em termos de M&R.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar se é possível estabelecer estratégias racionais de Manutenção e Reabilitação (M&R) para rodovias estaduais no Ceará, com base na Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV), aliada ao uso de árvores de decisão e à avaliação de sua condição funcional. Essa abordagem visa auxiliar profissionais e gestores rodoviários na seleção de alternativas M&R e de ferramentas de ACCV que equilibrem o desempenho técnico e a eficácia econômica.

Constatou-se que as árvores de decisão propostas mostraram-se ferramentas adequadas de auxílio no processo de tomada de decisão para as estratégias de M&R aplicadas para as rodovias. Além disso, essa ferramenta, quando utilizada em associação com os custos das estratégias de M&R, pode permitir aos gestores um maior controle da aplicação dos recursos financeiros em M&R.

Por sua vez, o modelo de previsão conseguiu a projeção de desempenho dos pavimentos rodoviários avaliados com a respectiva deterioração do *Internacional Roughness Index* (IRI), expressa pela sua elevação percentual anual observada em cada segmento da malha analisada. A ACCV evidenciou sua eficácia na aprimoração da escolha de estratégias de M&R nas rodovias avaliadas. Constatou-se que a não intervenção em momento oportuno geram os maiores custos de M&R. Assim, por fim, considera-se que tanto o modelo de previsão quanto à utilização da árvore de decisão possibilitou uma análise abrangente das rodovias avaliadas a partir de 2023 e ao longo dos próximos seis anos, podendo ser expandida e aplicada em outras rodovias, conferindo maior transparência dos recursos utilizados e intuição ao processo decisório.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

JLCS: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise formal, Software, Visualização, Escrita — rascunho original, Investigação, Metodologia; FHLO: Recursos, Escrita — revisão e edição, Supervisão, Validação.

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram que não há conflito de interesses.

USO DE TECNOLOGIA ASSISTIDA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores declaram que nenhuma ferramenta de inteligência artificial foi usada na pesquisa aqui relatada ou na preparação deste artigo.

DECLARAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DE DADOS

Os dados que suportam este estudo foram fornecidos pela Superintendência de Obras Públicas do estado do Ceará - SOP-CE e os autores não têm o direito de redistribuí-los. As solicitações devem ser dirigidas ao provedor dos dados.

REFERÊNCIAS

- Abaza, K.A. (2023) Stochastic-based pavement rehabilitation model at the network level with prediction uncertainty considerations. *Road Materials and Pavement Design*, v. 24, n. 11, p. 2680-2698. DOI: 10.1080/14680629.2022.2164330.
- Alaloul, W.S.; M.A. Musarat; M.S. Liew et al. (2021) Investigating the impact of inflation on labour wages in construction industry of Malaysia. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 12, n. 2, p. 1575-1582. DOI: 10.1016/j.asej.2020.08.036.
- Albuquerque, F.S. (2007) *Sistema de Gerência de Pavimento para Departamentos de Estradas do Nordeste Brasileiro*. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/17735>> (acesso em 02/12/2024).
- Amini, A.A.; M. Mashayekhi; H. Ziari et al. (2012) Life cycle cost comparison of highways with perpetual and conventional pavements. *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 13, n. 6, p. 553-568. DOI: 10.1080/10298436.2011.628020.
- Baldissera, L.E. e L.T. Gouveia (2022) Aperfeiçoamento de sistema computacional de registro de defeitos de pavimentos. *Revista Técnico-Científica do CREA-PR*, n. esp., p. 1-11.
- Bisbey, J.; S.H.H. Nourzad; C.-Y. Chu et al. (2020) Enhancing the efficiency of infrastructure projects to improve access to finance. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, v. 4, p. 27-49.
- Bragança, L.; R. Mateus e H. Koukari (2010) Building sustainability assessment. *Sustainability*, v. 2, n. 7, p. 2010-2023. DOI: 10.3390/su2072010.
- Bryce, J.; S. Brodie; T. Parry et al. (2017) A systematic assessment of road pavement sustainability through a review of rating tools. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 120, p. 108-118. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.11.002.
- Carneiro, R.S.; J.B.C. Durán e F.H.L. Oliveira (2023) Life-cycle cost analysis in evaluation of maintenance and rehabilitation strategies in airport pavement. *Transportes*, v. 31, n. 1, e2740. DOI: 10.58922/transportes.v31i1.2740.
- Ceará, Secretaria da Infraestrutura do Ceará (2018) *Tabela Unificada SEINFRA: 2018-2021*. Fortaleza: SEINFRA. Disponível em: <<https://sites.seinfra.ce.gov.br/siproce/anteriores/026.1-servicos.pdf>> (acesso em: 02/12/2024).
- Ceará, Secretaria da Infraestrutura do Ceará (2021) *Tabela Unificada SEINFRA: 2021-2023*. Fortaleza: SEINFRA. Disponível em: <<https://sites.seinfra.ce.gov.br/siproce/anteriores/027.1-servicos.pdf>> (acesso em: 02/12/2024).
- Chen, S.-H. e F.M.W. Ni (2019) Explore pavement roughness under various funding for the Taiwan provincial highways using LCCA. *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 20, n. 12, p. 1392-1399. DOI: 10.1080/10298436.2018.1429610.
- DNIT (2006) *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT (2011) *Manual de Gerência de Pavimentos*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT (2017) *Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO): Relatório Analítico de Composições de Custos, Ceará – Outubro/2017*. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT (2021) *Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) Relatório Analítico de Composições de Custos, Ceará – Outubro/2021*. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT (2022) *Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO): Relatório Analítico de Composições de Custos, Ceará – Outubro/2022*. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT (2023) *Pavimentação – Levantamento do Perfil Longitudinal de Pavimentos com Perfilômetro Inercial – 442/2023 – PRO*. Brasília: Diretoria Geral, Instituto de Pesquisas em Transportes.
- Dwaikat, L.N. e K.N. Ali (2018) Green buildings life cycle cost analysis and life cycle budget development: practical applications. *Journal of Building Engineering*, v. 18, p. 303-311. DOI: 10.1016/j.jobee.2018.03.015.
- Fernandes Jr., J.L.; S. Oda e L.F. Zerbini (2006) *Defeitos e Atividades de Manutenção e Reabilitação em Pavimentos Asfálticos*. São Paulo: EESC/USP. Disponível em: <<http://repositorio.eesc.usp.br/handle/RIEESC/7448?show=full>> (acesso em 02/12/2024).
- Figueredo, A.A.P. (2015) *Avaliação do Desempenho dos Contratos de Manutenção nas Rodovias Sob Gestão do DNIT em Pernambuco*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/16200>> (acesso em 02/12/2024).
- Giunta, M. (2017) Sustainability and resilience in the rehabilitation of road infrastructures after an extreme event: an integrated approach. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, v. 12, n. 3, p. 154-160. DOI: 10.3846/bjrbe.2017.18.
- Google (2024) Árvores de Decisão. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1HXSTIaPFRSGgIscqvZzgbTwmmSxC7m-p?usp=drive_link> (acesso em 02/12/2024).
- Hamim, O.F.; S.A. Salekin; M.S. Hoque et al. (2021) Suitability of pavement type for developing countries from an economic perspective using life cycle cost analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 14, n. 3, p. 259-266. DOI: 10.1007/s42947-020-0107-z.
- Han, D. e M. Do (2015) Life cycle cost analysis on pavement inspection intervals considering maintenance work delay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 19, n. 6, p. 1716-1726. DOI: 10.1007/s12205-014-1229-0.
- Han, D.; K. Kaito; K. Kobayashi et al. (2017) Management scheme of road pavements considering heterogeneous multiple life cycles changed by repeated maintenance work. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 21, n. 5, p. 1747-1756. DOI: 10.1007/s12205-016-1461-x.
- Ingrao, C.; A. Messineo; R. Beltramo et al. (2018) How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, v. 201, p. 556-569. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.080.

- Johnson, R.M. e R.I.I. Babu (2020) Time and cost overruns in the UAE construction industry: a critical analysis. *International Journal of Construction Management*, v. 20, n. 5, p. 402-411. DOI: 10.1080/15623599.2018.1484864.
- Karnikowski, T. (2019) *Seleção de Estratégias de Manutenção e Reabilitação de Pavimentos Urbanos Baseada na Análise do Custo do Ciclo de Vida*. Dissertação (mestrado). Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville. Disponível em: <https://www.udesc.br/arquivos/cct/id_cpmenu/706/2019_09_23_Tamires_Karnikowski_15801382834453_706.pdf> (acesso em 02/12/2024).
- Kedarisetty, S.; C. Kim e J.T. Harvey (2022) Regression models of road user cost prediction for highway maintenance and rehabilitation for life cycle planning in California. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2676, n. 1, p. 18-29. DOI: 10.1177/03611981211027153.
- Lee, J.-C.; J.-D. Lin; C.-R. Chiou et al. (2013) A performance-specified and reliability-based approach for life-cycle cost analysis of long-term pavement maintenance contracts. *Advanced Materials Research*, v. 723, p. 721-728. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.723.721.
- Lima, J. P. (2007) *Modelo de Decisão para a Priorização de Vias Candidatas às Atividades de Manutenção e Reabilitação de Pavimentos*. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. DOI: 10.11606/T.18.2007.tde-08052007-151731.
- Martin, T.C. (2001) Is local road maintenance meeting the community's needs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Municipal Engineer*, v. 145, n. 2, p. 169-174. DOI: 10.1680/muen.2001.145.2.169.
- Moins, B.; C. France; W. Van den bergh et al. (2020) Implementing life cycle cost analysis in road engineering: a critical review on methodological framework choices. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 133, p. 110284. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110284.
- Morais, J.D.M. (2014) *Metodologia de Avaliação do Custo de Ciclo de Vida de Pavimentos Rodoviários*. Dissertação (mestrado). Universidade da Beira Interior. Covilhã. Disponível em: <<https://ubibliorum.ubi.pt/handle/10400.6/12255>>. (acesso em 02/12/2024).
- Musarat, M.A.; W.S. Alaloul; A.H. Qureshi et al. (2020) Inflation rate and construction materials prices: relationship investigation. In *2020 International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA)* (Sakheer, Bahrain). New York: IEEE. p. 387-390. DOI: 10.1109/DASA51403.2020.9317162.
- Oliveira, J.J. (2013) *Experiência de Implantação de Sistema de Gerência de Pavimentos em Cidade de Médio Porte - Estudo de Caso: Anápolis – GO*. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-03092013-155923/publico/Jemysson_Jean_de_Oliveira.pdf>. (acesso em 02/12/2024).
- Oreto, C.; S.A. Biancardo; R. Veropalumbo et al. (2022) BIM-LCCA integration for road pavement maintenance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2676, n. 6, p. 259-273. DOI: 10.1177/03611981221074368.
- Pour, S.A. e D.H.S. Jeong (2012) Realistic life-cycle cost analysis with typical sequential patterns of pavement treatment through association analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2304, n. 1, p. 104-111. DOI: 10.3141/2304-12.
- Subedi, S. (2019) *A Decision-Making Tool for Incorporating Cradle-to-Gate Sustainability Into Pavement Design*. Dissertação (mestrado). Louisiana State University. Baton Rouge. Disponível em: <https://repository.lsu.edu/gradschool_theses/4953> (acesso em 02/12/2024).
- Thoft-Christensen, P. (2012) Infrastructures and life-cycle cost-benefit analysis. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 8, n. 5, p. 507-516. DOI: 10.1080/15732479.2010.539070.
- Toriola-Coker, O.L. (2018) *End-user Stakeholders' Management Framework for Public Private Partnership Road Project in Nigeria*. Tese (doutorado). University of Salford. Salford, UK. Disponível em: <<https://salford-repository.worktribe.com/output/1381458/end-user-stakeholders-management-framework-for-public-private-partnership-road-project-in-nigeria>> (acesso em 02/12/2024).
- Walls, J. e M.R. Smith (1998) *Life-cycle Costs Analysis in Pavement Design* (Interim Technical Bulletin). Washington D.C.: Federal Highway Administration.
- Wubuli, A.I.; F. Li; S.I. Cao et al. (2025) Timing of preventive highway maintenance: a study from the whole life cycle perspective. *Sustainability*, v. 17, n. 3, p. 1009. DOI: 10.3390/su17031009.
- Zanchetta, F. (2005) *Aquisição de Dados Sobre a Condição dos Pavimentos Visando a Implementação de Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos*. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo. São Carlos. DOI: 10.11606/D.18.2005.tde-23112012-115841.