

Análise de custos de implantação e de manutenção de rodovias dimensionadas por métodos empírico e mecanístico-empírico

Analysis of implementation and maintenance costs of highways designed by empirical and mechanistic-empirical methods






Jardel Andrade de Oliveira¹, Marcos Felipe Costa Cardoso¹, Samuel de Almeida Torquato e Silva², Iuri Sidney Bessa³, Marcio Muniz de Farias², Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos³, Beatriz Chagas Silva Gouveia⁴, Jorge Barbosa Soares³

¹ Universidade de Fortaleza, Fortaleza, Ceará, Brasil

² Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil

³ Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil

⁴ Superintendência Regional do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Fortaleza, Ceará, Brasil.

Contato: jardel@det.ufc.br,  (JAO); contactodomarcos@gmail.com,  (MFCC); samuel@det.ufc.br,  (SATS); iuri@det.ufc.br,  (ISB); muniz@unb.br,  (MMF); babadopulos@ufc.br,  (LFALB); beatriz.gouveia@dnit.gov.br,  (BCSG); jsoares@det.ufc.br,  (JBS)

Recebido:

26 de julho de 2023

Revisado:

9 de setembro de 2023

Aceito para publicação:

18 de abril de 2024

Publicado:

24 de maio de 2024

Editor de Área:

Francisco Thiago Sacramento Aragão,
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Palavras-chave:

LCCA.

Gerência de pavimentos.

Dimensionamento de pavimentos.

Fadiga.

Keywords:

LCCA.

Pavement management.

Pavement design.

Fatigue.

DOI: 10.58922/transportes.v32i2.2936

RESUMO

Decisões tomadas na fase de dimensionamento e durante a vida útil de pavimentos têm potencial de impactar o seu desempenho e ritmo de deterioração. Citam-se a definição do sistema de camadas (materiais e espessuras), que pode se dar por diferentes métodos de dimensionamento, e a escolha das atividades de manutenção e reabilitação (M&R). Nesse contexto, percebe-se que há potencial para combinação de estratégias de dimensionamento (com respectivas previsões de evolução de deterioração) com métodos de Análise do Custo de Ciclo de Vida (ACCV), do inglês, Life Cycle Cost Analysis (LCCA), com vistas a ajudar a selecionar opções adequadas de estruturas de pavimentos e de atividades de M&R que, combinadas, gerem pavimentos econômica e tecnicamente mais eficientes. Este artigo visa a avaliar os métodos empírico e mecanístico-empírico mais usados no Brasil quanto à sua capacidade em dimensionar pavimentos eficientemente ao se considerar os custos de ciclo de vida, em diferentes cenários de tráfego. Adotou-se como indicador de desempenho o percentual previsto de área trincada (%AT) obtido por simulações com o software MeDiNa. De maneira a manter a comparabilidade entre os cenários avaliados, apenas uma estratégia de M&R foi adotada: fresagem e recomposição total da camada de revestimento asfáltico. Tal ação é adotada sempre que o %AT previsto chega a 30% (critério de projeto adotado no MeDiNa). Diferentes alternativas de pavimentos demandaram mais ou menos repetições da ação de manutenção proposta. Foi possível concluir que, em cenários com maiores tráfegos, o uso de um método de dimensionamento mais mecanicista (no caso o método mecanístico-empírico implementado no MeDiNa) tende a reduzir o volume de recursos necessários para conjuntamente implantar e manter pavimentos ao longo do ciclo de vida. Nesses cenários, o valor do revestimento é muito alto e grandes intervenções são de alto custo e precisam ser evitadas durante o horizonte de projeto. Já para pavimentos destinados a atender menores tráfegos, esta lógica se inverte, e o menor investimento na construção pode se justificar ao ponto de pavimentos subdimensionados terem menores custos de ciclo de vida.

ABSTRACT

Decisions taken in the design phase and during the lifetime of pavements have the potential to impact their performance and rate of deterioration. Mention is made of the definition of the layer system (materials and thicknesses), which can be given by different design methods, and the choice of maintenance and rehabilitation (M&R) activities. In this context, it is clear that there is potential for combining pavement design strategies with Life Cycle



Cost Analysis (LCCA) methods to help select adequate structure options of pavements and M&R activities that, combined, generate economically and technically more efficient pavements. This paper aims to evaluate the empirical and mechanistic-empirical methods most used in Brazil regarding their ability to design pavements efficiently when considering life cycle costs, in different traffic scenarios. The predicted percentage of cracked area (%AT) obtained by simulations with the MeDiNa software was adopted as a performance indicator. In order to maintain comparability between the evaluated scenarios, only one M&R strategy was adopted: milling-and-filling and total reconstruction of the surface asphalt layer. Such action is adopted whenever the expected %AT reaches 30% (design criterion adopted in MeDiNa). Different pavement alternatives demanded more or less repetitions of the proposed maintenance action. It was possible to conclude that, in scenarios with higher traffic, the use a more mechanistic design methods (in this case, the mechanistic-empirical method implemented in MeDiNa) tends to mitigate the volume of resources needed to deploy and maintain pavements throughout the cycle of life. In those scenarios, the surface layer value is very high and major interventions are costly and need to be avoided within the project horizon. As for pavements designed to serve less traffic, this logic is reversed, and the lower investment in construction can be justified to the point that under-designed pavements have lower life cycle costs.

1. INTRODUÇÃO

Introduzida nos anos 1950 (Babashamsi et al., 2016), a análise custo-benefício (do inglês *Benefit-Cost Analysis* – BCA) evoluiu para a Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV, em inglês, *Life Cycle Cost Analysis* – LCCA), nas décadas seguintes, tornando-se uma ferramenta importante para a seleção de projetos de pavimentação e avaliação de estratégias de Manutenção e Reabilitação (M&R). Essa abordagem é empregada por agências de transporte para orientar decisões de investimento em infraestrutura, ajudando a maximizar a eficácia dos recursos aplicados (Kane, 1996; Lamptey et al., 2005; AAPTP, 2006; Haas et al., 2015; Babashamsi et al., 2016; Feitosa e Oliveira, 2018). Como exemplo, cita-se a *Federal Highway Administration* (FHWA), que incentiva que a ACCV seja empregada para avaliar as decisões de investimento (FHWA, 1998).

Há casos de sucesso na aplicação da ACCV (e.g. Rangaraju et al., 2008; Swei, Gregory e Kirchain, 2016), demonstrando seu valor na comparação de alternativas de conservação e manutenção de rodovias, enfatizando a relevância de abordagens probabilísticas na análise de riscos e custos.

Existem duas categorias distintas de custos a serem consideradas pela ACCV, quais sejam: os (i) custos dos gestores, expressos como os valores empregados na implantação e manutenção dos pavimentos; e (ii) os custos dos usuários, que representam custos operacionais dos veículos, custos relacionados ao tempo de viagem, desconforto e riscos de acidentes (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, porém, o foco recai apenas no item (i), custos dos gestores.

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

O objetivo deste artigo é investigar os atuais métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos recomendado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), quanto as suas capacidades de gerarem pavimentos econômicos e eficientes, considerando diferentes volumes de tráfego. Isso é feito empregando o método empírico (Souza, 1981) e o novo Método de Dimensionamento Nacional de pavimentos (MeDiNa) (Motta et al., 2018). As análises de custos

foram executadas baseando-se em instruções orçamentárias nacionais (tabelas do Sistema de Custos Referenciais de Obras, SICRO). Adotou-se uma hipótese de estratégia de M&R que mantenha os cenários comparáveis (fresagem e recomposição total da camada de revestimento asfáltico).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram selecionados três níveis (A, B e C) de volume de tráfego (número N), adotando-se as equações do *United States Army Corps of Engineers* (USACE). O valor do tráfego A é $1,8 \times 10^8$, equivalendo a uma via nacional real, anteriormente estudada pela equipe que desenvolveu o presente artigo. Os outros dois valores de número N escolhidos foram $5,0 \times 10^7$ (tráfego B) e $5,0 \times 10^6$ (tráfego C). Buscou-se, com essas escolhas, ter uma percepção da sensibilidade das variações de custo com relação aos volumes de tráfego para diferentes métodos de dimensionamento. Considerou-se uma vida útil de projeto de 10 anos nas análises. Os três níveis (A, B e C) de tráfego foram escolhidos, pois, representam a realidade de rodovias da região/estado de parte dos autores da pesquisa. Para possibilitar uma ponderação dos níveis de tráfego arrolados, com o que pode ser entendido como, por exemplo, um tráfego elevado, a Tabela 1 traz as categorias de tráfego apontadas por Ceratti, Bernucci e Soares (2015).

Tabela 1: Níveis de tráfego de veículos [adaptado de: Ceratti, Bernucci e Soares, 2015].

Baixo volume de tráfego	$N \leq 10^6$
Moderado volume de tráfego	$10^6 < N \leq 10^7$
Alto volume de tráfego	$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$
Tráfego muito pesado	$N > 5 \times 10^7$

Para esta pesquisa, foram escolhidos os métodos de dimensionamento tradicional/DNER, baseado no índice de suporte Califórnia (CBR) (Souza, 1981), e o MeDiNa (Motta et al., 2018). Para cada valor de número N, duas alternativas de pavimentos foram dimensionadas, originando as Alternativas 1 e 2, para os tráfegos A, B e C. Todas as Alternativas 1 (tráfegos A, B e C) dizem respeito ao dimensionamento pelo método tradicional/DNER, da mesma forma que todas as Alternativas 2 (tráfegos A, B e C) relacionam-se com o MeDiNa. De maneira a avaliar o efeito de se considerar a presença de uma camada de reforço de subleito, apenas para o tráfego B, foram dimensionadas 4 alternativas de pavimento, sendo elas as Alternativas 1 e 2 com reforço de subleito e as Alternativas 1 e 2 sem reforço de subleito.

Todos os materiais adotados na pesquisa são do banco de dados do MeDiNa. É importante ressaltar que há uma limitação na análise do comportamento da camada de revestimento asfáltico e da camada de sub-base estabilizada quimicamente em relação ao trincamento por fadiga, uma vez que a previsão do defeito de área trincada é muito influenciada pelos parâmetros obtidos por meio dos ensaios laboratoriais. Além disso, poucas estruturas de pavimento contendo camadas cimentadas foram consideradas na calibração do MeDiNa para o desenvolvimento do *software* e para a modelagem dos defeitos (Fritzen, 2016). Apesar disso, foram mantidos os materiais do banco de dados do MeDiNa para fins de comparação de diferentes cenários de dimensionamento.

Acessando o programa é possível encontrar as suas respectivas características mecânicas. Para isso, os nomes que os materiais recebem no *software* são listados a seguir. Para integrar as camadas dos pavimentos propostos, buscou-se no MeDiNa os materiais mais parecidos/típicos com os materiais normalmente empregados em rodovias da região de execução do estudo.

Os materiais utilizados nas análises são oriundos do banco de dados do MeDiNa (versão v.1.1.9.0 - abr/2023). Empregou-se apenas um material (concreto asfáltico modificado - RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22) para todas as camadas de revestimento, independentemente dos tráfegos. Da mesma forma, para as camadas de base, adotou-se apenas um material granular (brita graduada - gnaiss C4), independente do tráfego. Já para a camada de sub-base, escolheram-se dois materiais, quais sejam: (i) para o tráfego A, fez-se uso da brita graduada tratada com cimento - Balbo, 1993 c: 80kg/m³; (ii) para os tráfegos B e C, fez-se uso do material brita graduada - gnaiss C1. A camada de reforço de subleito, sempre que esta aparece (tráfegos A e B com reforço de subleito), fez uso do material solo areno-argiloso LG' 2. E, o material do subleito (solo siltoso NS'), manteve-se constante em todas os cenários.

A Tabela 2 traz propriedades dos materiais considerados nas avaliações e as espessuras das camadas das alternativas de pavimentos propostas para o tráfego A (Alt. 1 - traf. A e Alt. 2 - traf. A). Analogamente, as Tabelas 3 e 4 se relacionam com o tráfego B com e sem reforço, respectivamente. Já a Tabela 5 contempla dados/alternativas do tráfego C.

Tabela 2: Alternativas 1 e 2 para o tráfego A (N = 1,8×10⁸).

Camada	CBR (%)	Módulo de elasticidade (MPa)	Coeficiente de Poisson (ν)	Tradicional	MeDiNa
				Alt. 1 – traf. A	Alt. 2 – traf. A
				Espessuras (cm)	
Revestimento	-	3.184	0,30	12,5	23,5
Base	80	311	0,35	15,0	15,0
Sub-base	20	7.000	0,25	15,0	15,0
Reforço do subleito	10	248	0,45	15,0	25,0
Subleito	8	189	0,45	-	-

Adotou-se, nas soluções para o tráfego A, um pavimento semirrígido invertido, ou seja, com a camada cimentada na sub-base. Assim, espera-se evitar a reflexão de trincas para o revestimento. Trata-se de uma solução real, adotada recentemente em pavimento para uma via com um volume elevado de tráfego.

Tabela 3: Alternativas 1 e 2 para o tráfego B, com reforço (N = 5,0×10⁷).

Camada	CBR (%)	Módulo de elasticidade (MPa)	Coeficiente de Poisson (ν)	Tradicional	MeDiNa
				Alt. 1 – traf. B	Alt. 2 – traf. B
				Espessuras (cm)	
Revestimento	-	3.184	0,30	10,0	23,7
Base	80	311	0,35	15,0	15,0
Sub-base	20	259	0,35	15,0	15,0
Reforço do subleito	10	248	0,40	15,0	15,0
Subleito	8	189	0,45	-	-

Os custos de implantação e reabilitação das alternativas de pavimentos foram calculados com base no SICRO. Utilizou-se como referência a tabela do estado do Ceará, mês de janeiro de 2023. Nas Tabelas 6 e 7, respectivamente, mostram-se os parâmetros físicos/construtivos e os valores

unitários empregados em todas as avaliações. De maneira a simplificar a análise e focar nos aspectos diretamente ligados ao dimensionamento, não foram explorados aspectos econômicos, tais como: fluxo de caixa, taxa de retorno e/ou variação de preço (e.g. inflação). Tal consideração pode ser incluída em função da necessidade de adaptação a outros cenários de aplicação do método proposto.

Tabela 4: Alternativas 1 e 2 para o tráfego B, sem reforço ($N = 5,0 \times 10^7$).

Camada	CBR (%)	Módulo de elasticidade (MPa)	Coeficiente de Poisson (ν)	Tradicional	MeDiNa
				Alt. 1 – traf. B	Alt. 2 – traf. B
				Espessuras (cm)	
Revestimento	-	3.184	0,30	10,0	23,4
Base	80	311	0,35	15,0	15,0
Sub-base	20	259	0,35	20,0	15,0
Subleito	8	189	0,45	-	-

Tabela 5: Alternativas 1 e 2 para o tráfego C ($N = 5,0 \times 10^6$)

Camada	CBR (%)	Módulo de elasticidade (MPa)	Coeficiente de Poisson (ν)	Tradicional	MeDiNa
				Alt. 1 – traf. C	Alt. 2 – traf. C
				Espessuras (cm)	
Revestimento	-	3.184	0,30	5,0	8,0
Base	80	311	0,35	15,0	15,0
Sub-base	20	259	0,35	15,0	15,0
Subleito	8	189	0,45	-	-

Tabela 6: Parâmetros físicos/construtivos usados nas avaliações dos custos.

Parâmetro	Valor
Tráfego A	$1,8 \times 10^8$
Tráfego B	$5,0 \times 10^7$
Tráfego C	$5,0 \times 10^6$
Comprimento do pavimento (m)	1.000
Largura do pavimento (m)	7,0
Área do pavimento (m^2)	7.000
Massa específica do CA (t/m^3)	2,4
Massa específica da EAI (t/m^3)	0,98
Taxa imprimação (l/m^2)	1,0
Teor de CAO do CA (%)	5,5
DMT serviços (km)	5,0

Tabela 7: Valores adotados no cálculo dos custos de implantação dos pavimentos analisados.

Item/material	Unidade	Valor unitário (R\$)
Revestimento (CA polímero)*	t	223,50
Imprimação (EAI)*	m ²	0,44
Base granular*	m ³	216,35
Sub-base granular*	m ³	25,27
Sub-base (BGTC)*	m ³	258,84
Reforço (solo estabilizado)*	m ³	12,16
Fornecimento de emulsão asfáltica para imprimação**	t	2.591,96
Fornecimento de CAP revestimento**	t	5.180,00
Transporte de emulsão asfáltica imprimante*	tk	1,98
Transporte de CAP 50/70*	tk	1,98
Fresagem contínua de revestimento asfáltico*	m ³	54,9
Transporte do fresado com caminhão basculante*	t	3,05

*Valores retirados da planilha SICRO (Ceará, janeiro de 2023). OBS: Seguindo recomendação do Informativo SICRO nº 01/2017 (DNIT, 2017), é indicado realizar pesquisa de preço no mercado local.

** Valores retirados da Cesta de Produtos Asfálticos ANP (Nordeste, abril de 2023).

Em todos os cenários investigados, adotou-se, como indicador de desempenho, o percentual previsto de área trincada (%AT) calculado com o *software* MeDiNa, atualmente recomendado pelo DNIT (Motta et al., 2018; Franco e Motta, 2020) como método de dimensionamento mecanístico-empírico. Dessa forma, entende-se que o dano das estruturas e de seus materiais foi considerado nas análises executadas, visto que o método empregado envolve a consideração da deterioração por fadiga da camada de revestimento. Sendo assim, as 8 alternativas de pavimento foram avaliadas no MeDiNa quanto ao trincamento por fadiga, mesmo quando dimensionadas com base no método do CBR, de maneira a avaliar a diferença esperada conforme modelos de desempenho implementados no MeDiNa para os mesmos materiais e estruturas. Nesta etapa, fez-se uso exclusivamente da função “avaliar a estrutura” do *software*, pois, caso fosse empregada a função “dimensionar”, o programa potencialmente alteraria as espessuras das alternativas.

Como estratégia de manutenção, de maneira a manter o máximo de comparabilidade entre as alternativas, empregou-se, para todos os pavimentos explorados, a técnica de fresagem a frio de toda a espessura da camada de revestimento asfáltico, seguida de sua plena recomposição, com o mesmo material adotado na fase de execução. São excluídas das análises de custos desta pesquisa quaisquer ações mais corriqueiras e frequentes de manutenção (e.g. selagem de trincas). Dentro do período de vida útil proposto (10 anos), a ação de manutenção foi replicada sempre que o *software* indicou que o critério limite de fadiga foi atingido (30% de AT no revestimento asfáltico). Considerou-se, ainda, que, após a aplicação de um ciclo de manutenção (fresagem e recomposição da camada de revestimento), as condições iniciais (funcional e estrutural) do pavimento foram revitalizadas completamente, dando início, então, a um novo período de desgaste, o que permite calcular com igualdade de condições o trincamento previsto utilizando as mesmas premissas iniciais.

Para propiciar uma comparação mais reprodutível entre as alternativas, considerou-se que as ações de manutenção foram implantadas de forma instantânea. Dessa forma, tem-se que o %AT simulado cresce até o mês em que este índice atingiria 30%, logo, no mês subsequente, considerou-se que o pavimento iniciava um novo ciclo de desgaste, com suas condições estrutural e funcional inicial plenamente recomposta, sendo o custo necessário para a reabilitação computado. Para calcular

com mais precisão, o momento da implementação da ação de manutenção, fez-se um cálculo para, considerando a curva de evolução do %AT, identificar o período/mês exato (considerando decimais) que o AT atingiria 30%, chamou-se esse mês de MC (Mês Crítico). Em seguida, fez-se a razão do tempo de serviço do pavimento (120 meses) pelo MC. O resultado desta razão, representa o número de ciclos de manutenção que foi considerado nas avaliações dentro do ciclo de vida analisado.

A lógica de desgaste-M&R-desgaste, é exemplificada pela Figura 1, que 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. A Figura 2 é um caso particular (comparável com a Figura 1), customizada com as características particulares adotadas neste artigo (diferentes alternativas de pavimentos e consideração da fadiga da camada de revestimento – %AT).

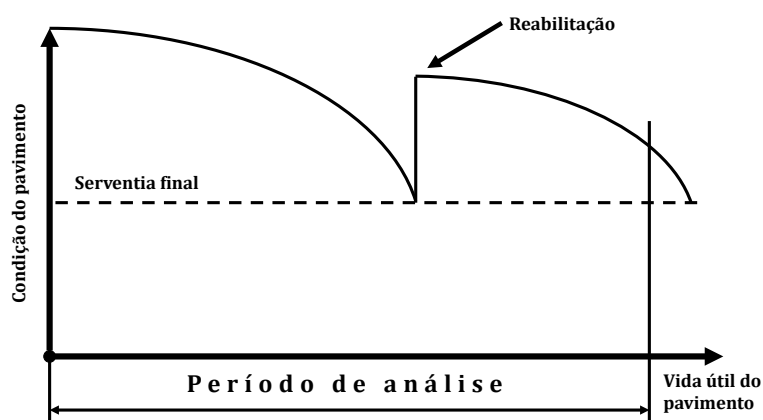


Figura 1. Ilustração da variação da serventia de um pavimento com o acúmulo de tráfego de veículos e impacto de medida de manutenção [adaptado de: Walls e Smith, 1998].

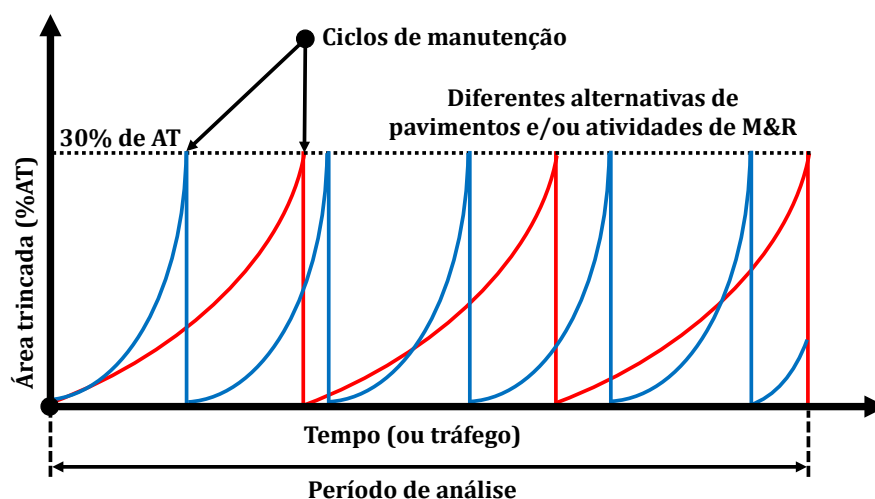


Figura 2. Evolução do %AT de diferentes alternativas de pavimentos.

Vale destacar que as alternativas dimensionadas pelo MeDiNa só atingem a previsão do limite de 30% de AT ao final da vida útil (120 meses) e assim demandariam apenas um ciclo de manutenção, conforme

estabelecido pela própria premissa utilizada na lógica de dimensionamento do referido método. Indica-se ainda que, para os pavimentos analisados neste artigo, nos cenários considerados, em nenhum caso o *software* indicou problema relacionado ao surgimento de trincamento por fadiga na camada feita de BGTC, logo entendeu-se que esta camada resistiu à fadiga. Os resultados do MeDiNa mostraram que as soluções inicialmente propostas com camada de BGTC não sofrem variação significativa no módulo de elasticidade. Portanto, considerou-se que a capacidade estrutural dessa camada específica não será impactada pela ação da passagem de tráfego ao longo da vida útil simulada. Dessa maneira, este item não será detalhado na seção seguinte, focando-se na manutenção da camada de revestimento e considerando-se as demais como intactas ao longo da vida de serviço simulada. Após a realização do dimensionamento das alternativas, da observação de suas previsões de desempenho e da definição da estratégia de M&R, calcularam-se os custos de implantação e de manutenção.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 8 mostra-se o mês em que cada alternativa proposta atingiu o limite de 30% de AT (MC), bem como as quantidades de ciclos de manutenção calculadas. Por sua vez, os valores de custos de implantação, manutenção e total para as 8 alternativas de pavimentos simuladas são apresentados na Tabela 9 e na Figura 3. Optou-se, na Figura 3, por não criar uma barra exclusiva para o custo total. No entanto, esclarece-se que este valor é representado pela soma das duas barras (barra preta – implantação e barra hachurada – manutenção). Nessa tabela, a variação nos custos decorre da adoção dos diferentes métodos de dimensionamento (tradicional e MeDiNa). Sempre que as células das colunas de variação (Var. %) indicarem valores positivos, significa que o uso do MeDiNa acarretou custos mais elevados. Analogamente, valores negativos indicam que o método tradicional trouxe custos maiores.

Percebe-se, da Tabela 9 e da Figura 3, que todas as alternativas obtidas com o MeDiNa (Alternativas 2 - tráfegos A, B e C) apresentaram maiores custos de implantação, o que era esperado, uma vez que estas alternativas têm maiores espessuras de camadas. Já ao se observar apenas os custos de manutenção, nota-se que as Alternativas 2 (tráfegos A e B) demandaram volumes menores de recursos financeiros durante todo o ciclo de vida, apesar do mais alto investimento em construção, que chega a dobrar nos casos que consideram o tráfego B.

Tabela 8: Meses críticos (MCs) e número de ciclos de manutenção calculados utilizando-se o MeDiNa para os 8 diferentes cenários avaliados.

Alternativa	MC	Número de ciclos de manutenção
Tráfego A ($1,8 \times 10^8$)		
1	11,6	10,3
2	120,0	1,0
Tráfego B ($5,0 \times 10^7$)		
1 (com camada de reforço)	19,7	6,1
2 (com camada de reforço)	120,0	1,0
1 (sem camada de reforço)	20,4	5,9
2 (sem camada de reforço)	120,0	1,0
Tráfego C ($5,0 \times 10^6$)		
1	106,3	1,13
2	120,0	1,0

Tabela 9: Custos de implantação e de manutenção das alternativas simuladas utilizando-se o MeDiNa para os 8 diferentes cenários analisados.

Alternativa	Implantação		Manutenção		Total	
	Custo (R\$)	Var. (%)	Custo (R\$)	Var. (%)	Custo (R\$)	Var. (%)
Tráfego A (1,8×10⁸)						
1	1.603.277		12.496.525		14.099.802	
2	2.574.886	61	2.283.443	-82	4.858.329	-66
Diferença	971.609		-10.213.082		-9.241.473	
Tráfego B (5,0×10⁷)						
1 (com camada de reforço)	1.131.334		5.946.343		7.077.677	
2 (com camada de reforço)	2.322.584	105	2.302.519	-61	4.625.103	-35
Diferença	1.191.250		-3.643.825		-2.452.574	
1 (sem camada de reforço)	1.123.214		5.727.986		6.851.199	
2 (sem camada de reforço)	2.284.124	103	2.273.905	-60	4.558.029	-33
Diferença	1.160.910		-3.454.080		-2.293.171	
Tráfego C (5,0×10⁶)						
1	690.355		562.651		1.253.006	
2	947.281	37	784.055	39	1.731.336	38
Diferença	256.927		221.404		478.330	

Os resultados expostos neste artigo devem permanecer limitados ao uso dos materiais e preços considerados neste artigo.

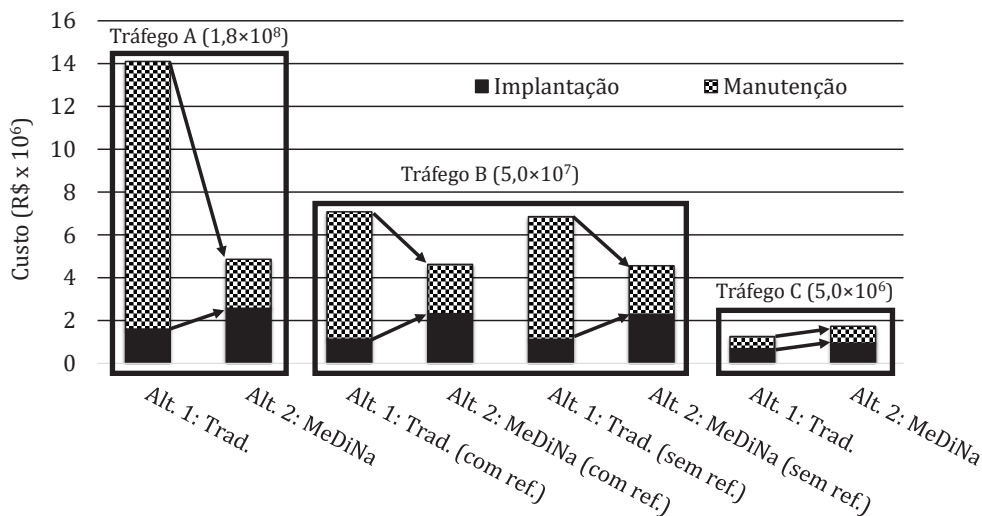


Figura 3. Representação gráfica dos custos de implantação e de manutenção das alternativas simuladas utilizando-se o MeDiNa para os 8 diferentes cenários explorados.

A redução em manutenções prevista pode ser significativa, com potencial para diminuir em aproximadamente 2/3 o custo no ciclo de vida (considerando construção e manutenção), valor observado no cenário do tráfego A (o mais elevado). Essa economia decorre do fato de que as alternativas dimensionadas pelo MeDiNa, conforme o critério de avaliação baseado no percentual de área trincada, indicam a necessidade de apenas um ciclo de manutenção. No entanto, é importante ressaltar que, na prática, podem ocorrer manutenções pontuais ou correções funcionais que não

são capturadas por esse critério. Em termos absolutos, essa economia pode representar uma redução da ordem de R\$ 500 mil por ano por quilômetro de rodovia de pista simples. Essa lógica é melhor evidenciada nos tráfegos mais elevados, se invertendo no tráfego C.

Percebe-se, então, ao se observar as Tabelas 8 e 9 e a Figura 3, conjuntamente, que, quanto maior for o número de ciclos de manutenção, mais vantajoso financeiramente se mostra o emprego do MeDiNa. A tendência exposta na última análise é fortalecida ao se observar as respostas obtidas para o tráfego C. Nesse caso, percebe-se que o custo de construção mais elevado da Alternativa 2 (MeDiNa) não foi compensado pelos possíveis custos maiores de manutenção, pois a diferença do número de ciclos de manutenção das Alternativas 1 e 2 (tráfego C) foi mínima (sendo 1 ciclo de manutenção para a Alternativa 2 e 1,13 ciclo de manutenção para a Alternativa 1). Além disso, para o volume de tráfego C, essa diferença incorre em incremento relevante de investimento na construção que não necessariamente é recompensado com redução de relevante de custo de manutenção pela proximidade dos 10 anos de projeto em ambos os casos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, buscou-se avaliar os impactos financeiros no custo de ciclo de vida (implantação e manutenção) de algumas alternativas de pavimentos, dimensionadas pelo uso de dois métodos de dimensionamento de pavimentos, tradicional e MeDiNa. Diferentes níveis de tráfego (A, B e C) foram considerados. Para avaliar a degradação das estruturas alternativas, fez-se uso da previsão de trincamento por fadiga (%AT) a partir do *software* MeDiNa. Como critério de manutenção, adotou-se a fresagem e recomposição total da camada de rolamento, de maneira a manter a comparabilidade entre as estratégias, sendo a única diferença o tempo necessário para se atingir o critério de manutenção (30% de %AT). Uma vez que foi definida uma alternativa de manutenção comum a todos os cenários, foi possível avaliar como as diferentes tecnologias adotadas impactaram os custos. Destacam-se, então, algumas conclusões:

- Os pavimentos com os menores custos de ciclo de vida entre os aqui investigados correspondem aos que tinham os maiores custos de implantação. Assim, é possível perceber que a solução mais barata no curto prazo (implantação), pode representar um custo mais elevado no final do período de projeto (implantação e ciclo de vida), conforme previsto utilizando o MeDiNa. Logo, os dados sugerem que investir mais na implantação, construindo um pavimento mais robusto, dimensionado por métodos mais adequados, pode representar uma economia financeira relevante ao se considerar as ações de M&R.
- O emprego do MeDiNa pode não trazer ganhos econômicos ao longo dos ciclos de vida para pavimentos submetidos a menores tráfegos de veículos, pois o método normalmente demanda camadas mais espessas (elevando os custos de construção e manutenção), que não necessariamente produzirão ganho suficiente na redução da frequência de manutenções previstas de maneira a justificar o maior investimento inicial. Portanto, em projetos de rodovias de menor porte, atender aos requisitos mecanístico-empírico indicados pelo MeDiNa poderá não produzir alternativas com ciclos de vida mais econômicos que os dimensionamentos empíricos.
- O uso combinado de estratégias de dimensionamento mecanístico-empírico com análises de custo de ciclo de vida parece útil para aumentar a qualidade de pavimentos e, ao mesmo tempo, reduzir investimentos em infraestrutura, com melhor planejamento.
- Sublinha-se, que é importante avaliar os resultados obtidos com a devida cautela, pois, no momento, estes restringem-se aos cenários explorados. Possíveis futuras análises de sensibilidade

permitirão avaliar as importâncias relativas de diferentes parâmetros de entrada adotados nas hipóteses e facilitarão generalizações mais confiáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao DNIT (TED 679/2020) e à Funcap (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico), no âmbito do Programa Cientista Chefe (Ciência e Inovação na Infraestrutura Viária no Ceará), pelas bolsas de pesquisas concedidas a alguns dos autores.

REFERÊNCIAS

- AAPTP (2006) *Life Cycle Cost Analysis for Airport Pavements: Relatório Final*. Auburn: Applied Research Associates Inc.
- Babashamsi, P.; N.I. Yusuff; H. Ceylan et al. (2016) Evaluation of pavement life cycle cost analysis: review and analysis, *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 9, n. 4, p. 241-54. DOI: 10.1016/j.ijprt.2016.08.004.
- Carneiro, R.S. (2021) *Análise do Custo do Ciclo de Vida para Otimização de Estratégias de Manutenção e Reabilitação em Pavimento Aeroportuário*. Monografia (iniciação científica). Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Ceratti, J.A.P.; L.L.B. Bernucci and J.B. Soares (2015) *Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação: Guia Técnico*. Rio de Janeiro: ABEDA.
- DNIT (2017) *Informativo SICRO nº 01/2017*. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/comunicados/InformativoSICROn012017.pdf> (acesso em: 29/12/2023).
- Feitosa, L.A. and F.H.L. Oliveira (2018) Análise econômica do custo de ciclo de vida para manutenção e reabilitação em rodovias: um estudo dos softwares e do catálogo de soluções CREMA-DNIT. In *Anais do 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. ANPET.
- FHWA (1998) *Pavement Management System Participant's Manual*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration, National Highway Institute.
- Franco, F. A. C. P. e L. M. G. Motta (2020) *MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional. Manual de Utilização. Versão 1.1.4*. Rio de Janeiro.
- Fritzen, M.A. (2016) *Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos*. Tese (doutorado). Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Haas, R.; W.R. Hudson and L.C. Falls (2015) *Pavement Asset Management*. Hoboken: John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9781119038849.
- Haider, S.W. and M.B. Dwaikat (2011) Estimating optimum timing for preventive maintenance treatment to mitigate pavement roughness, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2235, n. 1, p. 43-53. DOI: 10.3141/2235-06.
- Han, D. and 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. 1716-26. DOI: 10.1007/s12205-014-1229-0.
- Kane, A.R. (1996) *National Highway System Designation Act: Life-Cycle Cost Analysis Requirements*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
- Khurshid, M.B.; M. Irfan and S. Labi (2009) Comparison of methods for evaluating pavement interventions: Evaluation and case study, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2108, n. 1, p. 25-36. DOI: 10.3141/2108-03.
- Lamprey, G.; M.Z. Ahmad; S. Labi et al. (2005) *Life Cycle Cost Analysis for INDOT Pavement Design Procedures* (Publication FHWA/IN/JTRP-2004/28). West Lafayette: Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University. DOI: 10.5703/1288284313261
- Motta, L.M.G.; L.F.M. Leite; F.A.C.P. Franco et al. (2018) *Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método Mecânico-Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos*. Rio de Janeiro: DNIT, UFRJ.
- Rangaraju, P.R.; S. Amirkhanian and Z. Guven (2008) *Life Cycle Cost Analysis for Pavement Type Selection* (Final Report FHWA-SC-08-01). Columbia: South Carolina Department of Transportation.
- Souza, M.L. (1981) *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis* (3a ed.). Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias.
- Swei, O.; J. Gregory and R. Kirchain (2016) Probabilistic life-cycle cost analysis of pavements: drivers of variation and implications of context, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2523, n. 1, p. 47-55. DOI: 10.3141/2523.
- Walls, J. and M.R. Smith (1998) *Life-cycle Cost Analysis in Pavement Design – Interim Technical Bulletin*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
- Zhang, H.; G.A. Keoleian and M.D. Lepech (2008) An integrated life cycle assessment and life cycle analysis model for pavement overlay systems. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*. London: Taylor & Francis Group, p. 907-915.