

IMPACTO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO E DA ESPESSURA DE CAMADAS NO CUSTO DE CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Jardel Andrade de Oliveira
Centro Universitário Christus

Iuri Sidney Bessa
Jorge Barbosa Soares
Universidade Federal do Ceará

Antônio Alves Ferreira Júnior
Arielton Fonteles Araújo
Gustavo Pinheiro Moreira
Tribunal de Contas do Estado do Ceará

RESUMO

Este artigo objetivou investigar a influência da variação do Grau de Compactação (GC) e da conformidade de espessuras de camadas no Custo de Ciclo de Vida de pavimentos asfálticos, a partir de uma rodovia cearense. Avaliaram-se as conformidades entre o projeto e o observado após a construção. Os resultados indicaram que desvios no GC e nas espessuras das camadas aumentam a taxa de deterioração em termos de trincamento superficial previsto, elevando custos de manutenção. A análise comparou duas estruturas, sendo: (i) condição encontrada em campo (Estrutura 1) e (ii) condição ideal (Estrutura 2), utilizando o *software* MeDiNa para simulação de desempenho. A estrutura ideal apresentou custos totais menores ao longo do ciclo de vida. Projeto e controle tecnológico adequados são cruciais para garantir durabilidade e eficiência econômica dos pavimentos e a simulação com métodos atualmente disponíveis é uma alternativa para previsão de custos de ciclo de vida.

ABSTRACT

This paper had the objective of investigating the influence of variations in the Degree of Compaction (DC) and in the layer thickness conformity on the Life Cycle Cost of asphalt pavements, using a case study of a highway in Ceará. Conformities between the design and field surveys after construction were evaluated. The results indicated that deviations in DC values and layer thicknesses increase the deterioration rate predicted in terms of surface cracking, raising maintenance costs. The analysis compared two structures: (i) the condition found in the field (Structure 1) and (ii) the ideal condition (Structure 2), using the MeDiNa software for performance simulation. The ideal structure presented lower total costs over the life cycle. Adequate design and technological control are crucial to ensure the durability and economic efficiency of pavements, and performing simulation by means of currently available methods may be an alternative for the prediction of life cycle costs.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A verificação do Grau de Compactação (GC) das camadas de pavimentos asfálticos é uma das principais verificações a serem realizadas após a construção de pavimentos e antes da liberação para o tráfego de veículos. Trata-se de avaliar a conformidade da relação percentual entre a massa específica aparente seca obtida em campo e a massa específica aparente seca máxima, prevista em projeto. Valores baixos de GC podem resultar em pavimentos com capacidade de suporte inferior à projetada, acelerando o processo de falha estrutural e diminuindo a vida útil do pavimento. Como consequência, há um aumento na necessidade de intervenções ao longo da vida útil, elevando os custos totais da obra. Porém, são raros os estudos em que se realiza algum tipo de previsão do real efeito de uma falta de conformidade no desempenho dos pavimentos.

Estudos laboratoriais realizados em misturas asfálticas, como o de Albuquerque (2005), mostram que GC acima ou abaixo de 100% reduz os valores de resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR). A vida de fadiga tende a aumentar para valores de GC acima de 100% e diminuir para valores de GC abaixo de 100%. Para subcamadas, Goli *et al.* (2022) demonstraram que valores de GC abaixo de 100% podem diminuir indicadores de resistência

estática de materiais, como aquela medida pelo Índice de Suporte Califórnia (ISC), o que pode causar um subdimensionamento da estrutura.

Os diferentes métodos de dimensionamento de pavimentos podem gerar estruturas com espessuras de camadas variadas, resultando em diferentes tempos de vida útil e ciclos de Manutenção e Reabilitação (M&R). A fase de pós-execução de um pavimento rodoviário, que compreende a etapa seguinte à construção e liberação do tráfego, envolve a previsão de intervenções para melhorias estruturais (como a fresagem de camadas deterioradas e reconstrução com novos materiais) ou funcionais (como a melhoria da qualidade do rolamento e do conforto).

A Análise do Custo de Ciclo de Vida (ACCV) é uma metodologia que pode avaliar os impactos ambientais e econômicos associados ao ciclo de vida de empreendimentos, desde a extração das matérias-primas até o fim de suas vidas úteis (Souza e Motta, 2018; Viera e Kunert, 2020; Oliveira *et al.*, 2024). Este artigo abordará a ACCV no âmbito apenas da pavimentação, considerando os custos de implantação e manutenção (custos dos gestores) nas fases de projeto, construção, manutenção, uso e o fim de vida útil da estrutura, proporcionando uma visão dos custos ao longo do tempo, focada no desempenho dos materiais empregados. Isso é feito conforme previsão com ferramentas atualmente disponíveis no Brasil, o *software* MeDiNa, devidamente nutrido com propriedades dos materiais envolvidos em uma obra real. Essa análise pode auxiliar a tomada de decisões, impactando a avaliação da eficiência econômica dos projetos de pavimentação.

O objetivo da pesquisa apresentada no artigo é avaliar as fases de projeto e execução de uma rodovia cearense, verificando como inconsistências nessas fases (especificamente quanto ao GC e desvios de espessura de camadas) podem afetar a durabilidade dessa estrutura e impactar os seus custos de implantação e manutenção. Para atingir este objetivo, foram realizados: (i) avaliação da conformidade do projeto com o método empírico de dimensionamento do DNIT (DNIT, 2006a), (ii) verificação em campo das espessuras e da compactação das camadas do pavimento, avaliada pelo GC e (iii) simulação de desempenho de estruturas em cenário encontrado em campo e em cenário ideal de projeto, conforme método empírico de dimensionamento do DNIT.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A rodovia considerada no estudo é classificada como radial. O trecho analisado é de aproximadamente 38 km, dentre os aproximadamente 540 km da rodovia. O número N (USACE) indicado em projeto é de $1,35 \times 10^7$. Inicialmente, verificou-se se o projeto da rodovia (dimensionamento das espessuras das camadas) estava em conformidade com o método empírico descrito pelo DNIT (DNIT, 2006a). Para isso, foram adotados os valores de ISC indicados em projeto (80% para a base; 20% para a sub-base; e entre 7 e 12% para o subleito, adotando-se o valor médio de 10%), bem como o número N ($1,35 \times 10^7$), que também foi indicado no projeto. Em seguida, para avaliar se a rodovia foi construída conforme o projeto (*as built*), foram abertas três janelas de inspeção no trecho analisado. Nestas janelas foram realizadas: (i) medição dos GCs, das umidades e espessuras das camadas do pavimento e do subleito e (ii) coleta desses materiais. Os materiais coletados em campo foram caracterizados quanto à rigidez em laboratório, pela execução do ensaio de MR realizado de duas maneiras: com o GC ideal (100%) e com o GC de fato observado em campo. Adotou-se como valor de

módulo, o MR médio de todos os pares de tensão do ensaio.

De posse dos dados de rigidez das camadas, duas estruturas foram modeladas no *software* MeDiNa para simular o desempenho e as ações de M&R necessárias. A Estrutura 1 representa a condição de campo (espessuras de camadas e GCs medidos em campo) e a Estrutura 2 ilustra a condição ideal (espessuras de camadas conforme as recomendações do método empírico do DNIT e GCs de 100%). O desempenho das Estruturas 1 e 2 foi avaliado pela simulação no MeDiNa do percentual de Área Trincada (%AT). Como limite aceitável para o valor de %AT, adotou-se a recomendação do MeDiNa de 30%, a um nível de confiabilidade de 85%. Denominou-se de Mês Crítico (MC) o mês em que as estruturas simuladas atingiram o limite de %AT. Como atividade de M&R, de maneira a manter uma comparabilidade entre os cenários, adotou-se a fresagem a frio, com total e instantânea recomposição, com a mesma espessura da condição original, da camada de revestimento sempre que o MC foi atingido. Nas simulações, um novo ciclo de manutenção foi implementado sempre que o MC foi alcançado, restaurando integralmente as condições estruturais e a funcionalidade do pavimento. Assumiu-se que as camadas subjacentes mantêm suas capacidades estruturais durante a vida útil. A mesma metodologia foi adotada em Oliveira *et al.* (2024) e em Cardoso *et al.* (2024), onde pode-se obter mais detalhes da técnica de ACCV adotada em conjunto com a previsão de área trincada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 são apresentados os valores das espessuras das camadas nos seguintes cenários: (i) projeto real da rodovia, (ii) dimensionamento da rodovia conforme o método empírico do DNIT e (iii) condições encontradas em campo (*as built*) quanto a espessuras, GCs e umidades.

Tabela 1: Espessuras e GCs recomendados e verificados em campo

Estrutura	Projeto real	Dimensionamento empírico do DNIT	As built*			
			Espessura (cm)	GC (%)		Umidade de campo (%)
				Alvo**	Campo	
Revestimento	6,5	10,0	7,0	≥ 95	97,4	-
Base	15,0	18,0	15,0	≥ 100	92,0	4,2
Sub-base	22,0	24,0	19,0		90,3	7,5
Subleito	-	-	-		100,3	10,9

* Valores médios das 3 janelas de inspeção. / ** Conforme SOP (2020).

Ao avaliar as espessuras das camadas, observa-se que o dimensionamento da rodovia está em desconformidade com as indicações do método empírico do DNIT, evidenciando uma inconsistência de projeto. Essa desconformidade é preocupante, considerando que o Estado do Ceará adota este método. Adicionalmente, percebe-se que as espessuras medidas em campo (*as built*), das camadas de revestimento e da sub-base não apresentavam conformidade com o projeto real da rodovia, estando, respectivamente, com excesso de 0,5 cm de espessura e falta de 3,0 cm de espessura. Em termos de GC das camadas de base e sub-base, as especificações DNIT (2022a) e DNIT (2022b) recomendam que este parâmetro tenha valor maior ou igual a 100%. Os resultados de campo mostram que esses valores não foram alcançados. Apenas o subleito atingiu 100% de GC. O revestimento apresentou GC em conformidade com o intervalo ideal (DNIT, 2006b).

Para a fase de simulação da Estrutura 1 (condição de campo – espessuras de camadas e GC do *as built*) e da Estrutura 2 (condição ideal – espessuras conforme as recomendações do método empírico do DNIT 2006a e GC em 100%), os materiais coletados nas janelas foram utilizados

para a realização de ensaios de MR, para entrada desses valores no MeDiNa. Nos materiais coletados nas subcamadas e no subleito de cada janela, foram realizados ensaios de MR nas condições de GC e de umidade de fato observadas em campo (*as built*), cujos valores foram usados na simulação da Estrutura 1. Adicionalmente, foram realizados ensaios de MR também com os GCs (100%) e umidades ideais, e esses valores foram usados na simulação da Estrutura 2. Para o CA da camada de revestimento asfáltico considerou-se um único valor de MR. A Tabela 2 apresenta os resultados de MR dos materiais nas duas condições consideradas (de campo/*as built* e ideal), bem como as suas umidades, nas mesmas condições.

Tabela 2: Resumo dos ensaios de MR e valores de umidade nas condições ótima e de campo

Janela	Estrutura	Condições ótimas		Condições encontradas em campo		
		Umidade (%)	MR médio (MPa)	Umidade (%)	GC (%)	MR médio (MPa)
1	Base	8,7	420	4,4	101	473
	Sub-base	8,6	537	6,5	85	200
	Subleito	12,4	260	2,8	106	131
2	Base	6,7	668	4,1	90	373
	Sub-base	13,9	809	10,6	93	329
	Subleito	14,5	381	15,9	101	*
3	Base	5,9	468	4,0	85	*
	Sub-base	8,2	234	5,5	93	271
	Subleito	14,5	190	14,1	94	137

* Materiais que não resistiram ao ensaio de MR.

A partir das umidades ótimas e do GC adequado (100%), e considerando a média das 3 janelas coletadas, os MRs médios são: base = 519 MPa; sub-base = 527 MPa e subleito = 277 MPa. Considerando as umidades e os GCs de campo, os MRs médios são: base = 423 MPa; sub-base = 267 MPa e subleito = 131 MPa. Segundo Bernucci *et al.* (2022), os valores dos MR encontrados são compatíveis com os de materiais típicos para base, sub-base e subleito. O MR da camada de revestimento foi considerado igual a 6.497 MPa. Os valores dos serviços e materiais adotados nas ACCVs das Estruturas 1 e 2 foram obtidos no SICRO (Sistema de Custos Referencias de Obras – janeiro/ 2024, para o estado do Ceará), e na cesta de materiais da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil – abril/ 2024, para a região Nordeste). A Tabela 3 resume as informações das ACCVs e a Figura 1 traz os custos de implantação e manutenção das Estruturas 1 e 2.

Tabela 3: Estrutura das alternativas de pavimentos e informações para a ACCV

Estrutura	Espessuras das camadas (cm)			Dados para a ACCV	
	Revestimento	Base	Sub-base	Mês crítico	Nº de ciclos de manutenções
1 (Condição de campo – <i>as built</i>)	7,0	15,0	19,0	40,0	3,0
2 (Condição ideal)	10,0	18,0	24,0	82,8	1,5

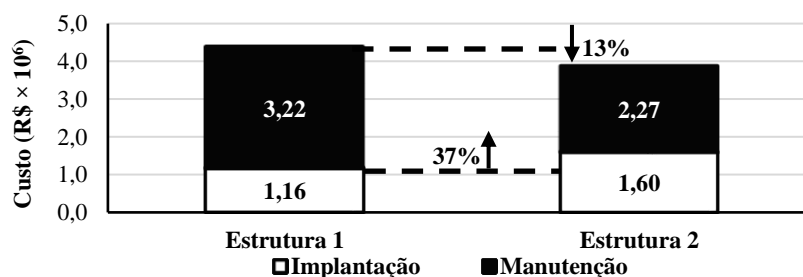


Figura 1: ACCV nas condições de campo (GC Baixo, Estrutura 1) em comparação à condição conforme ao projeto empírico do DNIT (GC Ótimo, Estrutura 2), considerando 1 km de rodovia

Na Figura 1, o custo de implantação de 1 km da Estrutura 2 (condição ideal – espessuras

conforme as recomendações do método do DNIT e GC em 100%) foi aproximadamente 37% maior do que o mesmo custo da Estrutura 1 (condição de campo – espessuras de camadas e GC do *as built*). Porém, o custo de ciclo de vida (soma do custo de implantação e do custo de manutenção) da Estrutura 1 foi, aproximadamente, 13% maior do que o da Estrutura 2. Em termos monetários, a Estrutura 1 custaria R\$ 510.000 a mais do que a Estrutura 2 para cada km de rodovia de 14 m de largura. Quando se considera a extensão total do pavimento (38 km), esse valor resultaria em R\$ 19.380.000. Isso evidencia que dispor de um projeto adequado e métodos construtivos confiáveis pode otimizar o emprego de recursos financeiros em obras de infraestrutura de transportes, o que pode, ao menos parcialmente, ter seu custo estimado usando ferramentas atualmente disponíveis no Brasil.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo investigou o efeito da variação do GC e das espessuras de camadas de pavimentos asfálticos em seu custo de ciclo de vida. Foram comparadas duas situações distintas: a estrutura conforme levantamento realizado em campo (*as built*), que revelou espessuras e GC fora de conformidade; e a estrutura redimensionada conforme metodologia empírica do DNIT. As estruturas foram comparadas com base em simulações mecanístico-empíricas de trincamento usando o *software* MeDiNa. Os resultados indicam que, embora a redução no custo de implantação seja observada nas condições de campo devido a inconformidades nas espessuras e nos GCs, há um aumento no custo dos ciclos de manutenção ao longo do ciclo de vida da rodovia. Estruturas com espessuras reduzidas e com problemas de compactação tendem a deteriorar mais rapidamente, resultando em uma maior frequência de intervenções de manutenção, portanto maiores custos de manutenção, em valor superior à economia na implantação. As discrepâncias observadas entre o projeto real e o método empírico do DNIT indicam a necessidade de revisões nos processos de planejamento e supervisão das obras rodoviárias, como evidencia o estudo de caso real ora apresentado. Além disso, os resultados das ACCVs demonstram que investimentos iniciais em conformidade com as recomendações podem resultar em economias significativas nos custos de manutenção a longo prazo. Sublinha-se a importância do controle tecnológico rigoroso em obras de pavimentação rodoviária, não apenas para assegurar a conformidade com as especificações de dimensionamento, mas também para a qualidade dos processos construtivos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Tribunal de Contas do Estado do Ceará (TCE-CE), por meio do projeto de pesquisa No. 11704975/2021, e ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por meio do TED No. 679/2020, pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa e pelas bolsas concedidas aos autores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, A.P.F. (2005) Influência da energia e da temperatura de compactação nos parâmetros volumétricos e nas propriedades mecânicas dos concretos asfálticos. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Bernucci, L.B.; Motta, L.M.G.; Ceratti, J.A.P.; Soares, J.B. (2022) Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2ª edição. Rio de Janeiro.
- Cardoso, M.F.C.; Oliveira, J.A.; Bessa, I.S.; Babadopulos, L.F.A.L.; Gouveia, BCS.; Soares, J.S. (2024) *Strategies for life-cycle cost analysis based on mechanistic-empirical performance prediction for asphalt pavements designed by different approaches*. In: ISAP Conference.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006a). Manual de pavimentação. 3ª edição. Rio de Janeiro.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2022a) Pavimentação – base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço (DNIT 141/2022).
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2022b) Pavimentação – sub-base estabilizada



- granulometricamente – especificação de serviço (DNIT 139/2022).
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006b) Pavimentos flexíveis - concreto asfáltico – especificação de serviço (DNIT 031/2006).
- Goli, A.; Hooshangi, H.; Kazemi, M. (2022) *Investigating the effect of compaction level and aggregate grading of stone materials*. In: *Base Layer on Bitumen Penetration Rate. Civil Engineering Infrastructures Journal*, v. 55, n. 2, p. 395-405. DOI: 10.22059/CEIJ.2021.317415.1737
- Oliveira, J.A.; Cardoso, M.F.C.; Silva, S.A.T.; Bessa, I.S.; Farias, M. M.; Babadopulos, L.F.A.L.; Gouveia, B.C. S.; Soares, J.B. (2024) Análise de custos de implantação e de manutenção de rodovias dimensionadas por métodos empírico e mecanístico-empírico. In: *Transportes*, 32(2). <https://doi.org/10.58922/transportes.v32i2.2936>.
- SOP – Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará. (2020) Especificações técnicas rodoviárias.
- Souza, L.P.; Motta, R. S. (2018) *Life-cycle analysis for a pavement sustainable project in Brazil*. In: *International Society for Asphalt Pavements – ISAP Conference*.
- Vieira, G.A.; Kunert, R.F. (2020) *Evaluation of the life cycle and the use of recyclable materials in paving*. In: *International Journal of Geoscience, Engineering and Technology*.

Jardel Andrade de Oliveira (jardel.oliveira@unichristus.edu.br)

Centro Universitário Christus

Av. Dom Luís, 911, Meireles, Fortaleza, Ceará, Brasil

Iuri Sidney Bessa (iuri@det.ufc.br)

Jorge Barbosa Soares (jsoares@det.ufc.br)

Universidade Federal do Ceará

Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, CT-Asfalto N/NE, bloco 734, Fortaleza, Ceará, Brasil

Antônio Alves Ferreira Júnior (antonio.ferreira@tce.ce.gov.br)

Arielton Fonteles Araújo (arielson.araujo@tce.ce.gov.br)

Gustavo Pinheiro Moreira (gustavo.moreira@tce.ce.gov.br)

Tribunal de Contas do Estado do Ceará

Rua Sena Madureira, 1047, Centro, Fortaleza, Ceará, Brasil