EFEITO DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS NA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO A PARTIR DE ANÁLISES MECANÍSTICAS

EFFECT OF INTERLAYER ADHERENCE CONDITIONS ON PAVEMENT SERVICE LIFE ESTIMATION THROUGH MECHANISTIC ANALYSES

Raul Tadeu Lobato Ferreira - raul.ferreira@ufmt.br - https://orcid.org/0000-0003-3789-8160
Márcio Muniz de Farias - muniz@unb.br - https://orcid.org/0000-0002-5257-911X
Lucas Fermi Pereira de Oliveira - lucas.fermi@outlook.com - https://orcid.org/0009-0003-3638-2194
Hermes Wiliam Bressanin - hermes.bressanin@dnit.gov.br - https://orcid.org/0000-0002-0037-3574
Luiz Guilherme Rodrigues de Mello - luiz.mello@dnit.gov.br - https://orcid.org/0000-0002-1507-0154

RESUMO: O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa) é composto por três diferentes programas computacionais para dimensionamento de pavimentos asfálticos, com a análise de tensões, deformações e deslocamentos realizada pelo programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC). Para a análise estrutural, a rotina AEMC leva em conta a condição de aderência entre as camadas, que no MeDiNa é definida em função da posição e da tipologia das camadas (granular, estabilizada ou asfáltica). O presente estudo apresenta uma análise comparativa entre o AEMC e outras ferramentas de análise de tensões e deformações em sistemas de camadas elásticas, variando as condições de aderência entre camadas. Os valores de tensão, deformação e deslocamento obtidos no AEMC para a estrutura de pavimento proposta, para uma mesma condição de aderência, apresentam pouca diferença em relação aos valores obtidos recorrendo a outras ferramentas de análise. De modo geral, as deflexões, tensões e deformações obtidas para camadas não aderidas são mais conservadoras. Nesse sentido, as condições de aderência entre camadas pré-estabelecidas na versão atual do MeDiNa, disponível para *download*, priorizam a integridade estrutural em detrimento da economia.

PALAVRAS-CHAVE: análise estrutural; MeDiNa; interface; vida útil; pavimento flexível.

ABSTRACT: *The National Pavement Design Method (MeDiNa) comprises three software for designing asphalt pavements, with stresses, strains, and displacements analysis performed by Multilayer Elastic Analysis (AEMC). For structural analysis, the AEMC routine takes into account the adherence condition between layers boundaries, which in MeDiNa is defined according to the layer position and typology (granular, stabilized, or asphaltic). The present study provides a comparative analysis between AEMC and other stress and strain analysis tools in elastic layer systems, varying the interlayer adherence conditions. The stress, strains, and displacement values obtained by AEMC for the proposed pavement structure, under the same adherence condition, show little difference compared to values obtained using other analysis tools. In general, the displacements, stresses, and strains obtained for unbonded conditions are more conservative. Concerning adherence conditions between layers pre-established in*

Submetido em 26/06/2023 e aceito em 30/08/2023.
https://doi.org/10.70859/2764-9539.v2.n2.81

the current version of MeDiNa, available for download, structural integrity prevails to the detriment of the economy.

KEYWORDS: *structural analysis; MeDiNa; interface adherence; service life; flexible pavement.*

1. INTRODUÇÃO

Devido a sua simplicidade, a teoria da elasticidade é uma ferramenta frequentemente utilizada na análise e no dimensionamento de pavimentos (Loulizi; Al-Qadi e Elseifi, 2006). Essas estruturas consistem em sistemas estratificados que não podem ser representados por uma massa homogênea, principalmente pela diferença de rigidez dos materiais que a constituem (Huang, 2004; Medina e Motta, 2015). Buscando um modelo matemático que melhor representasse esses sistemas, Burmister (1943) desenvolveu a teoria do sistema de duas camadas e posteriormente essa solução foi ampliada para um sistema de três camadas. Com o avanço tecnológico e o aprimoramento dos computadores, a teoria tem sido aplicada para solução de sistemas multicamadas e vários programas computacionais foram desenvolvidos, facilitando o cálculo automático de tensões, deformações e deslocamentos.

As principais hipóteses para solução de sistemas de camadas elásticas são: (i) as camadas são homogêneas, e os materiais apresentam comportamento linear elástico e isotrópico; (ii) as camadas não têm peso e são ilimitadas na direção horizontal; (iii) todas as camadas possuem uma espessura finita, exceto a camada inferior (subleito), que é considerada semi-infinita; (iv) a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada; (v) na área carregada ocorrem apenas tensões normais; (vi) a carga aplicada é considerada estática e uniformemente distribuída em uma área de contato circular, ou seja, carregamento axissimétrico; (vii) a grandes profundidades, as tensões e as deformações são nulas; e (viii) as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência (Huang, 2004; Medina e Motta, 2015).

Na condição aderida, as tensões verticais e cisalhantes e os deslocamentos verticais e radiais devem ser os mesmos nas interfaces entre as camadas. Para interfaces sem aderência, apenas as tensões e os deslocamentos verticais são contínuos. As tensões cisalhantes se tornam nulas em ambos os lados da interface e os deslocamentos radiais relativos na interface são descontínuos, porém não nulos. As condições de aderência entre as camadas afetam de forma significativa o dimensionamento, sendo que o efeito da condição de aderência entre a camada de revestimento e a camada subjacente prepondera sobre o efeito das condições de aderência entre as demais camadas (Scherer *et al.*, 2016; Torquato e Silva; Souza e Soares, 2019). Para o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, a interface entre camadas pode ser caracterizada por um módulo de rigidez tangente (K_s), que assume valor nulo para a condição não aderida e tende ao infinito para a condição totalmente aderida (DNIT, 2020).

Quanto maior a rigidez ao cisalhamento da interface, menores são os deslocamentos relativos para um mesmo nível de tensão cisalhante, e maior é a vida útil do pavimento. No entanto, apesar de a aderência total entre camadas ser desejável, não se conhecem atualmente suas condições reais. Por esse motivo, sua consideração pode levar ao subdimensionamento da estrutura. Da mesma

forma, a consideração de interfaces sem nenhuma aderência também é irreal, o que poderia resultar em pavimentos superdimensionados e, consequentemente, mais onerosos (Khweir e Fordyce, 2003; Toffoli, 2021). As ferramentas de projeto geralmente dimensionam as estruturas de pavimentos flexíveis, assumindo aderência total entre a camada de revestimento e a camada subjacente (Torquato e Silva, 2017).

Diante do cenário de implementação do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), o presente estudo busca realizar uma simulação comparativa entre as respostas do AEMC e as obtidas no KENLAYER e no ELSYM5, considerando o efeito das condições de aderência na estimativa da vida útil de pavimentos asfálticos.

2. METODOLOGIA

A metodologia empregada tem como finalidade avaliar o efeito das condições de aderência na estimativa da vida útil de um pavimento asfáltico. Para isso, foi proposta uma estrutura de pavimento flexível, que foi analisada considerando e desconsiderando a aderência entre camadas. A vida útil da estrutura proposta nas diferentes condições foi estimada recorrendo a diferentes modelos de previsão de desempenho.

2.1. FERRAMENTAS DE SOLUÇÃO ANALÍTICA

Atualmente, encontra-se disponível uma gama de programas computacionais para o cálculo de deslocamentos, deformações e tensões em pavimentos flexíveis usando a teoria de múltiplas camadas elásticas. Visando validar o MeDiNa em relação a outros programas de análise tensão-deformação, a estrutura proposta foi analisada por três ferramentas: (i) AEMC (pacote MeDiNa); (ii) ELSYM5; e (iii) KENLAYER.

2.1.1. ANÁLISE ELÁSTICA DE MÚLTIPLAS CAMADAS (AEMC)

O programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), desenvolvido por Franco (2007), calcula tensões e deformações em estruturas de pavimentos com até oito camadas sob carregamento de rodas do tipo eixo rodoviário. A estrutura geral de cálculo utiliza a integração de Gauss-Laguerre no cálculo das equações integrais, e as hipóteses fundamentais da solução computacional baseiam-se nas mesmas consideradas na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos (DNIT, 2020). Para o perfeito funcionamento do programa, o projetista deve atentar-se para o uso correto das unidades das grandezas físicas utilizadas no programa, conforme o que é apresentado na Tabela 1.

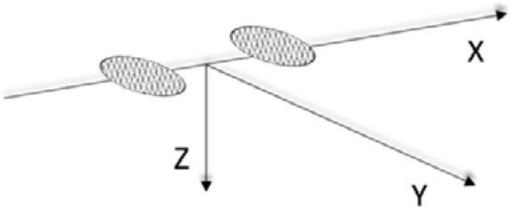
Tabela 1 – Grandezas e Unidades

Grandeza	Unidade
Espessuras e distâncias	cm
Raio do carregamento	cm
Deslocamentos	μm
Deformações específicas	m/m
Área de contato	cm²
Pressão de inflação e tensões	MPa
Carga de eixo ou de roda	ton

Fonte: DNIT (2020, p. 18)

O sistema de coordenadas x, y e z assumido no programa é o indicado na Figura 1.

Figura 1 – Sistema de coordenadas AEMC



Fonte: DNIT (2020, p. 19)

Os valores positivos de tensão e deformação normais indicam que o ponto está em compressão, enquanto os valores negativos indicam tração.

Os materiais das diferentes camadas podem ser considerados como elásticos lineares ou não lineares. No que diz respeito às condições de aderência, o programa faz uma modelagem física similar à teoria de molas a fim de permitir o movimento horizontal relativo na interface entre duas camadas. Para simular a aderência entre camadas, o AEMC utiliza um parâmetro adimensional (l) que se relaciona com o módulo de rigidez que resiste ao deslocamento radial relativo ao longo da interface. Para simular a condição não aderida, deve ser atribuído o valor $l = 0$ (zero), e, para a condição totalmente aderida, deve ser atribuído o valor $l = 1$ (um) (DNIT, 2020). A partir desse parâmetro de entrada, seria possível estimar a rigidez tangente (K_s) por meio da seguinte expressão:

$$K_s = \frac{l}{1 - l} \qquad (1)$$

Apesar de o programa MeDiNa, em sua versão atual, predefinir as condições de aderência com base no tipo e posição das camadas, no AEMC é possível conduzir análises atribuindo valores intermediários ao parâmetro de aderência (l). Entretanto, Toffoli (2021) demonstrou que a rigidez ao cisalhamento (K_s) é pouco sensível ao parâmetro de entrada (l), usando a fórmula da Equação 1, apresentando variações em relação à condição de interface sem aderência a partir de valores de $l = 0{,}99$.

A carga de roda é assumida no programa como sendo uniformemente distribuída em uma área de contato circular entre o pneu e a superfície do pavimento. A pressão de contato entre o pneu e o pavimento é assumida como sendo igual à pressão de inflação dos pneus, e o tamanho da área de contato depende da carga de roda e da pressão de inflação dos pneus (DNIT, 2020). O programa possibilita a obtenção de deslocamentos, deformações e tensões, sob condições axissimétricas, considerando o eixo padrão rodoviário, eixos simples, eixos duplos, eixos tipo tandem e eixos especiais. Para considerar a influência de mais de um pneu, o programa recorre à superposição de efeitos, apesar de esta hipótese ser questionável para materiais com comportamento não linear (Farias; Monteiro, 1996). Os resultados podem ser obtidos considerando tanto o semieixo como o eixo completo na análise.

2.1.2. ELASTIC LAYER SYSTEM MODEL 5 (ELSYM5)

O *Elastic Layer System Model* 5 (ELSYM5), escrito em linguagem Fortran e desenvolvido na Universidade da Califórnia em Berkeley (Kopperman; Tiller; Tseng, 1986), é um dos programas mais utilizados para o cálculo de deslocamentos, deformações e tensões em sistemas de camadas elásticas. As hipóteses básicas relativas ao sistema de camadas elásticas admitidas nesse programa são as mesmas de Burmister, e as condições de contorno e continuidade exigem o contato

contínuo das camadas (considera apenas a condição de total aderência entre camadas) (Pinto e Preussler, 2010; Medina e Motta, 2015).

O ELSYM5 admite cargas verticais uniformemente distribuídas em uma área circular, e o princípio da superposição é utilizado para considerar o efeito de várias cargas, que são caracterizadas por dois de três valores de entrada: carga, pressão do pneu e raio da área carregada (o usuário atribui dois desses valores e o programa calcula o terceiro). Segundo Balbo (2007), o programa é adimensional, bastando apenas que os parâmetros sejam informados em unidades coerentes. O programa pode aceitar um total de cinco camadas e até 10 cargas circulares normais, apresentando os resultados para até 10 profundidades distintas (coordenadas verticais). O sistema tridimensional utiliza as coordenadas x e y, em um plano horizontal, e a coordenada z representa a profundidade no sistema de camadas. A coordenada z é positiva verticalmente para baixo, com a origem na superfície. A convenção de sinais é negativa para tensões e deformações normais de compressão e positiva para tensões e deformações normais de tração (Pinto e Preussler, 2010).

2.1.3. KENLAYER

O programa computacional KENLAYER, desenvolvido e documentado por Huang (2004), é aplicável a pavimentos flexíveis. A função principal do programa é a solução de um sistema de camadas elásticas submetido a um carregamento distribuído em uma área circular (axissimétrico), utilizando regras de quadratura de Gauss para solucionar o sistema de equações. O KENLAYER, juntamente com o programa de entrada LAYERINP e o programa gráfico LGRAPH, é parte de um pacote de programas chamado KENPAVE. O KENPAVE foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação *Visual Basic* e pode ser utilizado em computadores com sistema operacional *Windows 95* ou versões superiores.

O cálculo de tensões e deformações pode ser feito em estruturas com até 19 camadas, em até 10 coordenadas radiais diferentes, e em até 19 profundidades diferentes (coordenadas verticais). O programa permite atribuir comportamento linear elástico, elástico não linear ou viscoelástico para os materiais das diferentes camadas. Além disso, possibilita a análise de dano, e as interfaces entre camadas podem ser especificadas como aderidas ou não aderidas (Huang, 2004).

O carregamento é caracterizado pelo raio da área carregada, pressão de contato e pelo espaçamento entre rodas e entre eixos. As propriedades dos materiais e demais parâmetros para caracterização da estrutura podem ser inseridos considerando o Sistema Internacional de Unidades ou o Sistema Imperial Britânico. O sistema de coordenadas utiliza as coordenadas x e y, no plano horizontal, e as coordenadas z, no plano vertical. A convenção de sinais é positiva para tensões e deformações normais de compressão, e negativa para tensões e deformações normais de tração.

2.2. ESTRUTURA PROPOSTA

Com intuito de comparar os resultados obtidos nos programas citados, tomou-se uma estrutura de pavimento flexível, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 2, assumindo comportamento elástico linear para todas as camadas. Os valores de módulo de Young e coeficiente de Poisson foram propostos com base nas recomendações da Instrução de Projeto IP-DE-00/001 do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER-SP, 2006).

Tabela 2 – Camadas e propriedades dos materiais

Camada	Módulo de Young (MPa)	Coeficiente de Poisson	Espessura (cm)
Revestimento	3500	0,30	10,0
Base	300	0,35	15,0
Sub-base	250	0,35	20,0
Subleito	100	0,40	-

Fonte: Elaboração própria

2.3. MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO

O impacto das condições de aderência foi avaliado estimando a vida útil do pavimento segundo critérios de fadiga da camada de revestimento e de afundamento de trilha de roda.

A vida de fadiga é um dos principais critérios utilizados no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos e está diretamente relacionada às tensões ou deformações horizontais de tração nas fibras inferiores da camada asfáltica (Yu *et al*., 2012). Alguns modelos de desempenho também relacionam a vida de fadiga com as propriedades da mistura asfáltica, como módulo de elasticidade, temperatura, e composição da mistura (Pinto e Preussler, 2010; Elnashar, Bhat e Sedaghati, 2019). A relação entre a vida de fadiga e a deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento, sob o centro de aplicação da carga de uma das rodas, foi analisada conforme a expressão a seguir:

$$N_{f1} = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k_2} \quad (2)$$

onde N_{f1}é o número de repetições da carga para ruptura por fadiga, ε_t é a deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento, e k_1 e k_2 são coeficientes experimentais determinados por regressão. Os modelos de previsão de vida de fadiga propostos na instrução de projeto IP-DE-00/001 (DER-SP, 2006) foram utilizados para estimativa de N_{f1}. Os coeficientes de cada modelo, para deformação adimensional (em decimais), são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes dos modelos de vida de fadiga recomendados pelo DER-SP (2006)

Modelo	Autor	Ano	k_1	k_2
A	*Federal Highway Administration*	1976	$1{,}092 \times 10^{-6}$	3,512
B	*Asphalt Institute*	1976	$2{,}961 \times 10^{-5}$	3,291
C	Barker, Brabston & Chou	1977	$9{,}7 \times 10^{-10}$	4,03
D	Pinto & Preussler	1980	$2{,}85 \times 10^{-7}$	3,69

Fonte: DER-SP (2006, p. 25)

Ao utilizar as equações recomendadas pela instrução de projeto IP-DE-00/001 (DER-SP, 2006), deve-se considerar que o N_{f1} obtido é correspondente ao prescrito pela metodologia da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), e que a expressão do *Asphalt Institute* foi simplificada para se ajustar ao formato da Equação 2, adotando um módulo de Young de 3000 Mpa, volume de betume de 13,5 % e volume de vazios de 4 %.

O desempenho quanto à fadiga também foi avaliado com base no máximo deslocamento vertical recuperável no topo do revestimento, pelo modelo de desempenho proposto por Elliott e Thompson (1985), conforme a expressão a

seguir:

$$N_{f2} = 5{,}6 \times 10^{11} \times \frac{1}{U_v{}^{4{,}6}} \quad (3)$$

onde N_{f2} é a vida útil do pavimento e U_v é o deslocamento vertical recuperável medido no topo do revestimento, expresso em 10^{-3} polegadas.

A previsão de desempenho para o critério de deformação permanente em função da deformação elástica vertical atuante no topo do subleito foi feita conforme a expressão a seguir:

$$N_{f3} = k_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^{k_4} \quad (4)$$

onde N_{f3} é o número equivalente de solicitações da carga do eixo rodoviário, ε_v é a deformação vertical de compressão no topo do subleito, e k_3 e k_4 são coeficientes experimentais determinados por regressão. Os modelos de previsão de vida útil, segundo esse critério, foram os propostos pela instrução de projeto IP-DE-00/001 (DER-SP, 2006) para estimativa de N_{f3}. Os coeficientes de cada modelo, para deformação adimensional (em decimais), são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes dos modelos para determinação do limite de ruptura plástica

Modelo	Autor	Ano	k_3	k_4
A	Dormon & Metcalf	1965	$6{,}069 \times 10^{-10}$	4,762
B	Shell (50% de confiabilidade)	1985	$6{,}15 \times 10^{-7}$	4,0
C	Shell (85% de confiabilidade)	1985	$1{,}94 \times 10^{-7}$	4,0
D	Shell (95% de confiabilidade)	1985	$1{,}05 \times 10^{-7}$	4,0
E	Santucci	1984	$1{,}338 \times 10^{-9}$	4,484

Fonte: DER-SP (2006, p. 26)

Ao utilizar as equações recomendadas pelo DER-SP (2006), deve-se considerar que o N_{f3} obtido é correspondente ao prescrito pela metodologia da *United States Army Corps of Engineers* (USACE).

2.4. ETAPAS E CENÁRIOS DE ANÁLISE

Para atingir os objetivos propostos, o presente estudo foi dividido em duas etapas: (i) etapa de comparação entre o AEMC e outros programas computacionais; e (ii) etapa de análise do efeito das condições de aderência. Em todas as etapas foram consideradas duas condições extremas de aderência: interfaces aderidas, designadas como AD, e interfaces não aderidas, designadas como NAD.

Na etapa de comparação, foram obtidos os valores de tensão, deformação e deslocamento ao longo da espessura das camadas, considerando um semieixo simples (eixo simples com roda simples). Os resultados obtidos por cada uma das ferramentas de análise foram comparados entre si de forma qualitativa e quantitativa. Na análise quantitativa decidiu-se pela avaliação das bacias de deslocamentos verticais e dos valores de deformação horizontal por serem parâmetros comumente utilizados em modelos de previsão de desempenho (Pinto e Preussler, 2010).

A proximidade entre as bacias de deslocamento vertical obtida para uma mesma condição de aderência foi avaliada pela raiz quadrática média dos erros percentuais (RMSE), expressa por:

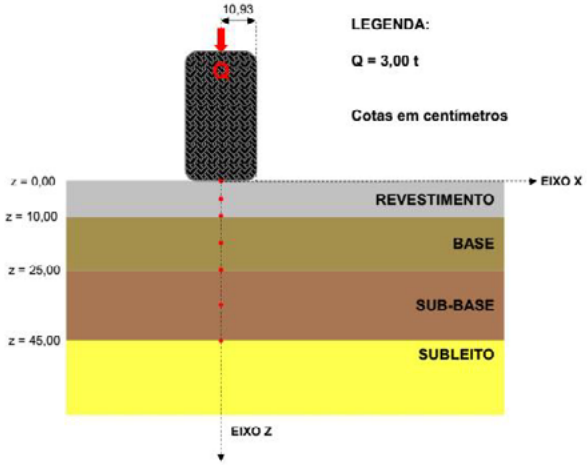
$$RMSE(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{d_{calculada} - d_{referência}}{d_{referência}}\right)^2} \quad (5)$$

onde n é o número de pontos de deslocamentos na bacia, $d_{calculada}$ é o valor de deslocamento obtido com as ferramentas de solução analítica (KENLAYER ou ELSYM5), e $d_{referência}$ é o valor

de deslocamento de referência, obtido no AEMC. Quanto menor o valor de RMSE, melhor o grau de aproximação entre as bacias (Silvério, 2021).

Na Figura 2, apresentam-se, de forma esquemática, as características do carregamento e a localização dos pontos na estrutura para obtenção dos deslocamentos, deformações e tensões, na etapa de comparação. Nos limites das camadas os resultados, foram obtidos na interface e em pontos imediatamente acima e imediatamente abaixo ($\Delta_Z = \pm 0{,}01\ cm$).

Figura 2 – Carregamento e pontos de avaliação na estrutura (etapa de comparação)

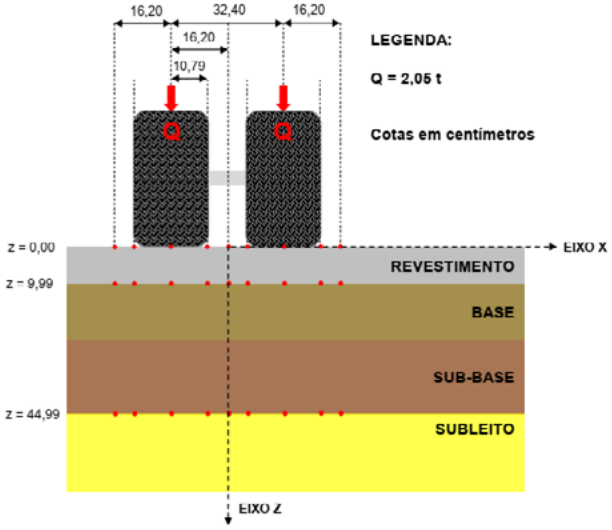


Fonte: Elaboração própria

Na etapa de análise do efeito das condições de aderência, foram considerados apenas os valores obtidos pelo AEMC. Foram calculadas as deformações horizontais, deslocamentos e deformações verticais na superfície e nas interfaces, considerando o semieixo rodoviário padrão. Os resultados obtidos para cada condição de aderência foram comparados, estimando-se a vida útil do pavimento por meio dos modelos de previsão de desempenho.

As características do carregamento e a localização dos pontos na estrutura para obtenção dos deslocamentos, deformações e tensões, na etapa de análise do efeito das condições de aderência, são apresentados de forma esquemática na Figura 3.

Figura 3 – Carregamento e pontos de avaliação na estrutura na análise das condições de aderência



Fonte: Elaboração própria

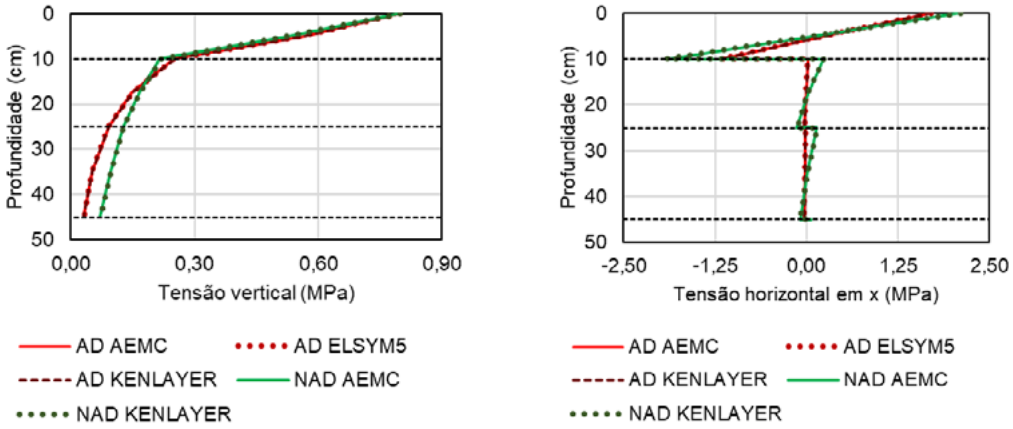
3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos considerando a estrutura e os cenários propostos. Primeiramente, é apresentada a comparação dos cálculos mecanísticos do AEMC, e, na sequência, é feita uma análise do impacto das condições de aderência.

3.1. COMPARAÇÃO ENTRE O AEMC E OUTROS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Nas Figuras 4, 5 e 6, apresenta-se o comparativo entre os valores de tensões, deformações e deslocamentos, obtidos pelos diferentes programas computacionais, ao longo da espessura do pavimento, comparando as condições AD e NAD para um carregamento de semieixo com roda simples. Os valores obtidos foram convertidos de forma a se tornarem compatíveis com o sistema de unidade, o sistema de coordenadas e a convenção de sinais do AEMC.

Figura 4 – Tensões verticais e horizontais (aderido AD *versus* não aderido NAD)

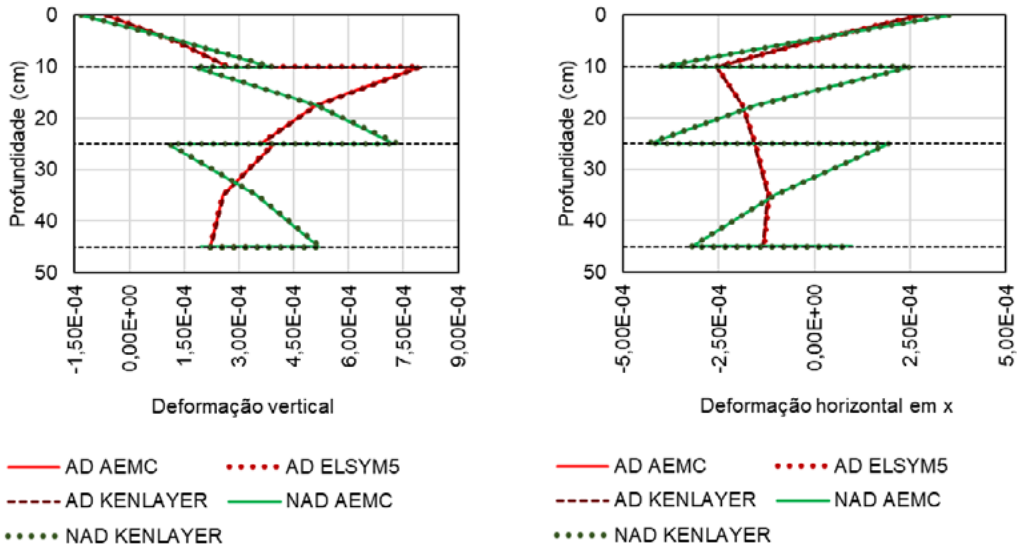


(a) Tensão vertical (b) Tensão horizontal

Fonte: Elaboração própria

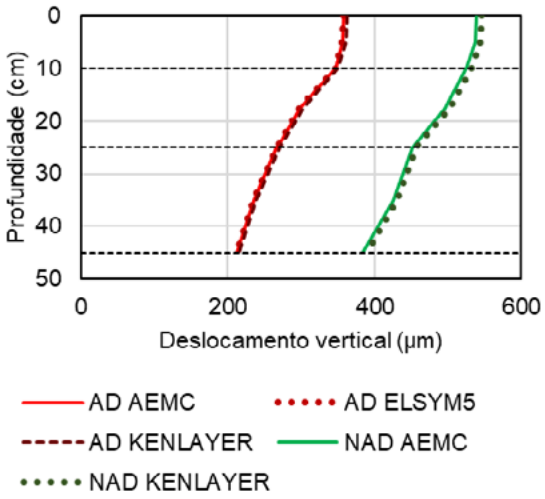
Figura 5 – Deformações verticais e horizontais (aderido AD versus não aderido NAD)

(a) Deformação vertical (b) Deformação horizontal



Fonte: Elaboração própria

Figura 6 – Deslocamentos verticais (aderido AD *versus* não aderido NAD)



Fonte: Elaboração própria

De modo geral, observa-se que os gráficos obtidos pelas diferentes ferramentas apresentam o mesmo comportamento, tanto para a condição aderida (AD), como para a condição não-aderida (NAD). Por se tratar de um carregamento simples (semieixo simples e roda simples), para a coordenada radial igual a 0 (zero), as tensões e deformações horizontais em y são iguais às tensões e deformações horizontais em x.

Como esperado, as tensões e os deslocamentos verticais são contínuos nos limites das camadas nas duas condições de aderência avaliadas; e diferentemente da condição aderida (AD), na condição não aderida (NAD) as deformações horizontais se tornam descontínuas nas interfaces. Nas Tabelas 5 e 6 apresentam-se respectivamente a variação dos valores de deformação horizontal e deslocamento vertical no topo da camada de revestimento e nas interfaces entre camadas, para a condição aderida (AD).

Em linhas gerais observa-se pouca variação nos valores obtidos pelas diferentes ferramentas de análise tensão-deformação. Para a condição aderida (AD), o comparativo qualitativo entre os gráficos e a pequena diferença entre os valores avaliados validam o AEMC em relação a outros programas computacionais, como KENLAYER e ELSYM5.

Tabela 5 – Variação das deformações horizontais - condição aderida, AD

z (cm)	AEMC (referência)	ELSYM5	Diferença	KENLAYER	Diferença
	(1)	(2)	[(2)-(1)]/(1) (%)	(3)	[(3)-(1)]/(1) (%)
0,00	2,74E-04	2,77E-04	1,09	2,74E-04	0,00
9,99	-2,55E-04	-2,55E-04	0,00	-2,57E-04	0,78
10,00	-2,55E-04	-2,56E-04	0,39	-2,57E-04	0,78
10,01	-2,55E-04	-2,56E-04	0,39	-2,57E-04	0,78
24,99	-1,56E-04	-1,55E-04	-0,64	-1,58E-04	1,28
25,00	-1,56E-04	-1,55E-04	-0,64	-1,57E-04	0,64
25,01	-1,56E-04	-1,55E-04	-0,64	-1,57E-04	0,64
44,99	-1,33E-04	-1,32E-04	-0,75	-1,35E-04	1,50
45,00	-1,33E-04	-1,32E-04	-0,75	-1,35E-04	1,50
45,01	-1,33E-04	-1,32E-04	-0,75	-1,35E-04	1,50

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6 – Variação dos deslocamentos verticais (μm) - condição aderida, AD

z (cm)	AEMC (referência)	ELSYM5	Diferença	KENLAYER	Diferença
	(1)	(2)	[(2)-(1)]/(1) (%)	(3)	[(3)-(1)]/(1) (%)
0,00	358,7	358,0	-0,20	362,7	1,12
9,99	346,8	347,0	0,06	351,1	1,24
10,00	346,7	347,0	0,09	351,0	1,24
10,01	346,6	346,0	-0,17	351,0	1,27
24,99	266,9	267,0	0,04	270,4	1,31
25,00	266,9	267,0	0,04	270,4	1,31
25,01	266,8	267,0	0,07	270,4	1,35
44,99	212,2	212,0	-0,09	215,1	1,37
45,00	212,2	212,0	-0,09	215,1	1,37
45,01	212,2	212,0	-0,09	215,0	1,32

Fonte: Elaboração própria

Nas Tabelas 7 e 8 apresentam-se respectivamente a variação dos valores de deformação horizontal e de deslocamento vertical no topo da camada de revestimento e nas interfaces, para a condição não-aderida (NAD).

Tabela 5 – Variação das deformações horizontais - condição não aderida, NAD

z (cm)	AEMC (referência)	KENLAYER	Diferença
	(1)	(2)	[(2)-(1)]/(1) (%)
0,00	3,52E-04	3,53E-04	0,28
9,99	-3,99E-04	-4,02E-04	0,75
10,00	2,53E-04	-4,03E-04	--
10,01	2,52E-04	2,55E-04	1,19
24,99	-4,32E-04	-4,37E-04	1,16
25,00	1,92E-04	-4,37E-04	--
25,01	1,91E-04	1,94E-04	1,57
44,99	-3,19E-04	-3,23E-04	1,25
45,00	9,80E-05	-3,23E-04	--
45,01	9,77E-05	9,90E-05	1,33

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6 – Variação dos deslocamentos verticais (μm) - condição não aderida, NAD

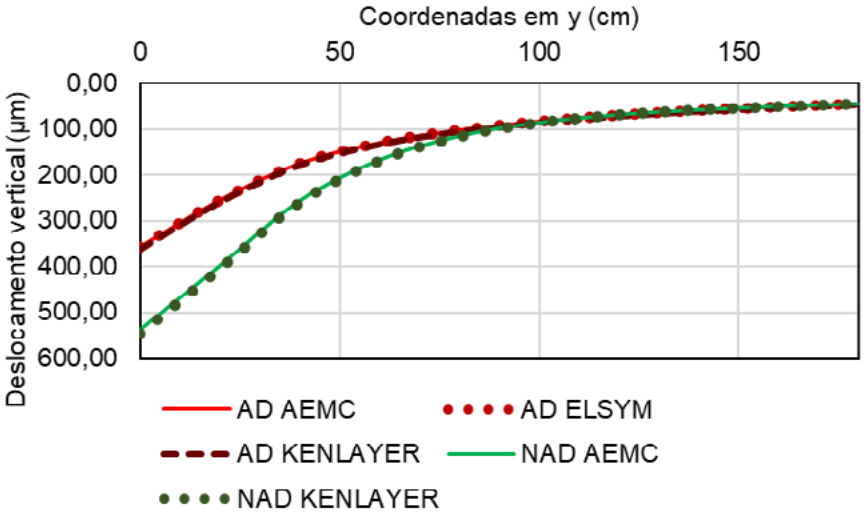
z (cm)	AEMC (referência)	KENLAYER	Diferença
	(1)	(2)	[(2)-(1)]/(1) (%)
0,00	539,2	545,6	1,19
9,99	525,5	532,2	1,27
10,00	525,4	532,1	1,28
10,01	525,4	532,1	1,28
24,99	451,4	457,4	1,33
25,00	451,4	457,3	1,31
25,01	451,3	457,3	1,33
44,99	383,6	388,8	1,36
45,00	383,6	388,7	1,33
45,01	383,5	388,7	1,36

Fonte: Elaboração própria

Para a condição sem aderência (NAD), o comparativo qualitativo entre os gráficos apresentados também valida o AEMC comparando-se os valores obtidos com o uso do KENLAYER. No que diz respeito aos deslocamentos verticais, assim como para a condição aderida (AD), observa-se uma pequena variação entre os valores na superfície e nas interfaces. Em relação às deformações horizontais, observa-se uma grande variação dos valores exatamente nas interfaces, enquanto deformações horizontais obtidas no AEMC são de compressão, as deformações horizontais obtidas no KENLAYER são de tração. A rigor, o valor é indefinido por se tratar de uma descontinuidade. No entanto, a variação dos valores de deformação horizontal para pontos imediatamente abaixo e imediatamente acima da interface ($\Delta_Z = \pm 0{,}01\ cm$) é baixa, o que ratifica o comportamento observado nos gráficos apresentados.

As bacias de deslocamentos verticais na superfície da camada de revestimento ($z = 0{,}00$) obtidas no AEMC, KENLAYER e ELSYM5 para as duas condições de aderência avaliadas são apresentadas na Figura 7 e nas Tabelas 9 e 10. Para gerar as bacias, foram obtidos os deslocamentos em 10 pontos ao longo do eixo y.

Figura 7 – Deslocamentos verticais no topo da camada de revestimento



Fonte: Elaboração própria

Tabela 9 – Deflexões e RMSE para a condição aderida, AD (1 µm = 0,1 × 10^{-2} mm)

y (cm)	Deflexões (µm)		RMSE (%)	Deflexões (µm)	RMSE (%)
	AEMC (referência)	ELSYM5		KENLAYER	
0,00	358,66	358,00	0,11	362,70	1,33
20,00	256,27	256,00		259,80	
40,00	175,82	176,00		178,20	
60,00	131,07	131,00		132,90	
80,00	103,16	103,00		104,60	
100,00	84,01	84,10		85,20	
120,00	70,16	70,20		71,10	
140,00	59,83	59,90		60,60	
160,00	51,94	52,00		52,60	
180,00	45,79	45,80		46,40	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 – Deflexões e RMSE para a condição não-aderida, NAD (1 μm = 0,1 × 10^{-2} mm)

y (cm)	Deflexões (μm)		RMSE (%)
	AEMC (referência)	KENLAYER	
0,00	539,20	545,60	1,35
20,00	399,26	404,70	
40,00	256,83	260,40	
60,00	166,90	169,20	
80,00	114,69	116,30	
100,00	85,10	86,30	
120,00	67,89	68,80	
140,00	57,16	57,90	
160,00	49,81	50,50	
180,00	44,32	44,90	

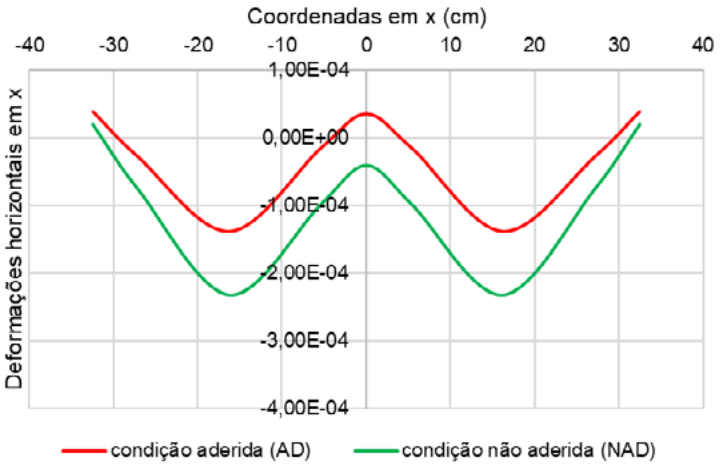
Fonte: Elaboração própria

A análise qualitativa das bacias apresentadas na Figura 7 e os baixos valores de RMSE corroboram a validação do AEMC em relação a outros programas de análise de tensão-deformação. Os valores de RMSE obtidos indicam boa correlação entre as bacias, segundo os critérios do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2020) e da *American Society for Testing and Materials* (1996).

3.2. ANÁLISE COMPARATIVA DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA

Na sequência, são apresentados os resultados obtidos no AEMC para os valores de interesse na análise mecanística da estrutura, comparando-se as condições AD e NAD para um carregamento de semieixo com as de roda dupla. Na Figura 8 e na Tabela 11 são apresentados os valores de deformação horizontal (ε_x) na fibra inferior (imediatamente acima da interface, $\Delta_Z = -\mathbf{0,01}$ cm) da camada de revestimento.

Figura 8 – Representação gráfica de ε_x na fibra inferior da camada de revestimento



Fonte: Elaboração própria

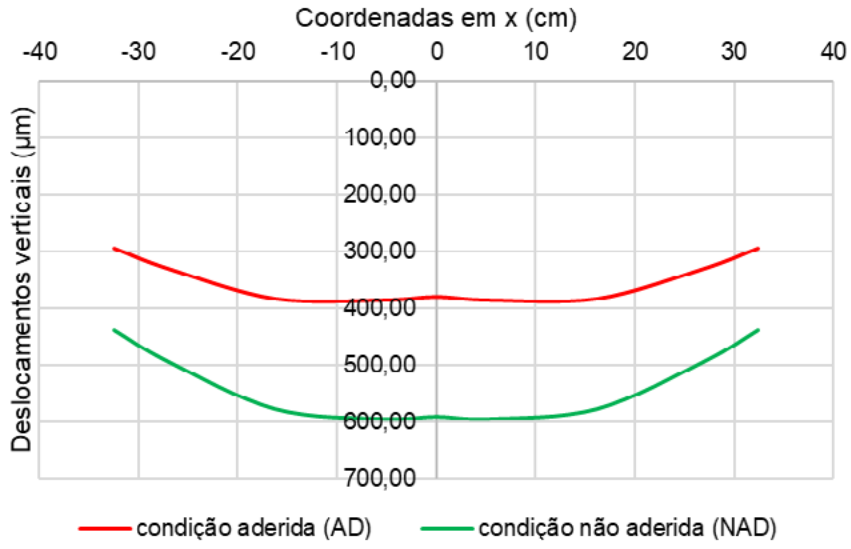
Tabela 11 – Deformações horizontais na fibra inferior da camada de revestimento

Coordenadas			ε_x		Diferença (%) [(2)-(1)]/(1)
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Aderido (AD) (1)	Não aderido (NAD) (2)	
-32,40	0,00	9,99	3,79E-05	1,95E-05	-48,55
-26,99	0,00	9,99	-2,99E-05	-7,71E-05	157,86
-16,20	0,00	9,99	-1,40E-04	-2,32E-04	65,71
-5,41	0,00	9,99	-1,65E-05	-9,87E-05	498,18
0,00	0,00	9,99	3,44E-05	-4,07E-05	--
5,41	0,00	9,99	-1,65E-05	-9,87E-05	498,18
16,20	0,00	9,99	-1,40E-04	-2,32E-04	65,71
26,99	0,00	9,99	-2,99E-05	-7,71E-05	157,86
32,40	0,00	9,99	3,79E-05	1,95E-05	-48,55

Fonte: Elaboração própria

De acordo com o valores obtidos, nos centros de aplicação da carga ($x = -16{,}20$ cm e $x = 16{,}20$ cm), verifica-se que, na condição não aderida, a deformação horizontal de tração na direção x é cerca de 66 % superior ao valor observado na condição aderida. O mesmo comportamento foi percebido ao analisar as deflexões na superfície do pavimento (U_v), cujos valores são apresentados na Figura 9 e na Tabela 12.

Figura 9 – Representação gráfica dos deslocamentos verticais no topo da camada de revestimento



Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 – Deslocamentos verticais no topo da camada de revestimento (1 µm = 0,1 × 10^{-2} mm)

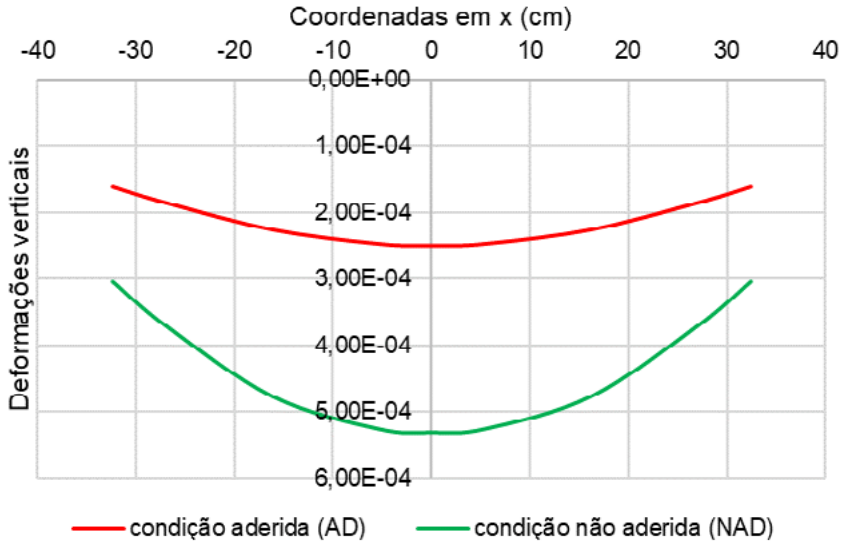
Coordenadas			U_v (µm)		Diferença (%) [(2)-(1)]/(1)
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Aderido (AD) (1)	Não aderido (NAD) (2)	
-32,40	0,00	0,00	294,81	440,44	49,40
-26,99	0,00	0,00	330,16	494,41	49,75
-16,20	0,00	0,00	382,91	577,24	50,75
-5,41	0,00	0,00	385,45	594,63	54,27
0,00	0,00	0,00	379,67	590,57	55,55
5,41	0,00	0,00	385,45	594,63	54,27
16,20	0,00	0,00	382,91	577,24	50,75
26,99	0,00	0,00	330,16	494,41	49,75
32,40	0,00	0,00	294,81	440,44	49,40

Fonte: Elaboração própria

Com base nos resultados apresentados, observa-se que os deslocamentos no topo da camada de revestimento na condição não aderida são cerca de 50 % maiores que os valores observados para a condição aderida, considerando a estrutura proposta. Isso certamente trará implicações na determinação de módulos por retroanálise com o BackMeDiNa, caso seja considerada uma ou outra condição extrema de aderência.

Os resultados das deformações verticais no topo do subleito são apresentados na Figura 10 e na Tabela 13. Os valores de defomação vertical (ε_v) na condição não aderida são maiores que na condição totalmente aderida. Na condição de camadas aderidas, o revestimento se comporta de forma mais rígida, absorvendo mais tensões verticais e transmitindo uma parcela menor para as camadas inferiores, como pode ser observado na Figura 4(a), na profundidade $z = 45$ cm.

Figura 10 – Representação gráfica das deformações verticais no topo do subleito



Fonte: Elaboração própria

Tabela 13 – Deformações verticais no topo do subleito

Coordenadas			ε_v		Diferença (%) [(2)-(1)]/(1)
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Aderido (AD) (1)	Não aderido (NAD) (2)	
-32,40	0,00	44,99	1,62E-04	3,04E-04	87,65
-26,99	0,00	44,99	1,86E-04	3,70E-04	98,92
-16,20	0,00	44,99	2,26E-04	4,76E-04	110,62
-5,41	0,00	44,99	2,47E-04	5,26E-04	112,96
0,00	0,00	44,99	2,50E-04	5,31E-04	112,40
5,41	0,00	44,99	2,47E-04	5,26E-04	112,96
16,20	0,00	44,99	2,26E-04	4,76E-04	110,62
26,99	0,00	44,99	1,86E-04	3,70E-04	98,92
32,40	0,00	44,99	1,62E-04	3,04E-04	87,65

Fonte: Elaboração própria

Com base nos resultados apresentados, observa-se que as deformações verticais no topo do subleito, imediatamente acima da interface, são cerca de 100 % maiores para a condição não aderida.

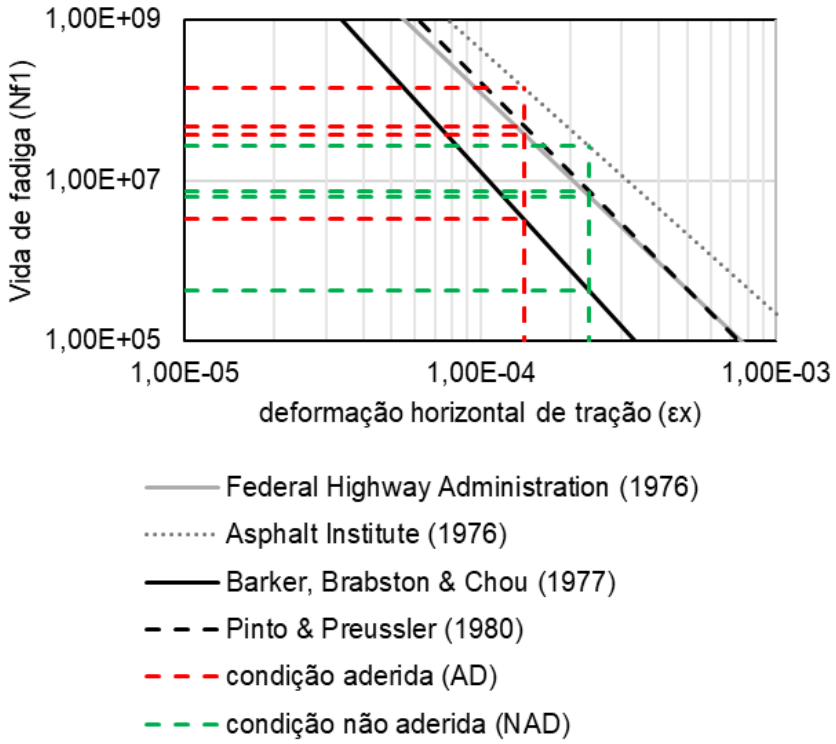
Em resumo, com base no comparativo apresentado, são observados maiores deslocamentos verticais, uma maior deformação horizontal de tração nos centros de aplicação do carregamento na fibra inferior da camada de revestimento, e uma maior deformação vertical no topo do subleito para a condição não aderida (NAD).

Na versão atual do MeDiNa, disponível para *download*, as condições de aderência são pré-estabelecidas em função do material e da posição da camada, existindo apenas as condições de interfaces sem aderência e totalmente aderidas. As únicas situações de total aderência são: (i) camada asfáltica sobre outra camada asfáltica; (ii) camada asfática sobre camada antirreflexão de trincas; e (iii) tratamento superficial sobre camadas asfálticas. Sendo assim, a condição não derida (NAD) é a que representa o comportamento da estrutura proposta ao ser analisada no MeDiNa.

3.3. EFEITO DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA NO DIMENSIONAMENTO

Buscando ampliar o entendimento dos efeitos da consideração de interfaces aderidas ou não aderidas no dimensionamento de um pavimento, a vida útil da estrutura proposta foi estimada recorrendo aos modelos de desempenho descritos no item 2.3, considerando a carga de um semieixo simples padrão rodoviário (ESP). Na Figura 11 e na Tabela 14, apresenta-se a estimativa da vida de fadiga, calculada com base na deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento nos centros de aplicação da carga no eixo x: $1{,}40 \times 10^{-4}$ e $2{,}32 \times 10^{-4}$, para as condições aderida (AD) e não aderida (NAD), respectivamente.

Figura 11 – Representação gráfica dos modelos de fadiga para estimativa de N_{f1}



Fonte: Elaboração própria

Tabela 14 – Vida de fadiga estimada com base na ε_x na fibra inferior da camada de revestimento (N_{f1})

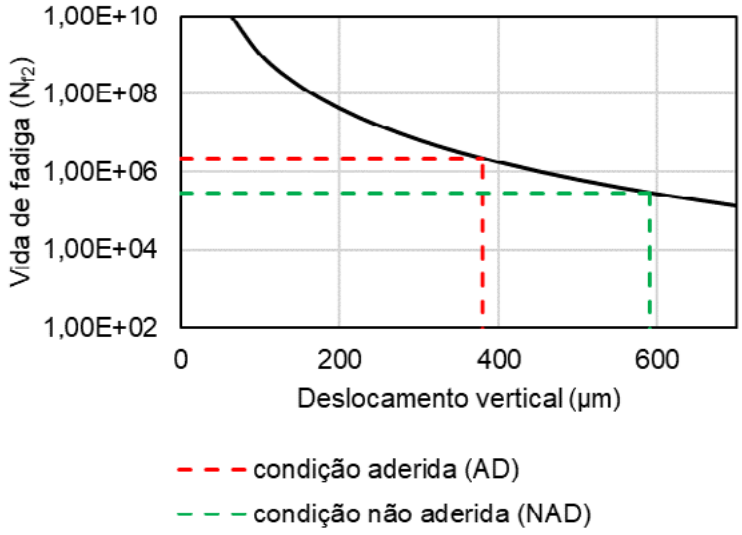
Modelo	Autor	N_{f1}		Diferença (%) [(2)-(1)]/(1)
		Aderido (AD) (1)	Não aderido (NAD) (2)	
A	*Federal Highway Administration*	3,74E+07	6,35E+06	-83,02
B	*Asphalt Institute*	1,43E+08	2,71E+07	-81,05
C	Barker, Brabston & Chou	3,30E+06	4,30E+05	-86,97
D	Pinto & Preussler	4,74E+07	7,35E+06	-84,49

Fonte: Elaboração própria

De modo geral, o número de passadas do ESP para atingir a vida de fadiga é cerca de 80 % a 90 % menor para a condição não aderida (NAD) em relação à condição de interfaces totalmente aderidas (AD).

O mesmo comportamento foi observado recorrendo à Equação 3 para previsão de desempenho do pavimento com base no deslocamento vertical na superfície do revestimento. A estimativa de vida útil em função da deflexão máxima medida entre os pneus da roda dupla do eixo padrão rodoviário é apresentada na Figura 12. A deflexão obtida no AEMC para as condições aderida (AD) e não aderida (NAD) é igual a 379,67 μm e 590,57 μm, respectivamente.

Figura 12– Representação gráfica do modelo para estimativa de N_{f2}

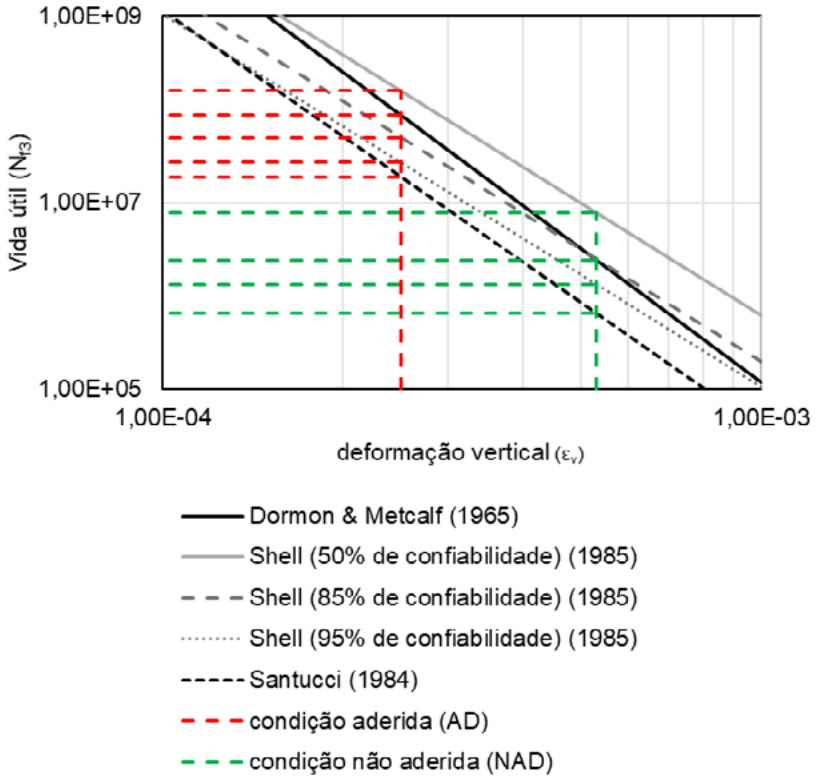


Fonte: Elaboração própria

Para a condição de interfaces totalmente aderidas, a vida de fadiga estimada foi de 2,21 × 10^6 ciclos de carga, e, para a condição de interfaces não aderidas, a vida de fadiga estimada foi de 2,90 × 10^5 ciclos de carga.

A estimativa de vida útil em função da deformação vertical atuante no topo do subleito é apresentada na Figura 13 e na Tabela 15. A deformação vertical máxima para as condições aderida (AD) e não aderida (NAD) é igual a 2,50 × 10^{-4} e 5,31 × 10^{-4}, respectivamente.

Figura 13 – Representação gráfica dos modelos para estimativa de N_{f3}



Fonte: Elaboração própria

Tabela 15 – Vida útil estimada com base na ε_v no topo do subleito (N_{f3})

Modelo	Autor	N_{f3}		Diferença (%) [(2)-(1)]/(1)
		Aderido (AD) (1)	Não aderido (NAD) (2)	
A	Dormon & Metcalf	8,63E+07	2,39E+06	-97,23
B	Shell (50% de confiabilidade)	1,57E+08	7,74E+06	-95,07
C	Shell (85% de confiabilidade)	4,97E+07	2,44E+06	-95,09
D	Shell (95% de confiabilidade)	2,69E+07	1,32E+06	-95,09
E	Santucci	1,90E+07	6,47E+05	-96,59

Fonte: Elaboração própria

A vida útil calculada pelos modelos baseados na deformação vertical no topo do subleito para a condição não-aderida (NAD) foi menor que para a condição aderida (AD), requerendo um número de passadas do ESP cerca de 95 % menor para atingir a condição de ruptura. Apesar de, em alguns casos, a vida de serviço estimada por esse critério (de deformação permanente) ser maior do que a prevista pelos demais critérios avaliados, vale ressaltar que, no Brasil, o principal defeito nos pavimentos flexíveis é o trincamento por fadiga, ou seja, na maioria dos casos, os pavimentos atingem os valores admissíveis de área trincada primeiro que os valores toleráveis de afundamento de trilha de roda (Pinto e Preussler, 2010).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para uma mesma condição de aderência, observa-se uma concordância significativa entre os comportamentos dos gráficos de deslocamento, tensão e deformação gerados com os valores provenientes do AEMC e aqueles oriundos dos outros *softwares* estudados. Em linhas gerais, isso valida a rotina de cálculo das variáveis mecanísticas (deslocamentos, deformações e tensões) no programa MeDiNa (AEMC), em relação aos valores teóricos decorrentes da teoria de múltiplas camadas elásticas.

De modo geral, os deslocamentos, deformações e tensões obtidas para a condição de interfaces não aderidas são mais elevadas em valores absolutos. Nesse sentido, as condições de aderência pré-definidas na versão atual do programa MeDiNa, disponível para *download*, são conservadoras e favoráveis à segurança. No entanto, essas condições podem gerar impactos econômicos significativos em termos de custo de implantação da rodovia.

O impacto das condições de aderência nas interfaces é melhor percebido ao estimar a vida de serviço do pavimento recorrendo a modelos de desempenho. Entre os modelos de desempenho avaliados, o modelo baseado no máximo deslocamento vertical recuperável no topo do revestimento se apresentou como o mais rigoroso, prevendo a menor vida útil nas duas condições de aderência avaliadas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5858 – 96** – Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory. 1996. 7 p.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BURMISTER, D. M. **The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways**. Proceedings, Highway Research Board, v. 23, p. 126-144, 1943.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **IP – DE – P00/001: Projeto de Pavimentação**. São Paulo: Secretaria dos Transportes. 2006. 53 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro. 2020. 78 p.

ELLIOTT, R. P.; THOMPSON, M. R. **Mechanistic Design Concepts for Conventional Flexible Pavements**. Transportation Engineering Series Nº 42. University of Illinois, Urbana, Illinois, United States, 1985.

ELNASHAR, G.; BHAT, R. B.; SEDAGHATI, R. Modeling pavement damage and predicting fatigue cracking of flexible pavements based on a combination of deterministic method with stochastic approach using Miner's hypothesis. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 229, p. 574-579, 2019.

FARIAS, M. M.; MONTEIRO, S. A. **Comparação entre análises bidimensionais axissimétricas com superposição de efeitos e análises tridimensionais aplicadas ao cálculo de tensões em pavimentos**. 30° Reunião Anual de Pavimentação, RAPv, Salvador, Bahia, Brasil, 1996.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. New Jersey: Pearson Education, 2004. 775 p.

KHWEIR, K.; FORDYCE, D. Influence of layer bonding on the prediction of pavement life. **Transport**, v. 156, n. 2, p. 73-83, 2003.

KOPPERMAN, S.; TILLER, G.; TSENG, M. **ELSYM5 Interactive microcomputer version**: User's manual for IBM-PC and compatible microcomputer. FHWA-TS-87-206. United States Department of Transportation. Federal Highway Administration, 1986.

LOULIZI, A.; AL-QADI, I. L.; ELSEIFI, M. Difference between In Situ Flexible Pavement Measured and Calculated Stresses and Strains. **Journal of Transportation Engineering**, v. 132, n. 7, p. 574-579, 2006.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. 620 p.

PINTO, S.; PREUSSLER. E. S. **Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro: Synergia, 2010. 220 p.

SCHERER, R. G. et al. **Influência da aderência entre camadas no desempenho esperado de pavimentos asfálticos**. 30° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, ANPET, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2016

SILVÉRIO, L. C. **Análise empírico-mecanística de pavimento asfáltico para verificação da influência dos módulos resilientes nos parâmetros de deformabilidade das camadas do pavimento e subleito**. 2021. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2021.

TOFFOLI, C. M. **Dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos: influência da condição de aderência na interface**. 2021. 80 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2021.

TORQUATO E SILVA, S. A. **Modelagem mecanístico-empírica da interface revestimento asfáltico-base granular**. 2017. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2017.

TORQUATO E SILVA, S. A.; SOUZA, W. A. R.; SOARES, J. B. **Método simplificado para a consideração da aderência entre camadas no dimensionamento de pavimentos asfálticos**. 33° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, ANPET, Balneário Camboriú, Santa Catarina, Brasil, 2019.

YU, J.; TSAI, B.; ZHANG, X.; MONISMITH, C. Development of asphalt pavement fatigue cracking prediction model based on loading mode transfer function. **Road Materials and Pavement Design**, v. 13, n. 3, p. 501-517, 2012.