



Relatório de Pesquisa IPR RP – 012

VALIDAÇÃO DO PROGRAMA MeDiNa POR MEIO DA COMPARAÇÃO COM FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS NO PROJETO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

BRASÍLIA/DF
JANEIRO/2026



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

Relatório de Pesquisa IPR RP – 012

VALIDAÇÃO DO PROGRAMA MeDiNa POR MEIO DA COMPARAÇÃO COM FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS NO PROJETO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Elaboração: Laboratório de Infraestrutura - INFRALAB/UnB

Termo de Execução Descentralizada - 352/2020 TED /IPR/DPP/DNIT SEDE

Processo: 50600.039998/2025-16

DOI: 10.70859/IPR-RP-012/2026

Brasília - DF
Janeiro/2026

EQUIPE TÉCNICA OU AUTOR:

Eng.º Márcio Muniz de Farias, PhD. – UnB

Eng.º Raul Tadeu Lobato Ferreira, MsC. – UnB

Eng.ª Andrea Cardona Perez DsC. – UnB

Eng.ª Letícia Nunes Lopes, DsC. – UnB

REVISÃO:

Eng.º Luiz Hélio Albuquerque Filho, DsC. – IPR

EDITORAÇÃO:

Eng.º Luiz Hélio Albuquerque Filho, DsC. – IPR

Eng.ª Victória Barbosa Costa Garcia Vieira - Consórcio Progen/HPT

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria-geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação-Geral do Instituto de Pesquisas em Transportes (IPR).

Validação do Programa MeDiNa por Meio da Comparação com Ferramentas Computacionais Utilizadas no Projeto de Pavimentos Asfálticos – Brasília-DF, 2026.

47 p. (Relatório de Pesquisa – IPR RP 012)

O conteúdo apresentado neste documento é de inteira responsabilidade dos autores.

A reprodução completa ou parcial desta publicação é permitida, sem alterar seu conteúdo, desde que não tenha fim comercial e que seja citada a referência bibliográfica completa.

RESUMO

Este documento relata o conjunto de atividades de pesquisa no escopo do projeto “Aprimoramento e consolidação do método mecanístico-empírico de dimensionamento para pavimentos rodoviários flexíveis (MeDiNa) e estudos complementares com geossintéticos e drenagem para pavimentos ferroviários”, financiado pelo DNIT por meio do Termo de Execução Descentralizada - 352/2020 TED /IPR/DPP/DNIT SEDE. A execução do projeto é liderada pela Universidade de Brasília, com início em maio de 2020. As atividades aqui apresentadas são referentes à Frente Rodoviária, especificamente inseridas na Meta III - “Protocolo para uso das diversas ferramentas do programa”, com ênfase na entrega do Produto “Validação do Programa MeDiNa por Meio da Comparação com Ferramentas Computacionais Utilizadas no Projeto de Pavimentos Asfálticos”.

Palavras-chave: Análise estrutural; MeDiNa; interface; aderência; pavimento flexível.

ABSTRACT

This document reports the set of research activities within the scope of the project "Improvement and consolidation of the mechanistic-empirical design method for flexible road pavements (MeDiNa) and complementary studies with geosynthetics and drainage for railway pavements", funded by DNIT through the Term of Decentralized Execution - 352/2020 TED /IPR/DPP/DNIT SEDE. The University of Brasília, starting in May 2020, leads the execution of the project. The activities presented here relate to the Road Front, specifically inserted in Goal III - "Protocol for using the program's tools", with emphasis on delivering the Product "Validation of the MeDiNa Program through Comparison with Computational Tools Used in Asphalt Pavement Design".

Keywords: Structural analysis; MeDiNa; interface; adherence; flexible pavement.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas

ELSYM5 – *Elastic Layer System Model 5*

MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos

AD – Interfaces totalmente aderidas

NAD – Interfaces sem aderência

le – *Target element dimension*

re – Tamanho relativo dos elementos

$x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ – Dimensões da geometria externa

K_S – Rigidez tangente

$RMSE$ – Raiz Quadrática Média dos Erros Percentuais

d_{calc_i} – Deslocamento vertical elástico calculado pelos programas ELSYM5, KENLAYER ou pelas ferramentas de solução numérica

d_{ref_i} – Deslocamento vertical elástico de referência calculado pelo programa AEMC

Δ (%) – Variação de valores em porcentagem

U_z – Deslocamento vertical elástico

ε_x – Deformação horizontal no eixo x

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de coordenadas AEMC	13
Figura 2 – Posição dos nós e pontos de Gauss nos elementos	15
Figura 3 – Posição dos nós (<i>nodes</i>) e pontos de Gauss (<i>stress points</i>) em elementos de interface.....	16
Figura 4 – Carregamento e pontos de avaliação na estrutura.....	20
Figura 5 – Representação do subdomínio (sem escala)	21
Figura 6 – Tensões verticais e horizontais (aderido <i>versus</i> não aderido)	23
Figura 7 – Deformações verticais e horizontais (aderido <i>versus</i> não aderido).....	23
Figura 8 – Deslocamentos verticais (aderido <i>versus</i> não aderido).....	24
Figura 9 – Deslocamentos verticais no topo da camada de revestimento	25
Figura 10 – Tensões verticais e horizontais (aderido <i>versus</i> não aderido)	27
Figura 11 – Deformações verticais e horizontais (aderido <i>versus</i> não aderido).....	28
Figura 12 – Deslocamentos verticais (aderido <i>versus</i> não aderido).....	28
Figura 13 – Deslocamentos verticais no topo da camada de revestimento.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Grandezas e unidades.....	12
Tabela 2 – Densidade da malha e tamanho relativo dos elementos.....	16
Tabela 3 – Características AEMC, ELSYM5, KENLAYER, SIGMA/W E PLAXIS 2D.	17
Tabela 4 – Camadas e propriedades dos materiais.....	19
Tabela 5 – Configurações da malha e condições de interface do SIGMA/W.....	21
Tabela 6 – Configurações da malha e condições de interface do PLAXIS 2D.....	22
Tabela 7 - Comparativo dos resultados obtidos pelo AEMC e pelos programas analíticos ELSYM5 e KENLAYER.....	26
Tabela 8 – Comparativo dos resultados obtidos pelo AEMC e pelos programas numéricos SIGMA/W e PLAXIS 2D.....	31
Tabela A1 – Parâmetros e convenções do modelo computacional AEMC (adaptado de DNIT, 2020).....	35
Tabela A.2 – Características gerais do programa ELSYM5 segundo Balbo (2007) e Pinto & Preussler (2010).....	36
Tabela A.3 – Características e parâmetros de cálculo do programa KENLAYER (adaptado de Huang, 2004).....	36
Tabela A.4 – Configuração da malha e modelagem de interfaces no SIGMA/W (GEO-SLOPE, 2013).....	37
Tabela A.5 – Configuração da malha e modelagem de interfaces no PLAXIS 2D (adaptado de Bentley Advancing Infrastructure, 2023).....	38
Tabela B.1 – Variação dos deslocamentos verticais (condição aderida).....	39
Tabela B.2 – Variação das deformações horizontais (condição aderida).....	40
Tabela B.3 – Variação dos deslocamentos verticais (condição não aderida).....	41
Tabela B.4 – Variação das deformações horizontais (condição não aderida).....	41
Tabela B.5 – Deflexões e RMSE para a condição aderida.....	42
Tabela B.6 – Deflexões e RMSE para a condição não aderida.....	43
Tabela C.1 – Variação dos deslocamentos verticais (condição aderida).....	44
Tabela C.2 – Variação das deformações horizontais (condição aderida).....	45
Tabela C.3 – Variação dos deslocamentos verticais (condição não aderida).....	46

Tabela C.4 – Variação das deformações horizontais (condição não aderida).....	46
Tabela C.5 – Deflexões e RMSE para a condição aderida.....	47
Tabela C.6 – Deflexões e RMSE para a condição não aderida.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	12
3	ESTRUTURA PROPOSTA E CENÁRIO DE ANÁLISE	19
4	VALIDAÇÃO DOS CÁLCULOS MECANÍSTICOS.....	22
4.1	FERRAMENTAS DE SOLUÇÃO ANALÍTICA.....	22
4.2	FERRAMENTAS DE SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	27
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
	APÊNDICE A	35
	APÊNDICE B	39
	APÊNDICE C	44

1 INTRODUÇÃO

Devido à sua simplicidade, a teoria da elasticidade é uma ferramenta frequentemente utilizada na análise e no dimensionamento de pavimentos (Loulizi; Al-Qdi; Elseifi, 2006). Essas estruturas consistem em sistemas estratificados que não podem ser representados por uma massa homogênea, principalmente em razão da 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 à solução de sistemas multicamadas, e vários programas foram desenvolvidos, facilitando o cálculo automático de tensões, deformações e deslocamentos.

No MeDiNa, a análise estrutural dos pavimentos é realizada com base nessa teoria de múltiplas camadas elásticas. Uma das principais hipóteses para a solução desses sistemas é que as condições de aderência entre camadas podem variar entre totalmente aderida e sem aderência, influenciando significativamente a distribuição dos esforços internos e o desempenho estrutural do pavimento.

Além das soluções analíticas, a modelagem numérica tem sido amplamente utilizada na engenharia para representar o comportamento de estruturas em condições reais. Grande parte dos programas computacionais comerciais que possibilitam essa modelagem recorre ao Método dos Elementos Finitos (MEF) para o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, baseando-se em modelos constitutivos que descrevem o comportamento dos materiais (Marinkovic e Zehn, 2019).

Visando validar o cálculo das variáveis mecanísticas do MeDiNa em relação a outros programas computacionais de análise tensão-deformação, foi proposta uma estrutura de pavimento que, em um primeiro momento, foi analisada pelas ferramentas: AEMC (pacote MeDiNa); ELSYM5; e KENLAYER. Também foi feita a modelagem computacional da estrutura, via MEF, nos programas SIGMA/W e PLAXIS 2D.

As análises foram realizadas considerando dois cenários de aderência entre camadas: interfaces totalmenteaderidas (AD) e interfaces sem aderência (NAD), sob o carregamento de um semieixo simples com roda simples.

2 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Neste tópico apresenta-se os programas computacionais que foram utilizados na validação do cálculo das variáveis mecanísticas do pacote MeDiNa.

2.1 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 formulação baseia-se na teoria da elasticidade linear aplicada a sistemas de multicamadas e contínuos, conforme apresentado pelo DNIT (2020), e utiliza a integração de Gauss-Laguerre para solução das equações integrais do problema.

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	cm ²
Pressão de inflação e tensões	MPa
Carga de eixo ou de roda	Ton

Fonte: DNIT (2020)

O sistema de coordenadas X, Y e Z assumido no programa é o indicado na Figura 1.

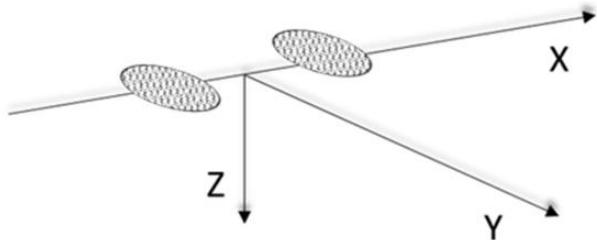


Figura 1 – Sistema de coordenadas AEMC

Fonte: DNIT (2020)

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 deste parâmetro de entrada seria possível estimar a rigidez tangente (K_s), expressa em kg/cm^3 , por meio da seguinte expressão:

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

Apesar de o programa MeDiNa, em sua versão atual, pré-estabelecer as condições de aderência em função do tipo e posição das camadas, no AEMC é possível conduzir análises atribuindo valores intermediários ao parâmetro de aderência (l).

2.2 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 *et al.*, 1986), constitui 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).

Em síntese, o programa ELSYM5 admite cargas verticais uniformemente distribuídas em áreas circulares e o princípio da superposição é utilizado para considerar o efeito de várias cargas, que são caracterizadas por dois de três valores de entrada, ou seja, o usuário atribui dois desses valores e o programa calcula o terceiro. Os valores de entrada do programa são carga, pressão do pneu, e raio da área carregada.

2.3 KENLAYER

O KENLAYER é um programa computacional desenvolvido e documentado por Huang (2004), amplamente utilizado na análise estrutural de pavimentos flexíveis. Sua principal função consiste na solução de um sistema de camadas elásticas submetido a um carregamento distribuído em uma área circular (axisimétrico).

O KENLAYER faz parte do pacote KENPAVE, composto pelos seguintes módulos:

- KENLAYER: cálculo das tensões, deformações e deslocamentos;
- LAYERINP: voltado à preparação e entrada dos dados de análise;
- LGRAPH: destinado à representação gráfica dos resultados obtidos.

O conjunto foi desenvolvido em linguagem de programação Visual Basic e projetado para ser executado em ambientes Windows 95 ou superiores.

2.4 SIGMA/W

O SIGMA/W constitui um dos módulos que compõem o pacote de programas computacionais *GeoStudio*, para a análise de tensões e deformações em estruturas geotécnicas, via método dos elementos finitos (MEF). Essa ferramenta permite a condução de análises mais simples, como problemas que assumem materiais com comportamento elástico-linear, e problemas mais sofisticados que são melhores representados por materiais com comportamento elasto-plástico.

Para conduzir uma análise tensão-deformação no SIGMA/W deve-se estabelecer a geometria do modelo, especificar o modelo constitutivo dos materiais, definir as condições de contorno e realizar a discretização ou geração da malha (que no método dos elementos finitos, consiste na subdivisão do meio contínuo em partes menores).

O processo de discretização nos módulos do *GeoStudio* é totalmente automático, e permite que o usuário faça todos os ajustes que julgar necessário.

2.5 PLAXIS 2D

PLAXIS 2D é um *software* de elementos finitos, desenvolvido para análise bidimensional de estruturas geotécnicas comercializado pela *Bentley Systems*. Além de calcular deformações, tensões, e fluxo de água em análises axissimétricas e de deformação plana, essa ferramenta permite a adoção de diferentes modelos constitutivos, o que permite levar em consideração o comportamento específico de argilas, areia e rochas, bem como o desempenho desses materiais sob carregamento, descarregamento e recarregamento (Bentley Advancing Infrastructure, 2023).

Para conduzir uma análise tensão-deformação no SIGMA/W deve-se definir a estratigrafia do solo e suas propriedades, definir os elementos geométricos e estruturais, definir as condições de contorno, realizar a discretização do modelo, e, a depender do tipo de análise, podem ser definidas etapas construtivas.

A representação dos elementos, bem como a localização dos nós (*nodes*) e dos pontos de Gauss (*stress points*), são apresentadas na Figura 2.

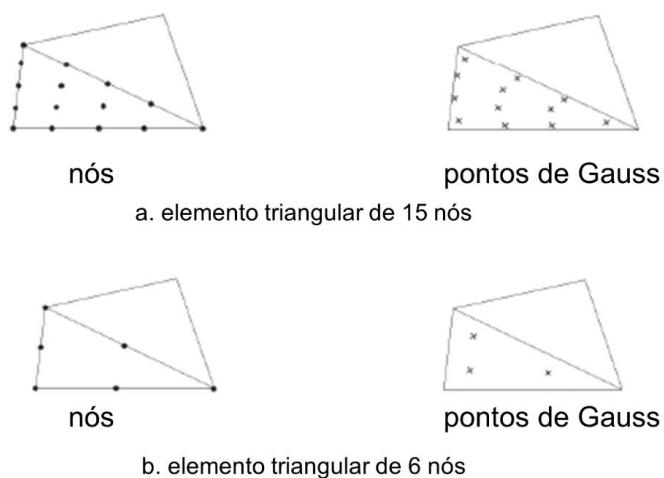


Figura 2 – Posição dos nós e pontos de Gauss nos elementos

Fonte: Adaptado de Bentley Advancing Infrastructure (2023)

O tamanho relativo dos elementos (r_e) assume valores pré-definidos de acordo com os níveis de densidade da malha pré-configurados (*element distribution*), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Densidade da malha e tamanho relativo dos elementos

Densidade da malha	Muito grosseira	Grosseira	Média	Fina	Muito fina
r_e	2,00	1,33	1,00	0,67	0,50

Fonte: Bentley Advancing Infrastructure (2023)

A Figura 3 apresenta a posição dos nós e pontos de Gauss em elementos de interface.

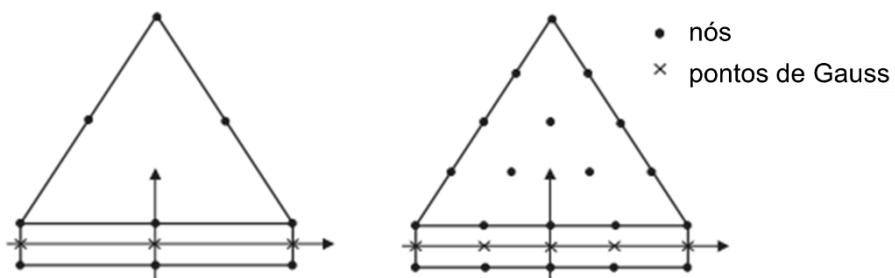


Figura 3 – Posição dos nós (nodes) e pontos de Gauss (stress points) em elementos de interface

Fonte: Adaptado de Bentley Advancing Infrastructure (2023)

A Tabela 3 apresenta um resumo entre as principais características dos programas computacionais utilizados.

Tabela 3 – Características dos programas AEMC, ELSYM5, KENLAYER, SIGMA/W E PLAXIS 2D

Programa	AEMC / MeDiNa (DNIT, 2020)	ELSYM5 (Balbo, 2007; Pinto e Preussler, 2010)	KENLAYER (Huang, 2004)	SIGMA/W (GEO-SLOPE, 2013)	PLAXIS 2D (Bentley Advancing Infrastructure, 2023)
Tipo de modelo	Analítico-mecanicista com modelagem de aderência paramétrica (λ)	Analítico, adimensional, baseado em solução elástica multicamadas	Analítico-mecanicista com múltiplas camadas e comportamento dependente do material	Numérico (MEF)	Numérico (MEF, bidimensional com elementos triangulares)
Número máximo de camadas	Variável, conforme configuração da estrutura analisada	5 camadas	Até 19 camadas	Definido pelo usuário conforme discretização da malha	Variável, definida na modelagem geométrica
Comportamento dos materiais	Elástico linear ou não linear	Linear elástico	Linear, não linear e viscoelástico	Linear elástico ou elasto-plástico, conforme o modelo adotado	Linear elástico, elasto-plástico, ou conforme o modelo constitutivo escolhido
Sistema de coordenadas	3D (X, Y, Z) – compressão positiva, tração negativa	3D (X, Y, Z) – compressão negativa, tração positiva	3D (X, Y, Z) – compressão positiva, tração negativa	2D (plano XZ) – adotando convenção de compressão positiva	2D (plano XZ) – compressão positiva, tração negativa
Tratamento das interfaces entre camadas	Representada por parâmetro de aderência (λ), que permite simular aderência parcial	Implícito (não modelado diretamente)	Pode ser aderida ou não aderida	Modelada explicitamente como elemento de interface fino ou com espessura definida	Modelada por elementos de interface compatíveis com a malha, com rigidez normal (K_n) e ao cisalhamento (K_s)
Controle de aderência	Paramétrico: $0 \leq \lambda \leq 1$, com cálculo de rigidez tangente $K_s = \lambda/(1 - \lambda)$	Não aplicável	Binário: aderido / não aderido	Binário, com definição física de contato	Paramétrico via rigidez K_n e K_s ajustável por material

Programa	AEMC / MeDiNa (DNIT, 2020)	ELSYM5 (Balbo, 2007; Pinto e Preussler, 2010)	KENLAYER (Huang, 2004)	SIGMA/W (GEO-SLOPE, 2013)	PLAXIS 2D (Bentley Advancing Infrastructure, 2023)
Tipo de malha / discretização	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Malha 2D com elementos quadriláteros (4 e 8 nós) e triangulares (3 e 6 nós)	Malha 2D triangular (6 ou 15 nós) com refinamento controlado por r_e e <i>coarseness factor</i>
Configuração da malha	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Refinamento por subdomínio e controle de tamanho de elementos (2,0 cm a 5,0 cm)	Refinamento automático e local, controlado por parâmetros r_e , l_e e <i>coarseness factor</i> (0,03125 a 8,0)
Modelagem de carregamento	Carga de roda circular, pressão = pressão de inflação do pneu	Até 10 cargas circulares simultâneas	Carga circular uniforme, com pressão e espaçamento entre eixos	Cargas aplicadas como pressões ou forças distribuídas sobre o domínio	Carga distribuída, concentrada ou em linha; permite simular condições axissimétricas
Capacidades de análise	Tensões, deformações e deslocamentos sob diferentes tipos de eixo e configurações de carga	Tensões e deformações em até 10 profundidades	Tensões e deformações em até 10 coordenadas radiais e 19 verticais	Distribuição de tensões e deslocamentos via MEF, considerando restrições e fronteiras	Tensões, deformações e deslocamentos considerando estratigrafia, interfaces e condições de contorno
Convenção de sinal	Compressão positiva / tração negativa	Compressão negativa / tração positiva	Compressão positiva / tração negativa	Compressão positiva / tração negativa	Compressão positiva / tração negativa

3 ESTRUTURA PROPOSTA E CENÁRIO DE ANÁLISE

Com intuito de comparar os resultados obtidos nos programas computacionais citados, tomou-se uma estrutura de pavimento flexível, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 4, assumindo comportamento elástico linear para todas as camadas. A estrutura e os valores de módulo de Young e coeficiente de Poisson foram propostos com base no trabalho desenvolvido por Toffoli (2021).

Tabela 4 – Camadas e propriedades dos materiais

Camada	Módulo de Young (MPa)	Coeficiente de Poisson	Espessura (cm)
Revestimento	4.138	0,25	13,5
Base	3.793	0,25	20,0
Sub-base	359	0,35	20,0
Subleito	276	0,45	-

Fonte: Toffoli (2021)

Para a validação do cálculo das variáveis mecanísticas, foram obtidos os valores de tensão, deformação e deslocamento ao longo da espessura de todas as camadas, considerando um semieixo 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 calculadas para uma mesma condição de aderência foi avaliada pela raiz quadrática média dos erros percentuais (RMSE), expressa por:

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

Onde:

- n é o número de pontos de deslocamentos na bacia;
- d_{calc_i} é o valor de deslocamento obtido pelos programas ELSYM5, KENLAYER ou pelas ferramentas de solução numérica;
- d_{ref_i} 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 4 é apresentada, de forma esquemática, as características do carregamento e a localização dos pontos na estrutura para obtenção dos deslocamentos, deformações e tensões, na etapa de validação. Nos limites das camadas, os resultados foram obtidos na interface e em pontos imediatamente acima e imediatamente abaixo ($\Delta z = \pm 0,01$ cm).

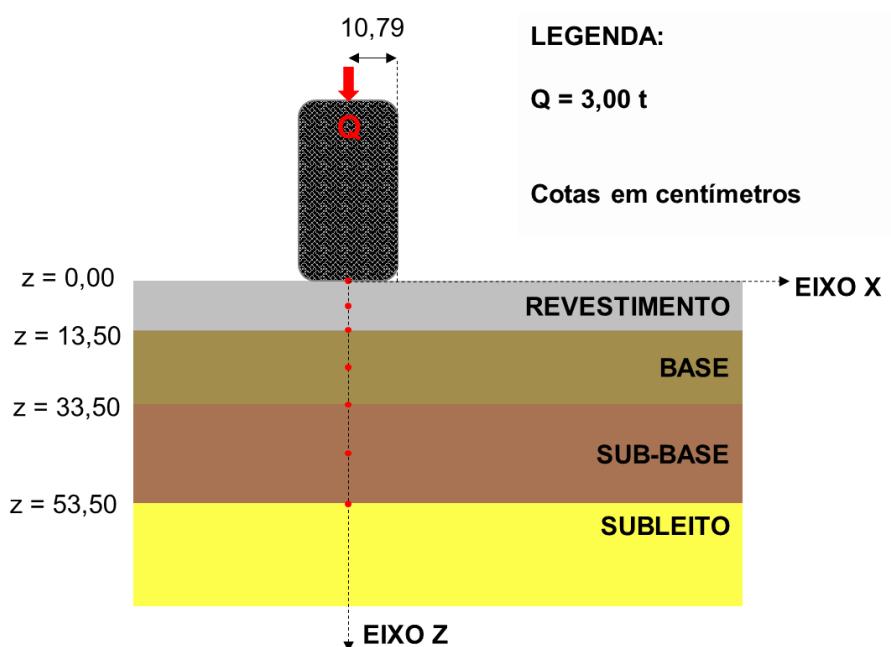


Figura 4 – Carregamento e pontos de avaliação na estrutura

Para análise da estrutura com as ferramentas de solução numérica, o modelo proposto possui subleito com 25,00 metros de profundidade e 25,00 metros de largura, não considerando superfície freática. Foram conduzidas análises axissimétricas

restrinindo os deslocamentos verticais e horizontais na fronteira inferior e permitindo apenas os deslocamentos verticais nas fronteiras laterais.

As análises foram conduzidas considerando um subdomínio, com 2,00 metros de largura a partir do eixo de revolução, representado na Figura 5. Essa medida foi adotada para estabelecer malha mais refinada apenas nas regiões de maior interesse, buscando estabelecer equilíbrio entre a acurácia e o tempo de processamento das análises. Os valores de tensão, deformação e deslocamento ao longo da espessura das camadas, foram obtidos ao longo do eixo de revolução ($x = 0,00$).

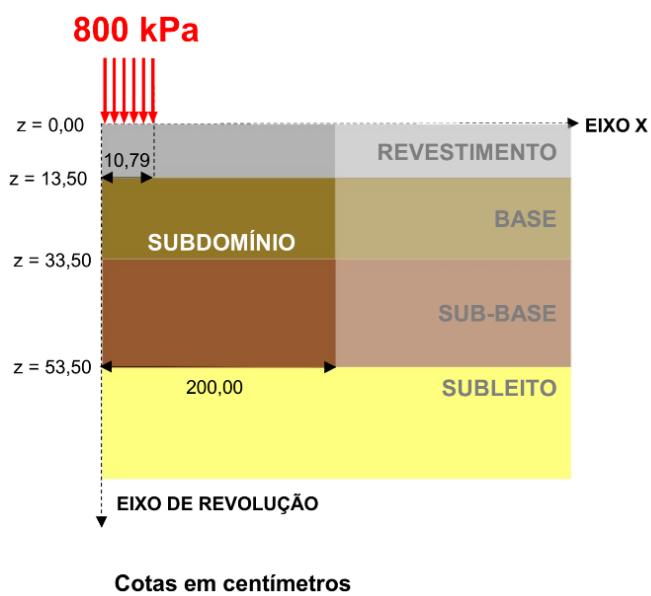


Figura 5 – Representação do subdomínio (sem escala)

A Tabela 5 apresenta as configurações da malha e condições de interfaces utilizadas na modelagem feita no SIGMA/W.

Tabela 5 – Configurações da malha e condições de interface utilizadas no SIGMA/W

Aspecto	Descrição Técnica
Tipo de elementos da malha	A malha foi gerada com quadriláteros de 8 nós e triângulos de 6 nós, especificando a dimensão máxima dos elementos.
Dimensão máxima dos elementos (subdomínio)	Nas camadas de revestimento, base e sub-base, a dimensão máxima dos elementos foi definida em 2,00 cm.
Dimensão máxima dos elementos (fora do subdomínio)	Nas regiões externas ao subdomínio, a dimensão máxima adotada foi de 5,00 cm.

Condição de interface entre camadas	Como o SIGMA/W não dispõe de elementos de interface com parâmetros de rigidez normal e de cisalhamento, a estrutura foi analisada considerando interfaces totalmente aderidas (AD).
Refinamento adicional da malha	Para melhor representação das interfaces entre camadas, foi inserido elemento de interface com espessura de 0,10 mm ao longo das linhas de contato.

A Tabela 6 apresenta as configurações da malha e condições de interfaces utilizadas na modelagem feita no PLAXIS 2D.

Tabela 6 – Configurações da malha e condições de interface utilizadas no PLAXIS 2D

Aspecto	Descrição Técnica
Tipo de elementos da malha	A malha foi composta por elementos triangulares de 15 nós.
Tamanho relativo dos elementos (re)	Especificado como 0,333, definindo a densidade global da malha.
Refinamento do subdomínio	Foi aplicado fator de refinamento igual a 0,03125 para maior precisão nas camadas estruturais.
Modelagem das interfaces entre camadas	O PLAXIS 2D permite inserir elementos de interface com parâmetros próprios de rigidez normal e ao cisalhamento. Assim, foram simulados dois cenários: <ul style="list-style-type: none"> • Com aderência entre camadas; • Sem aderência entre camadas.
Aplicação dos elementos de interface	Os elementos de interface foram inseridos apenas nas simulações sem aderência, representando o comportamento independente entre camadas.
Configuração das interfaces	As interfaces foram configuradas para herdar as propriedades dos materiais adjacentes.
Parâmetros de rigidez das interfaces	<ul style="list-style-type: none"> • Rigidez normal (K_n): 1×10^8 kPa/m • Rigidez ao cisalhamento (K_s): 1×10^{-3} kPa/m

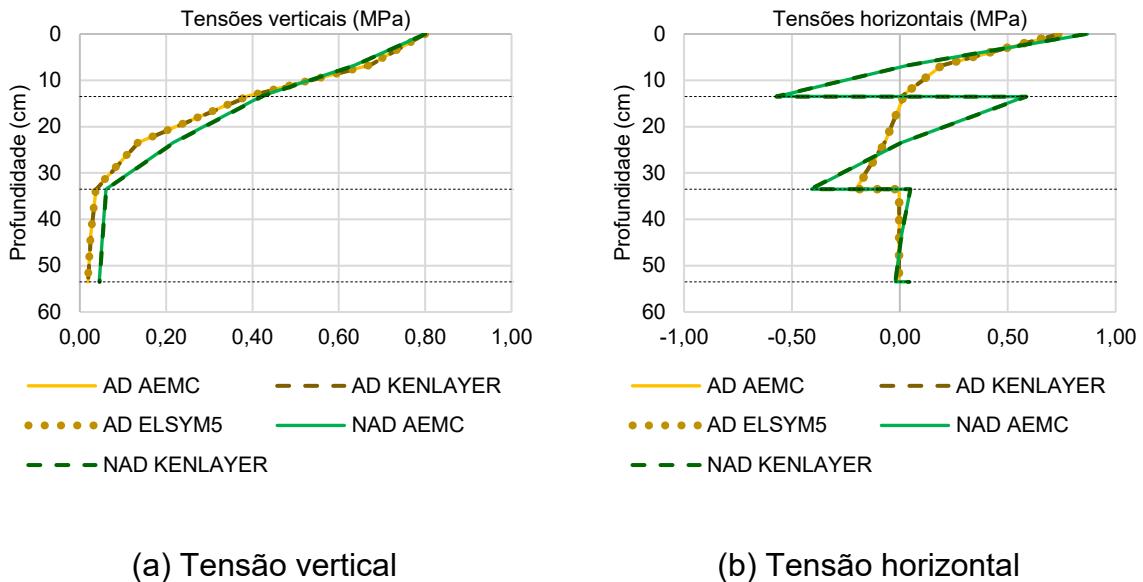
4 VALIDAÇÃO DOS CÁLCULOS MECANÍSTICOS

Neste tópico são apresentados os valores obtidos para validação do cálculo das variáveis mecanísticas do pacote MeDiNa.

4.1 FERRAMENTAS DE SOLUÇÃO ANALÍTICA

Nas Figuras 6, 7 e 8 são apresentados comparativos entre os valores de tensões, deformações e deslocamentos, obtidos pelas diferentes ferramentas de solução

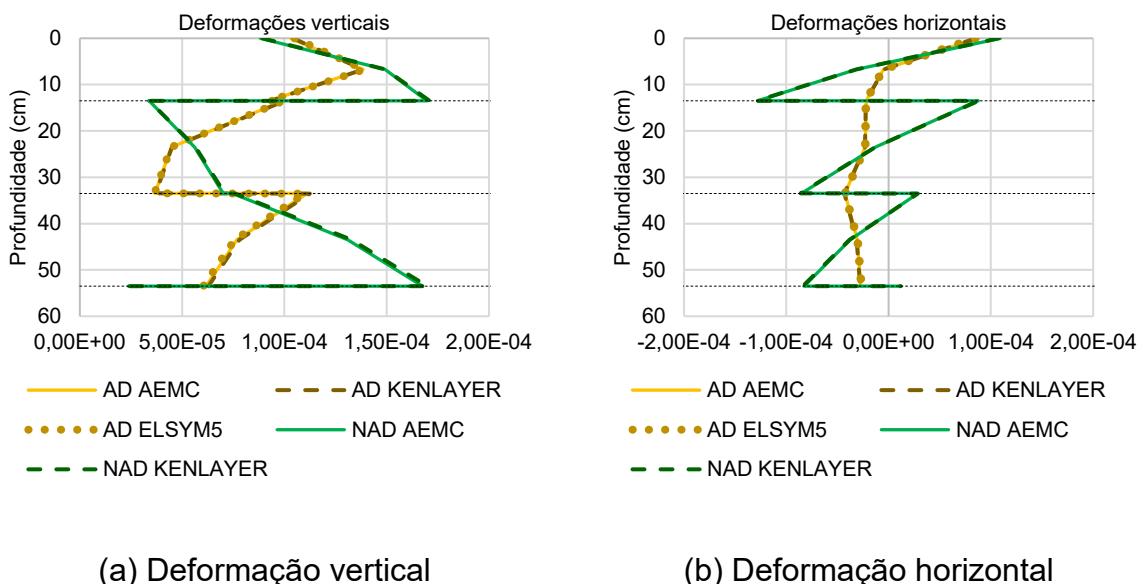
analítica, ao longo da espessura do pavimento, comparando as condições AD e NAD para um carregamento de semieixo simples com roda simples. Os valores obtidos foram convertidos de forma a se tornarem compatíveis com o sistema de unidade, sistema de coordenadas e a convenção de sinais do AEMC.



(a) Tensão vertical

(b) Tensão horizontal

Figura 6 – Tensões verticais e horizontais (aderido versus não aderido)



(a) Deformação vertical

(b) Deformação horizontal

Figura 7 – Deformações verticais e horizontais (aderido versus não aderido)

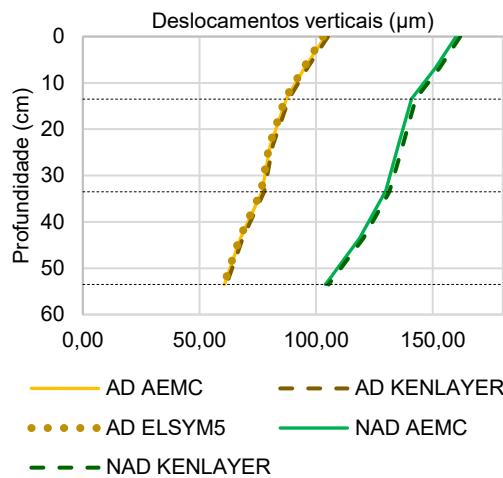


Figura 8 – Deslocamentos verticais (aderido versus não aderido)

De modo geral se observa que, para uma mesma condição de aderência, os gráficos obtidos pelos diferentes programas computacionais apresentam o mesmo comportamento. 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 .

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 de solução analítica, como KENLAYER e ELSYM5. Para a condição de interfaces sem aderência (NAD), o comparativo qualitativo entre os gráficos apresentados também valida o AEMC comparando os valores obtidos com uso do KENLAYER.

Quanto aos deslocamentos:

- Nos deslocamentos verticais, assim como para a condição aderida (AD), se observa uma pequena variação entre os valores na superfície e nas interfaces.
- Nas deformações horizontais, se observa uma grande variação dos valores exatamente nas interfaces.

A rigor, o valor é indefinido por se tratar de uma descontinuidade. No entanto, a pequena variação dos valores de deformação horizontal para pontos imediatamente

abaixo e imediatamente acima da interface ($\Delta z = \pm 0,01$ cm), ratifica o comportamento observado nos gráficos apresentados.

As bacias de deslocamentos verticais registradas 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 9. Para gerar as bacias foram obtidos os deslocamentos em 7 pontos ao longo do eixo Y.

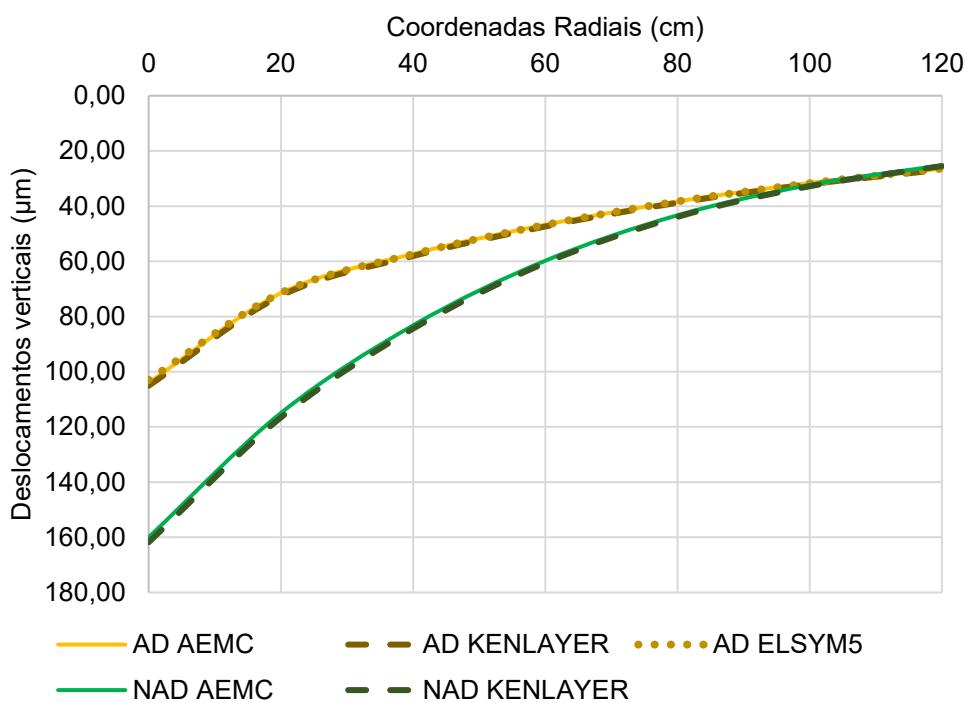


Figura 9 – Deslocamentos verticais no topo da camada de revestimento

A análise qualitativa das bacias apresentadas na Figura 9 e os baixos valores de RMSE (detalhados no Apêndice B) corroboram a validação do AEMC em relação a outros programas de análise de tensão-deformação, particularmente KENLAYER e ELSYM5. Os valores de RMSE obtidos na análise indicam boa correlação entre as bacias segundo os critérios do DNIT (2020) (inferior a 5 %) e da *American Society for Testing and Materials* (1996) (menor ou igual a 2 %).

A Tabela 7 apresenta um comparativo entre os resultados obtidos pelos programas AEMC, ELSYM5 e KENLAYER.

Tabela 7 - Comparativo dos resultados obtidos pelo AEMC e pelos programas analíticos ELSYM5 e KENLAYER

Aspecto Avaliado	Condição Aderida (AD)	Condição Não Aderida (NAD)	Análise Geral e Validação
Comportamento geral das tensões e deformações	Para uma mesma condição de aderência, os gráficos obtidos pelos três programas apresentam comportamento semelhante ao longo da espessura do pavimento	Também se observa comportamento coerente entre os programas, especialmente entre o AEMC e o KENLAYER, com boa concordância na forma dos gráficos	O AEMC apresenta resultados consistentes com os programas de referência (ELSYM5 e KENLAYER), confirmando a equivalência qualitativa dos campos de tensão e deformação
Tensões e deformações horizontais	Para coordenada radial igual a 0 (zero), verifica-se que $\sigma_x = \sigma_y$ e $\varepsilon_x = \varepsilon_y$, conforme esperado para carregamento simétrico	Mantém-se a simetria dos resultados; pequenas diferenças entre programas não afetam a tendência global dos perfis	Os resultados reforçam a consistência numérica do AEMC frente aos programas de solução analítica
Deslocamentos verticais	Pequenas variações observadas na superfície e nas interfaces. O comportamento dos deslocamentos é compatível entre os três programas	Apresentam comportamento semelhante, com variações discretas nas zonas de contato e transição	As diferenças são mínimas e fisicamente plausíveis, indicando coerência entre os modelos
Deformações horizontais nas interfaces	Observa-se grande variação local nas interfaces devido à transição de rigidez entre as camadas	A descontinuidade na interface torna o valor teórico indefinido; no entanto, a variação para pontos imediatamente acima e abaixo da interface ($\Delta z = \pm 0,01$ cm) permanece pequena	As pequenas variações confirmam a estabilidade numérica e física do AEMC na representação da interface
Correlação entre resultados (RMSE)	O RMSE entre as bacias obtidas é inferior a 5 %, atendendo aos critérios do DNIT (2020)	O RMSE entre AEMC e KENLAYER é ≤ 2 %, conforme o critério da ASTM (1996)	Os baixos valores de RMSE e a coerência gráfica confirmam a validação do AEMC em relação aos modelos analíticos tradicionais
Interpretação qualitativa das bacias de deflexão (Figura 9)	As bacias de deflexão obtidas com o AEMC reproduzem adequadamente o formato e a magnitude das curvas obtidas com ELSYM5 e KENLAYER	As diferenças entre as metodologias são desprezíveis em termos de forma e amplitude	A análise qualitativa e quantitativa conjunta (bacias + RMSE) valida o desempenho do AEMC como ferramenta analítica compatível com os programas de referência

4.2 FERRAMENTAS DE SOLUÇÃO NUMÉRICA

As análises numéricas desta validação foram realizadas na versão de avaliação do GeoStudio 2023.1.2 e no PLAXIS 2D versão 2023.1, com licença disponibilizada pelo Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB) da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (FT-UnB).

Nas Figuras 10, 11 e 12 são apresentados comparativos entre os valores de tensões, deformações e deslocamentos, 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, sistema de coordenadas e a convenção de sinais do AEMC.

Os gráficos traçados com valores obtidos via MEF contemplam resultados em pontos gerados automaticamente pelos softwares, em função do grau de refinamento da malha e do tipo de elemento escolhido. Os gráficos do programa AEMC foram traçados considerando os mesmos pontos gerados pelo programa PLAXIS 2D.

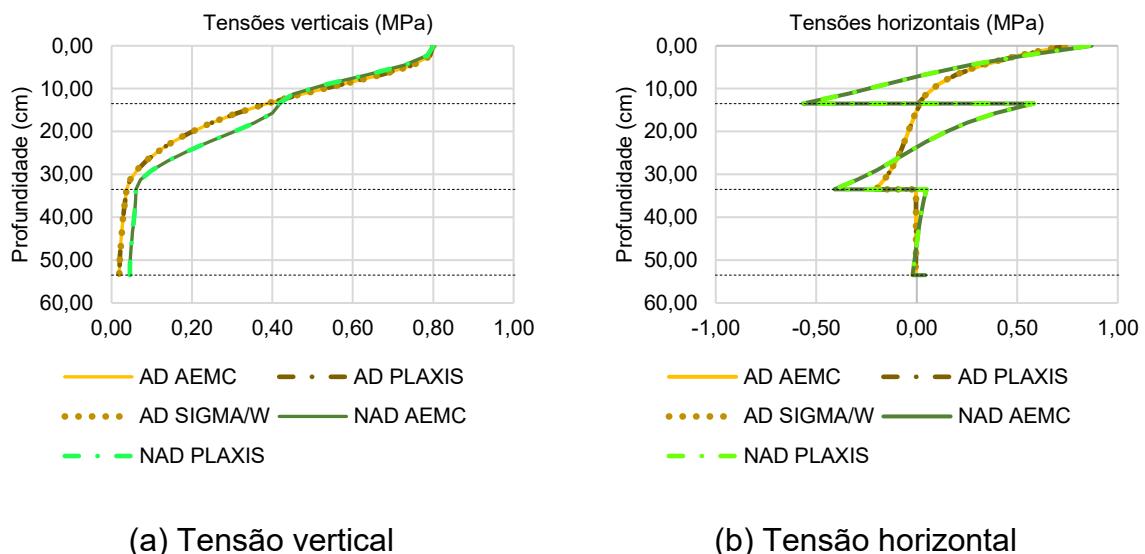


Figura 10 – Tensões verticais e horizontais (aderido versus não aderido)

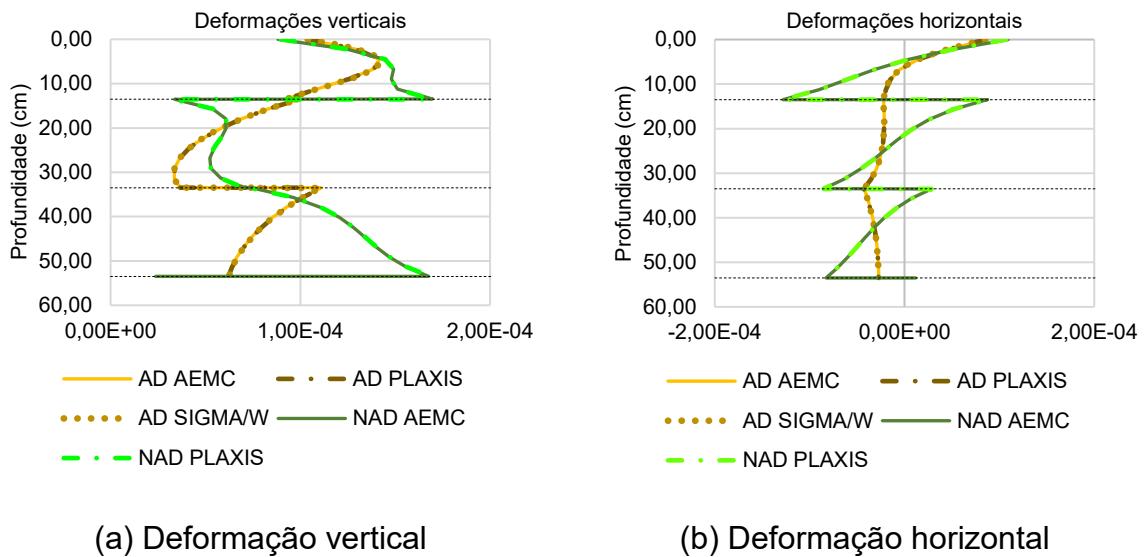


Figura 11 – Deformações verticais e horizontais (aderido versus não aderido)

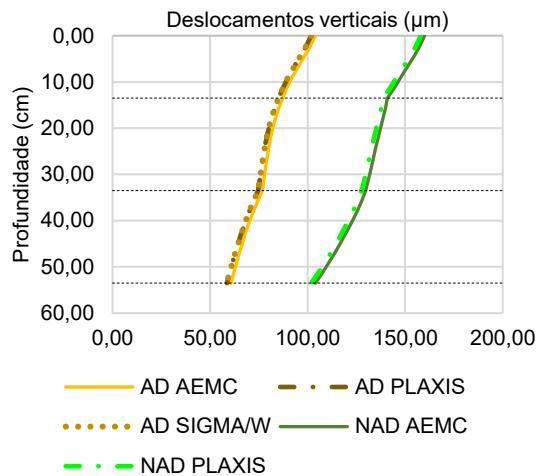


Figura 12 – Deslocamentos verticais (aderido versus não aderido)

Observa-se que, para uma mesma condição de aderência, os gráficos gerados a partir dos valores obtidos por solução numérica exibem um padrão semelhante aos gráficos gerados com os valores obtidos no AEMC.

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 programas de elementos finitos, particularmente SIGMA/W e PLAXIS 2D. Para a condição sem aderência (NAD), o comparativo qualitativo entre os gráficos apresentados também valida o AEMC comparando os valores obtidos com uso do PLAXIS 2D.

Quanto aos deslocamentos:

- Nos deslocamentos verticais, se observa uma pequena variação entre os valores na superfície e nas interfaces.
- Para o comparativo das deformações horizontais obtidas exatamente nas interfaces foram apresentados os dois valores exibidos pelo PLAXIS 2D. Para cada interface apenas um dos valores fornecidos pelo PLAXIS 2D possui grande divergência em relação ao valor correspondente obtido pelo AEMC.

A forma como o PLAXIS 2D apresenta os resultados para os pontos correspondentes às interfaces confirma a hipótese de que nesses locais os valores são indefinidos. De todo modo, a pequena variação dos valores de deformação horizontal para pontos imediatamente abaixo e imediatamente acima da interface ($\Delta z = \pm 0,01$ cm), ratifica o comportamento observado nos gráficos apresentados.

As bacias de deslocamentos verticais na superfície da camada de revestimento ($z = 0,00$) obtidas no AEMC, PLAXIS 2D e SIGMA/W, para as duas condições de aderência avaliadas são apresentadas na Figura 13. Para gerar as bacias foram obtidos os deslocamentos em 7 pontos ao longo do eixo Y.

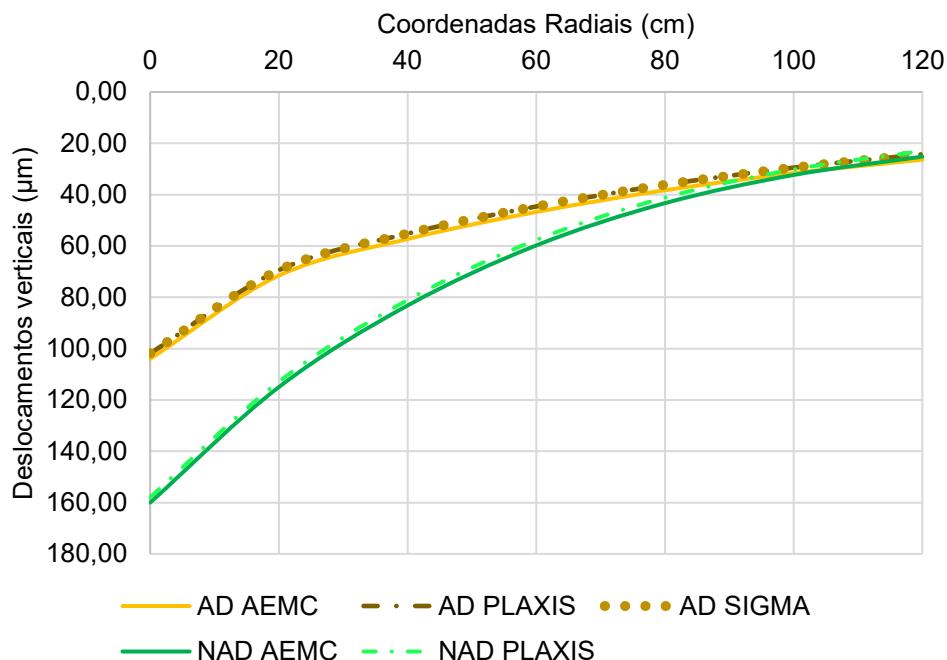


Figura 13 – Deslocamentos verticais no topo da camada de revestimento

A análise qualitativa das bacias de deslocamentos apresentadas na Figura 13 corroboram a validação do AEMC em relação aos programas de solução numérica estudados (SIGMA/W e PLAXIS 2D). Apesar de os valores de RMSE obtidos (detalhados no Apêndice C), não atenderem ao critério de boa correlação da *American Society for Testing and Materials* (1996) (menor ou igual a 2 %), o critério de boa correlação do DNIT (2020) (inferior a 5 %) é atendido.

Vale ressaltar que os resultados obtidos via MEF, podem apresentar maior ou menor divergência em relação aos resultados obtidos no AEMC, a depender:

- Do grau de refinamento da malha, e;
- Do tipo de elemento utilizado na modelagem do problema.

De qualquer forma, a divergência dos valores apresentados neste relatório, para uma mesma condição de aderência, é pequena.

A Tabela 8 apresenta o comparativo dos resultados obtidos entre o AEMC e os programas numéricos SIGMA/W e PLAXIS 2D.

Tabela 8 – Comparativo dos resultados obtidos pelo AEMC e pelos programas numéricos SIGMA/W e PLAXIS 2D

Aspecto Avaliado	Condição Aderida (AD)	Condição Não Aderida (NAD)	Análise Geral e Validação
Comportamento geral das tensões e deformações	Para uma mesma condição de aderência, os gráficos obtidos via MEF (SIGMA/W e PLAXIS 2D) exibem padrão semelhante aos gerados pelo AEMC, validando a consistência entre os métodos.	Também se observa semelhança na tendência dos perfis entre os resultados numéricos e o AEMC, com pequenas variações ao longo da espessura do pavimento.	As diferenças numéricas são pequenas e atribuídas às particularidades da discretização e dos elementos finitos. A correlação qualitativa é satisfatória.
Tensões e deformações horizontais	Os perfis apresentam coerência e proporcionalidade entre os valores de σ_x , σ_y , ε_x e ε_y para coordenada radial igual a 0.	A concordância permanece adequada, com pequenas discrepâncias associadas ao comportamento de interface modelado pelo PLAXIS 2D.	O AEMC mantém compatibilidade com os resultados obtidos via MEF, confirmando sua validade para simulações em condições análogas.
Deslocamentos verticais	Observam-se pequenas variações entre os valores calculados na superfície e nas interfaces, com tendência semelhante entre os três programas.	As variações se mantêm discretas, sem alteração significativa na forma dos gráficos.	O comportamento dos deslocamentos verticais é fisicamente coerente e confirma a equivalência funcional entre os métodos.
Deformações horizontais nas interfaces	No PLAXIS 2D, os valores de deformação horizontal exibem divergência pontual em um dos pontos da interface, decorrente da forma como o software trata os nós de contato.	A descontinuidade teórica nas interfaces faz com que os valores sejam indefinidos localmente; contudo, a variação para pontos imediatamente acima e abaixo ($\Delta z = \pm 0,01$ cm) permanece pequena.	O comportamento das deformações no entorno das interfaces confirma a consistência física dos resultados e a capacidade de o AEMC reproduzir o fenômeno observado.
Bacias de deflexão (Figura 13)	As bacias obtidas com o AEMC reproduzem adequadamente o formato e a magnitude das curvas calculadas via SIGMA/W e PLAXIS 2D.	Mantém-se o padrão geométrico das bacias, com diferenças mínimas nas amplitudes.	A análise qualitativa das bacias reforça a validação do AEMC em relação às soluções numéricas.
Índices de correlação (RMSE)	Os valores de RMSE obtidos são inferiores a 5 %, atendendo ao critério de correlação do DNIT (2020), embora superiores a 2 %, limite definido pela ASTM (1996).	Mesma tendência observada para AD; a diferença numérica é atribuída à natureza discreta do MEF.	Os índices de correlação indicam boa concordância global, validando o AEMC frente aos resultados numéricos.
Influência do refinamento da malha	Um refinamento maior da malha tende a reduzir divergências nos valores de tensão e deformação.	Malhas mais grossas e elementos de menor ordem podem aumentar a dispersão dos resultados.	A precisão das soluções numéricas depende diretamente do refinamento e do tipo de elemento adotado, mas as diferenças permanecem pequenas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa indicam que, para uma mesma condição de aderência, observa-se uma concordância significativa entre os comportamentos dos gráficos de deslocamentos, tensões e deformações obtidos a partir dos valores gerados pelo AEMC e daqueles provenientes dos demais programas computacionais analisados.

Em linhas gerais, essa coerência valida a rotina de cálculo das variáveis mecanísticas (deslocamentos, deformações e tensões) implementada no programa MeDiNa (AEMC), em relação aos valores teóricos decorrentes da teoria de múltiplas camadas elásticas, seja por solução analítica, seja por modelagem numérica.

A diferença de comportamento da estrutura ao considerar ou desconsiderar a aderência nas interfaces ressalta a importância do tema, principalmente quanto à previsão de desempenho. De modo geral, os deslocamentos, deformações e tensões obtidos com interfaces sem aderência são mais elevados em valores absolutos.

Nesse contexto, as condições de aderência pré-definidas na versão atual do programa MeDiNa podem ser consideradas conservadoras e favoráveis à integridade estrutural do pavimento. No entanto, tais condições podem também gerar impactos econômicos significativos, especialmente em termos de custo de implantação da rodovia, o que reforça a relevância de estudos voltados à calibração e à representação mais realista das condições de interface entre camadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- a) 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.
- b) BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p
- c) BENTLEY ADVANCING INFRASTRUCTURE. PLAXIS 2D 2023.2. Reference Manual 2D. 2023. 674 p.
- d) BURMISTER, D. M. (1943). 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.
- e) DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. (2020). Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro, 78 p.
- f) FRANCO, F. A. C. P. (2007). Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 294 p.
- g) GEO-SLOPE International Ltd. Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W. 2013. 211 p.
- h) HUANG, Y. H. (2004). Pavement analysis and design. Pearson Education, Upper Saddle River, New Jersey, 775 p.
- i) KOPPERMAN, S.; TILLER, G.; TSENG, M. (1986). 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, 33 p.

- j) LOULIZI, A.; AL-QADI, I. L.; ELSEIFI, M. (2006). Difference between In Situ Flexible Pavement Measured and Calculated Stresses and Strains. *Journal of Transportation Engineering*, 132 (7): 574-579.
- k) MARINKOVIC, D.; ZEHN, M. (2019). Survey of Finite Element Method-Based Real-Time Simulations. *Applied Sciences*, 9 (2775): 15 p.
- l) MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2015). Mecânica dos Pavimentos. Interciência, Rio de Janeiro, RJ, 620 p.
- m) PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. (2010). Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Synergia: IBP, Rio de Janeiro, RJ, 220 p.
- n) 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.
- o) TOFFOLI, C. M. (2021). Dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos: influência da condição de aderência na interface. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80 p.

APÊNDICE A

Neste apêndice serão apresentadas mais informações técnicas sobre os softwares utilizados. A Tabela A.1 apresenta os parâmetros e convenções do modelo computacional AEMC, conforme o DNIT (2020).

**Tabela A.1 – Parâmetros e convenções do modelo computacional AEMC
(adaptado de DNIT, 2020)**

Aspecto	Descrição Técnica
Sistema de coordenadas	O programa adota sistema tridimensional (X, Y, Z): <ul style="list-style-type: none"> • X e Y no plano horizontal • Z positivo no sentido vertical descendente. Conforme pode ser visto na Figura 1
Convenção de sinais	<ul style="list-style-type: none"> • Tensões e deformações positivas indicam compressão • Tensões e deformações negativas indicam tração
Comportamento dos materiais	Os materiais das camadas podem ser definidos como: <ul style="list-style-type: none"> • Elásticos lineares • Elásticos não lineares
Modelagem da aderência entre camadas	A aderência é representada por um modelo físico análogo à teoria de molas, permitindo deslocamentos horizontais relativos na interface entre duas camadas
Parâmetro de aderência (λ)	O programa utiliza um parâmetro adimensional λ , relacionado à rigidez que resiste ao deslocamento radial na interface
Valores de referência para λ	<ul style="list-style-type: none"> • $\lambda = 0$: interface não aderida • $\lambda = 1$: interface totalmente aderida
Relação entre λ e rigidez tangente (K_s)	A rigidez tangente é calculada conforme a equação: $K_s = \lambda / (1 - \lambda)$ (1) Expressa em kgf/cm ³
Atribuição de λ no AEMC	No módulo AEMC (Análise Elástica Multicamadas com Condições de Aderência), é possível atribuir valores intermediários de λ , permitindo simular graus parciais de aderência
Caracterização do carregamento	A carga de roda é considerada uniformemente distribuída sobre uma área circular de contato entre pneu e pavimento
Pressão de contato	Assumida como igual à pressão de inflação do pneu; o raio da área de contato é função da carga aplicada e da pressão de inflação
Configurações de eixo consideradas	O programa permite análise sob condições axissimétricas, considerando: <ul style="list-style-type: none"> • Eixo padrão rodoviário • Eixo simples • Eixo duplo • Eixo tipo tandem • Eixos especiais
Interação entre múltiplos pneus	A influência de mais de um pneu é considerada pela superposição de efeitos
Resultados obtidos	O programa fornece deslocamentos, tensões e deformações ao longo das camadas, permitindo análise por semieixo ou eixo completo

A Tabela A.2 apresenta características gerais do programa ELSYM5, segundo Balbo (2007) e Pinto e Preussler (2010).

Tabela A.2 – Características gerais do programa ELSYM5 segundo Balbo (2007) e Pinto e Preussler (2010)

Aspecto	Descrição Técnica
Natureza do programa	Programa adimensional, exigindo apenas que os parâmetros sejam fornecidos em unidades coerentes.
Capacidade de camadas	Permite a definição de até 5 camadas estruturais.
Número de cargas aplicáveis	Aceita até 10 cargas circulares normais simultâneas.
Profundidades de análise	Apresenta resultados para até 10 coordenadas verticais distintas (profundidades).
Sistema de coordenadas	Sistema tridimensional: X e Y no plano horizontal e Z representa profundidade no sistema de camadas.
Referência da coordenada Z	Origem na superfície do pavimento; valores positivos para baixo.
Convenção de sinais	Tensões e deformações de compressão = negativas; de tração = positivas.

A Tabela A.3 apresenta características gerais do programa KENLAYER, conforme Huang (2004).

Tabela A.3 – Características e parâmetros de cálculo do programa KENLAYER (adaptado de Huang, 2004)

Aspecto	Descrição Técnica
Capacidade de modelagem	Permite o cálculo de tensões e deformações em estruturas com até 19 camadas.
Coordenadas de análise	Possibilita avaliação em até 10 coordenadas radiais e 19 profundidades verticais (Z).
Comportamento dos materiais	Pode considerar materiais com comportamento linear elástico, elástico não linear ou viscoelástico.
Análise de dano	O programa permite analisar danos estruturais a partir dos parâmetros de deformação e repetição de carga.
Condição de interface entre camadas	As interfaces podem ser definidas como aderidas ou não aderidas, conforme o tipo de contato mecânico.
Caracterização do carregamento	Definido pelo raio da área carregada, pressão de contato, espaçamento entre rodas e entre eixos.
Sistema de coordenadas	Utiliza X e Y no plano horizontal e Z no plano vertical (profundidade).
Convenção de sinais	Positiva para tensões e deformações de compressão; negativa para tensões e deformações de tração.

A Tabela A.4 apresenta as configurações de malha e modelagem de interfaces do SIGMA/W, conforme GEO-SLOPE (2013).

Tabela A.4 – Configuração da malha e modelagem de interfaces no SIGMA/W (GEO-SLOPE, 2013)

Aspecto	Descrição Técnica
Tamanho e densidade dos elementos	O tamanho dos elementos pode ser ajustado em toda a malha ou apenas em regiões específicas.
Controle de densidade	A densidade da malha pode ser definida com base em uma unidade de comprimento ou como proporção do tamanho global da malha.
Tipos de elementos disponíveis	O SIGMA/W disponibiliza elementos quadriláteros de 4 e 8 nós e triângulos de 3 e 6 nós.
Modelagem de interfaces (descontinuidades)	Existem duas abordagens possíveis: (i) Aplicar um modelo de material diretamente na linha que representa a interface, criando um elemento fino especial; (ii) Criar um elemento de interface com espessura definida e atribuir a ele um modelo de material.

A Tabela A.5 apresenta as configurações de malha e modelagem de interfaces do PLAXIS 2D, conforme Bentley Advancing Infrastructure (2023).

**Tabela A.5 – Configuração da malha e modelagem de interfaces no PLAXIS 2D
(adaptado de Bentley Advancing Infrastructure, 2023)**

Aspecto	Descrição Técnica
Método de geração da malha	A malha é gerada por triangulação automática, considerando a estratigrafia do solo, os elementos estruturais, os carregamentos e as condições de contorno.
Tipos de elementos disponíveis	O usuário pode escolher entre elementos triangulares de 6 nós ou elementos triangulares de 15 nós. Ver Figura 2.
Parâmetro global da malha (l_e)	Representa a dimensão alvo dos elementos (target element dimension). É calculado pela equação: $l_e = r_e \times 0,06 \times \sqrt{((x_{\max} - x_{\min})^2 + (y_{\max} - y_{\min})^2)} \quad (2)$
Tamanho relativo dos elementos (r_e)	Define a distribuição dos elementos (element distribution) e está associado aos níveis de densidade pré-configurados da malha. Conforme Tabela 7.
Fator de refinamento (coarseness factor)	Controla o tamanho relativo do elemento em relação ao valor de referência definido por r_e . <ul style="list-style-type: none"> Valores $> 1,0 \rightarrow$ malha mais grossa; Valores $< 1,0 \rightarrow$ malha mais fina.
Intervalo de refinamento permitido	O fator de refinamento pode variar entre 0,03125 e 8,0, podendo ser especificado individualmente para cada entidade geométrica.
Exemplo de ajuste de refinamento	Um fator igual a 0,5 reduz o tamanho dos elementos à metade em relação ao tamanho definido por r_e .
Modelagem das interfaces entre camadas	As interfaces podem ser representadas por elementos de interface inseridos entre camadas, permitindo simular o comportamento de contato.
Caracterização dos elementos de interface	Pode-se: <ul style="list-style-type: none"> Atribuir um modelo de material específico, ou Adotar o modelo do material adjacente a cada lado da interface.
Definição dos parâmetros de rigidez da interface	Os parâmetros de rigidez normal (K_n) e ao cisalhamento (K_s) podem ser: <ul style="list-style-type: none"> Derivados automaticamente a partir das propriedades do material; Ou definidos diretamente pelo usuário.
Compatibilidade entre elementos e interfaces	O elemento de interface é automaticamente compatível com o tipo de elemento selecionado (triângulo de 6 ou 15 nós), garantindo continuidade geométrica e numérica. Ver Figura 3.

APÊNDICE B

Neste apêndice serão apresentados os valores de deformações e deslocamentos, obtidos pelas diferentes ferramentas de solução analítica, ao longo da espessura do pavimento, comparando as condições AD e NAD para um carregamento de semieixo simples com roda simples. Nas Tabelas B.1 e B.2 são apresentadas as variações dos valores de deslocamento vertical (U_z) e deformação horizontal (ε_x) no topo da camada de revestimento e nas interfaces, para a condição aderida (AD).

Tabela B.1 – Variação dos deslocamentos verticais (condição aderida)

Z (cm)	X (cm)	U_z (μm)				
		AEMC (REFERÊNCIA)	ELSYM5	Δ (%)	KENLAYER	Δ (%)
0,00	0,00	104,0	103,0	-1,0	105,1	1,1
13,49	0,00	87,2	86,7	-0,6	88,3	1,3
13,50	0,00	87,2	86,7	-0,6	88,3	1,3
13,51	0,00	87,2	86,7	-0,6	88,3	1,3
33,49	0,00	76,8	76,3	-0,7	77,8	1,3
33,50	0,00	76,8	76,3	-0,7	77,8	1,3
33,51	0,00	76,7	76,3	-0,5	77,8	1,4
53,49	0,00	60,7	60,5	-0,3	61,6	1,5
53,50	0,00	60,7	60,5	-0,3	61,6	1,5
53,51	0,00	60,7	60,5	-0,3	61,6	1,5

Tabela B.2 – Variação das deformações horizontais (condição aderida)

Z (cm)	X (cm)	ε_x				
		AEMC (REFERÊNCIA)	ELSYM5	Δ (%)	KENLAYER	Δ (%)
0,00	0,00	8,72E-05	8,48E-05	-2,8	8,54E-05	-2,1
13,49	0,00	-2,20E-05	-2,21E-05	0,5	-2,21E-05	0,5
13,50	0,00	-2,20E-05	-2,21E-05	0,5	-2,21E-05	0,5
13,51	0,00	-2,20E-05	-2,21E-05	0,5	-2,21E-05	0,5
33,49	0,00	-4,27E-05	-4,25E-05	-0,5	-4,32E-05	1,2
33,50	0,00	-4,26E-05	-4,25E-05	-0,2	-4,32E-05	1,4
33,51	0,00	-4,26E-05	-4,25E-05	-0,2	-4,32E-05	1,4
53,49	0,00	-2,72E-05	-2,66E-05	-2,2	-2,77E-05	1,8
53,50	0,00	-2,72E-05	-2,66E-05	-2,2	-2,77E-05	1,8
53,51	0,00	-2,72E-05	-2,66E-05	-2,2	-2,77E-05	1,8

Em linhas gerais se observa pouca variação nos valores obtidos pelas diferentes ferramentas de análise tensão-deformação.

Nas Tabelas B.3 e B.4 são apresentadas as variações dos valores de deslocamento vertical e deformação horizontal no topo da camada de revestimento e nas interfaces, para a condição não-aderida (NAD).

Tabela B.3 – Variação dos deslocamentos verticais (condição não aderida)

Z (cm)	X (cm)	Uz (μm)		
		AEMC (REFERÊNCIA)	KENLAYER	Δ (%)
0,00	0,00	160,0	161,8	1,1
13,49	0,00	140,9	142,7	1,3
13,50	0,00	140,9	142,7	1,3
13,51	0,00	140,9	142,7	1,3
33,49	0,00	129,7	131,4	1,3
33,50	0,00	129,7	131,4	1,3
33,51	0,00	129,7	131,4	1,3
53,49	0,00	104,0	105,4	1,3
53,50	0,00	104,0	105,4	1,3
53,51	0,00	104,0	105,4	1,3

Tabela B.4 – Variação das deformações horizontais (condição não aderida)

Z (cm)	X (cm)	εx		
		AEMC (REFERÊNCIA)	KENLAYER	Δ (%)
0,00	0,00	1,09E-04	1,08E-04	-0,9
13,49	0,00	-1,28E-04	-1,29E-04	0,8
13,50	0,00	8,74E-05	-1,29E-04	-
13,51	0,00	8,72E-05	8,81E-05	1,0
33,49	0,00	-8,50E-05	-8,61E-05	1,3
33,50	0,00	2,84E-05	-8,62E-05	-
33,51	0,00	2,82E-05	2,86E-05	1,4
53,49	0,00	-8,27E-05	-8,39E-05	1,5
53,50	0,00	1,19E-05	-8,40E-05	-

Z (cm)	X (cm)	εx		
		AEMC (REFERÊNCIA)	KENLAYER	Δ (%)
53,51	0,00	1,18E-05	1,20E-05	1,7

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 nas Tabelas B.5 e B.6. Para gerar as bacias foram obtidos os deslocamentos em 7 pontos ao longo do eixo Y.

Tabela B.5 – Deflexões e RMSE para a condição aderida

Y (cm)	Uz (μm)		RMSE (%)	Uz (μm)	RMSE (%)
	AEMC (referência)	ELSYM5		KENLAYER	
0,00	103,96	103,00	0,37	105,10	1,38
20,00	71,54	71,50		72,50	
40,00	57,31	57,40		58,10	
60,00	46,75	46,80		47,40	
80,00	38,30	38,30		38,80	
100,00	31,62	31,70		32,10	
120,00	26,39	26,40		26,80	

Tabela B.6 – Deflexões e RMSE para a condição não aderida

Y (cm)	Uz (μm)		RMSE (%)
	AEMC (referência)	KENLAYER	
0,00	160,00	161,80	1,30
20,00	114,99	116,60	
40,00	83,22	84,40	
60,00	59,90	60,60	
80,00	43,32	43,90	
100,00	32,34	32,80	
120,00	25,20	25,50	

APÊNDICE C

Neste apêndice serão apresentados os valores de deformações e deslocamentos, obtidos pelas diferentes ferramentas de solução numérica, ao longo da espessura do pavimento, comparando as condições AD e NAD para um carregamento de semieixo simples com roda simples.

Nas Tabelas C.1 e C.2 são apresentadas as variações dos valores de deslocamento vertical (U_z) e deformação horizontal (ε_x) no topo da camada de revestimento e nas interfaces, para a condição aderida (AD). Nos limites das camadas os resultados foram obtidos na interface e em pontos imediatamente acima e imediatamente abaixo ($\Delta z = \pm 0,01$ cm).

Tabela C.1 – Variação dos deslocamentos verticais (condição aderida)

Z (cm)	X (cm)	U_z (μm)				
		AEMC (REFERÊNCIA)	SIGMA/W	Δ (%)	PLAXIS	Δ (%)
0,00	0,00	104,0	101,9	-2,0	101,9	-2,0
13,49	0,00	87,2	85,1	-2,4	85,1	-2,4
13,50	0,00	87,2	85,1	-2,4	85,1	-2,4
13,51	0,00	87,2	85,1	-2,4	85,1	-2,4
33,49	0,00	76,8	74,7	-2,7	74,7	-2,7
33,50	0,00	76,8	74,7	-2,7	74,7	-2,7
33,51	0,00	76,7	74,7	-2,6	74,7	-2,6
53,49	0,00	60,7	58,6	-3,5	58,6	-3,5
53,50	0,00	60,7	58,6	-3,5	58,6	-3,5
53,51	0,00	60,7	58,6	-3,5	58,6	-3,5

Tabela C.2 – Variação das deformações horizontais (condição aderida)

Z (cm)	X (cm)	ε_x				
		AEMC (REFERÊNCIA)	SIGMA/W	Δ (%)	PLAXIS	Δ (%)
0,00	0,00	8,72E-05	8,51E-05	-2,4	8,50E-05	-2,5
13,49	0,00	-2,20E-05	-2,21E-05	0,5	-2,21E-05	0,5
13,50	0,00	-2,20E-05	-2,22E-05	0,9	-2,21E-05	0,5
13,51	0,00	-2,20E-05	-2,21E-05	0,5	-2,21E-05	0,5
33,49	0,00	-4,27E-05	-4,28E-05	0,2	-4,27E-05	0,0
33,50	0,00	-4,26E-05	-4,28E-05	0,5	-4,27E-05	0,2
33,51	0,00	-4,26E-05	-4,28E-05	0,5	-4,27E-05	0,2
53,49	0,00	-2,72E-05	-2,74E-05	0,7	-2,74E-05	0,7
53,50	0,00	-2,72E-05	-2,74E-05	0,7	-2,74E-05	0,7
53,51	0,00	-2,72E-05	-2,74E-05	0,7	-2,74E-05	0,7

De modo geral se observa uma pequena variação nos valores obtidos via MEF em relação aos valores calculados pelo AEMC.

Nas Tabelas C.3 e C.4 são apresentadas as variações dos valores de deslocamento vertical e deformação horizontal no topo da camada de revestimento e nas interfaces, para a condição de interfaces sem aderência (NAD).

Tabela C.3 – Variação dos deslocamentos verticais (condição não aderida)

Z (cm)	X (cm)	Uz (μm)		
		AEMC (REFERÊNCIA)	PLAXIS	Δ (%)
0,00	0,00	160,0	157,9	-1,3
13,49	0,00	140,9	138,8	-1,5
13,50	0,00	140,9	138,8	-1,5
13,51	0,00	140,9	138,8	-1,5
33,49	0,00	129,7	127,6	-1,6
33,50	0,00	129,7	127,6	-1,6
33,51	0,00	129,7	127,6	-1,6
53,49	0,00	104,0	101,9	-2,0
53,50	0,00	104,0	101,9	-2,0
53,51	0,00	104,0	101,9	-2,0

Tabela C.4 – Variação das deformações horizontais (condição não aderida)

Z (cm)	X (cm)	εx		
		AEMC (REFERÊNCIA)	PLAXIS	Δ (%)
0,00	0,00	1,09E-04	1,07E-04	-1,8
13,49	0,00	-1,28E-04	-1,28E-04	0,0
13,50	0,00	8,74E-05	-1,28E-04	-
			8,74E-05	0,0
13,51	0,00	8,72E-05	8,72E-05	0,0
33,49	0,00	-8,50E-05	-8,50E-05	0,0
33,50	0,00	2,84E-05	-8,52E-05	-
			2,86E-05	0,7
33,51	0,00	2,82E-05	2,85E-05	1,1
53,49	0,00	-8,27E-05	-8,29E-05	0,2
53,50	0,00	1,19E-05	-8,30E-05	-
			1,22E-05	2,5
53,51	0,00	1,18E-05	1,22E-05	3,4

As bacias de deslocamentos verticais na superfície da camada de revestimento ($z = 0,00$) obtidas no AEMC, PLAXIS 2D e SIGMA/W, para as duas condições de aderência avaliadas são apresentadas nas Tabelas C.5 e C.6. Para gerar as bacias foram obtidos os deslocamentos em 7 pontos ao longo do eixo Y.

Tabela C.5 – Deflexões e RMSE para a condição aderida

y (cm)	U_z (μm)		RMSE (%)	U_z (μm)	RMSE (%)
	AEMC (referência)	SIGMA/W		PLAXIS 2D	
0,00	103,96	101,88	5,19	101,88	5,19
20,00	71,54	69,44		69,44	
40,00	57,31	55,19		55,16	
60,00	46,75	44,63		44,63	
80,00	38,30	36,17		36,17	
100,00	31,62	29,49		29,49	
120,00	26,39	24,26		24,26	

Tabela C.6 – Deflexões e RMSE para a condição não aderida

y (cm)	U_z (μm)		RMSE (%)
	AEMC (referência)	PLAXIS 2D	
0,00	160,00	157,90	4,91
20,00	114,99	112,90	
40,00	83,22	81,09	
60,00	59,90	57,65	
80,00	43,32	41,17	
100,00	32,34	30,18	
120,00	25,20	23,03	