



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



GIOVANA SOUZA FERREIRA

ANÁLISE PARAMÉTRICA DE PAVIMENTO FLEXÍVEL:
INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ESTRUTURAIS E DA ADERÊNCIA ENTRE
CAMADAS

Uberlândia
2026

GIOVANA SOUZA FERREIRA

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DE PAVIMENTO FLEXÍVEL:
INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ESTRUTURAIS E DA ADERÊNCIA ENTRE
CAMADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito
obrigatório para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Civil

Área de concentração: Transportes

Orientador: Dr. Rodrigo Pires Leandro

Uberlândia

2026

RESUMO

Este trabalho analisa o comportamento estrutural de um pavimento flexível por meio de simulações realizadas no software AEMC, considerando uma estrutura composta por revestimento asfáltico, base em brita graduada simples e subleito. O estudo tem como objetivo avaliar a influência da variação das espessuras das camadas, dos módulos de resiliência do subleito e das condições de aderência e não aderência entre camadas nas respostas estruturais do pavimento. Para isso, foram realizadas simulações paramétricas com diferentes combinações de espessura do revestimento, espessura da base e módulo do subleito, analisando-se os critérios de deflexão superficial, deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento e tensão vertical de compressão no topo do subleito. Os resultados indicaram que o aumento da espessura do revestimento e do módulo de resiliência do subleito reduz as deformações de tração, as tensões verticais no topo do subleito e as deflexões, aumentando a vida útil estimada do pavimento. Verificou-se também que a ausência de aderência entre camadas aumenta as deformações de tração no revestimento e os deslocamentos superficiais, reduzindo a vida útil à fadiga. Conclui-se que o AEMC é uma ferramenta importante para avaliar a influência dos parâmetros estruturais e auxiliar no dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Palavras-chave: pavimento flexível; AEMC; análise paramétrica; brita graduada simples; aderência entre camadas; vida útil.

ABSTRACT

This study analyzes the structural behavior of a flexible pavement through simulations performed using the AEMC software, considering a structure composed of an asphalt surface layer, a graded crushed stone base, and a subgrade. The objective is to evaluate the influence of layer thicknesses, subgrade resilient modulus, and bonded and unbonded interface conditions on the structural response of the pavement. To achieve this, simulations were carried out using different combinations of asphalt layer thickness, base thickness, and subgrade resilient modulus, evaluating surface deflection, horizontal tensile strain at the bottom of the asphalt layer, and vertical compressive stress at the top of the subgrade. The results showed that increasing the asphalt layer thickness and the subgrade resilient modulus reduced tensile strains, vertical stresses at the top of the subgrade, and surface deflections, increasing the estimated pavement service life. It was also observed that the lack of bonding between layers increased tensile strains in the asphalt layer and surface deflections, reducing fatigue life. It is concluded that the simulations performed using the AEMC software are an important tool for evaluating the influence of structural parameters and supporting the design of flexible pavements.

Keywords: flexible pavement; AEMC; graded crushed stone; bounded interface; resilient modulus; service life.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura de pavimento flexível	9
Figura 2 – Distribuição do carregamento sobre pavimento flexível	9
Figura 3 – Trincas em pavimento asfáltico	11
Figura 4 – Afundamento em pavimento asfáltico	11
Figura 5 – Panela em pavimento asfáltico	12
Figura 6 – Desgaste em pavimento asfáltico	12
Figura 7 – Ondulação em pavimento asfáltico	13
Figura 8 – Escorregamento em pavimento asfáltico	13
Figura 9 – Exsudação em pavimento asfáltico	14
Figura 10 – Influência da aderência frente ao momento fletor.....	15
Figura 11 – Configurações de tipos de carregamento do AEMC.....	17
Figura 12 – Estrutura modelo	18
Figura 13 – Eixo padrão rodoviário.....	19
Figura 14 – Pontos de análise	19
Figura 15 – Deflexão superficial para condição de camadas não aderidas (Ponto 1)	22
Figura 16 – Deflexão superficial para condição de camadas aderidas (Ponto 1).....	23
Figura 17 – Deformações horizontais na fibra inferior do revestimento (Pontos 2 e 3) – NAD..	25
Figura 18 – Deformações horizontais na face inferior do revestimento (Pontos 2 e 3) - AD ..	25
Figura 19 – Tensões verticais críticas no Topo do Subleito (Pontos 4 e 5) - NAD	27
Figura 20 – Semieixo de rodas duplas.....	28
Figura 21 – Representação de ϵ_x na fibra inferior da camada de revestimento	28
Figura 22 – Deflexão no topo da camada de revestimento.	30
Figura 23 – Tensões verticais no topo do subleito - NAD	31
Figura 24 – Vida útil por fadiga para condição não aderida	32
Figura 25 – Vida útil por fadiga para condição aderida	33
Figura 26 – Vida útil por deflexão para condição não aderida.....	35
Figura 27 – Vida útil por deflexão para condição aderida	35
Figura 28 – Vida útil por deformação permanente para condição não aderida.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Simulações	18
Tabela 2 – Deflexão superficial para condição de camadas aderidas (Ponto 1).....	22
Tabela 3 - Deformações horizontais na face inferior do revestimento.....	24
Tabela 4 – Tensões verticais críticas no Topo do Subleito (Pontos 4 e 5).....	26
Tabela 5 - Deformações horizontais na fibra inferior da camada de revestimento	29
Tabela 6 - Deslocamentos verticais no topo do revestimento	30
Tabela 7 - Tensões verticais no topo do subleito - NAD	31
Tabela 8 – Influência dos parâmetros na vida útil por fadiga	34
Tabela 9 - Resultados AEMC – NAD	40
Tabela 10 - Resultados AEMC – AD	41
Tabela 11 – Vida útil para condição (Não Aderida).....	42
Tabela 12 – Vida útil para condição (Aderida)	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Aderida
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BGS	Brita Graduada Simples
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
FHWA	Federal Highway Administration
MR	Módulo de Resiliência
NAD	Não Aderida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1	Estrutura dos pavimentos flexíveis	8
2.2	Tensões, deformação e deflexões	9
2.3	Principais problemas e patologias em pavimentos asfálticos flexíveis.....	10
2.4	Aderência e não aderência entre as camadas do pavimento.....	14
2.5	Aderência entre as camadas como premissa de projeto.....	15
3	METODOLOGIA.....	16
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
4.1	Deflexão superficial	21
4.2	Deformação de tração.....	23
4.3	Tensão vertical de compressão	26
4.4	Análise comparativa das condições de aderência entre camadas	27
4.5	Influência das condições de aderência para análise da vida útil do pavimento	32
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS.....	38
	ANEXO A – RESULTADOS AEMC.....	40
	ANEXO B – Estimativa de vida útil dos pavimentos	42

1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário é responsável pela maior parte da movimentação de cargas e passageiros no Brasil e, de acordo com a Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de Rodovias 2025, responde por 65% da movimentação de cargas e por 95% do transporte de passageiros no país, evidenciando sua relevância para a logística, a integração regional, a mobilidade e a competitividade econômica nacional (CNT, 2025). Nesse contexto, a qualidade estrutural e funcional dos pavimentos influencia diretamente os custos operacionais do transporte, a segurança viária, o conforto ao rolamento e a durabilidade das rodovias.

Apesar dessa relevância, as condições da malha rodoviária brasileira ainda apresentam limitações importantes. A Pesquisa CNT de Rodovias 2025 mostra que, quanto à avaliação do pavimento, 37% dos trechos foram classificados como regulares, 15% como ruins e 4,5% como péssimos, totalizando 56,5% da extensão avaliada em condições inferiores a boas (CNT, 2025). Esses dados reforçam a necessidade de aprimoramento dos critérios de projeto, dimensionamento e manutenção, especialmente diante do aumento do tráfego e das solicitações impostas às estruturas de pavimento.

A evolução do dimensionamento de pavimentos no âmbito nacional, desde uma abordagem empírica até a adoção de métodos mecanicistas, possibilitou uma avaliação mais precisa de como os materiais e as espessuras das camadas afetam o desempenho do pavimento. Nesse contexto, o software AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) realiza o cálculo de tensões, deformações e deflexões, fornecendo respostas estruturais que aproximam o projeto das condições reais de serviço e das diretrizes técnicas vigentes (Medina e Motta, 2015).

No Brasil, a adoção predominante de pavimentos flexíveis está relacionada à ampla utilização de revestimentos asfálticos na infraestrutura rodoviária e à consolidação de técnicas de projeto, execução, avaliação e restauração desse tipo de estrutura. Conforme Bernucci (2022), o revestimento asfáltico, por constituir a camada superior do pavimento, tem a função de resistir diretamente às ações do tráfego, transmitir os esforços de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar a estrutura e melhorar as condições de rolamento, contribuindo para o conforto e a segurança dos usuários.

De acordo com Fogaça (1996), a influência das propriedades mecânicas dos materiais e das espessuras das camadas é determinante para o desempenho do pavimento. Nesse sentido, a análise de uma estrutura de três camadas composta por revestimento, base e subleito, variando as espessuras e os módulos de resiliência, verificou-se que, para a deflexão superficial, o fator mais significativo foi o módulo de resiliência do subleito, seguido da espessura da base, enquanto o módulo da base apresentou menor influência relativa entre os parâmetros estudados.

Além disso, as alterações na espessura do revestimento asfáltico, na espessura da base granular e na rigidez do subleito alteram a distribuição de esforços e influenciam o desempenho estrutural e a sensibilidade a mecanismos de deterioração. Destacam-se a fadiga do revestimento, a deformação permanente e a perda de rigidez global da estrutura, as quais podem estar relacionadas às condições estruturais, aos materiais utilizados, ao carregamento e ao ambiente de exposição do pavimento (Deng e Shi, 2023).

Conforme Rocha *et al.* (2021), além das propriedades dos materiais e das espessuras das camadas, a condição de aderência entre camadas também exerce influência significativa no comportamento estrutural dos pavimentos flexíveis. Interfaces aderidas ou não aderidas modificam a transferência de esforços entre as camadas, alteram os níveis de deformação e podem afetar os mecanismos de dano ao longo da vida útil do pavimento.

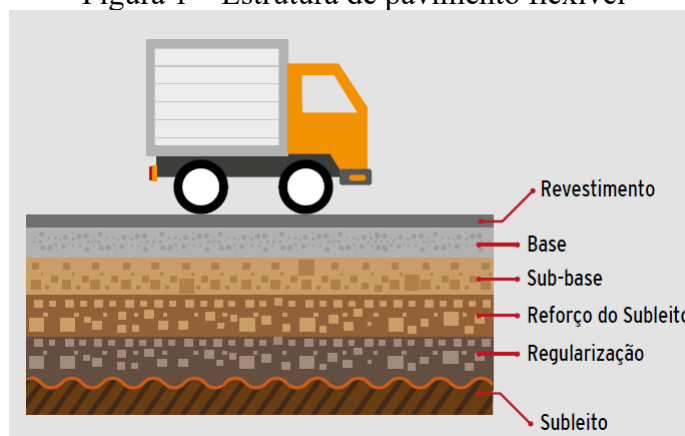
Portanto, o objetivo principal desse estudo é avaliar a influência das condições de aderência entre camadas de um pavimento asfáltico flexível e das suas características estruturais sobre o comportamento estrutural e sua vida útil estimada. Busca-se observar as condições de aderência e não aderência entre as camadas do pavimento, verificar a influência da variação de espessuras das camadas e do módulo de resiliência do subleito e determinar a vida útil do pavimento considerando os critérios de deflexão superficial, deformação permanente e fadiga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estrutura dos pavimentos flexíveis

O Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) define o pavimento flexível como estrutura composta por revestimento asfáltico sobre camada de base granular ou sobre camada de solo estabilizado granulometricamente. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), o pavimento flexível é classificado como uma estrutura que apresenta deformação elástica significativa em todas as camadas sob a ação das cargas aplicadas, o que possibilita a distribuição aproximadamente equivalente dos esforços entre elas. Como exemplo, pode-se citar o pavimento constituído por base de brita graduada ou base de solo com pedregulhos, revestido com camada asfáltica, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura de pavimento flexível



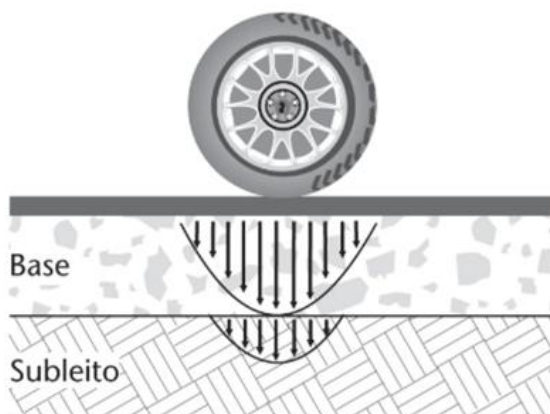
Fonte: CNT (2017)

2.2 Tensões, deformação e deflexões

O comportamento dos pavimentos flexíveis está diretamente relacionado à forma como as cargas resultantes do tráfego são transmitidas às camadas da estrutura. Segundo Balbo (2007), quando uma carga é aplicada, ela produz esforços que podem se manifestar como tensões horizontais e verticais. As tensões verticais estão associadas principalmente à compressão e ao cisalhamento dos materiais, enquanto as tensões horizontais estão relacionadas à tração e ao confinamento das camadas do pavimento. Esses esforços se dissipam gradualmente ao longo das camadas do pavimento, desde o revestimento até o subleito.

Além disso, Balbo (2007) destaca que a intensidade das tensões é maior na região próxima ao ponto de aplicação da carga e diminui com o aumento da profundidade, conforme ilustrado na Figura 2. Dessa forma, o revestimento asfáltico, camada superior, é o mais solicitado e, portanto, necessita apresentar maior resistência. Por outro lado, as camadas inferiores contribuem para a distribuição das tensões, favorecendo a estrutura do pavimento.

Figura 2 – Distribuição do carregamento sobre pavimento flexível



Fonte: Balbo (2007).

De acordo com Yoder e Witczak (1975), nos pavimentos flexíveis, as cargas aplicadas pelas rodas geram um campo de tensões que se distribui pelas camadas do sistema, com maiores intensidades próximas à região de aplicação da carga. As tensões e deformações horizontais de tração, especialmente na fibra inferior do revestimento asfáltico, estão associadas ao surgimento de trincas por fadiga decorrentes da repetição do carregamento.

Na prática, as tensões e as deformações verticais de compressão, principalmente no topo do subleito e nas camadas granulares, podem causar deformações permanentes e afundamento na trilha de roda. Percebe-se que os esforços nas interfaces entre as camadas podem gerar escorregamentos e perda de aderência. Essa perda de aderência prejudica a ação conjunta da estrutura.

As deformações mudam a forma e as propriedades dos materiais quando são aplicadas cargas, e as deformações podem ser recuperáveis ou permanentes. As deformações recuperáveis são aquelas que voltam ao normal, desaparecem assim que a carga é retirada. As deformações permanentes se acumulam a cada nova carga e formam as trilhas de roda.

A deflexão mostra o quanto a superfície do pavimento se abaixa quando a carga está sobre ela. Quando a deflexão fica muito alta, a deflexão pode indicar problemas na estrutura do pavimento, ou seja, favorece o aparecimento de trincas no revestimento e reduz a vida útil do pavimento. Deve-se analisar as tensões, as deformações e as deflexões juntas no dimensionamento do pavimento.

2.3 Principais problemas e patologias em pavimentos asfálticos flexíveis

As patologias em pavimentos são denominadas como defeitos, e elas afetam a maioria da população brasileira, porque comprometem a capacidade funcional do pavimento e criam condições ruins de rolamento, prejudicando o desempenho da via. Como consequência, as patologias em pavimentos causam desconforto aos usuários, aumentam o risco de acidentes, provocam lentidão no trânsito e elevam o custo final dos bens e produtos transportados. Os defeitos nos pavimentos podem estar ligados ao comportamento mecânico do pavimento, especialmente às tensões e às deformações que surgem quando as cargas do tráfego se repetem.

De acordo com o DNIT (2003), as patologias mais comuns em pavimentos flexíveis são fendas, afundamento, panela, desgaste, ondulação, escorregamento e exsudação. Esses defeitos mostram que o pavimento sofreu algum tipo de alteração e podem estar relacionados ao tráfego, aos materiais utilizados, às condições do clima ou à execução da obra.

As trincas são descontinuidades ou aberturas no revestimento e podem ocorrer por fadiga devido à repetição das cargas do tráfego, estando associadas principalmente às

deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico. Também podem estar relacionadas à retração térmica, ao envelhecimento do ligante asfáltico e à infiltração de água, conforme exemplificado na Figura 3.

Figura 3 – Trincas em pavimento asfáltico



Fonte: DNIT (2003).

O afundamento é uma deformação permanente da superfície do pavimento, normalmente causada pelo tráfego pesado, pela compactação inadequada ou pela baixa resistência das camadas inferiores. Esse tipo de defeito pode ser observado na Figura 4

Figura 4 – Afundamento em pavimento asfáltico



Fonte: DNIT (2003).

A panela é um buraco que aparece na superfície do pavimento, geralmente formado pela evolução de trincas e por problemas de drenagem. Um exemplo é apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Panela em pavimento asfáltico



Fonte: DNIT (2003).

O desgaste corresponde à perda de agregados e de material asfáltico da superfície do revestimento, deixando o pavimento mais áspero e irregular. Esse defeito pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Desgaste em pavimento asfáltico



Fonte: DNIT (2003).

A ondulação é a deformação transversal em forma de ondas ou corrugações na superfície e ocorre devido à instabilidade da mistura asfáltica e aos esforços horizontais provenientes do tráfego, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Ondulação em pavimento asfáltico



Fonte: DNIT (2003).

O escorregamento ocorre quando há deslocamento horizontal do revestimento, normalmente devido à falta de aderência entre as camadas do pavimento. Esse defeito é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Escorregamento em pavimento asfáltico



Fonte: DNIT (2003).

A exsudação ocorre pelo aparecimento do excesso de ligante asfáltico que forma uma película lisa e escura, ilustrada na Figura 9.

Figura 9 – Exsudação em pavimento asfáltico



Fonte: DNIT (2003).

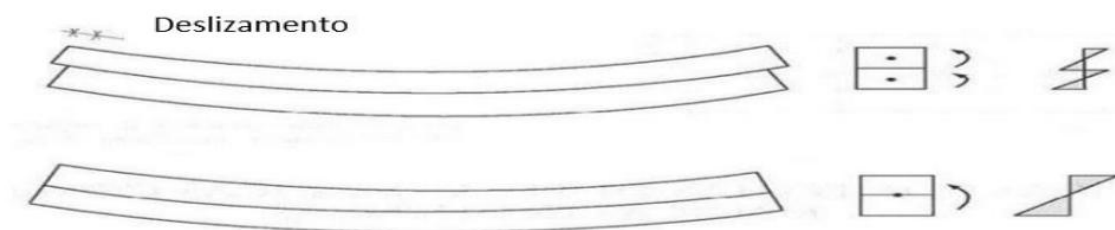
Portanto, estudar as patologias em pavimentos é fundamental para identificar as causas dos problemas e buscar soluções que sejam eficazes, além de permitir o uso racional dos recursos disponíveis, ou seja, compreender as falhas comuns em pavimentos flexíveis possibilita uma gestão eficiente e a adoção de estratégias de manutenção preventivas.

2.4 Aderência e não aderência entre as camadas do pavimento

Para garantir o comportamento estrutural adequado, é necessário verificar a aderência entre as camadas numa estrutura de pavimentos flexíveis. Conforme Guimarães (2013) e Gil (2015), a pintura de ligação tem papel importante nesse comportamento, pois contribui para que as camadas trabalhem de forma conjunta e para a transferência adequada dos esforços entre elas.

Bueno (2016) compara esse comportamento ao de uma viga laminada. Quando há aderência entre as partes, o conjunto das partes trabalha junto e a resistência à flexão aumenta. Quando não há aderência, pode acontecer deslizamento entre as partes, e o conjunto das partes passa a trabalhar de forma mais independente. Na prática, isso deixa bem clara a diferença de comportamento. A Figura 10 mostra de forma simples a diferença de comportamento.

Figura 10 – Influência da aderência frente ao momento fletor



Fonte: Bueno (2016) apud Pontes, Silva e Nascimento (2021)

Além da pintura de ligação, há outros fatores que também mudam a aderência entre as camadas. As características da superfície mudam a aderência entre as camadas. O tipo e a quantidade de ligante mudam a aderência entre as camadas. As condições de execução mudam a aderência entre as camadas. Por isso, a gente precisa garantir uma ligação adequada entre as camadas. Quando a gente garante a ligação adequada entre as camadas, o pavimento funciona de forma mais eficiente como um conjunto. (Gil, 2015)

A condição de aderência também influencia o comportamento estrutural e os resultados obtidos no dimensionamento. Quando as camadas não estão adequadamente ligadas, elas passam a trabalhar de maneira mais independente, modificando a distribuição das tensões e deformações na estrutura. Dessa forma, considerar corretamente a condição das interfaces é importante para representar melhor o comportamento do pavimento durante o dimensionamento (Rocha *et al.*, 2021).

Quando o projeto, a execução ou a conservação falham, podem fazer aparecer cedo problemas nos pavimentos flexíveis, como trincas, fissuras, afundamentos e panelas. Por isso, o controle adequado da execução das camadas e das interfaces é essencial para melhorar o desempenho do pavimento e aumentar a sua durabilidade (Barros Filho *et al.*, 2020).

2.5 Aderência entre as camadas como premissa de projeto

A aderência entre as camadas precisa ser avaliada já na fase de projeto, porque ela controla como as cargas se distribuem no pavimento. Quando a aderência é boa, a aderência faz com que as camadas trabalhem juntas. Quando a aderência é insuficiente, a aderência pode gerar mudanças nas tensões e nas deformações da estrutura (SANTOS, 2018).

No MeDiNa, a condição de interface que se usa no cálculo muda a resposta estrutural que se obtém (DNIT, 2023). No método de dimensionamento usado pelo DER-SP, a condição de interface não define claramente como variável de projeto. Na prática, o projetista tem que indicar a condição de aderência que está considerando no dimensionamento.

Além disso, é importante garantir que a aderência prevista no projeto seja realmente obtida na execução. Se o dimensionamento levar em conta as camadas aderidas, mas a aderência não acontecer de forma correta na obra, o pavimento pode apresentar um comportamento diferente do que os cálculos preveem (SANTOS, 2018).

Quando a aderência se perde, as camadas passam a agir de forma mais independente, o que aumenta as tensões e as deformações em partes específicas da estrutura. Por causa disso, surgem trincas, surgem deslocamentos entre as camadas e a vida útil do pavimento diminui (SANTOS, 2018). Por isso, a aderência precisa ser considerada como parte do projeto e como uma condição que tem que ser garantida na execução.

3 METODOLOGIA

O AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) é um software que integra o pacote MeDiNa, disponibilizado pelo DNIT, para análises mecanicistas de pavimentos, o qual possibilita o cálculo de tensões, deformações e deflexões em estruturas de pavimentos, com base na teoria da elasticidade aplicada a sistemas de múltiplas camadas. Dessa forma, é possível avaliar o comportamento estrutural de diferentes configurações de pavimento de maneira eficiente e confiável.

Durante a inserção dos dados no software, pode-se considerar tanto o comportamento elástico linear quanto o comportamento não linear de camadas granulares e alterar o módulo de resiliência em função do estado de tensões. Além disso, é possível escolher as condições de aderência entre camadas, variando entre totalmente aderido e sem aderência.

Quanto ao carregamento, o programa permite realizar simulações de diferentes configurações de eixos e variar parâmetros como a carga, a pressão e o espaçamento entre as rodas, conforme a Figura 11. Sendo assim, o AEMC considera que a carga da roda é distribuída de maneira uniforme em uma área circular de contato entre pneu e pavimento, em que a pressão é equivalente à pressão de inflação dos pneus.

Figura 11 – Configurações de tipos de carregamento do AEMC

Tipo de carregamento:

Eixo padrão rodoviário

Eixo simples

Dois eixos simples (direcional)

Eixo duplo

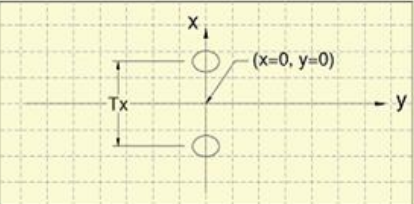
Dois eixos duplos

Dois eixos duplos em tandem

Três eixos duplos em tandem

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

Análise	Semi-eixo
Número de rodas:	2
Carga do semi-eixo (ton):	4,10
Carga de roda (ton):	2,05
Pressão de pneus (MPa):	0,56
Ty (cm):	0,00
Tx (cm):	32,40
Lx (cm):	181,00
Área (cm²):	366,07
Raio (cm):	10,79



Fonte: AEMC (2023)

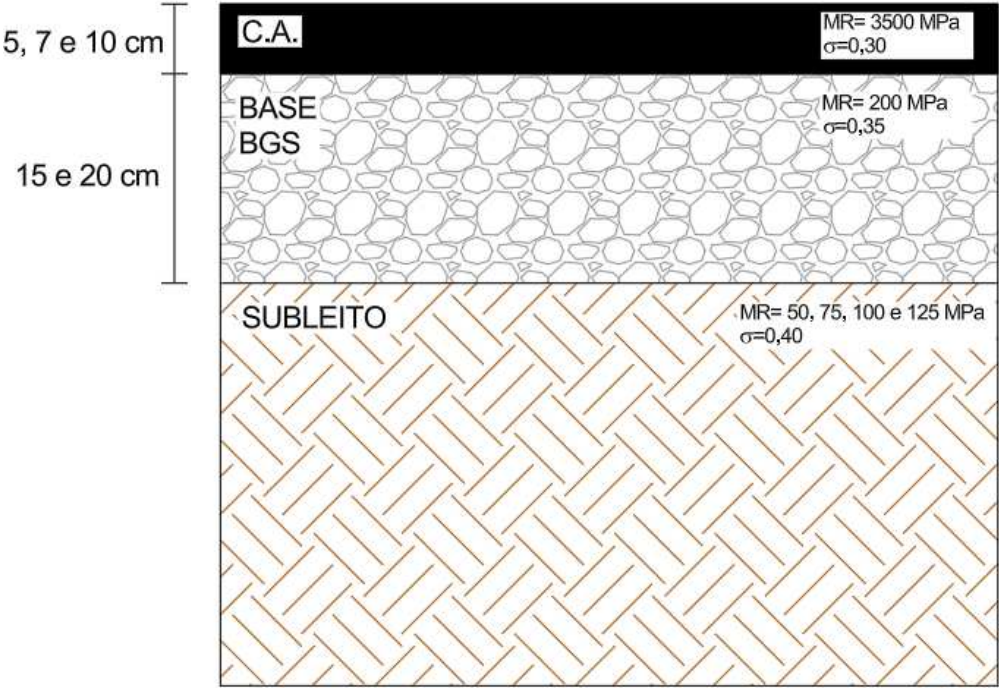
Assim, o AEMC é uma ferramenta eficiente para análises mecanicistas em pavimentos, visto que permite avaliar de maneira precisa o comportamento estrutural sob a ação das solicitações de tráfego e analisar a variação dos parâmetros físicos dos materiais. Com base nessa possibilidade de análise, foi definido o modelo estrutural utilizado neste trabalho.

Considerou-se como modelo de estrutura o pavimento flexível formado por três camadas, sendo elas: Revestimento (concreto asfáltico), Base (Brita Graduada Simples – BGS) e Subleito. Os valores adotados para os parâmetros de módulos de resiliência e coeficientes de Poisson foram definidos com base na norma IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2024). As espessuras das camadas e os valores do módulo de resiliência do subleito foram escolhidos para representar diferentes condições de pavimentos flexíveis. Dessa forma, foi possível avaliar como a variação desses parâmetros influencia o comportamento estrutural do pavimento.

Para a camada de revestimento em concreto asfáltico, foram analisadas três variações de espessura: 5, 7 e 10 cm. O coeficiente de Poisson adotado foi de 0,30 e o Módulo de Resiliência foi de 3.500 MPa. Na camada de base (BGS) analisaram-se duas variações de espessura (15 e 20 cm). Para o Módulo de Resiliência foi utilizado o valor de 200 MPa e um coeficiente de Poisson de 0,35. Para o subleito, foram considerados diferentes valores de Módulos de Resiliência: 50, 75, 100 e 125 MPa. O coeficiente de Poisson adotado para essa camada foi de 0,40. Apresenta-se na Figura 12 a estrutura-modelo, utilizada para realizar as

simulações deste trabalho. A partir deste modelo estrutural e da variação dos parâmetros, realizaram-se 24 simulações no AEMC, conforme Tabela 1.

Figura 12 – Estrutura modelo



Fonte: autora (2026)

Tabela 1 – Simulações

Simulações	Esp. C.A. (cm)	Esp. BGS (cm)	MR C.A. (MPa)	MR BGS (MPa)	MR Subleito (MPa)
1	5	15	3500	200	50
2	5	15	3500	200	75
3	5	15	3500	200	100
4	5	15	3500	200	125
5	5	20	3500	200	50
6	5	20	3500	200	75
7	5	20	3500	200	100
8	5	20	3500	200	125
9	7	15	3500	200	50
10	7	15	3500	200	75
11	7	15	3500	200	100
12	7	15	3500	200	125
13	7	20	3500	200	50
14	7	20	3500	200	75
15	7	20	3500	200	100
16	7	20	3500	200	125
17	10	15	3500	200	50
18	10	15	3500	200	75
19	10	15	3500	200	100
20	10	15	3500	200	125
21	10	20	3500	200	50
22	10	20	3500	200	75
23	10	20	3500	200	100
24	10	20	3500	200	125

Fonte: autora (2026).

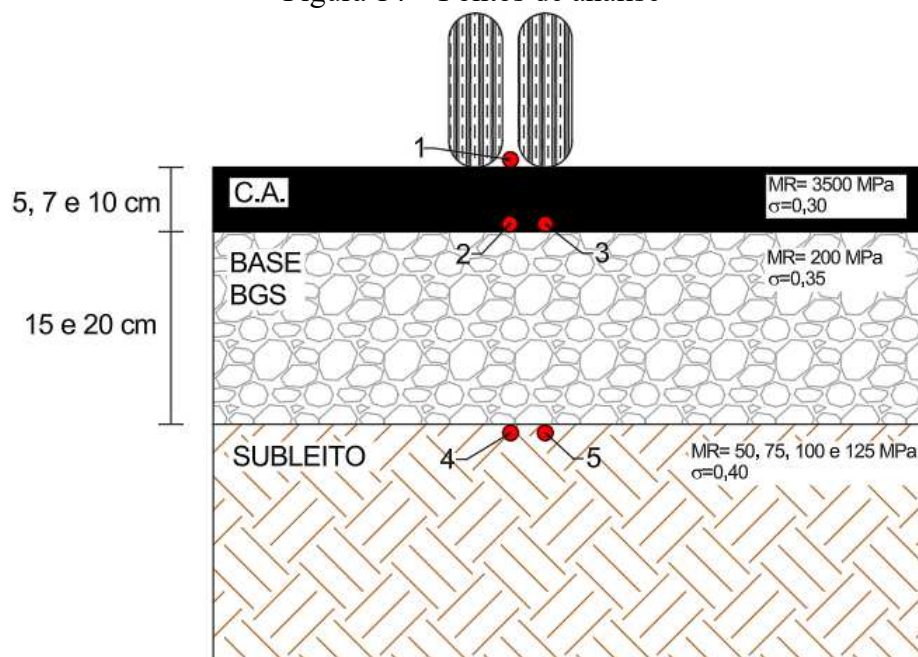
Para analisar o efeito do tráfego no pavimento, foi considerado o eixo padrão rodoviário, apresentado na Figura 13. Esse eixo possui carga total de 8,2 t, distribuída igualmente entre os dois lados, correspondendo a 4,1 t em cada conjunto de rodas duplas. A carga é aplicada sobre o pavimento por meio dos pneus, considerando uma pressão de contato de 0,56 MPa. Esse modelo é utilizado para representar de forma padronizada as solicitações provocadas pelo tráfego sobre a estrutura do pavimento.

Figura 13 – Eixo padrão rodoviário



Conforme apresentado na Figura 14, foram estabelecidos 5 pontos de análise para a avaliação da fadiga, da deformação permanente e da deflexão superficial, de modo a viabilizar a compreensão do desempenho estrutural do pavimento.

Figura 14 – Pontos de análise



Fonte: autora (2026)

Com relação aos pontos de análise, no ponto 1, localizado na superfície do revestimento asfáltico e entre os dois pneus do semieixo, busca-se obter a deflexão superficial no topo da estrutura de modo a ser avaliada com o critério de ruptura admissível. Nos pontos 2 e 3, serão analisadas as deformações de tração responsável pela formação do fenômeno da fadiga. Por fim, nos pontos 4 e 5, serão realizadas as análises das deformações verticais de compressão que estão relacionadas à avaliação da deformação permanente na camada mais fraca do sistema.

Para análise mecanicista da estrutura de pavimentos, torna-se necessário avaliar a vida útil do pavimento por meios de critérios de ruptura. Para isso, foram utilizados modelos experimentais de fadiga, de deformação permanente e de deflexão superficial. De acordo com o DER-SP a vida útil por fadiga na fibra inferior do revestimento asfáltico pode ser estimada pela Equação 1.

$$N = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^n \quad (1)$$

onde N é número acumulado de operações equivalentes de eixo simples padrão, com rodas duplas de 80 kN, ao longo do período de projeto; ε_t é a deformação horizontal de tração; K e n são os coeficientes determinados por regressões lineares, específicos para cada tipo de mistura asfáltica e modificados para refletir o desempenho no campo.

Os coeficientes K e n foram adotados a partir da tabela apresentada pelo DER-SP (2006), baseado no modelo da FHWA (Federal Highway Administration), em que K é igual a $1,092 \times 10^{-6}$ e n é igual a 3,512.

No que se refere ao desempenho do pavimento quanto à deformação permanente, caracterizada pela deformação de compressão no topo do subleito, foi utilizada a Equação 2, proposta pelo DER-SP (2006):

$$N = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_v} \right)^n \quad (2)$$

onde N é o número acumulado de operações equivalentes de eixo simples padrão, com rodas duplas de 80 kN, ao longo do período de projeto; ε_v é a deformação vertical de compressão; K e n são coeficientes determinados por regressões lineares, específicos para cada tipo de mistura asfáltica e modificados para refletir o desempenho no campo.

Os coeficientes K e n foram adotados a partir da tabela apresentada pelo DER-SP (2006), baseado no modelo de Dormon & Metcalf, em que K é igual a $6,069 \times 10^{-10}$ e n é igual a 4,762.

A estimativa da vida útil por deflexão superficial foi obtida pela Equação 3 do DNER PRO 11/79, utilizando-se os coeficientes K_1 igual a $1,263 \times 10^{17}$ e K_2 igual a 5,682.

$$N = K_1 \times (D_0)^{-K_2} \quad (3)$$

onde N é o número acumulado de operações equivalentes de eixo simples padrão, com rodas duplas de 80 kN, ao longo do período de projeto; D_0 é a deflexão no topo da estrutura;

K_1 e K_2 são os coeficientes determinados por regressões lineares, específicos para cada tipo de mistura asfáltica e modificados para refletir o desempenho no campo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da estrutura considerada e das simulações realizadas no AEMC. As variações analisadas tiveram como objetivo avaliar a influência de diferentes parâmetros estruturais, incluindo espessura do revestimento asfáltico, espessura da base granular, módulo de resiliência do subleito, condições de interface entre camadas, aderida e não aderida. A partir dos resultados gerados pelo software, foi possível elaborar gráficos e tabelas que permitiram verificar a relação entre cada parâmetro e as respostas estruturais do pavimento.

4.1 Deflexão superficial

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de deflexão para as condições de camadas não aderidas (NAD) e aderidas (AD) do pavimento. Analisando essa tabela, nota-se que a condição aderida representa uma redução no nível de deflexão no topo da estrutura de 20 a 26%.

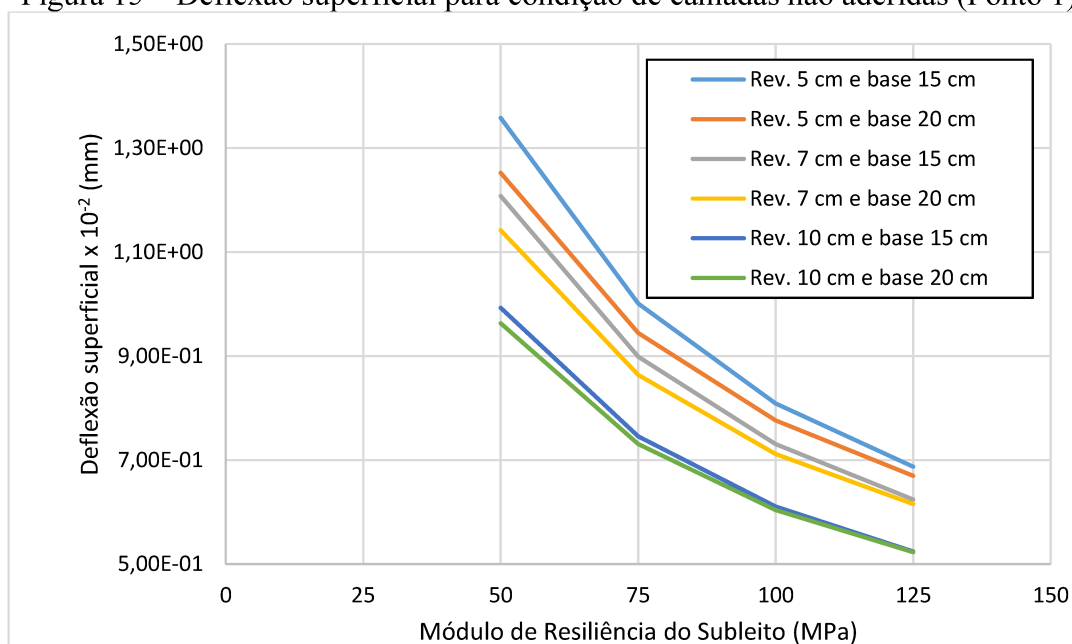
Tabela 2 – Deflexão superficial para condição de camadas aderidas (Ponto 1)

Condição de Aderência	Simulações	MR (MPa)	Uz x10 ⁻² (mm)					
			Rev=5cm Base=15cm	Rev=5cm Base=20cm	Rev=7cm Base=15cm	Rev=7cm Base=20cm	Rev=10cm Base=15cm	Rev=10cm Base=20cm
NAD	1	50	135,79	125,23	120,78	114,19	99,28	96,30
	2	75	100,11	94,40	89,85	86,35	74,57	73,09
	3	100	80,85	77,61	73,05	71,18	61,03	60,38
	4	125	68,71	66,96	62,40	61,53	52,40	52,27
AD	1	50	100,31	91,34	90,87	83,75	77,55	72,58
	2	75	75,27	70,14	68,57	64,48	58,74	55,86
	3	100	61,52	58,40	56,31	53,82	48,39	46,62
	4	125	52,74	50,86	48,47	46,96	41,75	40,67
Redução no Nível Deflectométrico	1	50	26%	27%	25%	27%	22%	25%
	2	75	25%	26%	24%	25%	21%	24%
	3	100	24%	25%	23%	24%	21%	23%
	4	125	23%	24%	22%	24%	20%	22%

Fonte: autora (2026).

A Figura 15 apresenta as deflexões resultantes para a condição não aderida em função do módulo de resiliência do subleito. Observa-se que, o aumento em 25 MPa no módulo de resiliência produz a maior taxa de redução nos resultados de deflexão para os menores níveis de rigidez. Além disso, à medida que a espessura do revestimento asfáltico diminui, aumenta a contribuição estrutural da camada de base. Nessa condição, a redução da deflexão proporcionada pelo aumento da espessura da base variou de aproximadamente 2,5% a 8,1%.

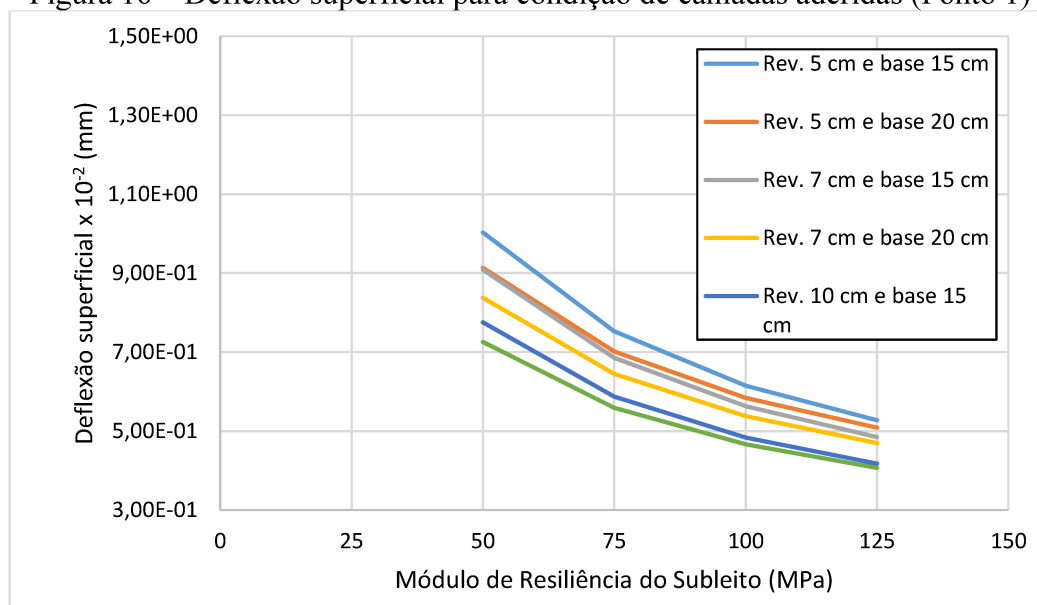
Figura 15 – Deflexão superficial para condição de camadas não aderidas (Ponto 1)



Fonte: autora (2026).

A Figura 16 apresenta as deflexões resultantes para a condição aderida. Assim como na condição não aderida, o aumento de 25 MPa no módulo de resiliência do subleito gera maiores reduções da deflexão para os menores níveis de rigidez. Também se verifica maior contribuição da camada de base nas estruturas com menos espessura de revestimento. Nessa condição, o aumento da espessura da base reduziu a deflexão entre 3,4% a 8,7%, evidenciando maior contribuição da base na redução do nível deflectométrico quando se tem camadas aderidas.

Figura 16 – Deflexão superficial para condição de camadas aderidas (Ponto 1)



Fonte: autora (2026).

4.2 Deformação de tração

Na Tabela 3, são apresentados os resultados referentes à deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico e as variações percentuais de redução em função das condições de aderência. Para a análise, foram considerados os maiores valores entre as componentes de deformação horizontal ϵ_x e ϵ_y , verificando-se que, em todas as simulações, a componente ϵ_y apresentou magnitude superior à ϵ_x , sendo, portanto, utilizada na avaliação. Nota-se que a aderência entre camadas resulta em redução do nível de deformação no fundo do revestimento asfáltico de até 42%, sendo essa redução mais eficiente para valores menores de rigidez do subleito.

Comparativamente aos resultados da Tabela 2, pode-se dizer que a condição de aderência é mais efetiva na redução do nível de deformação de tração na fibra inferior do revestimento do que na redução da deflexão superficial.

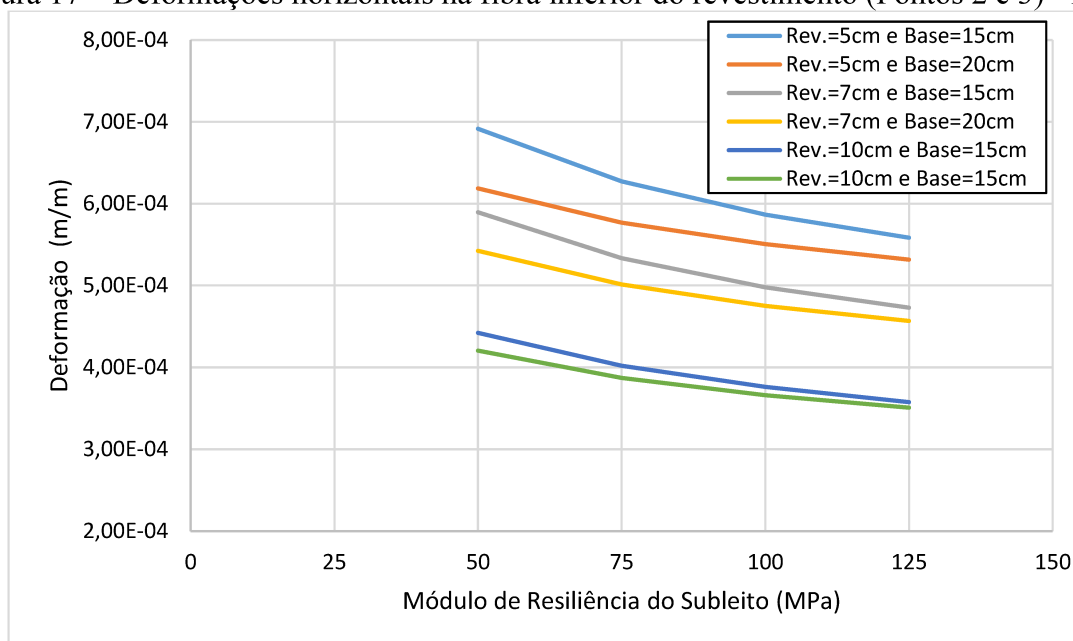
Tabela 3 - Deformações horizontais na face inferior do revestimento

Condição de Aderência	Simulações	MR (MPa)	$\varepsilon_y \times 10^{-4}$ (m/m)					
			Rev=5cm	Rev=5cm	Rev=7cm	Rev=7cm	Rev=10cm	Rev=10cm
			Base=15cm	Base=20cm	Base=15cm	Base=20cm	Base=15cm	Base=20cm
NAD	1	50	6,92	6,19	5,90	5,42	4,42	4,20
	2	75	6,27	5,77	5,33	5,01	4,02	3,87
	3	100	5,87	5,50	4,98	4,75	3,76	3,66
	4	125	5,58	5,32	4,73	4,57	3,58	3,51
AD	1	50	4,04	3,73	3,62	3,45	3,02	2,83
	2	75	3,85	3,65	3,50	3,32	2,82	2,70
	3	100	3,72	3,59	3,36	3,24	2,69	2,61
	4	125	3,63	3,54	3,26	3,18	2,60	2,54
Redução no	1	50	42%	40%	39%	36%	32%	33%
Nível de	2	75	39%	37%	34%	34%	30%	30%
Deformação	3	100	37%	35%	33%	32%	28%	29%
de Tração	4	125	35%	33%	31%	30%	27%	28%

Fonte: autora (2026).

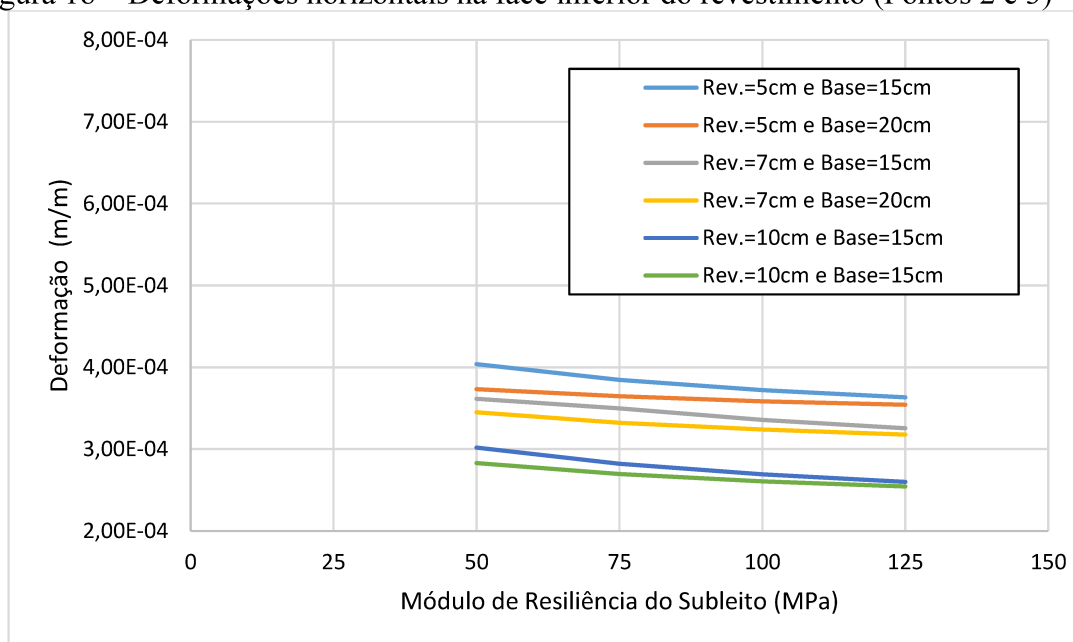
Nas Figuras 17 e 18, são mostrados os resultados de deformação de tração no fundo da camada de revestimento asfáltico em função dos valores de rigidez da camada de subleito para as condições de não aderência (NAD) e de aderência (AD), respectivamente. Observa-se que o comportamento é similar aquele verificado para a deflexão (Figuras 14 e 15), ou seja, à medida que a espessura do revestimento asfáltico diminui a responsabilidade da base aumenta. Para a condição não aderida a redução no nível de deformação de tração variou de 4,7% a 10,5%, enquanto para a condição aderida foi de 2,5% a 7,7%. Além disso, verifica-se que as maiores taxas de redução foram para os menores níveis de rigidez do subleito.

Figura 17 – Deformações horizontais na fibra inferior do revestimento (Pontos 2 e 3) - NAD



Fonte: autora (2026).

Figura 18 – Deformações horizontais na face inferior do revestimento (Pontos 2 e 3) - AD



Fonte: autora (2026).

A partir dos resultados apresentados, verifica-se que as deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento, em ambas as condições de aderência, apresentaram valores da ordem de grandeza de 10^{-4} . Para uma mesma espessura de revestimento e de base, observou-se que a deformação horizontal diminui com o aumento do módulo de resiliência do subleito. Dessa forma, o aumento da rigidez do subleito contribui para a redução das

deformações de tração na fibra inferior do revestimento, o que pode favorecer o desempenho estrutural quanto ao critério de fadiga.

4.3 Tensão vertical de compressão

Na Tabela 4 são apresentados os resultados das tensões verticais de compressão no topo do subleito para a condição não aderida, representadas pela componente σ_z nos pontos 4 e 5, referentes à Figura 14. A análise considerou as variações das espessuras do revestimento e da base, o módulo de resiliência do subleito. Os resultados da condição aderida não foram considerados, pois a hipótese de aderência entre a base e o subleito altera o estado de tensões nessa região. Nessa situação, a deformação vertical passa a sofrer maior influência das tensões horizontais, o que pode não representar adequadamente o comportamento físico do subleito.

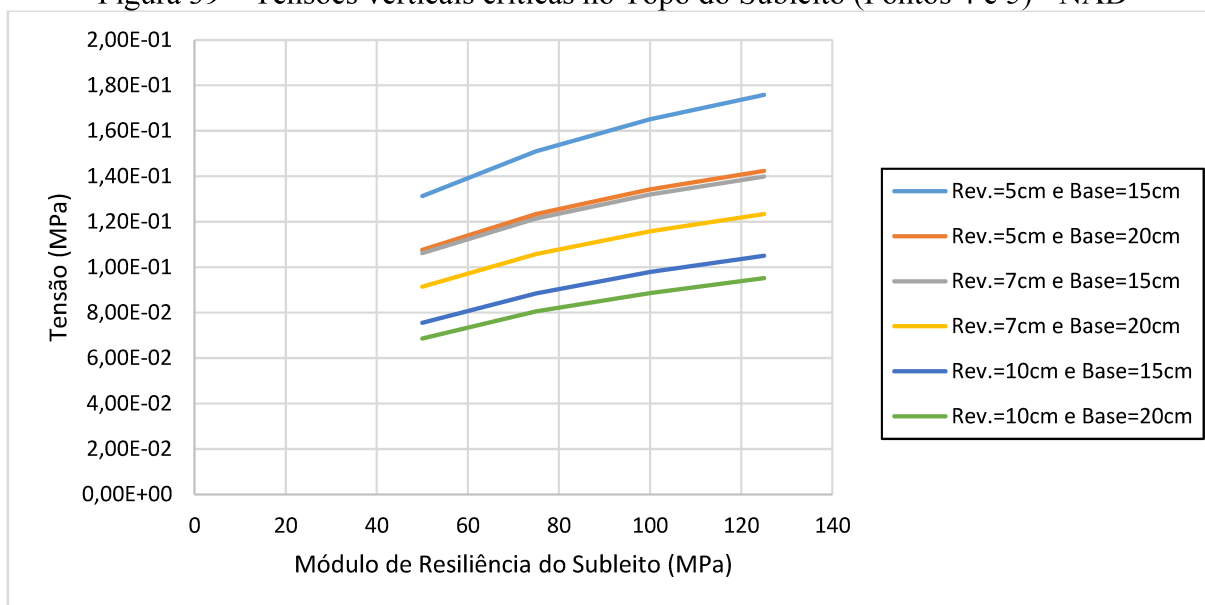
Tabela 4 – Tensões verticais críticas no Topo do Subleito (Pontos 4 e 5)

Condição de Aderência	Simulações	MR (MPa)	σ_z (MPa)					
			Rev=5cm Base=15cm	Rev=5cm Base=20cm	Rev=7cm Base=15cm	Rev=7cm Base=20cm	Rev=10cm Base=15cm	Rev=10cm Base=20cm
NAD	1	50	1,31E-01	1,08E-01	1,06E-01	9,14E-02	7,55E-02	6,86E-02
	2	75	1,51E-01	1,23E-01	1,21E-01	1,06E-01	8,85E-02	8,06E-02
	3	100	1,65E-01	1,34E-01	1,32E-01	1,16E-01	9,79E-02	8,87E-02
	4	125	1,76E-01	1,42E-01	1,40E-01	1,23E-01	1,05E-01	9,52E-02

Fonte: autora (2026).

Na Figura 19 são apresentados os resultados das tensões verticais de compressão em função do módulo de resiliência do subleito. Para todas as estruturas, observa-se aumento de σ_z com a elevação do módulo de resiliência. Considerando a variação do módulo de 50 para 125 MPa, o aumento da tensão vertical ficou entre aproximadamente 31,7% e 39,1%. Esse comportamento ocorre porque o subleito mais rígido apresenta menor capacidade de deformação e, conseqüentemente, desenvolve maiores tensões sob a ação do carregamento.

Figura 39 – Tensões verticais críticas no Topo do Subleito (Pontos 4 e 5) - NAD



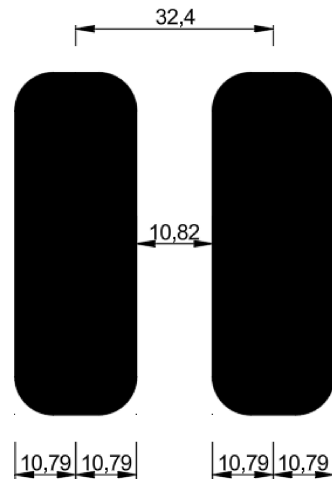
Fonte: autora (2026).

Observa-se também que o aumento das espessuras das camadas superiores reduz as tensões transmitidas ao subleito. O aumento da espessura da base de 15 para 20 cm proporcionou reduções entre aproximadamente 8,9% e 19,03%, sendo os maiores efeitos observados nas estruturas com revestimento de 5 cm. Já o aumento da espessura do revestimento de 5 para 10 cm resultou em reduções entre aproximadamente 33,0% e 42,5%, indicando que, entre as variáveis analisadas, a espessura do revestimento apresentou maior influência na redução da tensão vertical no topo do subleito.

4.4 Análise comparativa das condições de aderência entre camadas

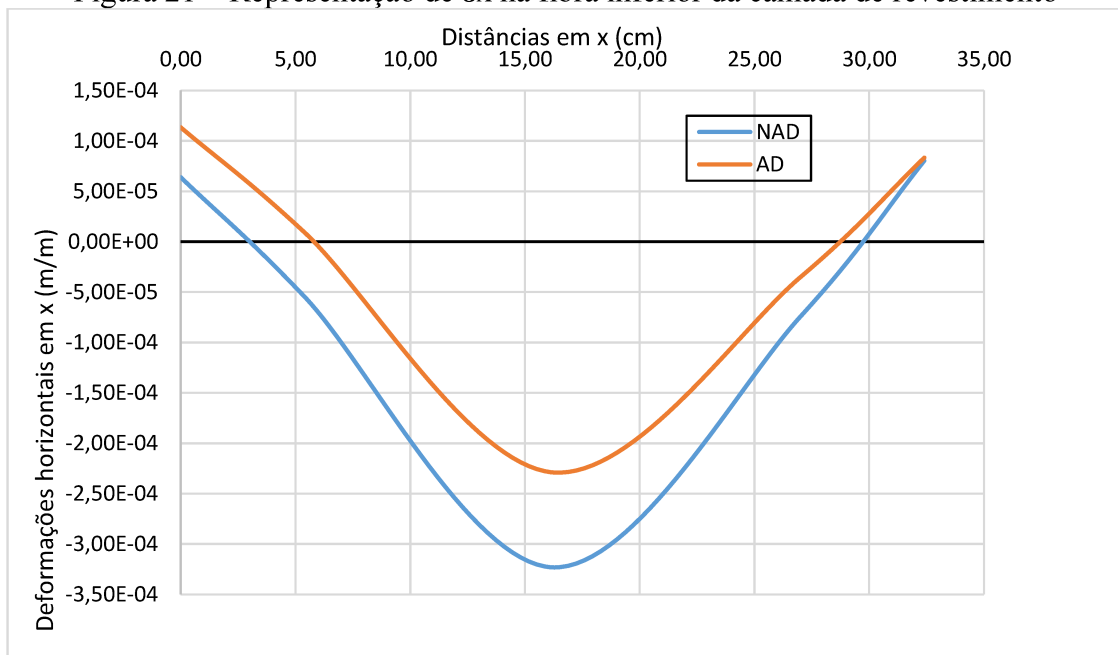
Para facilitar o entendimento da influência da aderência individualmente, foi definida uma situação em específico: revestimento com 7 cm de espessura e módulo de resiliência 3.500 MPa; base com 20 cm de espessura e módulo de resiliência igual a 200 MPa e subleito 100 MPa. Foram comparadas as condições AD e NAD sob a atuação de um carregamento de semieixo de rodas duplas, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Semieixo de rodas duplas



Fonte: autora (2026)

Na Figura 21, são apresentados os valores de deformação horizontal (ϵ_x), na fibra inferior da camada de revestimento. Nessa Figura foram distribuídos pontos na direção x, permitindo observar a variação das deformações em diferentes posições em relação à aplicação da carga. Nota-se que para todas as distâncias a condição de aderência produz menor nível de deformação de tração no fundo do revestimento asfáltico, sendo os pontos críticos aqueles que representam os centros dos pneus do semieixo. Evidencia-se, ainda, que a condição de aderência também exerce influência na posição de ocorrência da transição das deformações de tração para compressão.

Figura 21 – Representação de ϵ_x na fibra inferior da camada de revestimento

Fonte: autora (2026).

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das deformações de tração na fibra inferior do concreto asfáltico e o percentual de redução no nível desse tipo de deformação em função da condição de aderência e da posição dos pontos de análise na direção x.

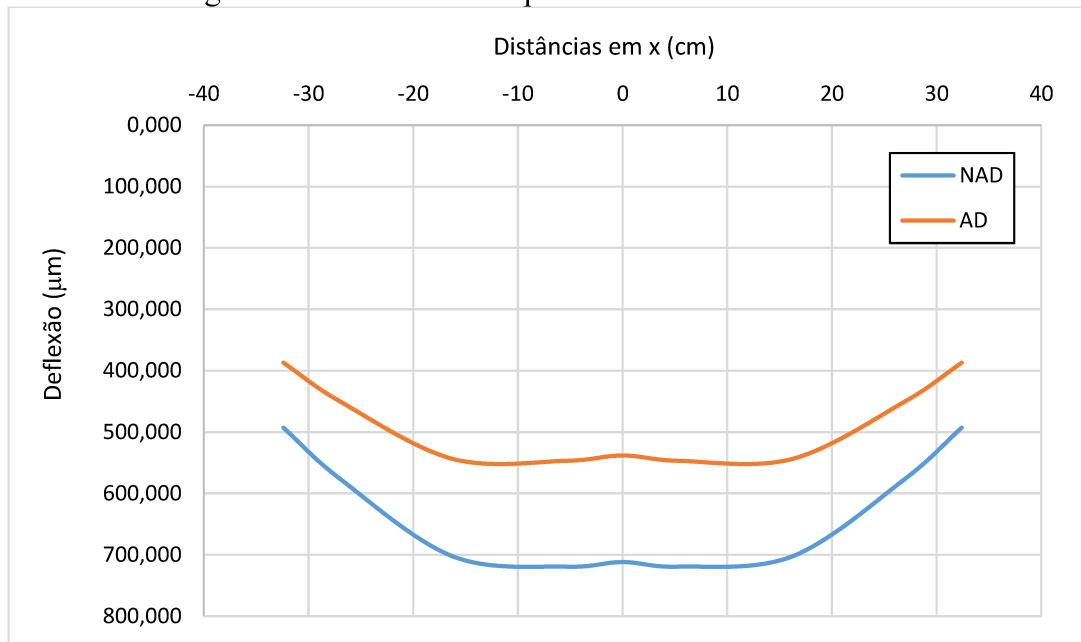
Tabela 5 - Deformações horizontais na fibra inferior da camada de revestimento

Coordenadas			ex (m/m)		Redução do Nível de Deformação de Tração (%)
X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	NAD	AD	
0,00	0,00	6,99	6,39E-05	1,13E-04	--
5,41	0,00	6,99	-5,50E-05	8,85E-06	--
16,20	0,00	6,99	-3,23E-04	-2,29E-04	29%
26,99	0,00	6,99	-7,46E-05	-3,54E-05	53%
32,40	0,00	6,99	8,04E-05	8,33E-05	--

Fonte: autora (2026).

A partir do valor obtido em $x=16,20$ cm localizado no centro de aplicação de carga, observa-se que a condição aderida, produz uma redução de 29% no nível de tração, sendo o efeito ainda mais relevante nos bordos dos pneus em que se tem uma redução de 53% no nível de deformação de tração ou a inversão do tipo de deformação. Esse resultado mostra que a ausência de aderência entre as camadas aumenta a solicitação de tração no revestimento asfáltico, o que pode contribuir para a redução da vida útil quanto ao critério de fadiga. Este comportamento também foi observado na análise da deflexão no topo do revestimento (U_z), apresentados na Figura 22 e Tabela 6.

Figura 22 – Deflexão no topo da camada de revestimento.



Fonte: autora (2026).

Tabela 6 - Deslocamentos verticais no topo do revestimento

Coordenadas			Deflexão (µm)		Redução no nível de deflexão (%)
X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	NAD	AD	
-32,40	0	0	492,932	387,112	21%
-26,99	0	0	575,912	449,822	22%
-16,20	0	0	702,657	543,908	23%
-5,41	0	0	719,267	546,869	24%
0,00	0	0	711,792	538,159	24%
5,41	0	0	719,267	546,869	24%
16,20	0	0	702,657	543,908	23%
26,99	0	0	575,912	449,822	22%
32,40	0	0	492,932	387,112	21%

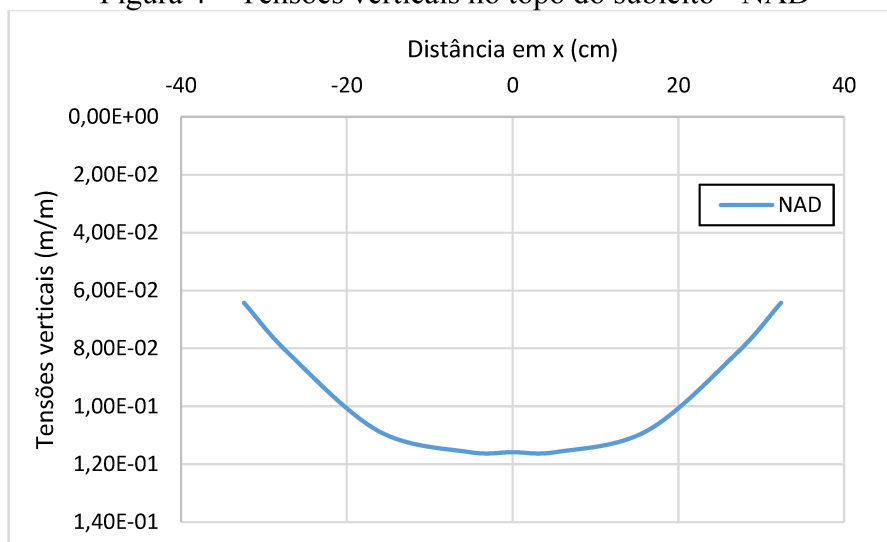
Fonte: autora (2026).

Percebe-se que os resultados dos deslocamentos verticais no topo da camada de revestimento obtidos na condição aderida foram, em média, 21% menores que aqueles correspondentes à condição não aderida. Esse aumento reforça a importância da aderência entre camadas para a redução das deflexões superficiais e para a melhoria da resposta estrutural do pavimento.

Na Figura 23 e na Tabela 7 são apresentados os resultados das tensões verticais de compressão (σ_z) no topo do subleito, considerando uma profundidade constante de $z=27$ cm, para a condição não aderida (NAD). Foram avaliados diferentes pontos distribuídos ao longo

do eixo x, permitindo analisar a distribuição da tensão vertical na superfície superior do subleito sob a ação do carregamento.

Figura 4 – Tensões verticais no topo do subleito - NAD



Fonte: autora (2026).

Tabela 7 - Tensões verticais no topo do subleito - NAD

Coordenadas			σ_z (MPa)
X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	NAD
-32,4	0	27,01	6,42E-02
-26,99	0	27,01	8,18E-02
-16,2	0	27,01	1,09E-01
-5,41	0	27,01	1,16E-01
0	0	27,01	1,16E-01
5,41	0	27,01	1,16E-01
16,2	0	27,01	1,09E-01
26,99	0	27,01	8,18E-02
32,4	0	27,01	6,42E-02

Fonte: autora (2026).

Com base nesses resultados, verifica-se que os maiores valores de tensão vertical de compressão ocorrem na região central de aplicação da carga ($x=0$), reduzindo gradativamente à medida que aumenta a distância em relação ao eixo de carregamento. Esse comportamento indica que a maior parte dos esforços é transmitida diretamente sob o ponto de aplicação da carga, diminuindo com o afastamento lateral.

A análise da tensão vertical de compressão foi realizada apenas para a condição não aderida, pois essa configuração representa de forma mais adequada o estado de tensões atuante no subleito. Na hipótese de aderência total entre as camadas, a deformação vertical (ϵ_z) deixa

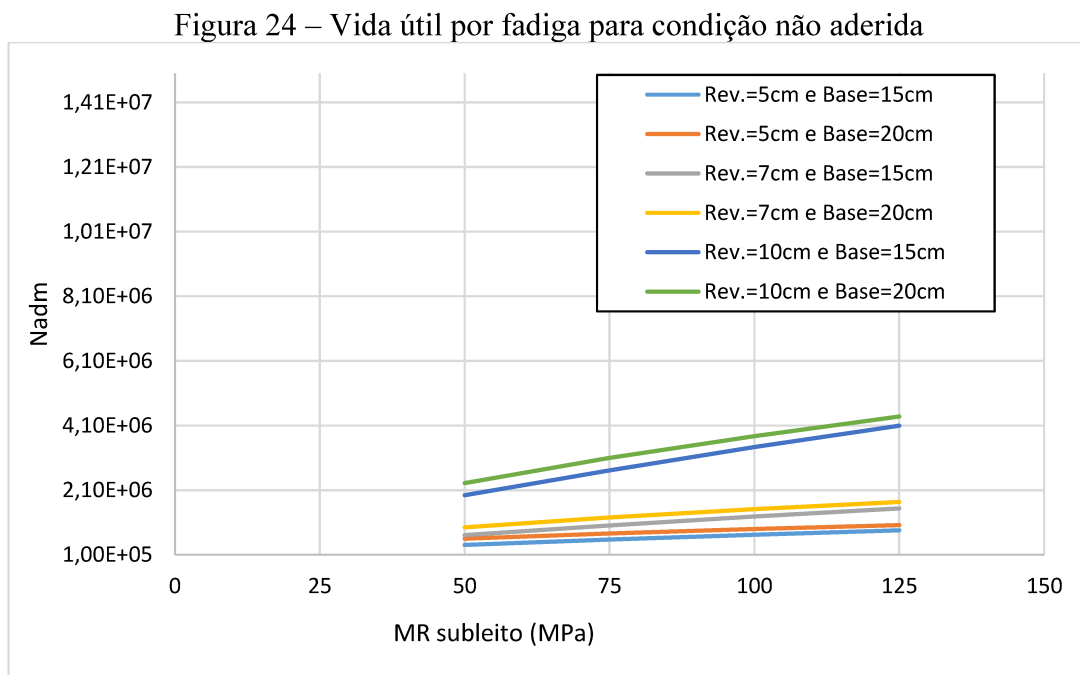
de depender predominantemente da tensão vertical (σ_z) e passa a ser influenciada também pelas tensões horizontais (σ_x e σ_y), conforme a relação da elasticidade apresentada na Equação 4.

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)}{E} \quad (4)$$

em que ε_z representa a deformação vertical; σ_x e σ_y , as tensões horizontais; ν , o coeficiente de Poisson; e E , o módulo de elasticidade do material. A equação mostra que a deformação vertical não depende apenas da tensão vertical, mas também das tensões horizontais. Assim, na condição aderida, a deformação vertical pode aumentar mesmo quando a tensão vertical diminui, e esse resultado pode não representar corretamente o comportamento do subleito.

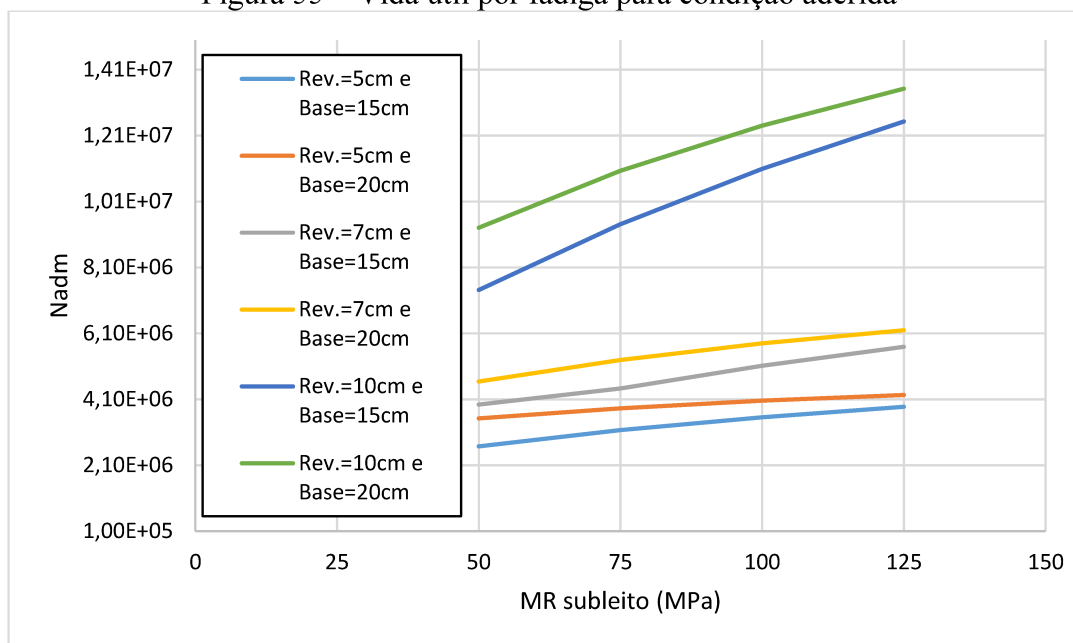
4.5 Influência das condições de aderência para análise da vida útil do pavimento

Com o objetivo de avaliar os efeitos das condições de interface aderida e não aderida quanto a vida útil do pavimento, foram aplicados os modelos descritos no item 3, considerando-se a carga de um semieixo simples padrão rodoviário. Os resultados estão apresentados no Apêndice (Tabelas 11 e 12) deste trabalho. Nas Figuras 24 e 25 são mostradas as estimativas de vida útil por fadiga calculadas com base na deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento, para as condições não aderida e aderida, respectivamente.



Fonte: autora (2026).

Figura 55 – Vida útil por fadiga para condição aderida



Fonte: autora (2026).

Analisando as Figuras 24 e 25, evidencia-se que para a condição não aderida os valores obtidos para N_{adm} (vida útil admissível) foram da ordem de grandeza de 10^5 e 10^6 , enquanto para a condição aderida ficaram na ordem de grandeza de 10^6 e 10^7 . Além disso, para as duas condições analisadas, observou-se acréscimo da vida útil por fadiga com o aumento da espessura do revestimento, da espessura da base e do módulo de resiliência do subleito.

A Tabela 8 compara a influência dos parâmetros na vida útil por fadiga. Foram analisados: o aumento da espessura do revestimento de 5 cm para 10 cm, o aumento do MR de 50 MPa para 125 MPa e o aumento da espessura da base de 15 cm para 20 cm. Verifica-se que o aumento da espessura do revestimento foi a medida mais eficiente para elevar a vida útil por fadiga, seguido pelo aumento do módulo de resiliência do subleito. O aumento da espessura da base apresentou a menor influência entre os parâmetros analisados.

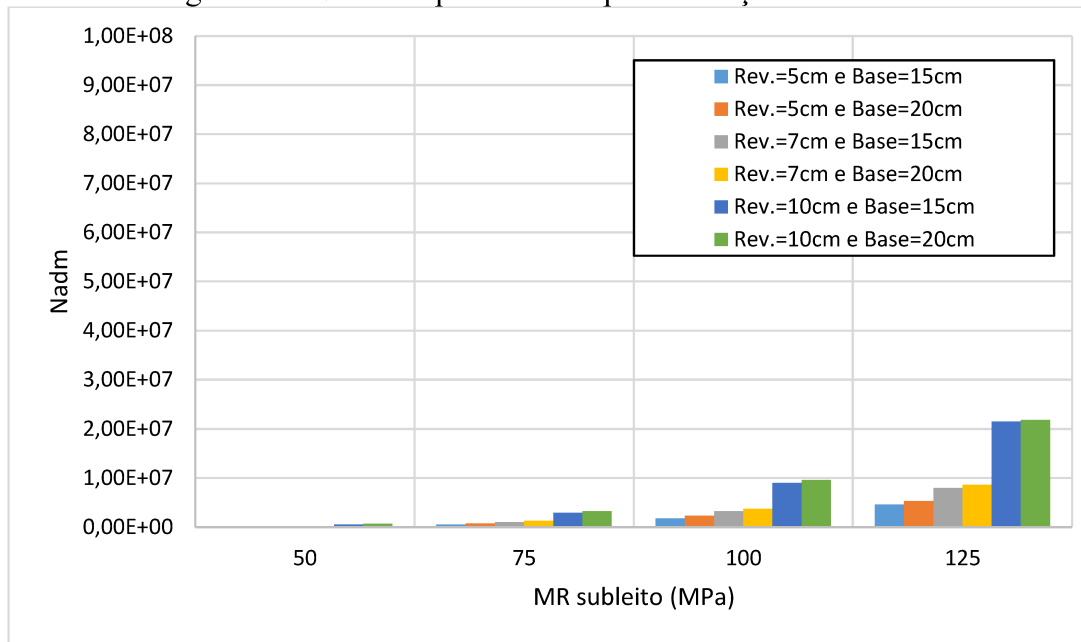
Tabela 8 – Influência dos parâmetros na vida útil por fadiga

Parâmetro analisado	Condição analisada	Vida útil por Fadiga (NAD)	Ganho % (NAD)	Vida útil por Fadiga (AD)	Ganho % (AD)
Espessura do revestimento	Rev. 5 cm Base 15 cm Subleito MR= 50 MPa	4,04E+05		2,67E+06	
	Rev. 10 cm Base 15 cm Subleito MR= 50 MPa	1,94E+06	380%	7,41E+06	178%
MR do subleito	Rev. 5 cm Base 15 cm Subleito MR= 50 MPa	4,04E+05		2,67E+06	
	Rev. 5 cm Base 15 cm Subleito MR= 125 MPa	8,56E+05	112%	3,87E+06	45%
Espessura da base	Rev. 5 cm Base 15 cm Subleito MR= 50 MPa	4,04E+05		2,67E+06	
	Rev. 5 cm Base 20 cm Subleito MR= 50 MPa	5,98E+05	48%	3,52E+06	32%

Fonte: autora (2026).

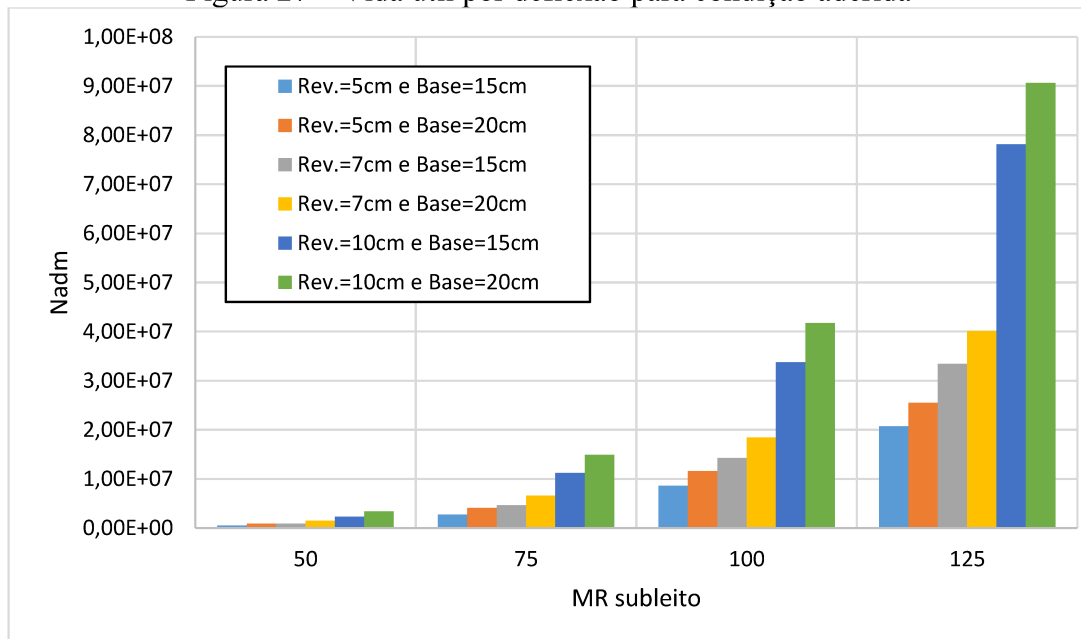
Comportamento semelhante foi observado na estimativa de vida útil baseada na deflexão superficial, conforme apresentado nas Figuras 26 e 27. Nota-se o efeito positivo da condição de aderência na vida útil estimada. Na condição aderida foi até 4,5 superior a condição não aderida. Observa-se também, que o aumento da espessura da base é menos efetivo no aumento da vida útil do pavimento em comparação com o aumento da espessura do concreto asfáltico e do aumento da rigidez do subleito.

Figura 66 – Vida útil por deflexão para condição não aderida



Fonte: autora (2026).

Figura 27 – Vida útil por deflexão para condição aderida

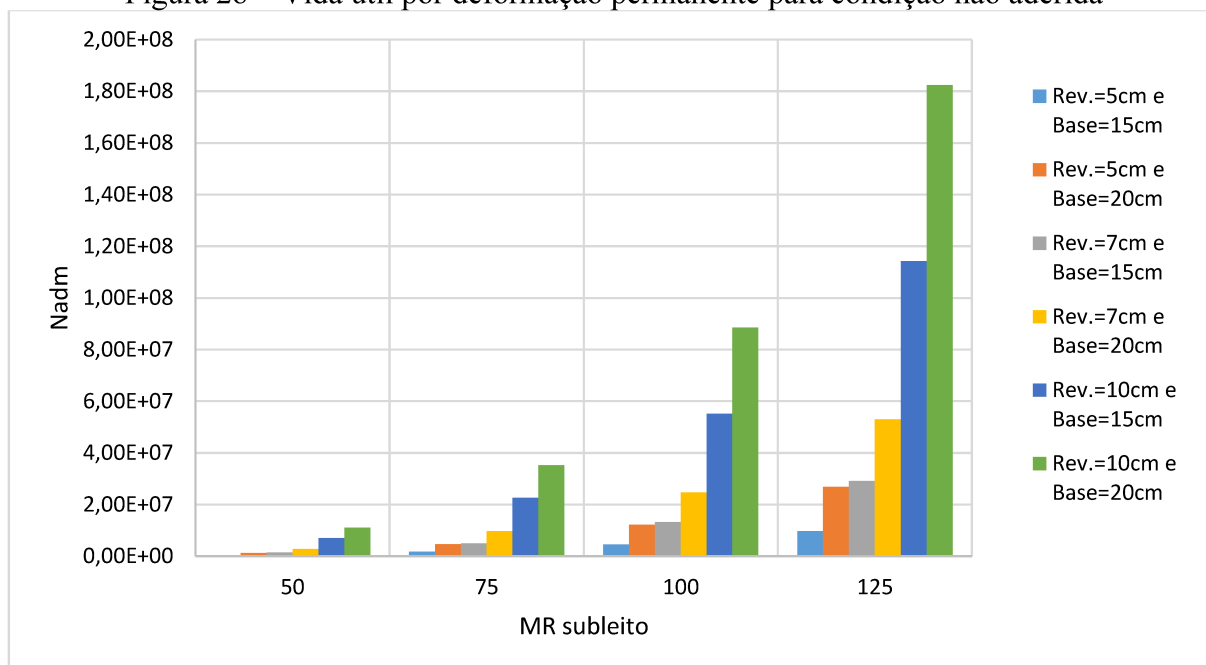


Fonte: autora (2026).

As estimativas de vida útil em função da deformação vertical no topo do subleito são apresentadas no Figura 28. Observa-se que a vida útil se eleva à medida que aumentam o módulo de resiliência do subleito, a espessura do revestimento e a espessura da base. Além disso, verifica-se que o aumento da espessura do revestimento proporcionou o maior ganho na

vida útil, seguido pelo aumento do módulo de resiliência do subleito, enquanto o aumento da espessura da base apresentou a menor influência.

Figura 28 – Vida útil por deformação permanente para condição não aderida



Fonte: autora (2026).

A análise foi realizada apenas para a condição não aderida, uma vez que essa configuração representa de forma mais adequada o estado de tensões atuante no subleito. Na condição aderida, a deformação vertical passa a ser significativamente influenciada pelas tensões horizontais, podendo resultar em valores elevados de deformação vertical mesmo com menor tensão vertical no subleito.

Embora a condição não aderida tenha apresentado elevada vida útil segundo o critério de deformação permanente, esse resultado deve ser analisado em conjunto com os demais critérios de desempenho. Conforme observado nas análises anteriores, a ausência de aderência entre as camadas aumenta as deformações de tração no revestimento e os deslocamentos superficiais, podendo comprometer o desempenho estrutural global do pavimento.

De acordo com Pinto e Preussler (2010) apesar da vida útil estimada para o critério de deformação permanente ser maior que a prevista para os demais critérios analisados, o trincamento por fadiga é um dos principais defeitos dos pavimentos flexíveis no Brasil. Dessa forma, a avaliação do desempenho estrutural deve considerar conjuntamente os diferentes critérios de dimensionamento.

5 CONCLUSÃO

Portanto, a partir das simulações realizadas no AEMC, observou-se que o comportamento estrutural do pavimento flexível é diretamente influenciado pela variação das espessuras do revestimento asfáltico e da base granular, pelo módulo de resiliência do subleito e pelas condições de aderência entre as camadas. Os resultados mostraram que a aderência entre revestimento e base melhora o comportamento estrutural do pavimento, reduzindo as deflexões superficiais e as deformações de tração no revestimento. Além disso, foi observado que o aumento do módulo de resiliência do subleito melhora o desempenho da estrutura, enquanto o aumento das espessuras das camadas reduz as solicitações atuantes no pavimento. Entre os parâmetros analisados e o intervalo de valores considerados, a espessura do revestimento foi a que mais influenciou a vida de fadiga, seguida pelo módulo de resiliência do subleito, enquanto a espessura da base apresentou menor influência.

Os resultados obtidos mostram que as propriedades dos materiais, a espessura das camadas e as condições de aderência influenciam diretamente o desempenho estrutural dos pavimentos. Assim, a escolha adequada desses parâmetros contribui para melhorar o desempenho e aumentar a durabilidade da estrutura. Esses resultados confirmam a importância da análise paramétrica como ferramenta de apoio ao dimensionamento, pois permite identificar a sensibilidade da estrutura às variáveis de projeto e avaliar combinações mais adequadas entre desempenho e viabilidade técnica.

REFERÊNCIAS

- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BARROS FILHO, A. H. Q.; PATRÍCIO, R. F.; LIMA, W. S. G. **Patologias encontradas em pavimentos flexíveis**. Acta Scientia, 2020. Disponível em: <https://periodicos.iesp.edu.br/actascientia/article/view/397>. Acesso em: 02 maio 2026.
- BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA; Petrobras, 2008.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 005/2003 – TER: defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos: terminologia**. Rio de Janeiro: DNIT, 2003.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.
- BUENO, Lucas Dotto. **Avaliação deflectométrica e de rigidez: estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2025**. Brasília, DF: CNT; SEST SENAT; ITL, 2025. 219 p. ISBN 978-85-68865-37-8. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/7df4efbc-4c55-44f9-b81e-9b8d4016f90e>. Acesso em: 05 maio 2026.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília, DF: CNT, 2017. 180 p. Disponível em: <https://cnt.org.br/por-que-pavimentos-rodovias-nao-duram>. Acesso em: 15 abr. 2026.
- DENG, Yubo; SHI, Xianming. **Modeling the rutting performance of asphalt pavements: a review**. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, v. 4, art. 15, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s43065-023-00082-9>. Acesso em: 14 maio 2026.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de ajuda: Programa MeDiNa: versão 1.1.6**. Brasília, DF: DNIT, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1.6/manual-medina-1-1-6.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2026.
- FOGAÇA, Bibiana Couto. **Análise paramétrica de estruturas de pavimento utilizando areia do litoral do Rio Grande do Sul estabilizada com cinza volante e cal**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/135400>. Acesso em: 14 maio 2026.
- FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **AEMC: módulo de cálculo de tensões e deformações**. Versão 2.4.6. abr. 2023. Programa de computador.

GIL, C. A. A. **Estudo da ligação entre camadas betuminosas de pavimentos flexíveis**. 2015. Dissertação – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstreams/b071bcb3-efab-471f-bc87-f306c45d3aa7/download>. Acesso em: 14 maio 2026.

GUIMARÃES, Poliana Avelar. **Estudo da aderência entre camadas asfálticas de pavimentos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-26072013-113513/publico/Dissertacao_Guimaraes_PolianaAvelar_unprotected.pdf. Acesso em: 03 março 2026.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto Simões. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro: Synergia, 2010.

PONTES, L. A. A.; SILVA, R. C.; NASCIMENTO, F. A. C. **Influência da condição de aderência entre camadas dos pavimentos flexíveis no dimensionamento mecanístico-empírico**. In: RIO DE TRANSPORTES, 18., 2018. Anais [...]. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://riodetransportes.org.br/xviii/anais/anais/AC-9956.pdf>. Acesso em: 14 março 2026.

ROCHA, M. L.; MARQUES, G. L. O.; SILVA, R. C. **Influência da condição de aderência entre camadas no dimensionamento de reforço de pavimentos asfálticos**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES DA ANPET, 2021. Anais [...]. 2021. Disponível em: <https://anpet.emnuvens.com.br/anpet/article/download/2419/904>. Acesso em: 15 fevereiro 2026.

SANTOS, A. G. dos. **Estudo teórico do efeito da interação entre camadas no comportamento estrutural de pavimentos asfálticos**. 2018. Tese – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-23052020-153122/>. Acesso em: 7 agosto 2026.

SÃO PAULO (Estado). Departamento de Estradas de Rodagem. **IP-DE-P00/001 A: projeto de pavimentação**. São Paulo: DER-SP, 2024. Disponível em: <https://www.der.sp.gov.br/WebSite/Documentos/Tecnicas.aspx#>. Acesso em: 20 janeiro 2026.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.

ANEXO A – RESULTADOS AEMC

Tabela 9 - Resultados AEMC – NAD

Simulação	Esp. Rev. (cm)	Esp. Base (cm)	MR (MPa)	Ponto 1	Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	Ponto 5
				Uz (μm)	Ex (m/m)	Ey (m/m)	Ex (m/m)	Ey (m/m)	Ez (m/m)	Ez (m/m)
1	5	15	50	1357,925	1,53E-04	-6,26E-04	-4,83E-04	-6,92E-04	7,31E-04	7,37E-04
2	5	15	75	1001,062	1,98E-04	-5,56E-04	-4,45E-04	-6,27E-04	5,47E-04	5,65E-04
3	5	15	100	808,523	2,25E-04	-5,11E-04	-4,22E-04	-5,87E-04	4,40E-04	4,64E-04
4	5	15	125	687,102	2,42E-04	-4,79E-04	-4,06E-04	-5,58E-04	3,69E-04	3,95E-04
5	5	20	50	1252,257	1,77E-04	-5,45E-04	-4,49E-04	-6,19E-04	6,04E-04	5,78E-04
6	5	20	75	943,962	2,10E-04	-5,00E-04	-4,22E-04	-5,77E-04	4,62E-04	4,47E-04
7	5	20	100	776,140	2,30E-04	-4,71E-04	-4,06E-04	-5,50E-04	3,77E-04	3,68E-04
8	5	20	125	669,606	2,43E-04	-4,50E-04	-3,95E-04	-5,32E-04	3,20E-04	3,14E-04
9	7	15	50	1207,819	-1,65E-05	-5,67E-04	-3,92E-04	-5,90E-04	5,96E-04	5,74E-04
10	7	15	75	898,458	2,85E-05	-5,06E-04	-3,55E-04	-5,33E-04	4,54E-04	4,42E-04
11	7	15	100	730,496	5,59E-05	-4,68E-04	-3,33E-04	-4,98E-04	3,71E-04	3,64E-04
12	7	15	125	624,049	7,45E-05	-4,40E-04	-3,18E-04	-4,73E-04	3,14E-04	3,11E-04
13	7	20	50	1141,877	7,43E-06	-5,14E-04	-3,69E-04	-5,42E-04	5,13E-04	4,77E-04
14	7	20	75	863,543	4,23E-05	-4,70E-04	-3,41E-04	-5,01E-04	3,96E-04	3,68E-04
15	7	20	100	711,792	6,39E-05	-4,42E-04	-3,23E-04	-4,75E-04	3,25E-04	3,05E-04
16	7	20	125	615,328	7,88E-05	-4,22E-04	-3,11E-04	-4,57E-04	2,77E-04	2,60E-04
17	10	15	50	992,753	-1,10E-04	-4,40E-04	-2,95E-04	-4,42E-04	4,24E-04	3,99E-04
18	10	15	75	745,655	-7,43E-05	-3,97E-04	-2,65E-04	-4,02E-04	3,31E-04	3,12E-04
19	10	15	100	610,330	-5,19E-05	-3,69E-04	-2,46E-04	-3,76E-04	2,75E-04	2,61E-04
20	10	15	125	523,972	-3,63E-05	-3,50E-04	-2,33E-04	-3,58E-04	2,36E-04	2,24E-04
21	10	20	50	962,964	-9,58E-05	-4,16E-04	-2,83E-04	-4,20E-04	3,85E-04	3,54E-04
22	10	20	75	730,869	-6,58E-05	-3,81E-04	-2,58E-04	-3,87E-04	3,02E-04	2,76E-04
23	10	20	100	603,778	-4,68E-05	-3,58E-04	-2,42E-04	-3,66E-04	2,49E-04	2,29E-04
24	10	20	125	522,702	-3,35E-05	-3,42E-04	-2,31E-04	-3,51E-04	2,14E-04	1,97E-04

Fonte: autora (2026).

Tabela 10 - Resultados AEMC – AD

Simulação	Esp. Rev. (cm)	Esp. Base (cm)	MR (MPa)	Ponto 1	Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	Ponto 5
				Uz (mm)	Ex (m/m)	Ey (m/m)	Ex (m/m)	Ey (m/m)	Ez (m/m)	Ez (m/m)
1	5	15	50	1003,126	2,19E-04	-3,33E-04	-3,05E-04	-4,04E-04	7,31E-04	7,37E-04
2	5	15	75	752,683	2,32E-04	-3,12E-04	-2,94E-04	-3,85E-04	5,47E-04	5,65E-04
3	5	15	100	615,220	2,40E-04	-2,98E-04	-2,87E-04	-3,72E-04	4,40E-04	4,64E-04
4	5	15	125	527,395	2,46E-04	-2,88E-04	-2,82E-04	-3,63E-04	3,69E-04	3,95E-04
5	5	20	50	913,372	2,37E-04	-2,99E-04	-2,88E-04	-3,73E-04	6,04E-04	5,78E-04
6	5	20	75	701,413	2,43E-04	-2,90E-04	-2,83E-04	-3,65E-04	4,62E-04	4,47E-04
7	5	20	100	584,032	2,47E-04	-2,83E-04	-2,79E-04	-3,59E-04	3,77E-04	3,68E-04
8	5	20	125	508,557	2,50E-04	-2,78E-04	-2,77E-04	-3,54E-04	3,20E-04	3,14E-04
9	7	15	50	908,679	7,64E-05	-3,38E-04	-2,59E-04	-3,62E-04	5,96E-04	5,74E-04
10	7	15	75	685,667	9,42E-05	-3,14E-04	-2,45E-04	-3,50E-04	4,54E-04	4,42E-04
11	7	15	100	563,099	1,05E-04	-2,99E-04	-2,35E-04	-3,36E-04	3,71E-04	3,64E-04
12	7	15	125	484,670	1,13E-04	-2,88E-04	-2,29E-04	-3,26E-04	3,14E-04	3,11E-04
13	7	20	50	837,539	9,56E-05	-3,09E-04	-2,43E-04	-3,45E-04	5,13E-04	4,77E-04
14	7	20	75	644,832	1,06E-04	-2,95E-04	-2,35E-04	-3,32E-04	3,96E-04	3,68E-04
15	7	20	100	538,159	1,13E-04	-2,86E-04	-2,29E-04	-3,24E-04	3,25E-04	3,05E-04
16	7	20	125	469,557	1,18E-04	-2,79E-04	-2,25E-04	-3,18E-04	2,77E-04	2,60E-04
17	10	15	50	775,502	-2,70E-05	-2,91E-04	-2,04E-04	-3,02E-04	4,24E-04	3,99E-04
18	10	15	75	587,392	-9,16E-06	-2,70E-04	-1,89E-04	-2,82E-04	3,31E-04	3,12E-04
19	10	15	100	483,855	2,22E-06	-2,56E-04	-1,80E-04	-2,69E-04	2,75E-04	2,61E-04
20	10	15	125	417,491	1,03E-05	-2,47E-04	-1,73E-04	-2,60E-04	2,36E-04	2,24E-04
21	10	20	50	725,792	-1,12E-05	-2,71E-04	-1,92E-04	-2,83E-04	3,85E-04	3,54E-04
22	10	20	75	558,625	1,05E-06	-2,57E-04	-1,81E-04	-2,70E-04	3,02E-04	2,76E-04
23	10	20	100	466,181	9,03E-06	-2,47E-04	-1,74E-04	-2,61E-04	2,49E-04	2,29E-04
24	10	20	125	406,737	1,47E-05	-2,40E-04	-1,70E-04	-2,54E-04	2,14E-04	1,97E-04

Fonte: autora (2026).

ANEXO B – ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DOS PAVIMENTOS

Tabela 11 – Vida útil para condição (Não Aderida)

Simulações	Variáveis	MR subleito (MPa)	D (mm)	Deformação de tração (m/m)	Deformação de compressão (m/m)	Deflexão (PRO11)	Fadiga (FHWA)	Deformação permanente (Dormon & Metcalf)
1	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 50 MPa)	50	135,792	6,92E-04	7,37E-04	9,60E+04	4,04E+05	5,01E+05
2	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 75 MPa)	75	100,106	6,27E-04	5,65E-04	5,43E+05	5,70E+05	1,77E+06
3	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 100 MPa)	100	80,852	5,87E-04	4,64E-04	1,83E+06	7,20E+05	4,56E+06
4	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 125 MPa)	125	68,710	5,58E-04	3,95E-04	4,61E+06	8,56E+05	9,76E+06
5	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 50 MPa)	50	125,226	6,19E-04	6,04E-04	1,52E+05	5,98E+05	1,29E+06
6	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 75 MPa)	75	94,396	5,77E-04	4,62E-04	7,58E+05	7,63E+05	4,65E+06
7	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 100 MPa)	100	77,614	5,50E-04	3,77E-04	2,31E+06	9,01E+05	1,22E+07
8	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 125 MPa)	125	66,961	5,32E-04	3,20E-04	5,33E+06	1,02E+06	2,68E+07
9	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 50 MPa)	50	120,782	5,90E-04	5,96E-04	1,87E+05	7,08E+05	1,38E+06
10	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 75 MPa)	75	89,846	5,33E-04	4,54E-04	1,00E+06	1,01E+06	5,01E+06
11	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 100 MPa)	100	73,050	4,98E-04	3,71E-04	3,25E+06	1,28E+06	1,33E+07
12	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 125 MPa)	125	62,405	4,73E-04	3,14E-04	7,96E+06	1,53E+06	2,91E+07
13	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 50 MPa)	50	114,188	5,42E-04	5,13E-04	2,57E+05	9,49E+05	2,82E+06
14	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 75 MPa)	75	86,354	5,01E-04	3,96E-04	1,26E+06	1,25E+06	9,70E+06

15	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 100 MPa)	100	71,179	4,75E-04	3,25E-04	3,77E+06	1,51E+06	2,47E+07
16	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 125 MPa)	125	61,533	4,57E-04	2,77E-04	8,62E+06	1,73E+06	5,30E+07
17	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 50 MPa)	50	99,275	4,42E-04	4,24E-04	5,69E+05	1,94E+06	7,00E+06
18	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 75 MPa)	75	74,566	4,02E-04	3,31E-04	2,89E+06	2,72E+06	2,27E+07
19	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 100 MPa)	100	61,033	3,76E-04	2,75E-04	9,03E+06	3,43E+06	5,53E+07
20	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 125 MPa)	125	52,397	3,58E-04	2,36E-04	2,15E+07	4,09E+06	1,14E+08
21	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 50 MPa)	50	96,296	4,20E-04	3,85E-04	6,77E+05	2,32E+06	1,11E+07
22	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 75 MPa)	75	73,087	3,87E-04	3,02E-04	3,24E+06	3,09E+06	3,53E+07
23	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 100 MPa)	100	60,378	3,66E-04	2,49E-04	9,60E+06	3,78E+06	8,85E+07
24	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 125 MPa)	125	52,270	3,51E-04	2,14E-04	2,18E+07	4,38E+06	1,82E+08

Fonte: autora (2026).

Tabela 12 – Vida útil para condição (Aderida)

Simulações	Variáveis	MR subleito (MPa)	D (mm)	Deformação de tração (m/m)	Deflexão (PRO11)	Fadiga (FHWA)
1	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 50 MPa)	50	100,313	4,04E-04	5,37E+05	2,67E+06
2	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 75 MPa)	75	75,268	3,85E-04	2,74E+06	3,17E+06
3	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 100 MPa)	100	61,522	3,72E-04	8,63E+06	3,56E+06
4	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 125 MPa)	125	52,739	3,63E-04	2,07E+07	3,87E+06
5	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 50 MPa)	50	91,337	3,73E-04	9,14E+05	3,52E+06
6	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 75 MPa)	75	70,141	3,65E-04	4,10E+06	3,83E+06
7	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 100 MPa)	100	58,403	3,59E-04	1,16E+07	4,05E+06
8	C.A. (Esp. 5 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 125 MPa)	125	50,856	3,54E-04	2,55E+07	4,23E+06
9	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 50 MPa)	50	90,868	3,62E-04	9,41E+05	3,94E+06
10	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 75 MPa)	75	68,567	3,50E-04	4,66E+06	4,42E+06
11	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 100 MPa)	100	56,310	3,36E-04	1,43E+07	5,11E+06
12	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 125 MPa)	125	48,467	3,26E-04	3,35E+07	5,69E+06
13	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 50 MPa)	50	83,754	3,45E-04	1,50E+06	4,64E+06
14	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 75 MPa)	75	64,483	3,32E-04	6,61E+06	5,29E+06
15	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 100 MPa)	100	53,816	3,24E-04	1,85E+07	5,79E+06
16	C.A. (Esp. 7 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 125 MPa)	125	46,956	3,18E-04	4,01E+07	6,19E+06
17	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 50 MPa)	50	77,550	3,02E-04	2,32E+06	7,41E+06
18	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 75 MPa)	75	58,739	2,82E-04	1,12E+07	9,41E+06

19	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 100 MPa)	100	48,385	2,69E-04	3,38E+07	1,11E+07
20	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 15 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 125 MPa)	125	41,749	2,60E-04	7,81E+07	1,25E+07
21	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 50 MPa)	50	72,579	2,83E-04	3,37E+06	9,30E+06
22	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 75 MPa)	75	55,863	2,70E-04	1,49E+07	1,10E+07
23	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 100 MPa)	100	46,618	2,61E-04	4,18E+07	1,24E+07
24	C.A. (Esp. 10 cm, MR= 3500 MPa) Base BGS (Esp. 20 cm, MR=200 MPa) Subleito (MR= 125 MPa)	125	40,674	2,54E-04	9,06E+07	1,35E+07

Fonte: autora (2026).