



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



SAMIRA MOTA GONÇALVES

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DO COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS
SEMIRRÍGIDOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CARGA E VARIÁVEIS
ESTRUTURAIS**

UBERLÂNDIA
2025

SAMIRA MOTA GONÇALVES

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DO COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS
SEMIRRÍGIDOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CARGA E VARIÁVEIS
ESTRUTURAIS**

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: Rodrigo Pires Leandro

UBERLÂNDIA

2025

Dedico este trabalho a memória do meu avô,
Joaquim T. Mota, cuja sua sabedoria, amor e
exemplo de vida continuam a me guiar. Sua
presença permanece viva em minha memória e
em tudo o que sou. Esta conquista é reflexo do
legado que deixou em mim.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde e força para enfrentar as dificuldades.

À minha família, que sempre foi meu porto seguro. Por todos os conselhos nos momentos dificeis e pelo apoio durante cada etapa dessa jornada. Meu eterno agradecimento a vocês.

Aos meus professores, agradeço pelo compartilhamento do conhecimento e pelos ensinamentos que levarei para além da vida acadêmica.

Por fim, agradeço a todos que, de maneira direta ou indireta, fizeram parte dessa etapa da minha vida.

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso tem como intuito realizar uma análise paramétrica do comportamento de pavimentos semirrígidos sob diversas condições de carregamento e parâmetros estruturais. Nesse contexto, foi verificado o impacto dos diferentes níveis de carga, espessuras e módulos de resiliência da camada de base em brita graduada tratada com cimento (BGTC), bem como dos módulos de resiliência do subleito em relação a previsão de desempenho do pavimento. Para estimar a vida útil do pavimento, foi considerado três modos de falhas principais, sendo eles: fadiga, deformação permanente e deflexão superficial.

Diante disso, foi utilizado o programa AEMC para realizar as simulações computacionais, visto que fornece dados de tensões, deformações e deslocamentos, proporcionando assim análises de vida útil do pavimento, levando em consideração a influência de cada uma das variáveis estabelecidas. Nesse estudo, foram determinados cerca de 24 cenários distintos de estruturas de pavimentos semirrígidos, simulados individualmente para os carregamentos de 8,2, 10, 11,25 e 12 toneladas, totalizando assim cerca de 96 simulações.

Contudo, os resultados obtidos apresentaram que o aumento do módulo de resiliência da BGTC teve impacto negativo na vida útil por fadiga, que se demonstrou o critério de falha mais crítico. Enquanto isso, camadas mais espessas da base contribuíram para o crescimento de ciclos de vida útil de maneira expressiva, sendo o parâmetro mais significativo perante ao desempenho do pavimento em termos de fadiga e deformação permanente. A sobrecarga apresenta impacto direto no comportamento dos pavimentos, reduzindo sua durabilidade em grande escala, principalmente, quando relacionado com o critério de deflexão superficial e com subleitos de baixa rigidez. Logo, esse estudo enfatiza a tamanha importância da fiscalização do peso dos veículos comerciais, bem como a adoção de melhores práticas de dimensionamento dos pavimentos.

Palavras-chave: análise paramétrica; pavimentos semirrígidos; vida útil; BGTC; AEMC.

ABSTRACT

This final project aims to perform a parametric analysis of the behavior of semi-rigid pavements under various loading conditions and structural parameters. In this context, the impact of different load levels, thicknesses, and resilience moduli of the cement-treated graded gravel (CGCB) base course, as well as the resilience moduli of the subgrade, was assessed on pavement performance prediction. To estimate pavement service life, three main failure modes were considered: fatigue, permanent deformation, and surface deflection.

Consequently, the AEMC program was used to perform computational simulations, as it provides stress, deformation, and displacement data, thus enabling pavement service life analyses, taking into account the influence of each of the established variables. This study determined approximately 24 distinct semi-rigid pavement structure scenarios, simulated individually for loads of 8.2, 10, 11.25, and 12 tons, totaling approximately 96 simulations.

However, the results showed that increasing the BGTC's resilient modulus had a negative impact on fatigue life, which proved to be the most critical failure criterion. Meanwhile, thicker base layers significantly increased service life cycles, representing the most significant parameter for pavement performance in terms of fatigue and permanent deformation. Overloading has a direct impact on pavement behavior, significantly reducing its durability, especially when related to the surface deflection criterion and low-stiffness subgrades. Therefore, this study emphasizes the importance of monitoring the weight of commercial vehicles, as well as the adoption of best practices for pavement design.

Keywords: parametric analysis; semi-rigid pavements; service life; BGTC; AEMC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Pavimentos Semirrígidos	14
Figura 2 – Interface do AEMC	18
Figura 3 - Estrutura do Modelo Simulado	20
Figura 4 - Eixo Simples de Rodas Duplas.....	22
Figura 5 - Pontos de Análise do Pavimento	23

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação da Vida Útil por Fadiga em função do Módulo de Resiliência da BGTC	27
Gráfico 2 - Variação da Vida Útil por Deformação Permanente em função do Módulo de Resiliência da BGTC	27
Gráfico 3 - Variação da Vida Útil por Deflexão em função do Módulo de Resiliência da BGTC	28
Gráfico 4 - Variação da Vida Útil por Fadiga em função da Espessura da Camada de BGTC	29
Gráfico 5 - Variação da Vida Útil por Deformação Permanente em função da Espessura da Camada de BGTC.....	29
Gráfico 6 - Variação da Vida Útil por Deflexão em função da Espessura da Camada de BGTC	30
Gráfico 7 - Variação da Vida Útil por Fadiga em função do Módulo de Resiliência do Subleito	31
Gráfico 8 - Variação da Vida Útil por Deformação Permanente em função do Módulo de Resiliência do Subleito	31
Gráfico 9 - Variação da Vida Útil por Deflexão em função do Módulo de Resiliência do Subleito	32
Gráfico 10 - Variação da Vida Útil em função do carregamento aplicado	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tolerância dos Limites Legais de Carga	15
Tabela 2 - Limite Máximo de Peso por Eixo	16
Tabela 3 - Cenários Simulados.....	21
Tabela A1 – Resultados do Carregamento 8,2 t	38
Tabela A2 – Resultados do Carregamento 10 t	39
Tabela A3 – Resultados do Carregamento 11,25 t	40
Tabela A4 – Resultados do Carregamento 12 t	41
Tabela B1 – Vida Útil para Carregamento de 8,2 t	42
Tabela B2 – Vida Útil para Carregamento de 10 t	43
Tabela B3 – Vida Útil para Carregamento de 11,25 t	44
Tabela B4 – Vida Útil para Carregamento de 12 t	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
MR	Módulo de Resiliência
Nd	Número de repetições de aplicação da carga até a falha por deflexão superficial
Ndp	Número de repetições de aplicação da carga até a falha por deformação permanente
Nf	Número de repetições de aplicação da carga até a falha por fadiga

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Objetivos	12
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	12
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	12
1.2	Justificativa	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Estrutura dos Pavimentos Semirrígidos	14
2.2	Cenário de Limites de Cargas	15
2.3	Modos de Ruptura do Pavimento.....	16
2.4	Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC).....	17
3	METODOLOGIA.....	19
3.1	Estrutura do Modelo Simulado e Parâmetros Variáveis	19
3.2	Carregamentos Analisados	21
3.3	Avaliação da Vida Útil do Pavimento	24
3.3.1	<i>Vida Útil por Fadiga.....</i>	24
3.3.2	<i>Vida Útil por Deformação Permanente</i>	24
3.3.3	<i>Vida Útil por Deflexão Superficial.....</i>	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
4.1	Influência do Módulo de Resiliência da BGTC	26
4.2	Influência da Espessura da Camada de BGTC	28
4.3	Influência do Módulo de Resiliência do Subleito.....	30
4.4	Influência do Carregamento Aplicado.....	32
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
	REFERÊNCIAS.....	35
	APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS DO AEMC	38
	APÊNDICE B – ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DOS PAVIMENTOS	42

1 INTRODUÇÃO

O sistema de transporte rodoviário é o principal meio de escoamento de mercadorias e pessoas utilizado no Brasil, sendo assim, exerce um papel fundamental na economia nacional. Entretanto, a intensa utilização desse modal acaba colocando a infraestrutura rodoviária sob diversos entraves, dentre eles destaca-se o excesso de carga encontrado nos veículos comerciais, que acaba desencadeando diversos danos estruturais no pavimento de maneira precoce, como trincas e afundamentos de trilha de roda. Segundo Albano (2005), foi identificado uma redução média de 23% da durabilidade do pavimento em estudo de rodovias federais do estado do Rio Grande do Sul que não possuem fiscalização de pesagem. Contudo, a vida útil projetada é comprometida significativamente pela sobrecarga, aumentando os custos de manutenção da via, o que leva a uma análise crítica do comportamento dos pavimentos rodoviários.

Os pavimentos rodoviários são superestruturas constituídas por um sistema de camadas de espessuras finitas, sobrepostas sobre um semi-espelho considerado teoricamente como infinito, denominado de infraestrutura ou subleito. Os pavimentos podem ser classificados como: flexíveis – aquele que todas as camadas sofrem deformações elásticas mediante a aplicação de um carregamento, sendo assim, a carga é distribuída em partes aproximadamente equivalentes entre as camadas; semirrígidos – são compostos por uma base cimentada por algum aglutinante que contenha propriedades cimentícias; e rígidos – aqueles que possuem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores, absorvendo assim praticamente todas as tensões provenientes de um certo carregamento aplicado (DNIT, 2006).

Nesse contexto, os pavimentos semirrígidos se apresentam como uma boa alternativa para suportar carregamentos de tráfego médio a pesado, em virtude da sua camada de base e/ou sub-base cimentada, que configura uma alta rigidez. A Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) é um material estabilizado com ligante hidráulico bastante presente em pavimentos de caráter semirrígido, visto que oferece um bom comportamento estrutural. O emprego da BGTC nas estruturas semirrígidas vem sendo bastante estudadas nos últimos tempo, como encontrado nos trabalhos de Andrade (2017), Santos (2019), Back (2022) e Cargin (2023).

Com o intuito de analisar profundamente o desempenho estrutural de pavimentos em relação ao efeito da sobrecarga e da heterogeneidade estrutural é realizado estudos paramétricos, mediante a utilização de software de modelagem computacional. A análise paramétrica é uma abordagem relevante em estudos de pavimentação, conforme apresentado no trabalho de Fogaça (1996). Desse modo, o presente trabalho tem como intuito realizar uma análise paramétrica do comportamento de pavimentos semirrígidos perante diversas condições

de carga e variáveis estruturais, considerando a utilização do programa AEMC para simular os distintos cenários.

Contudo, este estudo busca compreender o comportamento de pavimentos semirrígidos sob efeito de parâmetros estruturais e operacionais distintos. A presente análise visa identificar os fatores mais significativos no desempenho estrutural, favorecendo a orientação para melhorias nos dimensionamentos de pavimentos semirrígidos, além de auxiliar em possíveis estratégias de reabilitação das rodovias brasileiras.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento estrutural de pavimentos semirrígidos submetidos a diferentes condições de carregamento e parâmetros estruturais, por meio de modelagens computacionais realizadas com o software AEMC.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, tem-se:

- a) Determinar a vida útil do pavimento nos diferentes cenários simulados, considerando os critérios de fadiga, deformação permanente e deflexão superficial;
- b) Analisar o impacto do módulo de resiliência da camada de BGTC sobre a vida útil dos pavimentos;
- c) Observar a influência da espessura da BGTC no desempenho do pavimento;
- d) Verificar a resposta estrutural do pavimento sob diferentes módulos de resiliência do subleito;
- e) Avaliar o efeito de diferentes condições de carregamento na vida útil do pavimento.

1.2 Justificativa

De acordo com a Confederação Nacional do Transportes - CNT (2022), o sistema de transporte rodoviário representa cerca de 64,9% do escoamento de todas as mercadorias no território brasileiro. Com isso, urge-se a necessidade de uma fiscalização acentuada dos postos de pesagem, uma vez que a sobrecarga veicular vem sendo frequentemente observada no país, impactando significativamente o desempenho e a durabilidade dos pavimentos. Os custos de

manutenção das rodovias aumentam cerca de 33% devido a inexistência de postos de pesagem, conforme estratégias de conservação adotadas no estudo de Albano (2005).

Os pavimentos semirrígidos têm sido amplamente utilizados em rodovias de médio a alto volume de tráfego, em virtude da sua maior capacidade de suporte a cargas elevadas. Isso se deve, em muito, ao fato da alta rigidez das camadas formadas por materiais estabilizados com ligante hidráulico, em geral localizadas na base e/ou sub-base. No entanto, a variabilidade dos parâmetros estruturais apresenta entraves relevantes em relação a previsão de durabilidade dos pavimentos, solicitando análises precisas para facilitar os processos de dimensionamentos.

Diante disso, a análise paramétrica proposta nesse trabalho se apresenta como uma alternativa eficaz para compreender o comportamento de pavimentos semirrígidos, sendo viabilizada pela utilização do programa AEMC. Tal ferramenta computacional permite o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos sob diferentes condições de carga e propriedades estruturais, possibilitando assim a estimativa da vida útil do pavimento. O presente estudo busca compreender a influência das variações de parâmetros como, módulo de resiliência da camada de base cimentada e do subleito, espessura da base cimentada bem como espectro de carregamentos dentro de limites legais e em sobrecarga, perante os critérios de desempenho dos pavimentos. Logo, essa análise visa destacar a sensibilidade das variáveis estruturais bem como o tamanho impacto gerado pela sobrecarga nos pavimentos, reforçando assim a importância da fiscalização de pesagem em veículos comerciais, além da adoção de melhores práticas em projetos, a fim de aumentar a durabilidade da estrutura e minimizar custos de manutenção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estrutura dos Pavimentos Semirrígidos

De acordo com o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP, 2006), um pavimento semirrígido pode ser entendido como:

Pavimento semi-rígido é constituído por revestimento asfáltico e camadas de base ou subbase em material estabilizado com adição de cimento. O pavimento semi-rígido é conhecido como pavimento do tipo direto quando a camada de revestimento asfáltico é executada sobre camada de base cimentada e do tipo indireto ou invertido quando a camada de revestimento é executada sobre camada de base granular e sub-base cimentada.

Sendo assim, o pavimento semirrígido é aquele que apresenta um comportamento intermediário entre os pavimentos flexíveis e rígidos. Isso se deve, ao fato de que embora haja a estabilização dos materiais com ligantes hidráulicos, os mesmos não apresentam desempenho estrutural equivalente ao do concreto de cimento Portland.

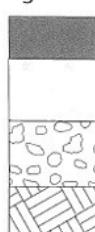
Sob esse viés, é lícito salientar que existem diversas combinações para estruturas de pavimentos semirrígidos, conforme apresentado pela Figura 1.

Figura 1 - Tipos de Pavimentos Semirrígidos

Caso A

Estrutura semirrígida tradicional

Revestimento



Mistura betuminosa

Base

Material estabilizado com ligante hidráulico

Sub-base

Material não estabilizado ou estabilizado com ligante hidráulico

Subleito

Mistura betuminosa

Caso B

Estrutura semirrígida híbrida ou mista

Revestimento



Mistura betuminosa

Base

Material estabilizado com ligante betuminoso

Sub-base

Material estabilizado com ligante hidráulico

Subleito

Caso C

Estrutura semirrígida invertida

Revestimento



Mistura betuminosa

Base

Material não estabilizado

Sub-base

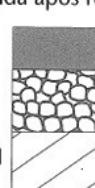
Material estabilizado com ligante hidráulico

Subleito

Caso D

Estrutura semirrígida após reabilitação

Novo revestimento



Mistura betuminosa

Camada de ligação

Material estabilizado com ligante hidráulico

Pavimento flexível original

Fonte: Balbo (2007)

Os materiais estabilizados com ligante hidráulico utilizados com maior recorrência em pavimentos de comportamento semirrígidos são: brita graduada tratada com cimento (BGTC), solo-cimento, solo-cal, solo-cal-cimento, concreto compactado a rolo (CCR) (Bernucci *et al*, 2008). Nesse trabalho, o material cimentado objeto de estudo será a brita graduada tratada com cimento (BGTC).

No Brasil, a BGTC passou a ser melhor difundida após a década de 1970 (Bernucci *et al*, 2008). A partir daí, é um dos materiais estabilizados com adição de cimento mais presente nas soluções estruturais de pavimentos semirrígidos. Segundo Balbo (2007), a BGTC consiste em uma mistura de agregados do tipo BGS (pedras britadas) que contém uma pequena porção de cimento Portland, geralmente, ficam em torno de 3% a 4% em relação ao peso da mistura total. Tal material é responsável por garantir a rigidez da estrutura, conseguindo assim proporcionar um maior suporte as cargas de tráfego da via.

2.2 Cenário de Limites de Cargas

Para garantir a segurança e a conservação das rodovias brasileiras, foi estabelecido uma legislação para regulamentar os limites de carga para veículos comerciais, sendo conhecida popularmente como Lei da Balança. Os excessos de carga contribuem significativamente para o agravamento dos danos nas rodovias, elevando os custos de manutenção e os riscos de sinistros.

A Lei nº 14.229 (Brasil, 2021) apresenta as tolerâncias aplicadas sobre os limites legais do peso bruto total (peso máximo que o veículo transmite para o pavimento, representa a soma da tara mais a lotação) e do peso bruto transmitido por eixo dos veículos comerciais brasileiros. A Tabela 1, apresenta as tolerâncias legais de carga atualmente em vigor.

Tabela 1 - Tolerância dos Limites Legais de Carga

Tipo de Limite	Tolerância
Peso Bruto Total	5%
Peso Bruto Transmitido por Eixo	12,5%

Fonte: Brasil (2021)

A pesagem por eixo é capaz de evitar que a carga do veículo esteja mal distribuída, garantindo maior segurança para os usuários da via e minimizando gastos de manutenção do

veículo. Sendo assim, a Tabela 2 apresenta os limites de distribuição do peso máximo admitido por eixo nas rodovias federais.

Tabela 2 - Limite Máximo de Peso por Eixo

Item	Tipo de configuração	Configuração de Eixos	D – Distância entre eixos (m)	Peso máximo (t)
A	Eixo isolado de 2 pneumáticos		-	6
B	Eixo isolado de 4 pneumáticos		-	10
C	Conjunto de 2 eixos direcionais com 2 pneumáticos cada		$D \geq 1,20$	12
D	Conjunto de 2 eixos em tandem		$1,20 < D \leq 2,40$	17
E	Conjunto de 2 eixos não em tandem		$1,20 < D \leq 2,40$	15
F	Conjunto de 3 eixos em tandem		$1,20 < D \leq 2,40$	25,5
G	Conjunto de dois eixos, sendo um dotado de 4 pneumáticos e outro de 2 pneumáticos interligados por suspensão especial		$D \leq 1,20$	9
H	Conjunto de dois eixos, sendo um dotado de 4 pneumáticos e outro de 2 pneumáticos interligados por suspensão especial		$1,20 < D \leq 2,40$	13,5

Fonte: ANTT (2018)

2.3 Modos de Ruptura do Pavimento

De acordo com a Norma DNIT 005/2003 – TER (DNIT, 2003), existem diversos tipos de defeitos presentes nos pavimentos flexíveis e semirrígidos que influenciam diretamente o processo de ruptura, sendo eles:

- Fendas: consiste em qualquer descontinuidade encontrada na camada de rolamento, possuindo aberturas de menor ou maior relevância. Tal cenário pode se subdividir em: fissuras (fendas de largura capilar, menor porte) e as diversas trincas (fenda com abertura de maior porte).
- Afundamento: está vinculado ao fenômeno da deformação permanente que compreende na depressão da superfície de rolamento, podendo ser apresentada ainda como: afundamento plástico (ocorrência de fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento) e afundamento de consolidação (ocasionado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento).
- Ondulação ou Corrugação: presença de deformações do tipo ondulações ou corrugação na camada de rolamento do pavimento.
- Escorregamento: processo de deslocamento da superfície asfáltica em relação a camada subjacente do pavimento.
- Exsudação: liberação do ligante betuminoso por meio do revestimento asfáltico, em virtude do excesso de ligante aplicado.

- f) Desgaste: remoção gradativa dos agregados constituintes do pavimento, ocasionados pelos esforços do tráfego.
- g) Panela ou Buraco: formação de cavidades na superfície asfáltica devido à falta de aderência entre as camadas do pavimento. Dependendo da situação pode atingir camadas inferiores da estrutura.
- h) Remendo: processo de preenchimento das panelas ou buracos existentes no pavimento, popularmente conhecido como “tapa buraco”. Pode ser do tipo profundo (engloba revestimentos de uma ou mais camadas subjacentes) ou superficiais (apenas revestimento asfáltico).

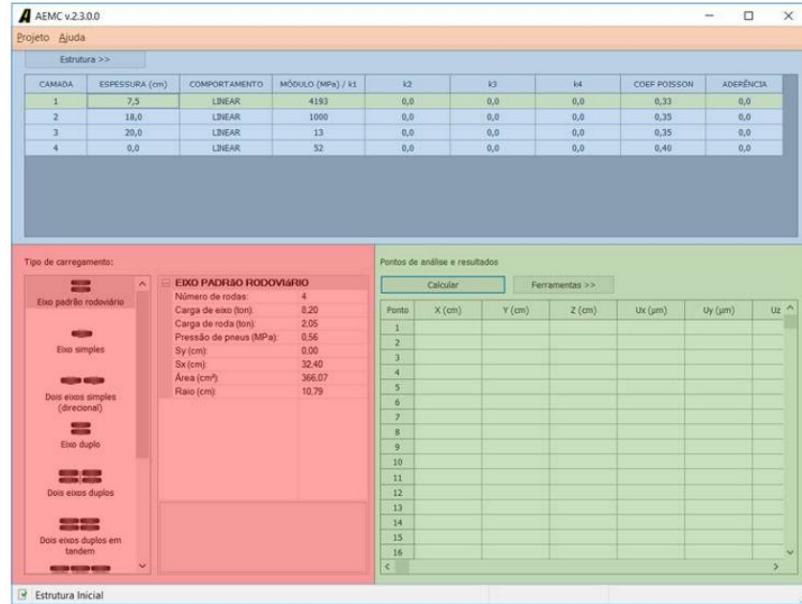
Sob esse viés, é lícito destacar três principais modos de ruptura da estrutura de um pavimento asfáltico, sendo eles: ruptura plástica, ruptura de natureza estrutural e ruptura de natureza funcional ou operacional. A ruptura plástica é aquela vinculada ao aparecimento excessivo de deformabilidades plásticas no pavimento, na qual não consegue mais suportar os carregamentos solicitantes e pode ser considerada também como ruptura estrutural. Já a ruptura estrutural está atrelada principalmente ao fenômeno da fadiga. Por fim, a ruptura funcional ou operacional consiste na péssima qualidade de conforto e segurança que o pavimento se encontra, não oferecendo mais serventia ao usuário (Balbo, 2007).

2.4 Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC)

O programa computacional Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) é responsável pelo cálculo de tensões, deformações e deslocamentos em estruturas de pavimentos, fazendo parte da conjuntura MeDiNa estabelecida pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

A interface do AEMC é bastante integrada, sendo capaz de reunir todas as informações em uma única tela. Os dados principais da modelagem computacional são acoplados em três quadros, sendo eles: estrutura do pavimento, tipo do carregamento atuante e as respostas desejadas em termos de tensões, deformações e deslocamentos (DNIT, 2020). A figura abaixo apresenta essa interface do programa.

Figura 2 – Interface do AEMC



Fonte: DNIT (2020)

Logo, o presente programa é bastante vantajoso para estudos mecânistas, uma vez que permite a análise de pavimentos sob diferentes cenários de carregamentos e parâmetros estruturais, além de gerar resultados de tensões, deformações e deslocamentos para qualquer ponto de aplicação da carga.

3 METODOLOGIA

3.1 Estrutura do Modelo Simulado e Parâmetros Variáveis

Como estrutura modelo, foi considerado o pavimento semirrígido tradicional, sendo formado por quatro camadas principais, sendo elas: Revestimento (material betuminoso), Base (material estabilizado com ligante hidráulico), Sub-base (material não estabilizado com ligante hidráulico) e Subleito. O intervalo de valores de módulos de resiliência e os coeficientes de *Poisson* adotados nesse trabalho foram retirados do IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2006).

Para a camada de rolamento, foi escolhido o concreto asfáltico como revestimento e adotado cerca de 7,5 cm de espessura. O Módulo de Resiliência adotado foi de 3500 MPa e o coeficiente de *Poisson* foi de 0,30.

Na camada de base, foi determinada a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) como material de estudo. Foram analisadas três variações de espessuras, tais como: 15, 20 e 25 cm. Para o Módulo de Resiliência foram estabelecidos quatro valores distintos: 10000, 15000, 16774 e 18000 MPa. O coeficiente de Poisson adotado para esse material foi de 0,20. Além disso, é crucial salientar que o módulo de resiliência de 16774 MPa, em específico, foi retirado de um estudo laboratorial realizado por Santos (2019), representando assim condições reais do material em estudo.

A camada de sub-base utilizou-se um material não estabilizado com ligante hidráulico, a Brita Graduada Simples (BGS). Para essa camada, foi adotada uma espessura de 15 cm, com módulo de resiliência de 250 MPa e coeficiente de Poisson de 0,35.

O subleito, camada semi-infinita, foi considerado uma variação de dois módulos de resiliência, sendo eles: 100 e 75 MPa. O coeficiente de Poisson adotado nessa camada foi de 0,40.

No entanto, o modelo estrutural referência desse trabalho, contendo os respectivos parâmetros variáveis, são apresentados pela Figura 3.

Figura 3 - Estrutura do Modelo Simulado



Fonte: autora (2025)

Levando em consideração, os diferentes valores dos módulos de resiliência da base e do subleito, bem como as variações da espessura da camada de base, foi determinado cerca de 24 cenários distintos para análise computacional (Tabela 3).

Tabela 3 - Cenários Simulados

Cenários	MR BGTC (MPa)	ESP. BGTC (cm)	MR Subleito (MPa)
C1	10000	15	100
C2	15000	15	100
C3	16774	15	100
C4	18000	15	100
C5	10000	15	75
C6	15000	15	75
C7	16774	15	75
C8	18000	15	75
C9	10000	20	100
C10	15000	20	100
C11	16774	20	100
C12	18000	20	100
C13	10000	20	75
C14	15000	20	75
C15	16774	20	75
C16	18000	20	75
C17	10000	25	100
C18	15000	25	100
C19	16774	25	100
C20	18000	25	100
C21	10000	25	75
C22	15000	25	75
C23	16774	25	75
C24	18000	25	75

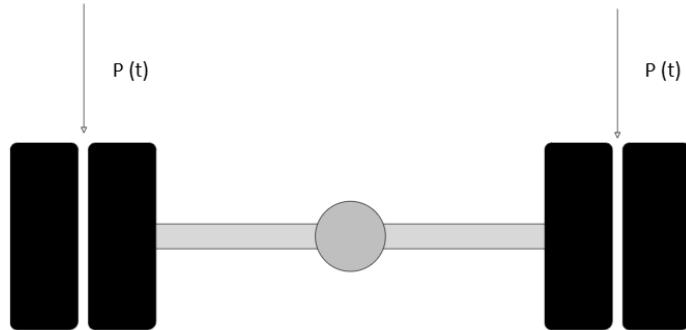
Fonte: autora (2025)

3.2 Carregamentos Analisados

Para realizar a análise do efeito do carregamento no comportamento de pavimentos semirrígidos, foram considerados quatro tipos de carregamentos distintos 8,2, 10, 11,25 e 12 t. Sendo assim, os 24 cenários atribuídos anteriormente foram submetidos a cada um desses carregamentos, totalizando cerca de 96 simulações computacionais realizadas no programa AEMC.

Nesse contexto, foi selecionado o eixo simples de rodas duplas, equivalente ao eixo padrão rodoviário brasileiro, para realizar as análises desses carregamentos. A Figura 4, apresenta a disposição das cargas solicitantes.

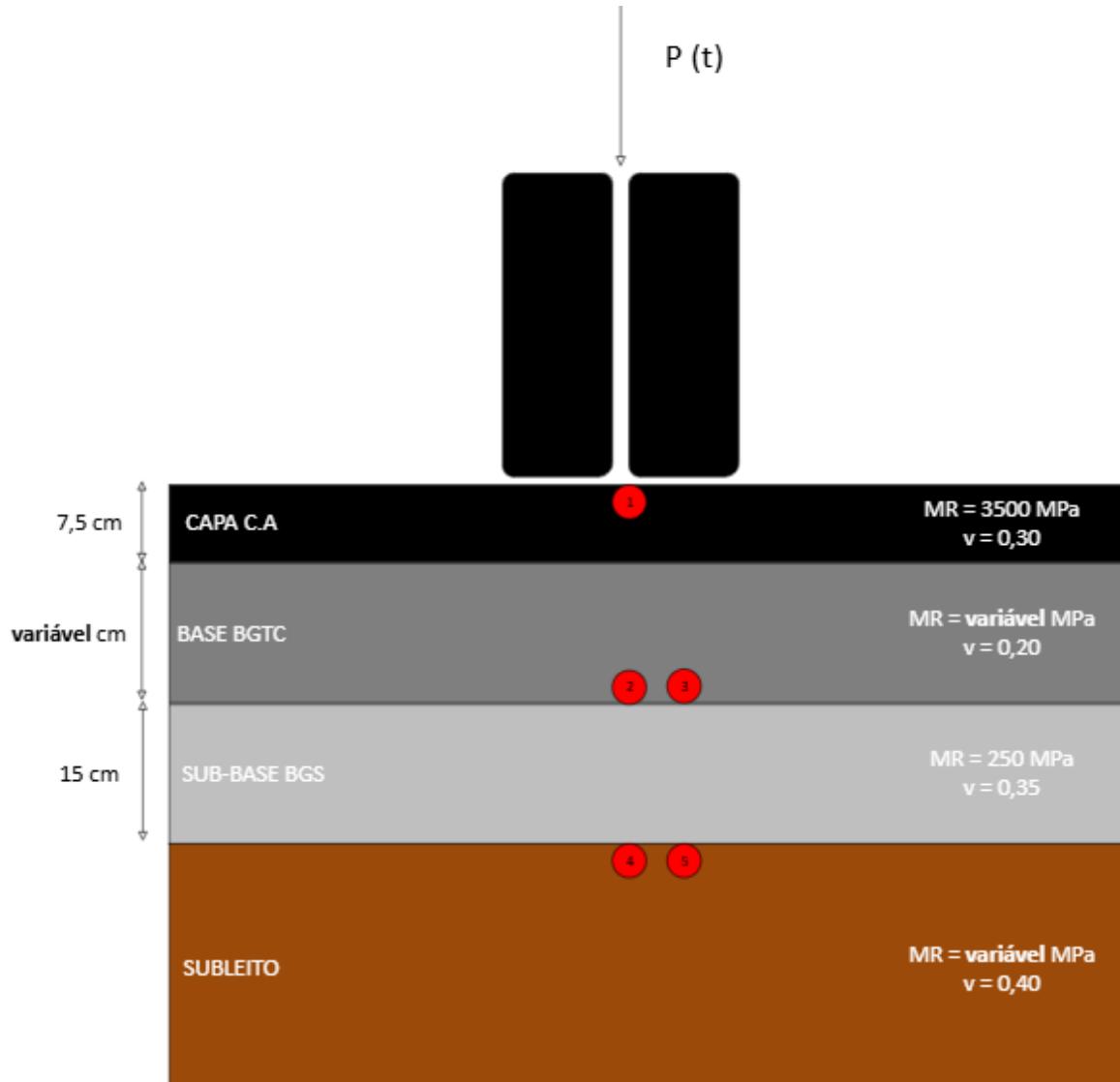
Figura 4 - Eixo Simples de Rodas Duplas



Fonte: autora (2025)

Com o intuito de analisar a estrutura de referência em relação ao modo de falha por fadiga, deformação permanente e deflexão superficial, foram estabelecidos cinco pontos de análise principal, conforme apresentado pela Figura 5.

Figura 5 - Pontos de Análise do Pavimento



Fonte: autora (2025)

O Ponto 1, localizado na superfície do revestimento asfáltico no meio das duas rodas, é responsável pela verificação da deflexão, relacionada ao deslocamento vertical do pavimento frente a aplicação de cargas. Já os Pontos 2 e 3 são destinados a análise do fenômeno da fadiga, posicionados na base da camada de BGTC em virtude da alta concentração de tensões nessa região. Por último, os Pontos 4 e 5, situados na região superior do subleito, foram designados para a avaliação da deformação permanente.

Diante disso, foram realizadas todas as simulações computacionais previamente propostas no programa AEMC, que permite o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos para cada um dos pontos de análises. Os resultados obtidos estão apresentados no apêndice desse trabalho.

3.3 Avaliação da Vida Útil do Pavimento

No presente trabalho, a avaliação da vida útil do pavimento foi realizada perante três modos de falhas principais: fadiga (tensão na base da camada de BGTC), deformação permanente (deformação no topo do subleito) e deflexão superficial (deslocamento no topo do revestimento asfáltico).

3.3.1 Vida Útil por Fadiga

A vida útil por fadiga na base da BGTC pode ser estimada por meio da Equação 1 (DER-SP, 2006):

$$N = 10^{7,19 \times (1 - \frac{\sigma_t}{8 \times \sigma_r})} \quad (1)$$

Onde:

N = número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN na tensão máxima de tração sob a camada cimentada, σ_t , requerido para se iniciar a primeira trinca por fadiga;

σ_t : tensão de tração atuante (kgf/cm^2);

σ_r : tensão de tração na ruptura do material (kgf/cm^2).

A tensão de ruptura utilizada nesse trabalho foi de 0,6 MPa, conforme encontrado no estudo laboratorial realizado por Santos (2019) para mistura padrão sem fibra.

3.3.2 Vida Útil por Deformação Permanente

A previsão de desempenho do pavimento para deformações verticais de compressão do subleito, o número N foi determinado pela seguinte equação (DER-SP, 2006):

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

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

ε_v : deformação específica horizontal na tração;

K e n: coeficientes determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo de mistura asfáltica e modificados para refletir o desempenho no campo.

Os parâmetros K e n empregados nessa análise foram aqueles desenvolvidos por Dormon & Metcalf apresentados pelo DER-SP (2006).

3.3.3 Vida Útil por Deflexão Superficial

A estimativa da vida útil por deflexão superficial, ou seja, o deslocamento vertical máximo localizado na superfície do pavimento, foi determinada conforme a Equação 3 (DER-SP, 2006).

$$\log D_{adm} = k - n \times \log N \quad (3)$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

k e n: coeficientes determinados por regressões lineares.

Os coeficientes k e n empregados nessa análise foram aqueles estabelecidos pelo DNER – PRO 011/79, apresentados pelo DNER-SP (2006).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção, é apresentado as análises individuais da influência do módulo de resiliência (MR) da BGTC (10000, 15000, 16774 e 18000 MPa), da espessura da camada de BGTC (15, 20 e 25 cm), do módulo de resiliência do subleito (100 e 75 MPa), bem como das quatro condições de carregamento (8,2, 10, 11,25 e 12 t) em relação a vida útil do pavimento. Para cada uma desses parâmetros variáveis, os resultados são apresentados separadamente para cada um dos modos de falha, sendo eles: fadiga, deformação permanente e deflexão.

A vida útil por fadiga é determinada pela tensão de tração na base da BGTC, utilizando o maior ponto de análise, que nesse caso foi o ponto 2 - localizado no meio das duas rodas. Já a vida útil por deformação permanente foi estimada mediante a deformação vertical encontrada no topo do subleito, considerando os valores obtidos do ponto localizado entre as duas rodas (ponto 4), uma vez que apresentou maiores resultados. Por fim, a vida útil por deflexão está associada ao deslocamento vertical realizado na superfície asfáltica do pavimento, sendo determinada pelo ponto 1, posicionado entre as duas rodas.

Outrossim, para facilitar o entendimento do impacto desses parâmetros individualmente, foi necessário fixar algumas variáveis em estudo. Com isso, foi definido o seguinte cenário apresentado pela Tabela 4:

Tabela 4: Definição do Cenário Base

Módulo de Resiliência da BGTC (MPa)	Espessura da Camada de BGTC (cm)	Módulo de Resiliência do Subleito (MPa)	Carga (t)
16774	20	100	10

Fonte: Autora (2025)

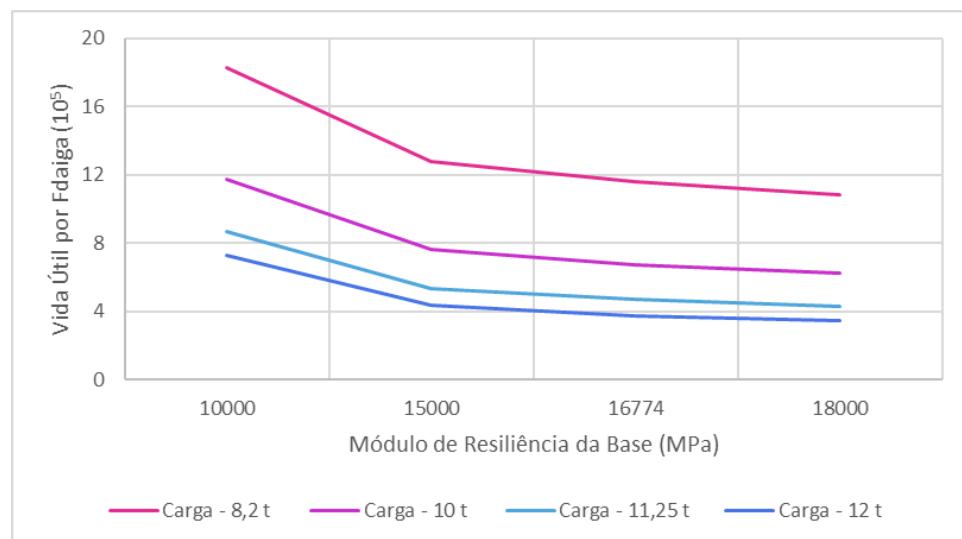
Os resultados para as demais combinações estruturais podem ser encontrados no apêndice desse trabalho.

4.1 Influência do Módulo de Resiliência da BGTC

O Gráfico 1 evidencia que o aumento do módulo de resiliência da BGTC resultou na diminuição da vida útil em virtude da rigidez elevada que acaba concentrando tensões maiores na fibra inferior da camada, favorecendo assim o processo de fissuração por fadiga. Nos estudos

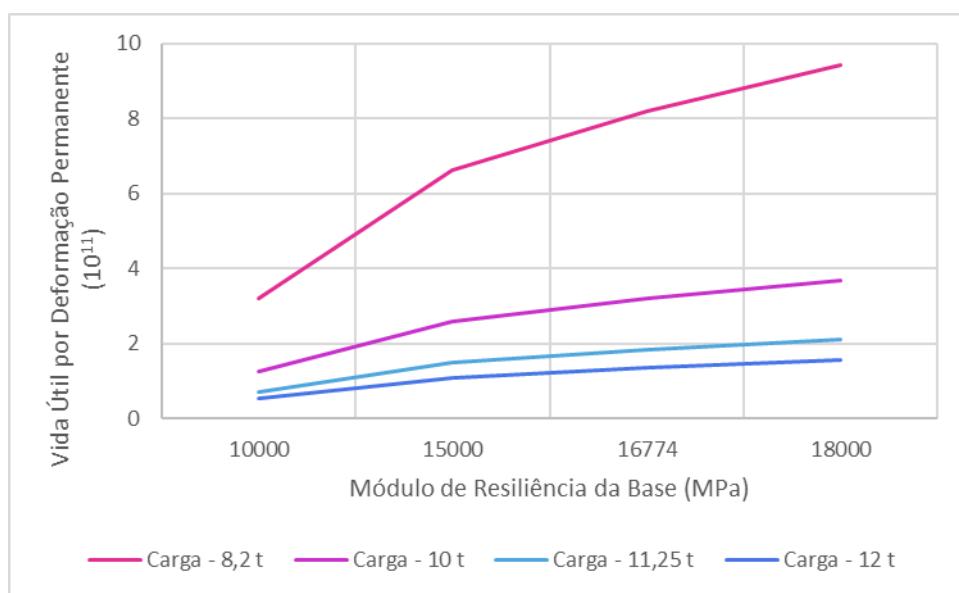
de Fogaça (1996), também foi observado esse comportamento, visto que a rigidez diminui as deformações admissíveis na estrutura. Em contradição, a vida útil por deformação permanente (Gráfico 2) e deflexão (Gráfico 3) apresentaram um aumento do número de repetições conforme o crescimento do módulo de resiliência da BGTC, ressaltando um efeito positivo no pavimento.

Gráfico 1 - Variação da Vida Útil por Fadiga em função do Módulo de Resiliência da BGTC



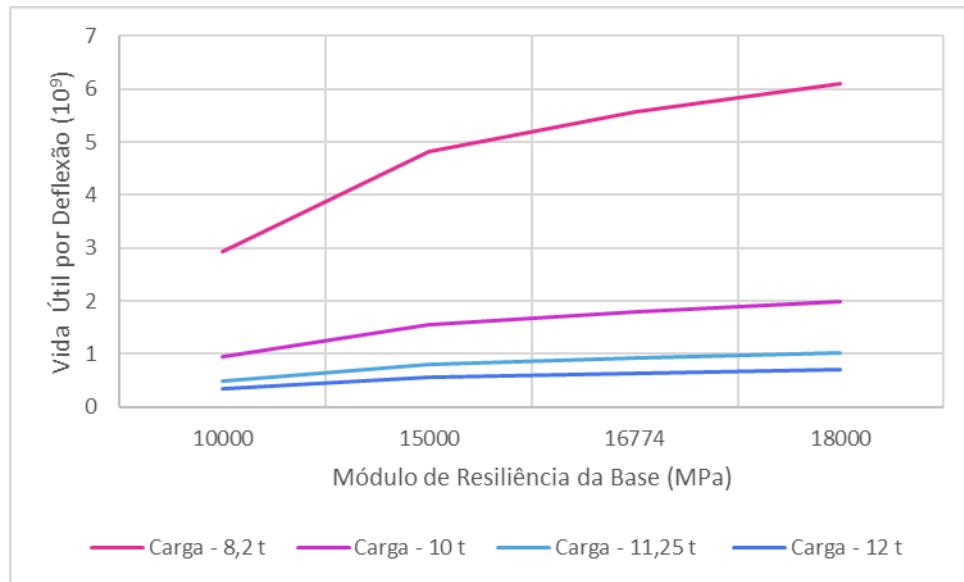
Fonte: autora (2025)

Gráfico 2 - Variação da Vida Útil por Deformação Permanente em função do Módulo de Resiliência da BGTC



Fonte: autora (2025)

Gráfico 3 - Variação da Vida Útil por Deflexão em função do Módulo de Resiliência da BGTC



Fonte: autora (2025)

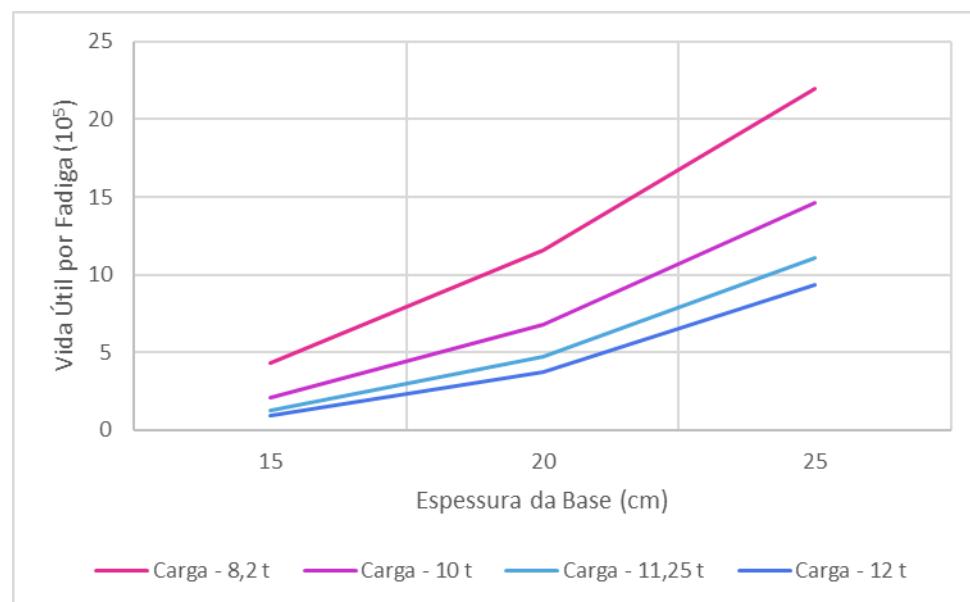
Dado ao exposto, o aumento do módulo de resiliência de 10000 MPa para 18000 MPa, acarreta uma redução de $5,51 \times 10^5$ ciclos de vida útil para a fadiga, representando um decréscimo de aproximadamente 47%. Entretanto, para a deformação permanente e deflexão houve um aumento de $2,42 \times 10^{11}$ e $1,03 \times 10^9$ ciclos, respectivamente, correspondente a cerca de 66% e 52% de acréscimo.

Ademais, é lícito destacar também a importância de manter um equilíbrio entre a rigidez e a flexibilidade nos pavimentos de caráter semirrígido, especialmente durante a utilização da BGTC como material da base, a fim de minimizar o processo de fadiga.

4.2 Influência da Espessura da Camada de BGTC

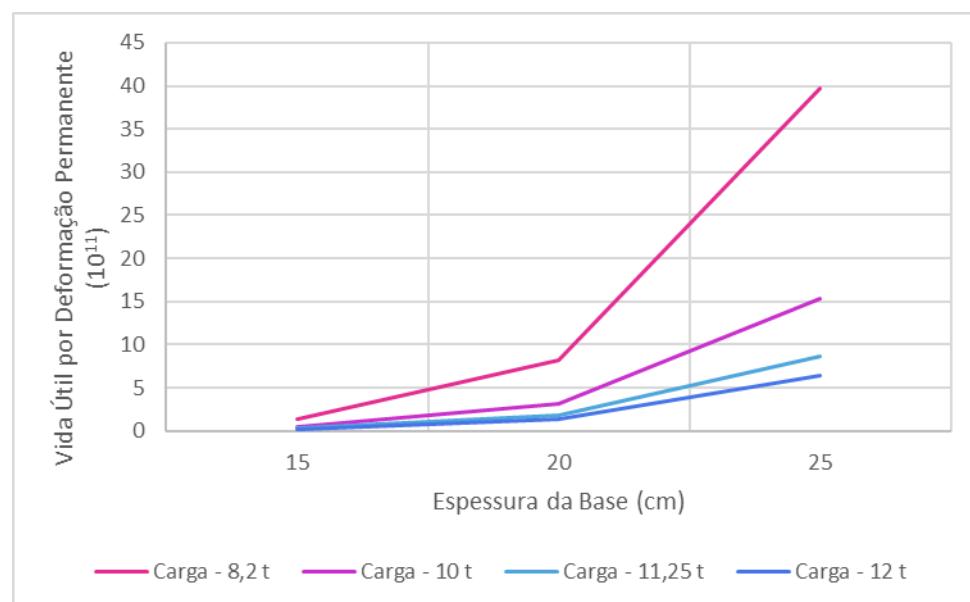
A espessura da camada de BGTC se apresentou como um fator bastante influente na previsão de desempenho de pavimentos, conforme apresentado pelos Gráficos 4, 5 e 6. Sendo assim, é notório um comportamento relativamente similar entre os modos de falhas por fadiga, deformação permanente e deflexão, na qual à medida que a espessura da camada de BGTC aumenta ocorre um crescimento da vida útil do pavimento também.

Gráfico 4 - Variação da Vida Útil por Fadiga em função da Espessura da Camada de BGTC



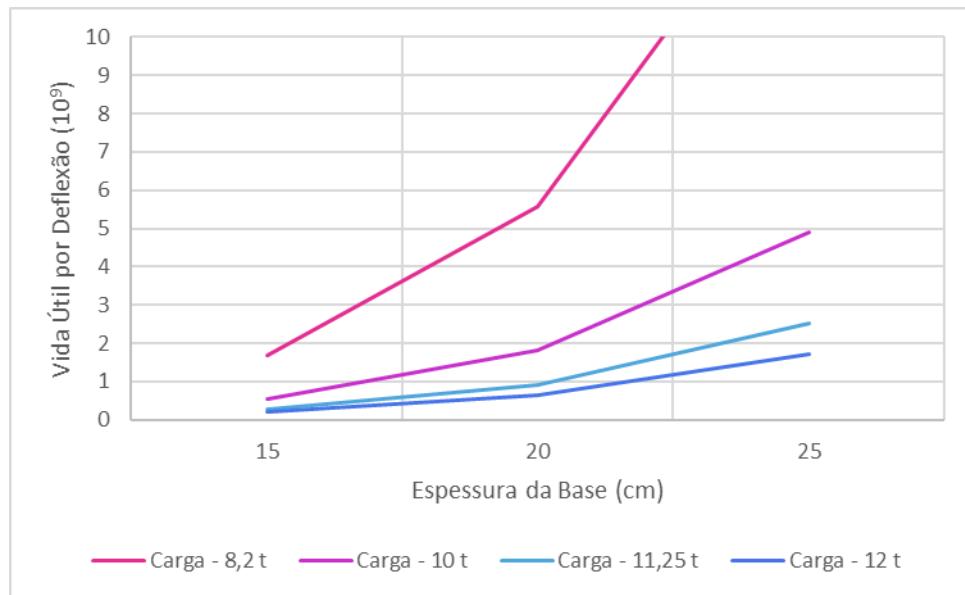
Fonte: autora (2025)

Gráfico 5 - Variação da Vida Útil por Deformação Permanente em função da Espessura da Camada de BGTC



Fonte: autora (2025)

Gráfico 6 - Variação da Vida Útil por Deflexão em função da Espessura da Camada de BGTC



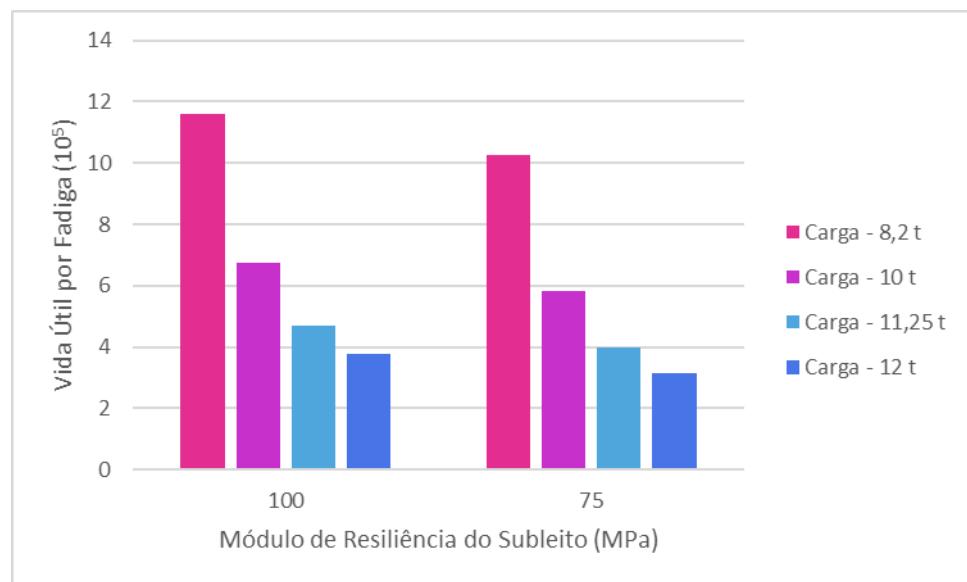
Fonte: autora (2025)

No entanto, foi observado que ao aumentar a espessura da camada de BGTC houve um crescimento significativo da vida útil do pavimento para todos os critérios de falhas analisados. A deformação permanente se demonstrou o critério mais sensível ao ganho estrutural, com acréscimos de $2,68 \times 10^{11}$ ciclos no intervalo de 15 para 20 cm, bem como de $1,21 \times 10^{12}$ ciclos ao elevar de 20 para 25 cm a espessura da base. Para os modos de fadiga e deflexão superficial, o intervalo de 15 a 20 cm obteve um aumento de $4,69 \times 10^5$ e $1,26 \times 10^9$ ciclos, respectivamente, enquanto para o intervalo de 20 a 25 cm proporcionou um incremento de $7,87 \times 10^5$ e $3,11 \times 10^9$ ciclos, respectivamente. Dessa forma, é destacado a tamanha relevância da espessura da camada cimentante no desempenho estrutural dos pavimentos semirrígidos.

4.3 Influência do Módulo de Resiliência do Subleito

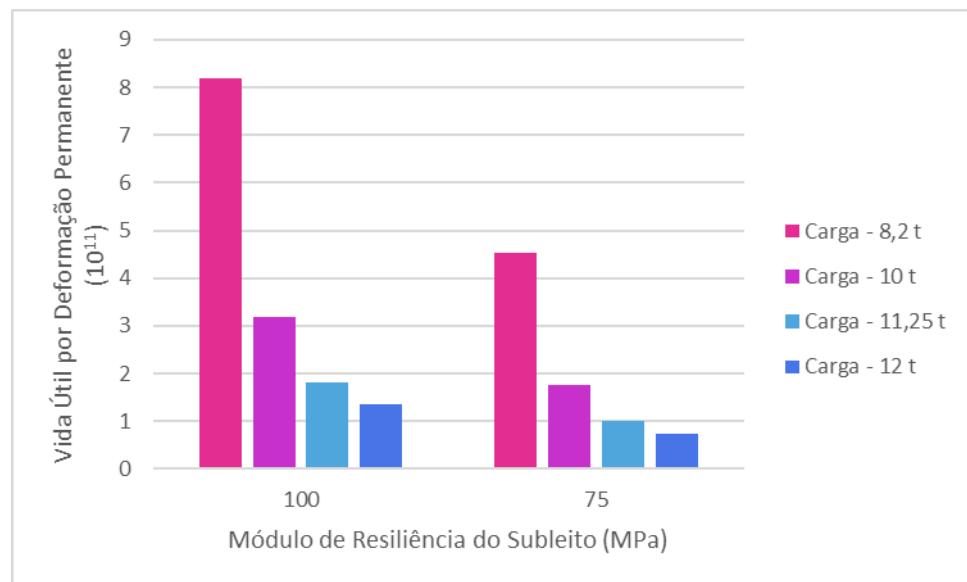
O módulo de resiliência do subleito exerce influência na capacidade de suporte do pavimento, uma vez que é considerada a fundação dessa estrutura. Sendo assim, o aumento do módulo de resiliência do subleito, corrobora positivamente com a vida útil dos pavimentos frente a todos os critérios de avaliação de desempenho, conforme apresentado pelos Gráficos 7, 8 e 9.

Gráfico 7 - Variação da Vida Útil por Fadiga em função do Módulo de Resiliência do Subleito



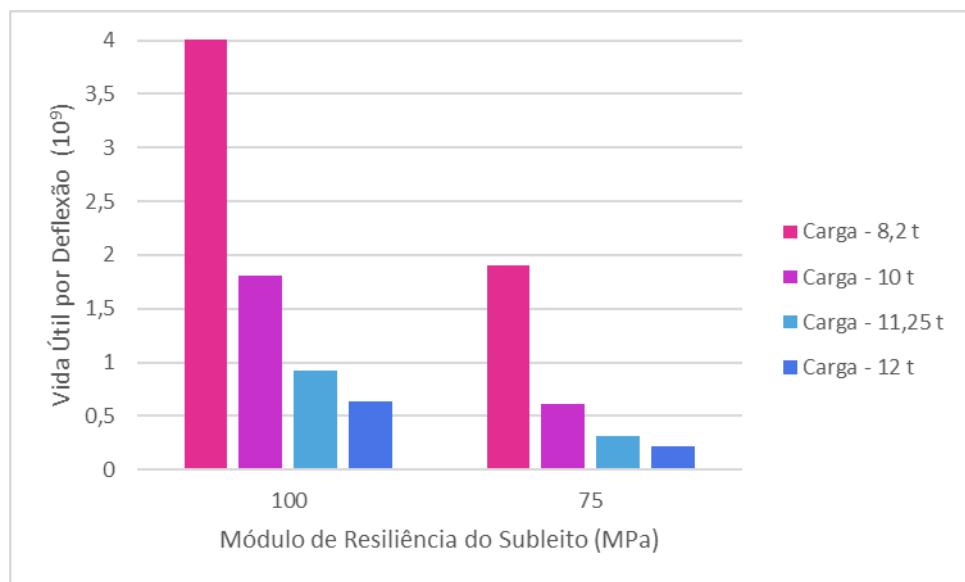
Fonte: autora (2025)

Gráfico 8 - Variação da Vida Útil por Deformação Permanente em função do Módulo de Resiliência do Subleito



Fonte: autora (2025)

Gráfico 9 - Variação da Vida Útil por Deflexão em função do Módulo de Resiliência do Subleito



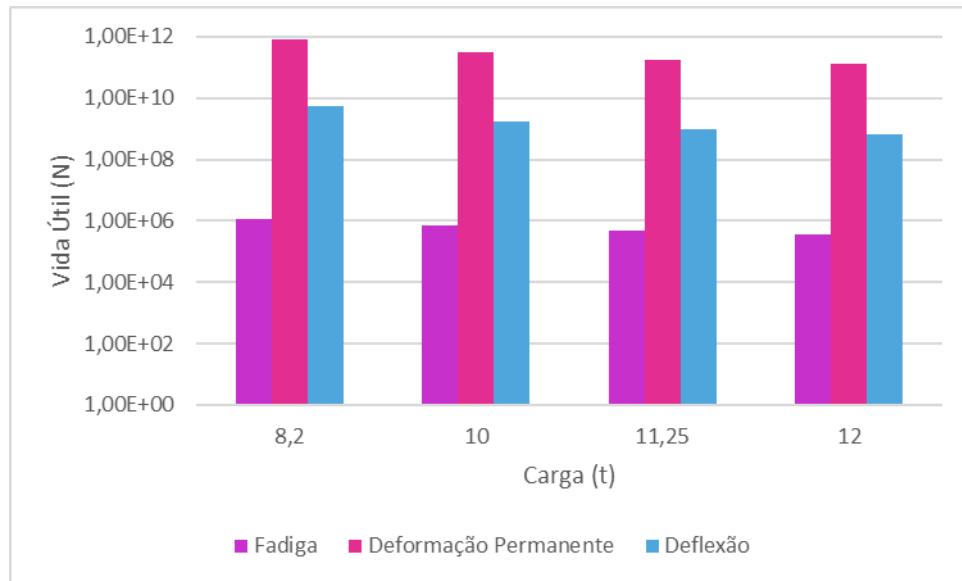
Fonte: autora (2025)

Nesse cenário, é notório que o critério de deflexão obteve a maior variação na vida útil do pavimento ao reduzir o módulo de resiliência de 100 MPa para 75 MPa, diminuindo em $1,19 \times 10^9$ ciclos, representando aproximadamente 66% de redução. Enquanto isso, para os modos de fadiga e deformação permanente houve um decréscimo de $9,31 \times 10^4$ e $1,44 \times 10^{11}$ ciclos, respectivamente, equivalentes a 14% e 45% aproximadamente.

4.4 Influência do Carregamento Aplicado

O impacto da sobrecarga é extremamente crítico ao desempenho estrutural do pavimento, diminuindo significativa o seu ciclo de vida útil. O Gráfico 10, representa o impacto das variações de carregamento frente aos critérios de fadiga, deformação permanente e deflexão.

Gráfico 10 - Variação da Vida Útil em função do carregamento aplicado



Fonte: autora (2025)

Nesse contexto, é realizado uma análise da redução de vida útil para os critérios de avaliação de desempenho do pavimento, levando em consideração o aumento do carregamento de 10 t (carga máxima legal) para 11,25 t (sobrecarga dentro da tolerância de 12,5%) e 12 t (sobrecarga de 20% fora da tolerância). De maneira respectiva, tem-se:

- Fadiga: redução de 31% e 44% da vida útil do pavimento.
- Deformação permanente: redução de 43% e 58% da vida útil do pavimento.
- Deflexão: redução de 49% e 65% da vida útil do pavimento.

Diante disso, é destacado que o critério de deflexão obteve a maior sensibilidade perante as variações de carregamentos solicitadas no pavimento, especialmente, em condições de sobrecarga (11,25 t e 12 t).

Outrossim, é lícito ressaltar que o critério de fadiga foi aquele que obteve menores ciclos de vida útil para os cenários analisados, se apresentando como um modo crítico de falha de pavimentos semirrígidos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em suma, a análise paramétrica realizada nesse trabalho evidenciou a tamanha sensibilidade dos parâmetros estruturais e operacionais frente a previsão de desempenho de pavimentos semirrígidos, considerando a espessura da camada de BGTC, módulo de resiliência da BGTC e do subleito, além das diferentes condições de carregamento como aspectos variáveis. Com isso, foram geradas modelagens computacionais dos diversos cenários propostos, permitindo assim a avaliação de vida útil do pavimento sobre os modos de falha por fadiga, deformação permanente e deflexão superficial.

Os resultados obtidos foram capazes de identificar que o aumento do módulo de resiliência da BGTC reduz o ciclo de vida útil da estrutura perante o critério de fadiga, em virtude da concentração de tensões na base da camada, sendo assim, o modo de falha mais crítico de pavimentos semirrígidos. A espessura da camada de BGTC foi a variável mais significativa em relação a fadiga e a deformação permanente, apresentando uma mudança de comportamento expressiva ao aumentar a espessura de 15 cm para 25 cm. Em relação a deflexão superficial, a variação de condições de carregamento foi o parâmetro mais sensível, principalmente quando comparado com a carga de eixo padrão (8,2 t). Ademais, o efeito da sobrecarga teve uma redução expressiva da vida útil dos pavimentos, em comparação com o cenário de carga legal limite recomendada, principalmente em situações de baixo módulo de resiliência do subleito.

Contudo, o presente estudo realizado ressaltou a importância da implementação de sistemas de fiscalização de pesagem eficazes, em virtude do modal rodoviário ser o pioneiro na matriz de escoamento de cargas bem como de pessoas no território brasileiro, corroborando assim para mitigar danos e reduzir custos. Além disso, é notório a relevância de melhores práticas de elaboração de projetos, em virtude da alta sensibilidade no desempenho de pavimentos decorrentes da variação de parâmetros estruturais e operacionais. Logo, estudos nesse seguimento são fundamentais para garantir melhores condições de durabilidade, segurança e economia aos pavimentos rodoviários.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Manual de procedimentos de fiscalização em postos de pesagem veicular.** 2. ed. Brasília: ANTT, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/fiscalizacao-e-multas/arquivos/arquivos-manuais-de-fiscalizacao/manual-de-fiscalizacao-em-postos-de-pesagem-veicular.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2025.

ALBANO, João Fortini. **Efeitos dos Excessos de Carga Sobre a Durabilidade de Pavimentos.** Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4498/000457228.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2025.

ANDRADE, Lucas Rodrigues. **Comparação do Comportamento de Pavimentos Asfálticos com Camadas de Base Granular, Tratada com Cimento e com Estabilizantes Asfálticos para Tráfego Muito Pesado.** Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-13032017-095746/publico/LucasRodriguesdeAndradeCorr17.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2025.

BACK, Ana Helena. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Cimentadas do Tipo BGTC Utilizando Duas Rochas Extrusivas do Estado do RS.** Tese de Doutorado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/24417/TES_PPGEC_2022_BACK_ANA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 04 abr. 2025.

BALBO, José Tadeu. **Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos.** 1993. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

_____. **Pavimentação Asfáltica – materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007

BERNUCCI, Liedi Bariani; *et al.* **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: ABEDA, Petrobras, 2008.

BRASIL. Lei nº 14.229, de 21 de outubro de 2021. Altera as Leis nºs 9.503/1997 (Código de Trânsito Brasileiro), 10.233/2001, 5.917/1973, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 22 out. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-lei-n-14.229-de-21-de-outubro-de-2021-353829382>. Acesso em: 04 abr. 2025.

CARGNIN, Andréia Posser. **Development of a high-performanc cement-trete crushed stone for pavement bases.** Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-21032024-075227/publico/AndreiaPosserCargninVersaoSimplificada.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **O transporte move o Brasil: propostas da CNT ao país.** Brasília: CNT, 2022. 144 p. ISBN 978-85-68865-01-9. Disponível em:< <https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/907973a7-6dc6-4006-b683-9e6ef6bc1505.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2025

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (DER-SP). **IP-DE-P00-001 A: Projeto de Pavimentação.** São Paulo: 2006. Disponível em: <https://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/normas/IP-DE-P00-001_A.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação.** 3^a ed. Rio de Janeiro: 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigida_errata_1.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2025.

_____. **Norma DNIT 005/2003 – TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia.** Rio de Janeiro: 2003. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit_005_2003_ter-1.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2025.

_____. **Manual de utilização do AEMC versão 2.4.2.** [S. i]: 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/manual_aemc_2_4_2.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2025.

FOGAÇA, Bibiana Cardoso. **Análise Paramétrica de Estruturas de Pavimento Utilizando Areia do Litoral do Rio Grande do Sul Estabilizada com Cinza Volante e Cal.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa da Pós Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 1996. Disponível em: <[s](#)>. Acesso em: 04 abr. 2025.

SANTOS, Márcio Antônio Zardini. **Análise do Efeito da Adição de Fibra de Polipropileno no Comportamento Mecânico de uma Brita Graduada Tratada com Cimento.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Uberlândia, 2019.

APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS DO AEMC

Tabela A1 - Resultados do Carregamento de 8,2 t

Cenário	Carregamento 8,2 t							
	Ponto 1	Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	Ponto 5	
	Uz (µm)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Ez (m/m)	Ez (m/m)	
1	267,2393	-0,58652	-0,83032	-0,65519	-0,81582	6,31E-05	6,05E-05	
2	248,5027	-0,71756	-0,99068	-0,78789	-0,97173	5,58E-05	5,35E-05	
3	243,2446	-0,75661	-1,03743	-0,82693	-1,01711	5,37E-05	5,16E-05	
4	239,9041	-0,78184	-1,06741	-0,85205	-1,0462	5,25E-05	5,04E-05	
5	322,7314	-0,62721	-0,87195	-0,69418	-0,85655	7,21E-05	6,93E-05	
6	300,449	-0,76588	-1,04001	-0,83441	-1,0201	6,36E-05	6,13E-05	
7	294,166	-0,80711	-1,08894	-0,8756	-1,06766	6,13E-05	5,90E-05	
8	290,1685	-0,83371	-1,12031	-0,90209	-1,09813	5,98E-05	5,76E-05	
9	220,6236	-0,47697	-0,61943	-0,48817	-0,59679	4,45E-05	4,29E-05	
10	202,1752	-0,56605	-0,72275	-0,57628	-0,69708	3,82E-05	3,69E-05	
11	197,0966	-0,59164	-0,75196	-0,60149	-0,72546	3,65E-05	3,53E-05	
12	193,8956	-0,60797	-0,77048	-0,61756	-0,74347	3,55E-05	3,43E-05	
13	266,1842	-0,5062	-0,64911	-0,51651	-0,62601	5,05E-05	4,88E-05	
14	244,2247	-0,59965	-0,75683	-0,60901	-0,73069	4,33E-05	4,19E-05	
15	238,153	-0,62644	-0,78722	-0,63541	-0,76026	4,14E-05	4,01E-05	
16	234,3211	-0,6435	-0,80648	-0,65222	-0,77901	4,01E-05	3,89E-05	
17	187,4284	-0,38812	-0,47593	-0,37766	-0,45384	3,29E-05	3,18E-05	
18	169,8978	-0,45089	-0,54641	-0,43904	-0,52224	2,76E-05	2,68E-05	
19	165,1537	-0,4685	-0,56593	-0,45627	-0,54123	2,62E-05	2,55E-05	
20	162,1825	-0,47965	-0,57824	-0,46717	-0,5532	2,54E-05	2,46E-05	
21	225,9003	-0,40984	-0,4979	-0,39889	-0,47555	3,71E-05	3,60E-05	
22	205,047	-0,47527	-0,57104	-0,46295	-0,54662	3,11E-05	3,02E-05	
23	199,3801	-0,49358	-0,59125	-0,48088	-0,5663	2,95E-05	2,87E-05	
24	195,8266	-0,50515	-0,60398	-0,49221	-0,5787	2,85E-05	2,78E-05	

Fonte: autora (2025)

Tabela A2 - Resultados do Carregamento de 10 t

Cenário	Carregamento 10 t						
	Ponto 1	Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	Ponto 5
	Uz (μm)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Ez (m/m)	Ez (m/m)
1	325,6136	-7,23E-01	-1,00E+00	-7,78E-01	-9,71E-01	7,67E-05	7,35E-05
2	302,8105	-0,88314	-1,19447	-9,37E-01	-1,16E+00	6,78E-05	6,51E-05
3	296,4113	-0,93086	-1,25107	-0,98434	-1,21284	6,54E-05	6,28E-05
4	292,3459	-0,96169	-1,28736	-1,01458	-1,24786	6,38E-05	6,13E-05
5	393,2569	-0,77236	-1,05118	-8,26E-01	-1,02E+00	8,77E-05	8,43E-05
6	366,1351	-0,94198	-1,25454	-9,94E-01	-1,22E+00	7,75E-05	7,45E-05
7	358,4873	-0,99235	-1,3138	-1,04361	-1,27439	7,47E-05	7,19E-05
8	353,6216	-1,02486	-1,35178	-1,07552	-1,31109	7,29E-05	7,02E-05
9	268,9613	-0,58342	-0,74734	-5,86E-01	-7,16E-01	5,42E-05	5,22E-05
10	246,4864	-0,69213	-0,87251	-6,92E-01	-8,37E-01	4,66E-05	4,50E-05
11	240,2994	-0,72336	-0,90792	-0,72238	-0,87111	4,45E-05	4,30E-05
12	236,3998	-0,74328	-0,93039	-0,74181	-0,89288	4,32E-05	4,18E-05
13	324,5062	-0,61901	-0,7835	-6,20E-01	-7,51E-01	6,16E-05	5,95E-05
14	297,7531	-0,73307	-0,91403	-0,73177	-0,87777	5,28E-05	5,11E-05
15	290,3558	-0,76575	-0,95088	-0,7637	-0,91351	5,05E-05	4,89E-05
16	285,6875	-0,78657	-0,97424	-0,78403	-0,93618	4,90E-05	4,75E-05
17	228,5842	-0,47296	-0,57494	-0,45525	-0,54666	4,01E-05	3,88E-05
18	207,2125	-0,54949	-0,66041	-0,52957	-0,62942	3,37E-05	3,27E-05
19	201,4289	-0,57096	-0,6841	-0,55044	-0,65242	3,20E-05	3,11E-05
20	197,8068	-0,58455	-0,69903	-0,56366	-0,66693	3,10E-05	3,01E-05
21	275,4909	-0,49943	-0,60171	-0,48112	-0,57312	4,53E-05	4,39E-05
22	250,0695	-0,57921	-0,69042	-0,55871	-0,65913	3,80E-05	3,70E-05
23	243,1612	-0,60152	-0,71495	-0,58043	-0,68297	3,61E-05	3,51E-05
24	238,8294	-0,61563	-0,7304	-0,59418	-0,69801	3,49E-05	3,40E-05

Fonte: autora (2025)

Tabela A3 - Resultados do Carregamento 11,25 t

Cenário	Carregamento 11,250 t						
	Ponto 1	Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	Ponto 5
	Uz (µm)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Ez (m/m)	Ez (m/m)
1	366,2044	-8,18E-01	-1,12E+00	-8,61E-01	-1,08E+00	8,61E-05	8,24E-05
2	340,5845	-0,99874	-1,33308	-1,04E+00	-1,28E+00	7,62E-05	7,31E-05
3	333,3975	-1,05248	-1,39642	-1,09055	-1,34489	7,34E-05	7,05E-05
4	328,8316	-1,08719	-1,43704	-1,12429	-1,38395	7,17E-05	6,88E-05
5	442,2798	-0,87375	-1,17305	-9,14E-01	-1,13E+00	9,85E-05	9,46E-05
6	411,8055	-1,06486	-1,40058	-1,10E+00	-1,35E+00	8,70E-05	8,37E-05
7	403,2149	-1,12159	-1,46691	-1,15717	-1,41407	8,39E-05	8,07E-05
8	397,7494	-1,15819	-1,50944	-1,19279	-1,45502	8,18E-05	7,88E-05
9	302,6216	-0,65732	-0,83453	-6,51E-01	-7,96E-01	6,09E-05	5,86E-05
10	277,3531	-0,77966	-0,9747	-7,70E-01	-9,32E-01	5,24E-05	5,05E-05
11	270,3997	-0,8148	-1,01437	-0,80436	-0,96995	5,01E-05	4,84E-05
12	266,0171	-0,83721	-1,03954	-0,82609	-0,9943	4,86E-05	4,70E-05
13	365,0965	-0,69733	-0,87517	-6,90E-01	-8,36E-01	6,92E-05	6,68E-05
14	335,0178	-0,82569	-1,02137	-0,8151	-0,97765	5,94E-05	5,75E-05
15	326,7036	-0,86246	-1,06266	-0,85082	-1,01762	5,68E-05	5,50E-05
16	321,4565	-0,88588	-1,08884	-0,87357	-1,04297	5,51E-05	5,34E-05
17	257,2783	-0,53167	-0,64259	-0,50822	-0,60989	4,51E-05	4,36E-05
18	233,2385	-0,61772	-0,73838	-0,59143	-0,70251	3,80E-05	3,68E-05
19	226,7356	-0,64186	-0,76493	-0,61482	-0,72826	3,61E-05	3,50E-05
20	222,6629	-0,65714	-0,78167	-0,62962	-0,74451	3,49E-05	3,39E-05
21	310,0403	-0,56142	-0,67269	-0,5373	-0,63963	5,10E-05	4,94E-05
22	281,4465	-0,65113	-0,77212	-0,62419	-0,73591	4,28E-05	4,16E-05
23	273,6787	-0,67622	-0,79962	-0,64854	-0,76262	4,06E-05	3,96E-05
24	268,808	-0,69209	-0,81695	-0,66394	-0,77945	3,93E-05	3,83E-05

Fonte: autora (2025)

Tabela A4 -Resultados do Carregamento 12 t

Cenário	Carregamento 12 t						
	Ponto 1	Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	Ponto 5
	Uz (μm)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Ez (m/m)	Ez (m/m)
1	390,6145	-8,75E-01	-1,18E+00	-9,09E-01	-1,14E+00	9,17E-05	8,78E-05
2	363,3253	-1,06819	-1,4151	-1,10E+00	-1,36E+00	8,12E-05	7,78E-05
3	355,6672	-1,12555	-1,48244	-1,15269	-1,42251	7,82E-05	7,51E-05
4	350,802	-1,16258	-1,52564	-1,18851	-1,46397	7,64E-05	7,33E-05
5	471,7466	-0,93469	-1,24515	-9,66E-01	-1,20E+00	1,05E-04	1,01E-04
6	439,2821	-1,13869	-1,48706	-1,16E+00	-1,43E+00	9,27E-05	8,92E-05
7	430,1275	-1,19922	-1,5576	-1,22371	-1,49625	8,93E-05	8,60E-05
8	424,3031	-1,23827	-1,60282	-1,26153	-1,53973	8,72E-05	8,40E-05
9	322,8891	-0,70161	-0,8862	-6,90E-01	-8,44E-01	6,49E-05	6,24E-05
10	295,9635	-0,83212	-1,0353	-8,17E-01	-9,88E-01	5,58E-05	5,39E-05
11	288,5513	-0,8696	-1,07751	-0,8529	-1,02841	5,34E-05	5,15E-05
12	283,8795	-0,8935	-1,10429	-0,87601	-1,05429	5,19E-05	5,01E-05
13	389,5206	-0,74427	-0,92953	-7,32E-01	-8,87E-01	7,38E-05	7,12E-05
14	357,4659	-0,88119	-1,08506	-0,86446	-1,03675	6,33E-05	6,13E-05
15	348,6026	-0,92041	-1,129	-0,90243	-1,07923	6,05E-05	5,86E-05
16	343,009	-0,94539	-1,15686	-0,92663	-1,10619	5,88E-05	5,70E-05
17	274,5745	-0,56679	-0,68276	-0,53966	-0,64736	4,81E-05	4,65E-05
18	248,9516	-0,65855	-0,78469	-0,62818	-0,74586	4,05E-05	3,93E-05
19	242,0178	-0,68429	-0,81296	-0,65306	-0,77326	3,85E-05	3,73E-05
20	237,6753	-0,70059	-0,83078	-0,66882	-0,79054	3,72E-05	3,62E-05
21	330,849	-0,59851	-0,71485	-0,57067	-0,67907	5,43E-05	5,27E-05
22	300,3697	-0,69417	-0,82067	-0,66311	-0,78148	4,57E-05	4,44E-05
23	292,0869	-0,72093	-0,84995	-0,68902	-0,80989	4,34E-05	4,22E-05
24	286,8933	-0,73785	-0,8684	-0,70541	-0,8278	4,20E-05	4,09E-05

Fonte: autora (2025)

APÊNDICE B – ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DOS PAVIMENTOS

Tabela B1 - Vida Útil para Carregamento de 8,2 t

Carregamento 8,2 t						
Cenários	MR BGTC (Mpa)	ESP. BGTC (cm)	MR Subleito (Mpa)	Nf	Ndp	Nd
C1	10000	15	100	8,84E+05	6,06E+10	9,86E+08
C2	15000	15	100	5,08E+05	1,09E+11	1,49E+09
C3	16774	15	100	4,33E+05	1,31E+11	1,68E+09
C4	18000	15	100	3,90E+05	1,46E+11	1,82E+09
C5	10000	15	75	7,65E+05	3,21E+10	3,37E+08
C6	15000	15	75	4,29E+05	5,83E+10	5,07E+08
C7	16774	15	75	3,62E+05	6,97E+10	5,71E+08
C8	18000	15	75	3,25E+05	7,82E+10	6,17E+08
C9	10000	20	100	1,83E+06	3,20E+11	2,93E+09
C10	15000	20	100	1,28E+06	6,61E+11	4,81E+09
C11	16774	20	100	1,16E+06	8,18E+11	5,56E+09
C12	18000	20	100	1,09E+06	9,41E+11	6,10E+09
C13	10000	20	75	1,65E+06	1,75E+11	1,01E+09
C14	15000	20	75	1,14E+06	3,65E+11	1,64E+09
C15	16774	20	75	1,03E+06	4,54E+11	1,90E+09
C16	18000	20	75	9,59E+05	5,23E+11	2,08E+09
C17	10000	25	100	3,00E+06	1,36E+12	7,40E+09
C18	15000	25	100	2,35E+06	3,12E+12	1,29E+10
C19	16774	25	100	2,20E+06	3,97E+12	1,52E+10
C20	18000	25	100	2,11E+06	4,67E+12	1,68E+10
C21	10000	25	75	2,78E+06	7,63E+11	2,56E+09
C22	15000	25	75	2,16E+06	1,78E+12	4,44E+09
C23	16774	25	75	2,02E+06	2,28E+12	5,21E+09
C24	18000	25	75	1,93E+06	2,67E+12	5,77E+09

Fonte: autora (2025)

Tabela B2 - Vida Útil para Carregamento de 10 t

Carregamento 10 t						
Cenários	MR BGTC (MPa)	Esp. BGTC (cm)	MR Subleito (MPa)	Nf	Ndp	Nd
C1	10000	15	100	4,91E+05	2,39E+10	3,21E+08
C2	15000	15	100	2,52E+05	4,30E+10	4,85E+08
C3	16774	15	100	2,07E+05	5,13E+10	5,47E+08
C4	18000	15	100	1,83E+05	5,74E+10	5,92E+08
C5	10000	15	75	4,13E+05	1,26E+10	1,10E+08
C6	15000	15	75	2,05E+05	2,28E+10	1,65E+08
C7	16774	15	75	1,67E+05	2,73E+10	1,86E+08
C8	18000	15	75	1,46E+05	3,06E+10	2,01E+08
C9	10000	20	100	1,18E+06	1,25E+11	9,50E+08
C10	15000	20	100	7,64E+05	2,57E+11	1,56E+09
C11	16774	20	100	6,76E+05	3,19E+11	1,80E+09
C12	18000	20	100	6,26E+05	3,67E+11	1,98E+09
C13	10000	20	75	1,04E+06	6,82E+10	3,27E+08
C14	15000	20	75	6,62E+05	1,41E+11	5,33E+08
C15	16774	20	75	5,83E+05	1,76E+11	6,15E+08
C16	18000	20	75	5,38E+05	2,03E+11	6,75E+08
C17	10000	25	100	2,13E+06	5,26E+11	2,39E+09
C18	15000	25	100	1,59E+06	1,20E+12	4,18E+09
C19	16774	25	100	1,46E+06	1,53E+12	4,91E+09
C20	18000	25	100	1,39E+06	1,79E+12	5,45E+09
C21	10000	25	75	1,94E+06	2,95E+11	8,29E+08
C22	15000	25	75	1,43E+06	6,80E+11	1,44E+09
C23	16774	25	75	1,32E+06	8,69E+11	1,69E+09
C24	18000	25	75	1,25E+06	1,02E+12	1,87E+09

Fonte: autora (2025)

Tabela B3 - Vida Útil para Carregamento de 11,25 t

Carregamento 11,250 t						
Cenários	MR BGTC (Mpa)	ESP. BGTC (cm)	MR Subleito (Mpa)	Nf	Ndp	Nd
C1	10000	15	100	3,30E+05	1,38E+10	1,65E+08
C2	15000	15	100	1,56E+05	2,48E+10	2,48E+08
C3	16774	15	100	1,25E+05	2,95E+10	2,80E+08
C4	18000	15	100	1,09E+05	3,31E+10	3,03E+08
C5	10000	15	75	2,71E+05	7,28E+09	5,63E+07
C6	15000	15	75	1,24E+05	1,31E+10	8,45E+07
C7	16774	15	75	9,83E+04	1,57E+10	9,52E+07
C8	18000	15	75	8,49E+04	1,76E+10	1,03E+08
C9	10000	20	100	8,71E+05	7,19E+10	4,86E+08
C10	15000	20	100	5,37E+05	1,48E+11	7,98E+08
C11	16774	20	100	4,68E+05	1,83E+11	9,22E+08
C12	18000	20	100	4,29E+05	2,10E+11	1,01E+09
C13	10000	20	75	7,57E+05	3,91E+10	1,67E+08
C14	15000	20	75	4,57E+05	8,08E+10	2,73E+08
C15	16774	20	75	3,96E+05	1,00E+11	3,15E+08
C16	18000	20	75	3,62E+05	1,15E+11	3,45E+08
C17	10000	25	100	1,69E+06	3,01E+11	1,22E+09
C18	15000	25	100	1,21E+06	6,84E+11	2,14E+09
C19	16774	25	100	1,11E+06	8,71E+11	2,51E+09
C20	18000	25	100	1,05E+06	1,02E+12	2,78E+09
C21	10000	25	75	1,52E+06	1,68E+11	4,24E+08
C22	15000	25	75	1,08E+06	3,86E+11	7,34E+08
C23	16774	25	75	9,82E+05	4,93E+11	8,61E+08
C24	18000	25	75	9,25E+05	5,77E+11	9,53E+08

Fonte: autora (2025)

Tabela B4 - Vida Útil para Carregamento de 12 t

Carregamento 12 t						
Cenários	MR BGTC (Mpa)	ESP. BGTC (cm)	MR Subleito (Mpa)	Nf	Ndp	Nd
C1	10000	15	100	2,60E+05	1,02E+10	1,14E+08
C2	15000	15	100	1,18E+05	1,83E+10	1,72E+08
C3	16774	15	100	9,32E+04	2,18E+10	1,94E+08
C4	18000	15	100	8,03E+04	2,44E+10	2,10E+08
C5	10000	15	75	2,11E+05	5,38E+09	3,90E+07
C6	15000	15	75	9,17E+04	9,72E+09	5,85E+07
C7	16774	15	75	7,19E+04	1,16E+10	6,60E+07
C8	18000	15	75	6,15E+04	1,30E+10	7,13E+07
C9	10000	20	100	7,29E+05	5,32E+10	3,36E+08
C10	15000	20	100	4,36E+05	1,09E+11	5,52E+08
C11	16774	20	100	3,77E+05	1,35E+11	6,37E+08
C12	18000	20	100	3,43E+05	1,55E+11	6,99E+08
C13	10000	20	75	6,28E+05	2,88E+10	1,16E+08
C14	15000	20	75	3,67E+05	5,97E+10	1,89E+08
C15	16774	20	75	3,15E+05	7,39E+10	2,18E+08
C16	18000	20	75	2,86E+05	8,50E+10	2,39E+08
C17	10000	25	100	1,47E+06	2,22E+11	8,45E+08
C18	15000	25	100	1,03E+06	5,03E+11	1,47E+09
C19	16774	25	100	9,38E+05	6,40E+11	1,73E+09
C20	18000	25	100	8,82E+05	7,48E+11	1,92E+09
C21	10000	25	75	1,32E+06	1,24E+11	2,93E+08
C22	15000	25	75	9,13E+05	2,84E+11	5,07E+08
C23	16774	25	75	8,26E+05	3,62E+11	5,95E+08
C24	18000	25	75	7,75E+05	4,24E+11	6,59E+08

Fonte: autora (2025)