

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Henrique Fiuza Froener**

**DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE  
PAVIMENTOS COM CAMADAS DE SOLO-CAL: EFEITO DA  
ESPESSURA E RIGIDEZ DOS MATERIAIS**

Porto Alegre  
Abril 2023

**HENRIQUE FIUZA FROENER**

**DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE  
PAVIMENTOS COM CAMADAS DE SOLO-CAL: EFEITO DA  
ESPESSURA E RIGIDEZ DOS MATERIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de  
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia  
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Thaís Radünz Kleinert**  
**Coorientador: Washington Peres Núñez**

Porto Alegre  
Abril 2023

**HENRIQUE FIUZA FROENER**

**DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE  
PAVIMENTOS COM CAMADAS DE SOLO-CAL: EFEITO DA  
ESPESSURA E RIGIDEZDOS MATERIAIS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, abril de 2023

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof.<sup>a</sup> Thaís Radünz Kleinert (UFRGS)**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientadora

**Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)**

Dr. Pela Universidade do Rio Grande do Sul  
Coorientador

**Prof. William Fedrigo (UFRGS)**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Bruna Calabria Diniz**

Ms. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar diferentes estruturas de pavimentos com bases e/ou sub-bases de solo-cal, de modo a determinar a sua capacidade estrutural. Neste estudo, foram realizadas análises mecanísticas de duas estruturas semirrígidas principais, sendo uma delas com solo-cal como base e sub-base e outra com base em solo-cal e sub-base granular. Além disso, optou-se por trabalhar com diferentes materiais e espessuras nas camadas de concreto asfáltico e de solo-cal. A partir dos resultados, foram gerados modelos de regressão e gráficos de contorno para contribuir com o pré-dimensionamento de estruturas de pavimentos com camadas de solo-cal. Observou-se um ganho significativo na capacidade estrutural quando são aplicadas espessuras de revestimentos de concreto asfáltico superiores a 10 cm. Também foi verificado que misturas de solo-cal com teores de 5% de cal calcítica compactadas na energia modificada (solo estabilizado), em comparação às estruturas similares de pavimentos com camadas de solo-cal compactadas na energia normal (solo melhorado), com teor de 3% ou estabilização com cal dolomítica, quando aplicadas as camadas de base e/ou sub-base, caracterizam pavimentos com capacidades estruturais melhores.

**Palavras-chave:** *solo-cal; pré-dimensionamento de pavimentos; dimensionamento mecanístico-empírico; camadas cimentadas.*

## ABSTRACT

*The aim of this study is to assess the structural capacity of different pavement structures using lime-soil bases and/or sub-bases. Mechanistic analyses of two main semi-rigid structures were analyzed, one with lime-soil as the base and sub-base, and the other with a lime-soil base and granular sub-base. Furthermore, various materials and thicknesses were employed for the asphalt concrete and lime-soil layers. Regression models and contour graphs were generated from the results to contribute to the pre-design of pavement structures with lime-soil layers. It was observed that applying asphalt concrete coatings thicker than 10 cm significantly increased the structural capacity. Additionally, pavements with lime-soil mixtures containing 5% calcitic lime and compacted with modified effort (soil stabilized by lime) demonstrated superior structural capacities in comparison to similar pavement structures with lime-soil layers compacted with normal effort (modified soil) and 3% lime or dolomitic lime stabilization applied to the base and/or sub-base.*

**Keywords:** *lime-soil; pavement pre-design; mechanistic-empirical design; cemented layers.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estruturas consideradas nas análises mecánicas .....	11
Figura 2 – Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura combinada da base e sub-base de solo-cal para estimar o $N_{AASHTO}$ (entre $2 \times 10^6$ e $1,4 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.1) e (4.2) respectivamente.....	22
Figura 3 – Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura combinada da base e sub-base de solo-cal para estimar o $N_{AASHTO}$ (entre $6 \times 10^6$ e $1,8 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.3) e (4.4) respectivamente.....	23
Figura 4 – Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura combinada da base e sub-base de solo-cal para estimar o $N_{AASHTO}$ (entre $8 \times 10^6$ e $2 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.5) e (4.6) respectivamente.....	24
Figura 5 – Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura combinada da base e sub-base de solo-cal para estimar o $N_{AASHTO}$ (entre $8 \times 10^6$ e $2 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.7) e (4.8) respectivamente.....	24
Figura 6 – Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura da base de solo-cal para estimar o $N_{AASHTO}$ (entre $1,5 \times 10^6$ e $1,35 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.9) e (4.10) respectivamente.....	26
Figura 7 – Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura da base de solo-cal para estimar o $N_{AASHTO}$ (entre $3 \times 10^6$ e $2,1 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.11) e (4.12) respectivamente.....	26
Figura 8 – Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura da base de solo-cal para estimar o $N_{AASHTO}$ (entre $5 \times 10^6$ e $3,5 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.13) e (4.14) respectivamente.....	27
Figura 9 – Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura da base de solo-cal para estimar o $N_{AASHTO}$ (entre $5 \times 10^6$ e $3,5 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.15) e (4.16) respectivamente.....	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos materiais de solo-cal. ....	10
Tabela 2 – Características dos demais materiais utilizados nas análises mecánísticas. ....	11
Tabela 3 – resultados das análises mecánísticas da estrutura A, PVA compactado na energia normal.....	15
Tabela 4 – resultados das análises mecánísticas da estrutura A, PVA compactado na energia modificada.....	16
Tabela 5 – resultados das análises mecánísticas da estrutura A, TX compactado na energia normal.....	16
Tabela 6 – resultados das análises mecánísticas da estrutura A, LV compactado na energia modificada.....	17
Tabela 7 – resultados das análises mecánísticas da estrutura B, PVA compactado na energia normal.....	18
Tabela 8 – resultados das análises mecánísticas da estrutura B, PVA compactado na energia modificada.....	19
Tabela 9 – resultados das análises mecánísticas da estrutura B, TX compactado na energia normal.....	19
Tabela 10 – resultados das análises mecánísticas da estrutura B, LV compactado na energia modificada.....	20

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Official*

AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas

BGS – Grita graduada simples

CA – Concreto asfáltico

CAP – Cimento asfáltico de petróleo

CC – Cal calcítica

CD – Cal dolomítica

EN– Energia normal

EM – Energia modificada

LV – Latossolo vermelho

MEF – Módulo de elasticidade na flexão

MR – Módulo de resiliência

RCS – Resistência à compressão simples

SAMDM – *South African Mechanistic-Empirical Design Method*

PVA – Argissolo vermelho-amarelo

TX – Luvisolo háplico

R<sup>2</sup> – Coeficiente de determinação

$\rho$  – Massa específica

$\mu$  – Coeficiente de poisson

$\epsilon$  – deformação

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. OBJETIVOS .....	9
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
3. RESULTADOS DAS ANÁLISES MECANÍSTICAS .....	14
3.1. ESTRUTURA A .....	14
3.2. ANÁLISES DA ESTRUTURA B .....	18
4. PRÉ-DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO DE PAVIMENTOS COM CAMADAS DE SOLO-CAL .....	20
4.1. ESTRUTURA A .....	21
4.1.1. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 5 cm.....	21
4.1.2. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 10 cm.....	22
4.1.3. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 15 cm.....	23
4.1.4. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 20 cm.....	24
4.2. ESTRUTURA B .....	25
4.2.1. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 5 cm.....	25
4.2.2. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 10 cm.....	26
4.2.3. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 15 cm.....	27
4.2.4. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 20 cm.....	27
5. CONCLUSÃO.....	29
REFERÊNCIAS.....	30

## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento das estradas e o aumento do volume de tráfego, torna-se cada vez mais necessário que as estruturas sejam capazes de suportar os esforços solicitantes cada vez maiores (PINTO et al., 2001). Ao construir novos pavimentos, as características do solo e de materiais do local devem ser consideradas, pois é necessário a incorporação de materiais resistentes e estáveis a fim de garantir que o pavimento tenha a capacidade de suportar os esforços e cargas aos quais será submetido ao longo de sua vida útil (AZEVEDO et al., 1998).

Não obstante, caso o solo de um determinado local não cumpra com os requisitos geotécnicos mínimos, será necessário tomar uma decisão relativa à solução mais indicada para cada caso, que, geralmente, deve contemplar: substituir o solo existente por outro, cujas características são satisfatórias; estabilizar química ou mecanicamente o solo do local; ou redimensionar o projeto (CRISTELO, 2001).

Um bom dimensionamento de pavimento é essencial para prolongar sua vida útil e viabilidade econômica, atendendo ao tráfego de projeto de forma a minimizar o número e o impacto das manutenções, além de evitar o superdimensionamento, que provoca desvantagens econômicas e de sustentabilidade ao longo do tempo. A técnica de solo-cal é elaborada com base nas características exigidas pelo projeto e do solo aplicado (DNIT 422 - ES, 2019). O uso da cal no solo proporciona a melhoria das suas propriedades, como a resistência ao cisalhamento e a durabilidade. Portanto, estudar estruturas com camadas de base e/ou sub-base de solo cal, de forma a esclarecer acerca das capacidades estruturais dos pavimentos, assim como o efeito da implementação de misturas de diferentes solos com cales de teores e tipos distintos, é importante para viabilizar a construção de novas estradas sobre solos estabilizados por cal, de forma a minimizar a necessidade de transportes de materiais, gerando obras mais econômicas e sustentáveis.

### 1.1. OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é avaliar como as espessuras das camadas de base e/ou sub-base de solo-cal, e a rigidez de seus materiais influenciam na capacidade estrutural de pavimentos. De modo a apresentar modelos e gráficos de contorno que relacionem as características mecânicas e de geometria com o volume de tráfego, caracterizado por um número  $N_{AASHTO}$  associado a um determinado mecanismo de ruptura.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar como as camadas de solo-cal afetam o comportamento estrutural do pavimento, é necessário conduzir análises mecanísticas. Para isso, foram selecionados materiais asfálticos, granulares, cimentados e de subleito, e então definidas estruturas de pavimentos. Com as composições definidas, foram realizadas análises na sub-rotina de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) do programa do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa) para o cálculo das deformações e tensões, com os quais é possível aplicar os modelos do Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico da África do Sul – *South African Mechanistic-Empirical Design Method* (SAMDM) sugeridos pela *South African National Roads Agency Limited* (2014). Dessa forma, é estimado o mecanismo de ruptura, bem como o  $N$  crítico, que corresponde ao número admissível de solicitações de eixos padrão que cada estrutura pode suportar antes de romper.

Finalmente, conhecendo o  $N$  crítico de cada estrutura, foi possível realizar modelos de regressão matemática a fim de relacionar o  $N_{AASHTO}$  com as espessuras das camadas cimentadas de solo-cal e seus módulos de elasticidade na flexão (MEF).

## 2.1. MATERIAIS

Foram analisadas camadas cimentadas de solo-cal, as quais variam de acordo com o teor de cal de 3% e 5%, sua energia de compactação, normal (EN) ou modificada (EM), o tipo de cal, calcária (CC) ou dolomítica (CD), e o tipo de solo: argissolo vermelho-amarelo (PVA), luvisolo háplico (TX), e latossolo vermelho (LV). Foram analisadas um total 16 misturas de solo-cal, a fim de verificar os efeitos da variação desses parâmetros nas propriedades do pavimento. As misturas de solo-cal consideradas foram as estudadas e descritas por Kleinert (2021), as quais possuem suas características de massa específica ( $\rho$ ), MEF, resistência à compressão simples a 28 dias ( $RCS_{28\text{dias}}$ ), deformação na ruptura ( $\epsilon_{\text{ruptura}}$ ) e coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos materiais de solo-cal

Emprego	Material	Massa específica- $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo linear (Mpa)	RCS <sub>28 dias</sub> (MPa)	$\epsilon_{\text{ruptura}}$ (microstrain)	Coefficiente de Poisson- $\mu$
Base ou sub-base cimentada	PVA-EN-3CD	1,95	519	0,53	298	0,2
	PVA-EN-5CD	1,92	1149	0,77	189	0,2
	PVA-EN-3CC	1,91	1262	0,79	187	0,2
	PVA-EN-5CC	1,92	2457	1,09	173	0,2
	PVA-EM-3CD	2,13	2017	1,84	209	0,2
	PVA-EM-5CD	2,11	2913	2,23	200	0,2
	PVA-EM-3CC	2,11	3772	2,93	207	0,2
	PVA-EM-5CC	2,09	4840	3,4	213	0,2
	TX-EN-3CD	1,85	327	0,29	170	0,2
	TX-EN-5CD	1,82	611	0,5	149	0,2
	TX-EN-3CC	1,83	682	0,41	192	0,2
	TX-EN-5CC	1,82	903	0,5	270	0,2
	LV-EM-3CD	2,02	823	1,36	221	0,2
	LV-EM-5CD	2,01	969	1,59	210	0,2
	LV-EM-3CC	2,00	1047	1,32	174	0,2
	LV-EM-5CC	1,98	1499	2,17	196	0,2

Fonte: KLEINERT (2021)

Foi escolhido um subleito genérico para avaliar de maneira mais precisa as variações das demais camadas. Desta forma, foi selecionado o módulo de 100 MPa, que pode ser considerado um valor aproximado aos módulos de resiliência usuais de solos de subleitos de pavimentos asfálticos, como os estudados por Ferri (2018).

Além disso, foram considerados dois materiais para concreto asfáltico, com valores de módulo de resiliência (MR) de 3032 MPa e 5533 MPa. O objetivo desta escolha foi verificar o comportamento do pavimento em diferentes resistências de concreto asfáltico. O material granular escolhido foi a brita graduada simples (BGS), pois é o mais utilizado nacionalmente. Para o revestimento asfáltico, foram selecionados os estudados por Godoi (2017) para o concreto asfáltico (CA) com cimento asfáltico de petróleo (CAP) 50/70 de 3032 MPa e pela ANTT (2018), cujo CA CAP 50/70 apresenta MR de 5533 MPa. Já a BGS apresenta valor de MR dependente do estado de tensões, sendo considerado neste estudo o modelo gerado pelo estudo de Malysz (2009). As características requeridas para as análises mecânicas desses materiais podem ser encontradas na Tabela 2. Os coeficientes de Poisson são sugeridos pelo *software* AEMC.

Tabela 2: Características dos demais materiais utilizados nas análises mecânicas

Emprego	Material	Massa específica $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo (Mpa)			Coeficiente de Poisson $\mu$	
			Linear	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>		k <sub>3</sub>
Revestimento	CA CAP 50/70*	2,41	3032	-	-	-	0,3
	CA CAP 50/70**	2,37	5533	-	-	-	0,3
Sub-base Granular	BGS***	2,65	-	2303	0,2228	0,7593	0,35
Subleito	SL100	1,97	100	-	-	-	0,4

\*GODOI (2017)

\*\*ANTT (2018)

\*\*\*MALYSZ (2009)

## 2.2. ESTRUTURAS

Duas estruturas foram estabelecidas, considerando tanto o comportamento quanto a espessura das camadas utilizadas. As estruturas definidas estão representadas pela Figura 1.

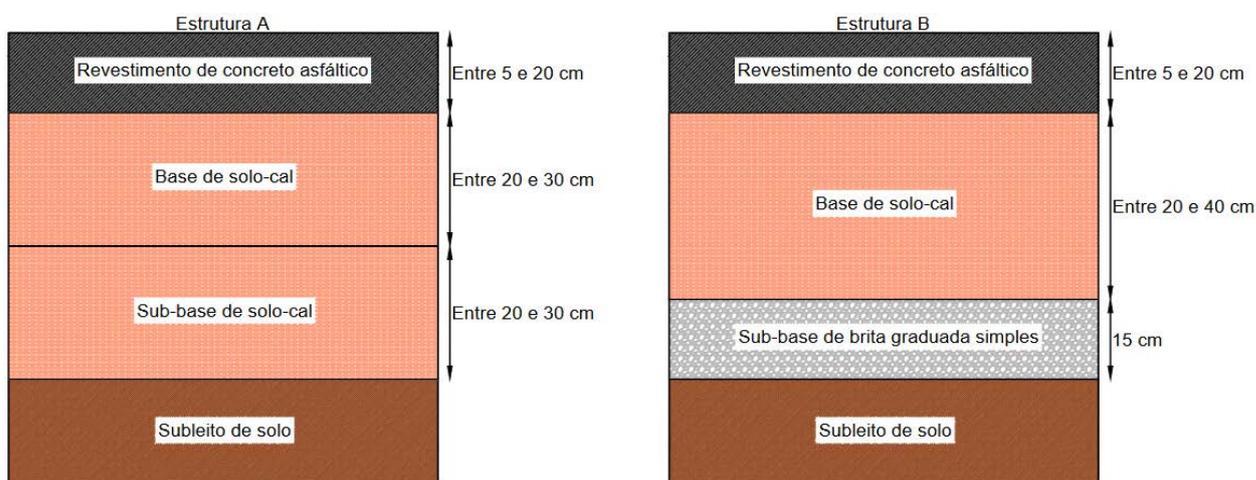


Figura 1: Estruturas consideradas nas análises mecânicas

Na Figura 1, as estruturas A e B apresentam revestimento de concreto asfáltico com diferentes espessuras: 5, 10, 15 e 20cm. As espessuras foram escolhidas para avaliar o efeito sobre o comportamento das camadas de solo-cal, compostas pelos materiais listados na tabela 1, em estruturas com revestimentos asfálticos delgados e espessos.

Na estrutura semirrígida A, as camadas de base e sub-base de solo cal foram analisadas em incrementos de 2 em 2 cm, totalizando 11 estruturas. Quando as espessuras da base e sub-base diferiam, a maior espessura foi atribuída à camada de sub-base, ambas sendo variadas de 20 a 30 cm. É importante ressaltar que a escolha de manter os materiais da base e sub-base iguais em todas as variações foi feita com o objetivo de aumentar a aplicabilidade e consistência dos resultados. Dessa forma, é possível avaliar de maneira mais precisa o comportamento da estrutura semirrígida, já que as camadas de solo-cal apresentam características semelhantes em todas as espessuras testadas.

Na estrutura B, sub-base é de BGS, de modo que a mesma foi mantida com espessura fixa de 15 cm, já que essa camada não é o foco principal do estudo. Para a camada de base de solo-cal, a espessura variou de 20 a 40 cm, com um aumento de 2 cm em cada etapa, resultando em um total de 11 espessuras de base.

Além disso, vale ressaltar que para cada estrutura, foram considerados os dois tipos de materiais de concreto asfáltico, com suas 4 espessuras distintas, descritos na Tabela 2. De modo a obter um total 16 estruturas analisadas com camadas de solo-cal.

Após a coleta dos dados do N crítico de cada composição dos pavimentos estudados, foram realizadas regressões, a fim de relacionar o MEF e as espessuras das camadas de solo-cal com seus  $N_{AASHTO}$ . Dessa forma, foram gerados modelos de regressão, além de conceber a ilustração dessa relação em formato de gráficos de contorno. Esses podem servir de auxílio em um pré-dimensionamento de pavimentos com camadas de solo-cal.

### 2.3. ANÁLISES MECANÍSTICAS

Para as análises mecanísticas das estruturas estudadas, foram utilizados os modelos de previsão propostos pelo SAMDM. Os modelos empregados para cada camada são apresentados na sequência, sendo importante salientar que o SAMDM emprega índices que variam em função da categoria da rodovia, além de sugerir propriedades de materiais usualmente utilizados. Essas propriedades sugeridas não foram utilizadas, tendo em vista que foi possível obter as características reais dos materiais. O nível de confiabilidade da rodovia adotado foi de 90% para todas as análises. A partir dos resultados obtidos para os diversos mecanismos de ruptura, foi possível definir o N crítico, que corresponde ao menor valor calculado. Esse valor corresponde ao  $N_{AASHTO}$ .

#### 2.3.1 Camadas asfálticas

Utilizando os modelos (2.1) e (2.2), foi possível determinar a vida de fadiga das camadas asfálticas.

$$N_f = SF \times 10^{\alpha \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{\beta}\right)} \quad (2.1)$$

$$SF = 0,0489 \times t - 0,2225 \quad (2.2)$$

Onde:

$N_f$  – vida de fadiga;

$\alpha$  e  $\beta$  – constantes, que dependem do nível de confiabilidade, da espessura da camada, granulometria ou MR;

$\varepsilon_t$  – deformação horizontal na tração na fibra inferior da camada asfáltica, em microstrain;

SF – fator de espessura, que está relacionado com a propagação de trincas, é calculado usando a equação (2.2) para espessuras de 25 mm ou mais. Caso contrário, é considerado como 1;

$t$  – espessura da camada, em milímetros.

#### 2.3.2 Camadas granulares

Para determinar o número N necessário para a ruptura ao cisalhamento das camadas granulares, foram analisados os modelos (2.3) e (2.4). A condição de umidade, requerimento para a aplicação do modelo, foi considerada como moderada.

$$N = 10^{(\alpha F + \beta)} \quad (2.3)$$

$$F = \frac{\sigma_3 [K(\tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) - 1) + 2 K C \tan(45 + \frac{\phi}{2})]}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (2.4)$$

Onde:

$N$  – número equivalente de eixos padrão para proteção contra resistência ao cisalhamento;

$\alpha$  e  $\beta$  – constantes que dependem do nível de confiabilidade;

$F$  – reação de tensões, adquirida pela equação (2.4);

$\sigma_1$  e  $\sigma_3$  – tensões principais maior e menor, atuando na metade da camada granular;

$C$  – coesão;

$\phi$  – ângulo de atrito;

$K$  – constante relacionada à umidade.

Os valores da coesão e do ângulo de atrito referentes a camada granular de BGS aplicada no estudo são de, respectivamente, 71kPa e 60°, conforme Malysz (2009).

### 2.3.3 Camadas cimentadas

Para as camadas cimentadas, foram examinados dois modos de falha: esmagamento avançado (modelo (2.5)) e vida efetiva de fadiga (modelos (2.6) e (2.7)).

$$N_{ca} = 10^{\alpha \left(1 - \frac{\sigma_v}{b \text{RCS}}\right)} \quad (2.5)$$

$$N_{eff} = SF \times 10^{c \left(1 - \frac{\epsilon}{d \epsilon_{ruptura}}\right)} \quad (2.6)$$

$$SF = 10^{(0,00285t - 0,293)} \quad (2.7)$$

Onde:

$N_{ca}$  – número equivalente de eixos padrão para esmagamento avançado;

$\sigma_v$  – tensão vertical de compressão no topo da camada;

RCS – resistência à compressão simples;

$a$  e  $b$  – constantes relacionadas ao nível de confiabilidade;

$N_{eff}$  – vida de fadiga efetiva;

$\epsilon$  – deformação horizontal na tração na fibra inferior da camada, em microstrain;

$\epsilon_{ruptura}$  – deformação na ruptura, em microstrain;

SF – fator de espessura, que está relacionado com a propagação de trincas, é calculado usando a equação (2.7) para espessuras entre 102 mm e 419 mm;

$t$  – espessura da camada, em milímetros.

Quando a camada cimentada alcança o número de solicitações correspondente à vida efetiva de fadiga, ela começa a se comportar como um material granular. Isso significa que, além de  $N$ , é preciso adicionar o número de solicitações que o pavimento deve suportar a partir desse ponto. (*South African Pavement Engineering Manual*, 2013) No entanto, como não há informações disponíveis sobre o comportamento granular das misturas solo-cal estudadas nesta pesquisa, o valor de  $N_{eff}$  foi considerado como o fim da vida útil do pavimento nos casos em que a fadiga da camada cimentada é o mecanismo que leva à ruptura do pavimento. Consideração que é a

favor da segurança.

### 2.3.4 Subleito

Utilizando a profundidade do sulco de 10 mm e o modelo (2.8), foi possível verificar o número de eixos padrão equivalente a partir do qual ocorre a deformação permanente do subleito.

$$N_{PD} = 10^{(a-10\log\varepsilon_v)} \quad (2.8)$$

Onde:

$N_{PD}$  – número equivalente de eixos padrão para definir o nível de deformação permanente;

$\varepsilon_v$  – deformação vertical de compressão no topo da camada;

$a$  – constante relacionada ao nível de confiabilidade e à profundidade do sulco referente à deformação permanente.

## 3. RESULTADOS DAS ANÁLISES MECANÍSTICAS

Após definidas as estruturas, foram realizados cálculos para determinar as tensões e deformações de cada composição de pavimento. Implementou-se, então, a análise mecânica pelos métodos da SAMDM, a fim de especificar o  $N_{AASHTO}$  das estruturas analisadas com suas diferentes espessuras e materiais de camadas, as quais tiveram seus impactos avaliados na capacidade estrutural dos pavimentos.

Dessa forma, foi possível determinar que para as estruturas com revestimentos de concreto asfáltico de 5 cm, o mecanismo de falha das estruturas foi, predominantemente, o esmagamento avançado da camada de base. E para estruturas com camadas de revestimento mais robustas, a vida efetiva de fadiga da base ou sub-base se torna crítica. Isso se dá pelos efeitos da tensão vertical no topo da camada de base, que com revestimentos mais delgados, é pouco dissipada e é mais intensa, resultando em condições mais críticas para o esmagamento da base. Nesses casos, camadas de base mais robustas não se apresentam como soluções, visto que o aumento da altura da camada pouco influencia na tensão que a mesma está submetida ao seu topo. Ao invés disso, o esmagamento da camada de base pode ser mitigado por materiais mais resistentes, que é observado, principalmente, nos casos quando a energia de compactação é a modificada e a estabilização do solo-cal é feita por cal calcítica. Todavia, o aumento da espessura da camada de revestimento da estrutura é o método mais efetivo para melhorar os comportamentos estruturais em relação ao esmagamento de base.

### 3.1. ESTRUTURA A

Na tabela 3 são apresentados os números  $N_{AASHTO}$  críticos obtidos para as diversas composições e seu método de falha, considerando camadas de Argissolo tratados com as duas cales (dolomítica e calcítica) e nos teores de 3 e 5%. A tabela mostra os resultados das análises mecánísticas considerando uma camada de revestimento de concreto asfáltico de módulos de resiliência de 3032 e 5533 MPa em quatro espessuras distintas: 5, 10, 15 e 20 cm. Também três espessuras combinadas de base e sub-base de 40, 50 e 60 cm. As siglas apresentadas a baixo dos resultados identificam os mecanismos de degradação que devem levar à ruptura do pavimento, sendo EB, o esmagamento avançado da base, FB, fadiga da base, FS, fadiga da sub-base e FR fadiga do revestimento.

Observa-se que o emprego de camadas cimentadas de Argissolo compactados na energia normal para revestimentos de concreto asfáltico delgados (5 cm) mostra-se inadequado. As tensões verticais no topo da base são muito elevadas, implicando que a base cimentada romperá por esmagamento avançado com a passagem de números de operação do eixo padrão muito reduzidos. Também pode-se perceber que para maiores espessuras de revestimento (15 e 20

cm), mesmo por vezes a estrutura rompendo por esmagamento de base, as tensões verticais no topo da base são mitigadas, de modo ao aumentar a capacidade estrutural do pavimento significativamente.

Tabela 3: resultados das análises mecánísticas da estrutura A, PVA compactado na energia normal.

Material	Espessura combinada	Espessura do revestimento							
		CAP com MR de 3032 MPa				CAP com MR de 5533 MPa			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
PVA-EN-3CD	40 cm	4,2E+2	1,0E+5	1,5E+6	6,8E+6	1,9E+3	4,3E+5	4,2E+6	8,6E+6
	50 cm	4,1E+2	9,6E+4	1,4E+6	6,3E+6	1,8E+3	4,1E+5	3,9E+6	1,0E+7
	60 cm	4,0E+2	9,3E+4	1,4E+6	6,0E+6	1,8E+3	3,9E+5	3,8E+6	1,3E+7
PVA-EN-5CD	40 cm	8,7E+3	2,7E+5	2,4E+6	7,5E+6	1,7E+4	7,4E+5	5,3E+6	8,0E+6
	50 cm	8,5E+3	2,5E+5	5,0E+6	8,3E+6	1,7E+4	7,0E+5	4,9E+6	1,0E+7
	60 cm	8,4E+3	2,5E+5	2,2E+6	8,0E+6	1,7E+4	6,8E+5	4,7E+6	1,4E+7
PVA-EN-3CC	40 cm	1,0E+4	2,7E+5	2,4E+6	7,6E+6	1,9E+4	7,3E+5	5,1E+6	8,1E+6
	50 cm	1,0E+4	2,6E+5	2,3E+6	8,2E+6	1,9E+4	6,9E+5	4,8E+6	1,0E+7
	60 cm	1,0E+4	2,5E+5	2,2E+6	7,9E+6	1,9E+4	6,7E+5	4,6E+6	1,4E+7
PVA-EN-5CC	40 cm	1,0E+5	7,7E+5	4,3E+6	8,7E+6	1,4E+5	1,5E+6	7,2E+6	9,1E+6
	50 cm	1,0E+5	7,4E+5	4,1E+6	1,1E+7	1,4E+5	1,4E+6	6,8E+6	1,1E+7
	60 cm	1,0E+5	7,3E+5	4,0E+6	1,2E+7	1,4E+5	1,4E+6	6,6E+6	1,7E+7

EB FB FS FR

A análise também evidenciou que misturas similares de solo-cal com módulos de resiliência maiores apresentam desempenhos superiores. Além disso, as espessuras das camadas de base e sub-base apresentam pouca influência quando o esmagamento de base é o mecanismo de ruptura. Esse resultado já era esperado, pois a tensão vertical no topo da camada de base sofre pouca influência das espessuras das camadas de base e sub-base.

Observa-se que o emprego de uma camada de revestimento asfáltico com maior módulo de resiliência aumenta a capacidade estrutural dos pavimentos, de forma mais significativa, para estruturas que rompem por esmagamento avançado da base. Pois a tensão vertical ao topo da camada de base será menor, devido à maior capacidade de mitigação do revestimento.

Na tabela 4, são apresentados os resultados obtidos quando do emprego de misturas de Argissolo com cal nas camadas de base e sub-base compactadas na energia modificada.

É possível observar que os números  $N_{AASHTO}$ , principalmente para espessuras de revestimento de concreto asfáltico delgados (5 cm), são muito superiores aos da tabela 3. Também, a ruptura por esmagamento avançado da base não se apresenta mais como o mecanismo de ruptura prevalente. Desse modo, as espessuras combinadas da base e sub-base passam a representar ganhos na capacidade estrutural do pavimento.

Tabela 4: resultados das análises mecânicas da estrutura A, PVA compactado na energia modificada.

Material	Espessura combinada	Espessura do revestimento							
		CAP com MR de 3032 MPa				CAP com MR de 5533 MPa			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
PVA-EM-3CD	40 cm	2,1E+6	7,5E+6	8,4E+6	9,0E+6	2,6E+6	8,0E+6	8,7E+6	9,3E+6
	50 cm	2,1E+6	7,3E+6	1,1E+7	1,1E+7	2,6E+6	1,1E+7	1,1E+7	1,1E+7
	60 cm	2,1E+6	1,3E+1	1,9E+7	2,0E+7	2,6E+6	1,1E+7	2,0E+7	2,1E+7
PVA-EM-5CD	40 cm	4,2E+6	8,4E+6	9,0E+6	9,5E+6	4,8E+6	8,7E+6	9,3E+6	9,8E+6
	50 cm	4,2E+6	1,0E+7	1,2E+7	1,2E+7	4,7E+6	1,2E+7	1,2E+7	1,2E+7
	60 cm	4,2E+6	1,0E+7	2,0E+7	2,1E+7	4,7E+6	1,4E+7	2,1E+7	2,1E+7
PVA-EM-3CC	40 cm	8,4E+6	9,1E+6	9,6E+6	1,0E+7	8,7E+6	9,3E+6	9,9E+6	1,0E+7
	50 cm	9,5E+6	1,2E+7	1,2E+7	1,2E+7	1,0E+7	1,2E+7	1,2E+7	1,2E+7
	60 cm	9,5E+6	1,8E+7	2,1E+7	2,2E+7	1,0E+7	2,1E+7	2,2E+7	2,2E+7
PVA-EM-5CC	40 cm	9,1E+6	9,7E+6	1,0E+7	1,0E+7	9,3E+6	9,9E+6	1,0E+7	1,1E+7
	50 cm	1,2E+7	1,2E+7	1,2E+7	1,2E+7	1,2E+7	1,2E+7	1,2E+7	1,2E+7
	60 cm	1,4E+7	2,1E+7	2,2E+7	2,2E+7	1,5E+7	2,2E+7	2,2E+7	2,2E+7

■ EB ■ FB ■ FS ■ FR

Vale ressaltar que apesar de que a mistura de Argissolo compactado na energia normal e com teor de cal calcítica de 5% (PVA-EN-5CC) possuir um módulo de resiliência de 2457 MPa, superior ao da mistura PVA-EM-3CD, de módulo igual a 2017 MPa, a mistura de energia compactada modificada ainda apresenta capacidades estruturais melhores, representadas pelo  $N_{AASHTO}$ . Isso pode ser relacionado aos maiores valores de resistência a compressão simples obtidos para PVA-EM-3CD em relação a mistura PVA-EM-5CC.

O aumento no módulo de resiliência do CA de 3032 para 5533 MPa, não resulta em ganhos significativos no  $N_{AASHTO}$ .

Os resultados das análises considerando camadas de base e sub-base de luvissole compactadas na energia normal são apresentados na tabela 5.

Tabela 5: resultados das análises mecânicas da estrutura A, TX compactado na energia normal.

Material	Espessura combinada	Espessura do revestimento							
		CAP com MR de 3032 MPa				CAP com MR de 5533 MPa			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
TX-EN-3CD	40 cm	7,7E-2	1,8E+3	1,3E+5	1,4E+6	1,7E+0	2,0E+4	7,2E+5	4,7E+6
	50 cm	7,4E-2	1,6E+3	1,2E+5	1,2E+6	1,6E+0	1,8E+4	6,6E+5	4,2E+6
	60 cm	7,2E-2	1,5E+3	1,1E+5	1,2E+6	1,6E+0	1,7E+4	6,2E+5	4,0E+6
TX-EN-5CD	40 cm	1,4E+2	4,3E+4	8,6E+5	4,5E+6	6,0E+2	2,1E+5	2,6E+6	5,9E+6
	50 cm	1,3E+2	4,1E+4	7,9E+5	4,2E+6	5,7E+2	1,9E+5	2,4E+6	8,3E+6
	60 cm	1,3E+2	3,9E+4	7,6E+5	4,0E+6	5,6E+2	1,9E+5	2,3E+6	9,1E+6
TX-EN-3CC	40 cm	4,8E+0	5,1E+3	2,1E+5	1,8E+6	2,7E+1	3,5E+4	8,5E+5	4,9E+6
	50 cm	4,6E+0	4,7E+3	1,9E+5	1,6E+6	2,6E+1	3,2E+4	7,6E+5	4,4E+6
	60 cm	4,5E+0	4,5E+3	1,8E+5	1,5E+6	2,5E+1	3,1E+4	7,2E+5	4,1E+6
TX-EN-5CC	40 cm	6,5E+1	1,6E+4	4,1E+5	2,7E+6	2,2E+2	7,8E+4	1,3E+6	6,4E+6
	50 cm	6,2E+1	1,5E+4	3,7E+5	2,4E+6	2,1E+2	7,3E+4	1,2E+6	5,8E+6
	60 cm	6,1E+1	1,4E+4	3,5E+5	2,3E+6	2,1E+2	7,0E+4	1,2E+6	5,5E+6

■ EB ■ FB ■ FS ■ FR

Para as estruturas com base e sub-base em Luvissole compactadas na energia normal, percebe-se que os teores de 3 e 5% de cal das misturas, assim como o seu tipo, cal dolomítica ou calcítica,

possuem pouca influência na capacidade estrutural dos pavimentos. Sendo mais eficiente acréscimos à espessura do revestimento de concreto asfáltico.

O comportamento deficiente das camadas de base compostas por misturas de Luvisolo compactadas na energia normal, em comparação com às de Argissolo também compactadas na energia normal, era esperado. Pois as misturas de Luvisolo apresentam módulos e/ou resistência à compressão simples inferiores. Vale ressaltar, que a resistência à compressão simples mitiga os efeitos da tensão vertical ao topo da base, reduzindo o efeito do esmagamento avançado de base.

A camada de revestimento de concreto asfáltico com módulo de resiliência de 5533 MPa sobre as estruturas representadas pela tabela 5 apresenta resultados estruturais pouco melhores aos comparados com estruturas semelhantes com um revestimento de concreto asfáltico com módulo de 3032 MPa. Isso ocorre devido à tensão vertical no topo da camada de base, que leva ao esmagamento avançado da base.

Na tabela 6, são apresentados os resultados obtidos quando do emprego de misturas de Latossolo e cal como base e sub-base.

De modo similar às misturas de Argissolo com cal compactadas na energia modificada, as misturas de Latossolo, referentes na tabela 6, apresentam resultados de capacidade estrutural superiores às outras misturas estudadas compactadas na energia normal.

As camadas de solo-cal compactadas na energia modificada apresentam resistência a compressão simples (RCS) superiores àquelas compactadas na energia normal. Razão pela qual as misturas compactadas na energia modificada apresentam uma maior capacidade, mais evidente para espessuras de revestimento de concreto asfáltico delgados (5 cm). Pois a RCS reduz os efeitos de esmagamento avançado da base.

Tabela 6: resultados das análises mecânicas da estrutura A, LV compactado na energia modificada.

Material	Espessura combinada	Espessura do revestimento							
		CAP com MR de 3032 MPa				CAP com MR de 5533 MPa			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
LV-EM-3CD	40 cm	2,1E+6	7,5E+6	8,4E+6	9,0E+6	2,6E+6	8,0E+6	8,7E+6	9,3E+6
	50 cm	2,1E+6	7,3E+6	1,1E+7	1,1E+7	2,6E+6	1,1E+7	1,1E+7	1,1E+7
	60 cm	2,1E+6	1,3E+1	1,9E+7	2,0E+7	2,6E+6	1,1E+7	2,0E+7	2,1E+7
LV-EM-5CD	40 cm	4,2E+6	8,4E+6	9,0E+6	9,5E+6	4,8E+6	8,7E+6	9,3E+6	9,8E+6
	50 cm	4,2E+6	1,0E+7	1,2E+7	1,2E+7	4,7E+6	1,2E+7	1,2E+7	1,2E+7
	60 cm	4,2E+6	1,0E+7	2,0E+7	2,1E+7	4,7E+6	1,4E+7	2,1E+7	2,1E+7
LV-EM-3CC	40 cm	8,4E+6	9,1E+6	9,6E+6	1,0E+7	8,7E+6	9,3E+6	9,9E+6	1,0E+7
	50 cm	9,5E+6	1,2E+7	1,2E+7	1,2E+7	1,0E+7	1,2E+7	1,2E+7	1,2E+7
	60 cm	9,5E+6	1,8E+7	2,1E+7	2,2E+7	1,0E+7	2,1E+7	2,2E+7	2,2E+7
LV-EM-5CC	40 cm	9,1E+6	9,7E+6	1,0E+7	1,0E+7	9,3E+6	9,9E+6	1,0E+7	1,1E+7
	50 cm	4,4E+6	1,0E+7	1,0E+7	1,1E+7	5,4E+6	1,0E+7	1,1E+7	1,1E+7
	60 cm	4,3E+6	1,3E+7	1,8E+7	1,9E+7	5,3E+6	1,8E+7	1,9E+7	2,0E+7

■ EB ■ FB ■ FS ■ FR

Percebe-se que os mecanismos de ruptura para as estruturas com base e sub-base de latossolo tratado com cal, dependem da espessura das camadas cimentadas e de revestimento. Sendo que para revestimentos de 5 cm de espessura, o mecanismo de ruptura crítico é o esmagamento da base.

Ao comparar os impactos de revestimentos de concreto asfáltico com módulos de resiliência de 3032 MPa e 5533 MPa em estruturas com base e sub-base em Latossolo com cal, pode-se constatar que não há um ganho significativo na capacidade estrutural. Porém, as rupturas por fadiga da base e sub-base se mostram mais críticas em comparação ao esmagamento avançado

da base. Fenômeno que pode ser explicado por uma maior mitigação na tensão vertical que atinge o topo da camada de base devido à uma maior resistência por parte do revestimento de concreto asfáltico.

### 3.2. ANÁLISES DA ESTRUTURA B

A estrutura B é uma estrutura em que a base é composta por solo-cal, a sub-base é composta por BGS com espessura de 15 cm, possui revestimento de concreto asfáltico, nas espessuras de 5, 10, 15 e 20 cm e módulos de resiliência de 3032 ou 5533 MPa. Os mecanismos de ruptura da estrutura verificados foram: fadiga do revestimento asfáltico (FR), esmagamento avançado da base (EB), fadiga da base (FB), deformação permanente do subleito (DP) e cisalhamento da sub-base (CS).

Na tabela 7 são apresentados os números  $N_{AASHTO}$  críticos obtidos para as diversas composições e seu mecanismo de ruptura, considerando camadas de Argissolo tratados com as duas cales (dolomítica e calcítica) e nos teores de 3 e 5%.

Tabela 7: resultados das análises mecânicas da estrutura B, PVA compactado na energia normal.

Material	Espessura da base	Espessura do revestimento							
		CAP com MR de 3032 MPa				CAP com MR de 5533 MPa			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
PVA-EN-3CD	20 cm	5,5E+2	1,6E+5	2,5E+6	4,8E+6	2,5E+3	7,0E+5	4,3E+6	5,8E+6
	30 cm	4,5E+2	1,2E+5	1,9E+6	8,3E+6	2,0E+3	5,2E+5	5,2E+6	1,3E+7
	40 cm	4,2E+2	1,0E+5	1,6E+6	7,2E+6	1,9E+3	4,5E+5	4,5E+6	1,5E+7
PVA-EN-5CD	20 cm	1,1E+4	3,9E+5	2,8E+6	3,9E+6	2,3E+4	1,1E+6	3,4E+6	4,7E+6
	30 cm	9,3E+3	3,0E+5	2,8E+6	1,0E+7	1,9E+4	8,5E+5	6,2E+6	1,2E+7
	40 cm	8,8E+3	2,7E+5	2,5E+6	9,1E+6	1,8E+4	7,5E+5	5,4E+6	1,6E+7
PVA-EN-3CC	20 cm	1,3E+4	4,0E+5	3,0E+6	4,0E+6	2,5E+4	1,1E+6	3,5E+6	4,8E+6
	30 cm	1,1E+4	3,1E+5	2,8E+6	1,0E+7	2,1E+4	8,3E+5	6,0E+6	1,2E+7
	40 cm	1,0E+4	2,7E+5	2,4E+6	9,0E+6	2,0E+4	7,4E+5	5,2E+6	1,6E+7
PVA-EN-5CC	20 cm	1,2E+5	1,0E+6	4,2E+6	5,2E+6	1,7E+5	2,0E+6	4,7E+6	5,9E+6
	30 cm	1,1E+5	8,4E+5	4,8E+6	1,3E+7	1,5E+5	1,6E+6	8,1E+6	1,4E+7
	40 cm	1,0E+5	7,8E+5	4,3E+6	1,3E+7	1,4E+5	1,5E+6	7,3E+6	1,9E+7

■ EB ■ FB

Observa-se que o emprego de camadas cimentadas de Argissolo compactados na energia normal para revestimentos de concreto asfáltico delgados (5 cm) mostra-se inadequado devido ao rompimento precoce da base cimentada com o emprego de concreto asfáltico delgado (5 cm) devido ao esmagamento avançado. Com o aumento das espessuras do revestimento, mesmo que essas rompam devido ao esmagamento da base, houve ganho na capacidade estrutural, verificado pelo aumento no valor do N crítico.

Além disso, camadas asfálticas de maior módulo, apresentam melhora na capacidade estrutural dos pavimentos de forma mais significativa na mitigação da ruptura por esmagamento. vale mencionar que maiores espessuras na camada de base apresentam melhores desempenhos quanto à fadiga da base.

Na tabela 8, são apresentados os resultados obtidos quando do emprego de misturas de Argissolo com cal nas camadas de base compactadas na energia modificada e sub-base de BGS, com espessura de 15 cm. E módulos de resiliência dos revestimentos de concreto asfáltico de 3032 e 5533 MPa.

Tabela 8: resultados das análises mecânicas da estrutura B, PVA compactado na energia modificada.

Material	Espessura da base	Espessura do revestimento							
		CAP com MR de 3032 MPa				CAP com MR de 5533 MPa			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
PVA-EM-3CD	20 cm	2,4E+6	3,5E+6	4,6E+6	5,6E+6	2,6E+6	3,9E+6	5,1E+6	6,3E+6
	30 cm	2,2E+6	7,9E+6	1,2E+7	1,4E+7	2,7E+6	1,1E+7	1,3E+7	1,5E+7
	40 cm	2,1E+6	7,5E+6	2,0E+7	3,2E+7	2,6E+6	1,1E+7	2,8E+7	3,3E+7
PVA-EM-5CD	20 cm	3,1E+6	4,3E+6	5,4E+6	6,3E+6	3,4E+6	4,7E+6	5,9E+6	6,9E+6
	30 cm	4,3E+6	1,1E+7	1,4E+7	1,5E+7	4,9E+6	1,3E+7	1,5E+7	1,6E+7
	40 cm	4,2E+6	1,1E+7	2,5E+7	3,4E+7	4,8E+6	1,4E+7	3,2E+7	3,5E+7
PVA-EM-3CC	20 cm	4,0E+6	5,2E+6	6,2E+6	7,1E+6	4,3E+6	5,6E+6	6,7E+6	7,7E+6
	30 cm	9,7E+6	1,4E+7	1,5E+7	1,7E+7	1,1E+7	1,5E+7	1,6E+7	1,7E+7
	40 cm	9,6E+6	1,9E+7	3,4E+7	3,6E+7	1,0E+7	2,3E+7	3,6E+7	3,7E+7
PVA-EM-5CC	20 cm	4,9E+6	6,0E+6	7,0E+6	7,8E+6	5,2E+6	6,4E+6	7,5E+6	8,4E+6
	30 cm	1,4E+7	1,5E+7	1,7E+7	1,8E+7	1,4E+7	1,6E+7	1,7E+7	1,9E+7
	40 cm	1,4E+7	2,3E+7	3,7E+7	3,8E+7	1,5E+7	2,7E+7	3,8E+7	3,9E+7

■ EB ■ FB

É possível observar que os números  $N_{AASHTO}$ , principalmente para espessuras de revestimento de concreto asfáltico delgados (5 cm), são muito superiores aos da tabela 7. Também, a ruptura por esmagamento avançado da base não se apresenta mais como o método de falha prevalente. Desse modo, as espessuras combinadas da base e sub-base passam a exercer uma maior influência positiva na capacidade estrutural do pavimento.

Os resultados das análises considerando camadas de base e sub-base de Luvissole compactadas na energia normal, e também revestimentos de concreto asfáltico com módulos de resiliência iguais a 3032 e 5033 MPa, são apresentados na tabela 9.

Para as estruturas com base em Luvissole com cal compactadas na energia normal, e sub-base em BGS, percebe-se que os teores de 3 e 5% de cal das misturas, assim como o seu tipo, cal dolomítica ou calcítica, possuem pouca influência na capacidade estrutural dos pavimentos. Sendo mais eficiente acréscimos à espessura do revestimento de concreto asfáltico.

Tabela 9: resultados das análises mecânicas da estrutura B, TX compactado na energia normal.

Material	Espessura da base	Espessura do revestimento							
		CAP com MR de 3032 MPa				CAP com MR de 5533 MPa			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
TX-EN-3CD	20 cm	1,1E-1	3,3E+3	2,6E+5	1,9E+6	2,6E+0	3,9E+4	1,4E+6	2,9E+6
	30 cm	8,7E-2	2,2E+3	1,7E+5	1,9E+6	1,9E+0	2,6E+4	9,9E+5	6,4E+6
	40 cm	7,9E-2	1,9E+3	1,4E+5	1,5E+6	1,7E+0	2,1E+4	8,0E+5	5,2E+6
TX-EN-5CD	20 cm	1,8E+2	7,1E+4	1,1E+6	1,9E+6	8,5E+2	3,6E+5	1,6E+6	2,7E+6
	30 cm	1,5E+2	5,1E+4	1,1E+6	5,7E+6	6,6E+2	2,5E+5	3,3E+6	7,3E+6
	40 cm	1,4E+2	4,5E+4	9,0E+5	4,8E+6	6,0E+2	2,2E+5	2,8E+6	1,1E+7
TX-EN-3CC	20 cm	7,1E+0	9,6E+3	4,3E+5	3,1E+6	4,2E+1	7,0E+4	1,7E+6	4,0E+6
	30 cm	5,4E+0	6,3E+3	2,8E+5	2,3E+6	3,1E+1	4,5E+4	1,1E+6	6,6E+6
	40 cm	4,9E+0	5,3E+3	2,2E+5	1,9E+6	2,7E+1	3,7E+4	9,0E+5	5,3E+6
TX-EN-5CC	20 cm	9,1E+1	2,8E+4	7,7E+5	5,0E+6	3,3E+2	1,4E+5	2,6E+6	6,0E+6
	30 cm	7,1E+1	1,9E+4	5,1E+5	3,4E+6	2,5E+2	9,7E+4	1,7E+6	8,2E+6
	40 cm	6,5E+1	1,6E+4	4,2E+5	2,8E+6	2,2E+2	8,1E+4	1,4E+6	6,7E+6

■ EB ■ FB

A camada de revestimento de concreto asfáltico com módulo de resiliência de 5533 MPa apresenta resultados estruturais pouco melhores aos comparados a uma mesma estrutura com base em Latossolo com cal e sub-base de BGS, mas com um revestimento de concreto asfáltico com módulo de 3032 MPa. Isso ocorre devido à tensão vertical no topo da camada de base, que leva ao esmagamento avançado da base, não ser muito dissipada pelas camadas de revestimento delgadas (5 cm).

Finalizando as análises da estrutura B, na tabela 10 são apresentados os resultados obtidos quando do emprego de misturas de latossolo e cal como base e sub-base de BGS.

Tabela 10: resultados das análises mecânicas da estrutura B, LV compactado na energia modificada.

Material	Espessura da base	Espessura do revestimento							
		CAP com MR de 3032 MPa				CAP com MR de 5533 MPa			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
LV-EM-3CD	20 cm	8,3E+5	1,9E+6	2,9E+6	4,0E+6	1,1E+6	2,2E+6	3,5E+6	4,9E+6
	30 cm	7,6E+5	6,1E+6	8,6E+6	1,1E+7	1,2E+6	7,2E+6	9,7E+6	1,2E+7
	40 cm	7,4E+5	5,8E+6	1,9E+7	2,5E+7	1,2E+6	1,0E+7	2,4E+7	2,7E+7
LV-EM-5CD	20 cm	1,1E+6	1,9E+6	3,0E+6	4,0E+6	1,2E+6	2,3E+6	3,6E+6	4,9E+6
	30 cm	1,5E+6	6,9E+6	8,9E+6	1,1E+7	2,2E+6	7,5E+6	9,9E+6	1,2E+7
	40 cm	1,5E+6	8,1E+6	2,3E+7	2,6E+7	2,1E+6	1,3E+7	2,4E+7	2,7E+7
LV-EM-3CC	20 cm	6,2E+5	1,4E+6	2,3E+6	3,3E+6	8,2E+5	1,7E+6	2,9E+6	4,1E+6
	30 cm	5,6E+5	4,4E+6	7,5E+6	9,3E+6	8,6E+5	6,2E+6	8,5E+6	1,1E+7
	40 cm	5,4E+5	4,1E+6	1,5E+7	2,3E+7	8,3E+5	7,6E+6	2,2E+7	2,5E+7
LV-EM-5CC	20 cm	1,6E+6	2,5E+6	3,6E+6	4,6E+6	1,7E+6	2,9E+6	4,1E+6	5,4E+6
	30 cm	4,5E+6	8,5E+6	1,0E+7	1,2E+7	5,6E+6	9,1E+6	1,1E+7	1,3E+7
	40 cm	4,4E+6	1,4E+7	2,6E+7	2,8E+7	5,4E+6	2,0E+7	2,7E+7	3,0E+7

■ EB ■ FB

Na tabela 10 percebe-se que os mecanismos de ruptura para as estruturas com base de latossolo tratado com cal e sub-base de BGS, dependem da espessura das camadas cimentadas e do revestimento. Sendo que para revestimentos de 5 cm de espessura, o mecanismo de ruptura crítico é o esmagamento da base. Já para revestimentos de 20 cm de espessura, o mecanismo crítico de falha é a fadiga da base.

As estruturas com revestimentos de concreto asfáltico, cujos módulos de resiliência são 3032 e 5533 MPa e que possuem o  $N_{AASHTO}$  indicado, apresentam comportamento estrutural semelhante. Assim, verifica-se que o aumento no módulo do revestimento não resulta em melhorias significativas.

É importante destacar que as análises mecânicas foram realizadas considerando um subleito genérico de 100 MPa.

#### 4. PRÉ-DIMENSIONAMENTO MECÂNICO DE PAVIMENTOS COM CAMADAS DE SOLO-CAL

Com o intuito de esclarecer sobre os efeitos da espessura e rigidez dos materiais empregados nas diferentes camadas de pavimento com base e/ou sub-bases de solo-cal, de modo a determinar seu desempenho estrutural, foram elaborados modelos e gráficos de contorno que relacionam as espessuras das camadas de solo-cal e seus módulos de elasticidade na flexão com seu  $N_{AASHTO}$ , o qual foi obtido a partir das análises mecânicas das estruturas iteradas. Os modelos e gráficos de contorno podem ser utilizados para perceber os efeitos que as diferentes camadas e materiais causam no desempenho estrutural de cada composição de pavimento. No entanto, os resultados apresentados por esses modelos matemáticos e gráficos devem ser interpretados apenas como referências para auxiliar na etapa de pré-dimensionamento.

Com o objetivo de simplificar a avaliação dos dados coletados, optou-se por realizar o arredondamento dos módulos das misturas de solo-cal para a centena mais próxima. Cumpre destacar que esse procedimento foi utilizado somente na fase de apresentação dos resultados, uma vez que, nas análises mecânicas, foram considerados os valores experimentais obtidos por Kleinert (2021), mencionados no item 2.1.

#### 4.1. ESTRUTURA A

Após as análises mecânicas executadas conforme o item 2.3 para todas as composições de pavimentos, foi possível observar que as camadas de solo-cal compactadas na energia normal resultam em condições estruturais significativamente menos favoráveis em comparação às camadas compactadas na energia modificada. Assim, é observado um aumento no  $N_{AASHTO}$  de até 5000 vezes para revestimentos em concreto asfáltico de 5 cm de espessura. Nota-se, que a diferença entre as energias de compactação é mitigada ao incrementar a espessura do revestimento, reduzindo a diferença no valor do  $N_{AASHTO}$  de 5000 para apenas 1,22 vezes.

Assim, ao empregar equações de regressão para estabelecer modelos matemáticos na estrutura A, foram utilizados somente os dados das análises mecânicas que consideram camadas de solo-cal compactadas com energia modificada. Essa limitação é aplicada com o objetivo de padronizar a amostra de dados coletados e apresentar resultados mais precisos.

Utilizando os materiais de concreto asfáltico descrito na tabela 2 de 3032 e 5533 MPa, e iterando a estrutura A conforme é explicitado no item 2.2, além de apenas considerar solos estabilizados por cal e compactados na energia modificada, foi possível alcançar um modelo de regressão que relaciona o MEF e as espessuras combinadas das camadas de base e sub-base com seu  $N_{AASHTO}$ .

##### 4.1.1. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 5 cm

O modelo (4.1), com  $R^2$  de 96%, e o modelo (4.2) de  $R^2$  igual a 95,4%, permitem estimar o  $N$  crítico a partir dos módulos de elasticidade na flexão, em MPa, das camadas de solo-cal e de suas espessuras, em cm. Vale ressaltar que os modelos são somente válidos para o intervalo de MEF de 800 a 4800 MPa e para espessuras combinadas de 40 a 60 cm. Também apenas para subleito de 100 MPa e revestimento de concreto asfáltico de 3032, para o modelo (4.1), e 5533 MPa, para o modelo (4.2), e 5 cm de espessura.

$$N_{AASHTO} = 0,4179 \times MEF \times MEF + 0,2531 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (4.1)$$

$$N_{AASHTO} = 727 \times MEF + 0,2859 \times MEF \times MEF + 0,2348 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (4.2)$$

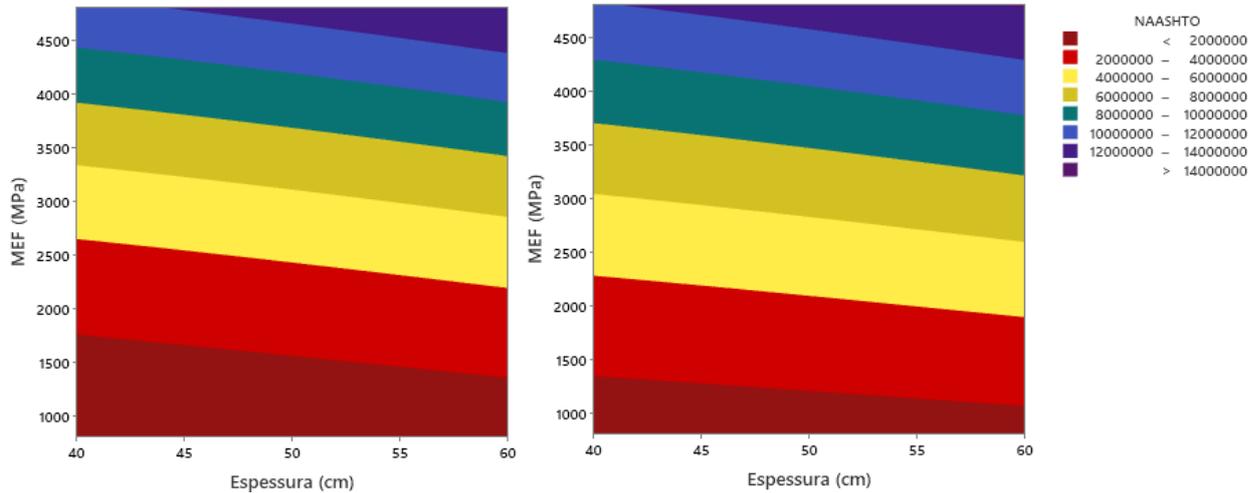


Figura 2: Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura combinada da base e sub-base de solo-cal para estimar o  $N_{AASHTO}$  (entre  $2 \times 10^6$  e  $1,4 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.1) e (4.2) respectivamente.

Os gráficos de contorno ilustram o fenômeno esperado para essas estruturas, pois para espessuras delgadas de revestimento (5 cm), a estrutura é suscetível à falha por esmagamento da base e possui baixa influência das espessuras das camadas de base e sub-base.

Ambas as estruturas se comportam de forma similar, porém as composições com revestimentos de módulos de 5533 MPa apresentam  $N_{AASHTO}$  maiores. Não obstante, um maior módulo de resiliência no revestimento influencia em uma maior rigidez, mesmo que não muito significativa, em relação ao esmagamento de base, falha essa que para revestimentos delgados de 5 cm ainda é predominante.

#### 4.1.2. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 10 cm

Similarmente às características descritas no item 4.1.1, porém com revestimento de concreto asfáltico de 10 cm de espessura, obteve-se os modelos (4.3) e (4.4), com  $R^2$  de 91% e 97,8% respectivamente, e os gráficos de contorno ilustrados na figura 3.

$$\begin{aligned}
 N_{AASHTO} = & 229795 \times \text{espessura} \\
 & - 3152 \times \text{espessura} \times \text{espessura} \\
 & + 0,9413 \times MEF \times \text{espessura} \times \text{espessura}
 \end{aligned}
 \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned}
 N_{AASHTO} = & 141260 \times \text{espessura} \\
 & - 0,1219 \times MEF \times MEF \\
 & + 0,867 \times MEF \times \text{espessura} \times \text{espessura}
 \end{aligned}
 \quad (4.4)$$

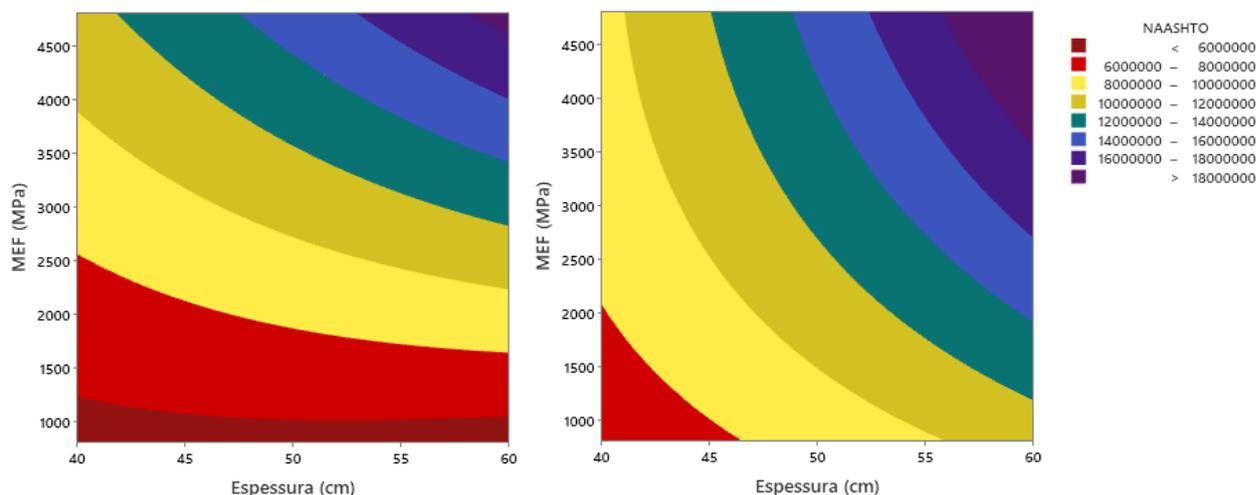


Figura 3: Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura combinada da base e sub-base de solo-cal para estimar o  $N_{AASHTO}$  (entre  $6 \times 10^6$  e  $1,8 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.3) e (4.4) respectivamente.

Com um acréscimo de apenas 5 cm na espessura do revestimento de concreto asfáltico, é possível verificar melhoras no comportamento estrutural dos pavimentos, expressado pelo  $N_{AASHTO}$ . Esse aumento no  $N$  crítico pode ser explicado por uma redução na tensão vertical que atinge o topo da camada de base, pois essa mesma tensão sofrerá uma maior mitigação por parte da camada de revestimento mais espessa. E como o mecanismo de falha predominante para as estruturas desse modelo ainda é o esmagamento de base, ao reduzir as tensões no topo da camada de base a estrutura suportará um maior número admissível de solicitações de eixos padrão antes da ruptura.

Também é possível perceber que o revestimento com módulo de 5533 MPa, apresenta comportamento estrutural superior.

#### 4.1.3. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 15 cm

Também para estruturas com base e sub-base com solo-cal estabilizados por energia modificada e com espessuras combinadas de 40 a 60 cm, módulo do subleito de 100 MPa e módulos de resiliência do revestimento de concreto asfáltico de 3032 e 5533 MPa, foram realizados os modelos (4.5) com  $R^2$  de 99,2% e o modelo (4.6) com  $R^2$  de 98,6%, e gráficos de contorno considerando uma espessura de 15 cm de revestimento.

$$N_{AASHTO} = 4047,6 \times \text{espessura} \times \text{espessura} + 0,4169 \times MEF \times \text{espessura} \times \text{espessura} \quad (4.5)$$

$$N_{AASHTO} = 184771 \times \text{espessura} - 0,349 \times MEF \times MEF + 1,085 \times MEF \times \text{espessura} \times \text{espessura} \quad (4.6)$$

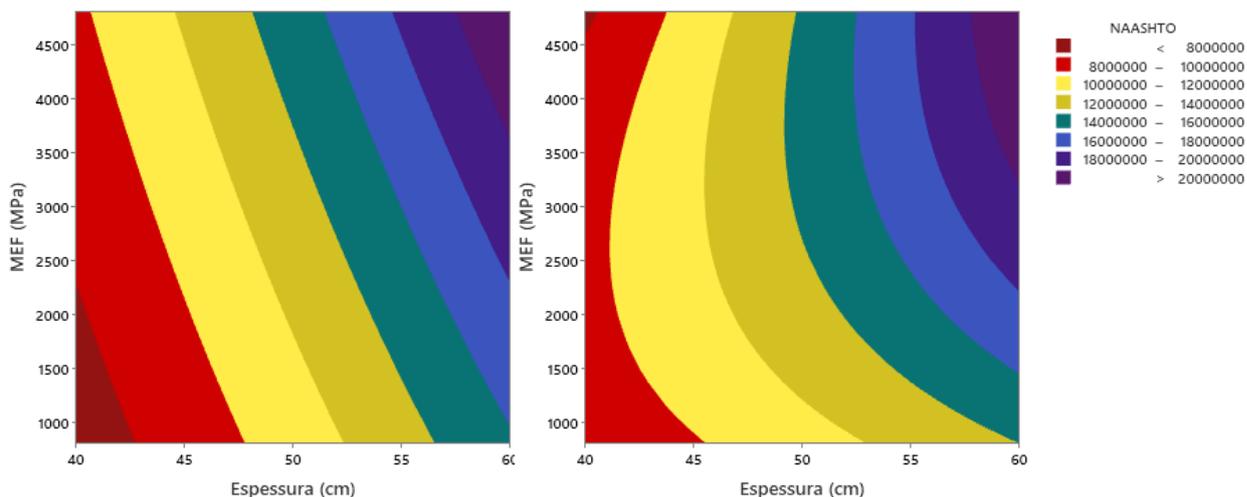


Figura 4: Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura combinada da base e sub-base de solo-cal para estimar o  $N_{AASHTO}$  (entre  $8 \times 10^6$  e  $2 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.5) e (4.6) respectivamente.

Com uma espessura de revestimento mais robusta, as variações das espessuras combinadas das camadas de base e sub-base apresentam-se mais relevantes à determinação do  $N_{AASHTO}$ . Fator que é observado também pelos métodos de falha, que agora são predominantemente a vida de fadiga da base e da sub-base, defeitos que podem ser minimizados por camadas mais espessas de base e da sub-base. Também, o maior módulo de resiliência do revestimento, resulta no aumento geral do  $N_{AASHTO}$  calculado.

#### 4.1.4. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 20 cm

De modo análogo ao item 4.1.2, porém considerando um revestimento de concreto asfáltico de 20 cm, obteve-se os modelos (4.7) e (4.8), os quais resultaram  $R^2$  de 99,2% e 98,6% respectivamente, e gráficos de contorno representados abaixo.

$$N_{AASHTO} = 44391,8 \times \text{espessura} \times \text{espessura} + 0,3443 \times MEF \times \text{espessura} \times \text{espessura} \quad (4.7)$$

$$N_{AASHTO} = 199970 \times \text{espessura} - 0,3443 \times MEF \times MEF + 1,019 \times MEF \times \text{espessura} \times \text{espessura} \quad (4.8)$$

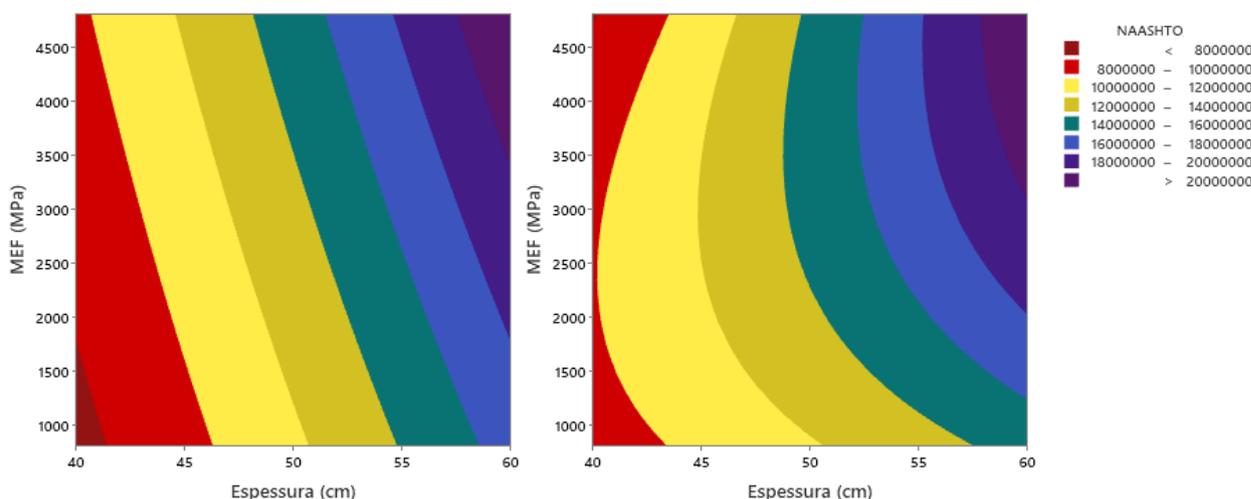


Figura 5: Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura combinada da base e sub-base de solo-cal para estimar o  $N_{AASHTO}$  (entre  $8 \times 10^6$  e  $2 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.7) e (4.8) respectivamente.

É possível observar uma grande semelhança entre os gráficos representados pelas figuras 4 e 5, a ocorrência disso pode ser atribuída aos métodos de falha das estruturas, os quais se mantêm semelhante mesmo com a adição de 5 cm ao revestimento de concreto asfáltico. As falhas devido a vida de fadiga da base ou sub-base pouco são influenciadas por pequenas variações na espessura do revestimento. Além disso, os modelos apresentam uma forte relação entre as espessuras combinadas de base e sub-base com o  $N_{AASHTO}$ , essa influência evidencia os mecanismos de ruptura de fadiga de base e fadiga de sub-base para maiores espessuras de revestimento de concreto asfáltico (20 cm). Também, o acréscimo no módulo do revestimento de CA proporciona melhoras no desempenho estrutural do pavimento, evidenciadas pelo  $N_{AASHTO}$ .

## 4.2. ESTRUTURA B

Para as composições de pavimentos representadas pela estrutura B, também foi realizada a análise mecânica como descrita no item 2.3. As composições analisadas foram iteradas de modo a variar o material e a espessura das camadas de revestimento e de base, como está explicitado no item 2.2.

Os modelos de regressão empregados para a estrutura B que retornaram coeficientes de significância superiores a 79% foram obtidos utilizando os dados das análises mecânicas considerando camadas de base de solo-cal compactadas na energia normal e modificada.

Vale ressaltar, que ao considerar as camadas de base em solo-cal também compactadas na energia normal, os modelos de regressão, em sua maior parte, resultaram em coeficientes de significância menores para revestimentos mais delgados (5 e 10).

Utilizando os materiais de concreto asfáltico com módulo de resiliência de 3032 e 5533 MPa para a camada de revestimento e BGS como sub-base, descritos na tabela 2, e iterando a estrutura B, conforme é explicitado no item 2.2, além de apenas considerar bases em solos estabilizados com cal e compactados na energia normal e modificada, foi possível atingir modelos de regressão relevantes, que relacionam o MEF e a espessura da camada e o  $N_{AASHTO}$  do pavimento.

### 4.2.1. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 5 cm

Os modelos (4.9) e (4.10), com  $R^2$  de 87,8% e 87,2%, permitem estimar o N crítico a partir dos módulos de elasticidade na flexão, em MPa, das camadas de solo-cal e de suas espessuras, em cm. Vale ressaltar que esse modelo é válido somente para o intervalo de MEF de 300 a 4800 MPa e espessuras de base de solo-cal de 20 a 40 cm. Além disso, é válido apenas para um subleito de módulo igual a 100 MPa.

$$N_{AASHTO} = 0,3268 \times MEF \times MEF - 720 \times espessura \times espessura + 0,909 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (4.9)$$

$$N_{AASHTO} = +45,28 \times MEF + 21,83 \times MEF \times MEF + 166,65 \times espessura \times espessura + 141,95 \times espessura \times espessura \times espessura + 10,13 \times MEF \times espessura \times espessura \times espessura \quad (4.10)$$

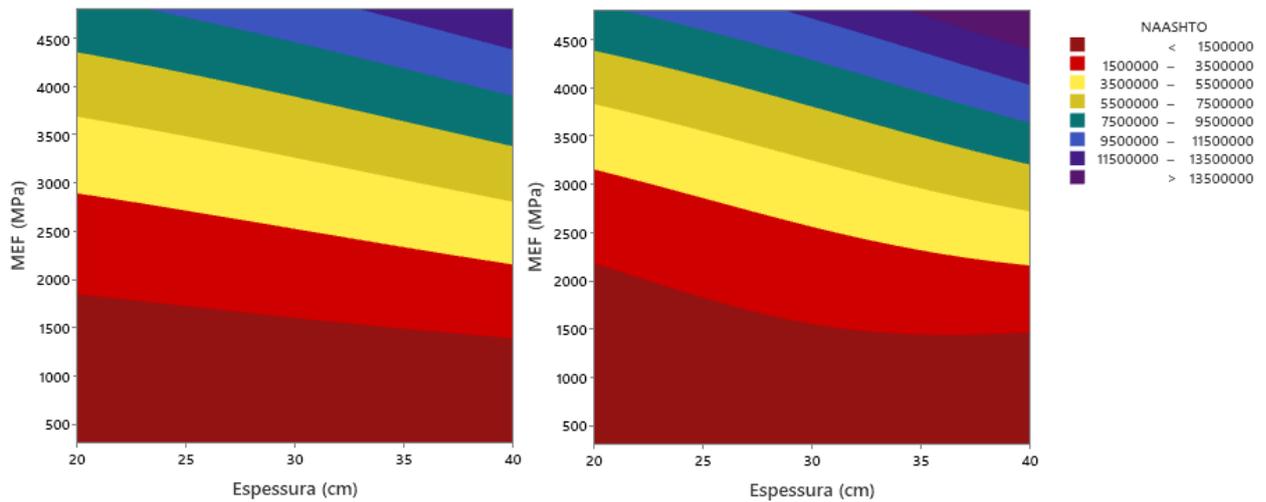


Figura 6: Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura da base de solo-cal para estimar o  $N_{AASHTO}$  (entre  $1,5 \times 10^6$  e  $1,35 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.9) e (4.10) respectivamente.

Na figura 6, é possível perceber um baixo impacto das espessuras de base no  $N_{AASHTO}$ , indicando que o método de falha predominante do pavimento é o esmagamento da base. Que mesmo tendo seu efeito um pouco reduzido devido a maior rigidez do revestimento de CA com módulo de 5533 MPa no lugar do CA com módulo de 3032 MPa, a pequena espessura de 5 cm de revestimento não se mostra como suficiente para minimizar os efeitos do esmagamento de base.

#### 4.2.2. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 10 cm

Similarmente às características descritas no item anterior, porém com revestimento de concreto asfáltico de 10 cm de espessura, obteve-se os modelos (4.11) com  $R^2$  de 81% e (4.12) com  $R^2$  79,1%, e os gráficos de contorno ilustrados na figura 7.

$$N_{AASHTO} = 0,2133 \times MEF \times MEF + 2,398 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (4.11)$$

$$N_{AASHTO} = 0,2485 \times MEF \times MEF + 0,08402 \times MEF \times espessura \times espessura \times espessura \quad (4.12)$$

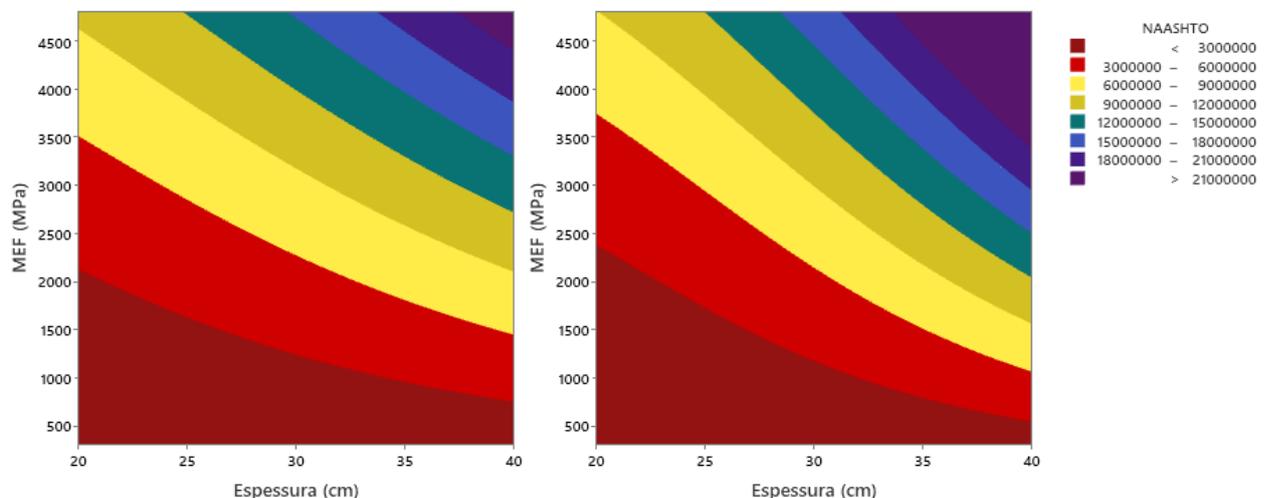


Figura 7: Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura da base de solo-cal para estimar o  $N_{AASHTO}$  (entre  $3 \times 10^6$  e  $2,1 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.11) e (4.12) respectivamente.

Os gráficos de contorno representados pela figura 7, evidenciam uma crescente dependência da espessura da base pra a determinação do  $N_{AASHTO}$ . No entanto, o esmagamento da base ainda é

o mecanismo de ruptura predominante para a estrutura B com revestimento em CA com 10 cm de espessura e 3032 ou 5533 MPa de módulo de resiliência.

#### 4.2.3. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 15 cm

Também para estruturas com base com solo-cal e com espessuras de 20 a 40 cm, módulo do subleito de 100 MPa e módulo de resiliência do revestimento de concreto asfáltico de 3032 ou 5533 MPa, foram realizados os modelos (4.13) e (4.14) com  $R^2$  de 82,7% e  $R^2$  de 86,4% respectivamente, e gráficos de contorno considerando uma espessura de 15 cm de revestimento.

$$N_{AASHTO} = -0,01054 \times MEF \times MEF \times espessura + 5,84 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (4.13)$$

$$N_{AASHTO} = +10,53 \times MEF - 0,711 \times MEF \times MEF + 0,1264 \times MEF \times espessura \times espessura \times espessura \quad (4.14)$$

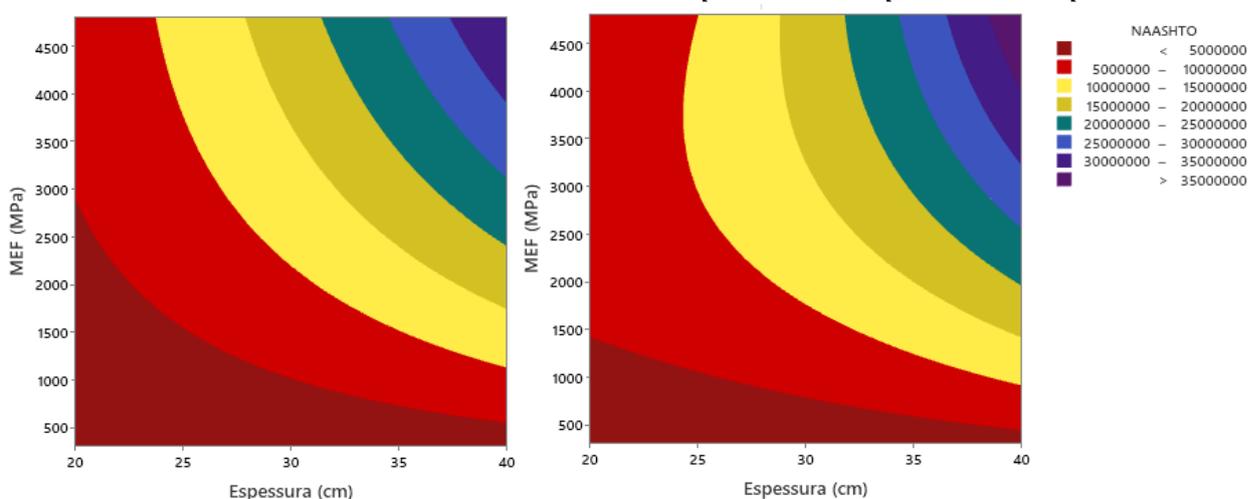


Figura 8: Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura da base de solo-cal para estimar o  $N_{AASHTO}$  (entre  $5 \times 10^6$  e  $3,5 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.13) e (4.14) respectivamente.

Com uma espessura de revestimento mais robusta, as variações da espessura da camada de base apresentam-se mais relevante à determinação do  $N_{AASHTO}$ . Fator que é observado também pelos métodos de falha, que agora é predominantemente a vida de fadiga da base, defeito que pode ser minimizado por uma camada cimentada mais rígida.

#### 4.2.4. REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE 20 cm

De modo análogo ao item (4.2.3), porém considerando um revestimento de concreto asfáltico de 20 cm, obteve-se os modelos (4.15) e (4.16), os quais resultaram em  $R^2$  de 99,68% e 95,1% respectivamente, e gráficos de contorno representados abaixo.

$$N_{AASHTO} = 0,654 \times MEF \times MEF - 0,05755 \times MEF \times MEF \times espessura + 9,664 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (4.15)$$

$$N_{AASHTO} = +1506 \times MEF - 0,633 \times MEF \times MEF + 5910 \times espessura \times espessura + 4,891 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (4.16)$$

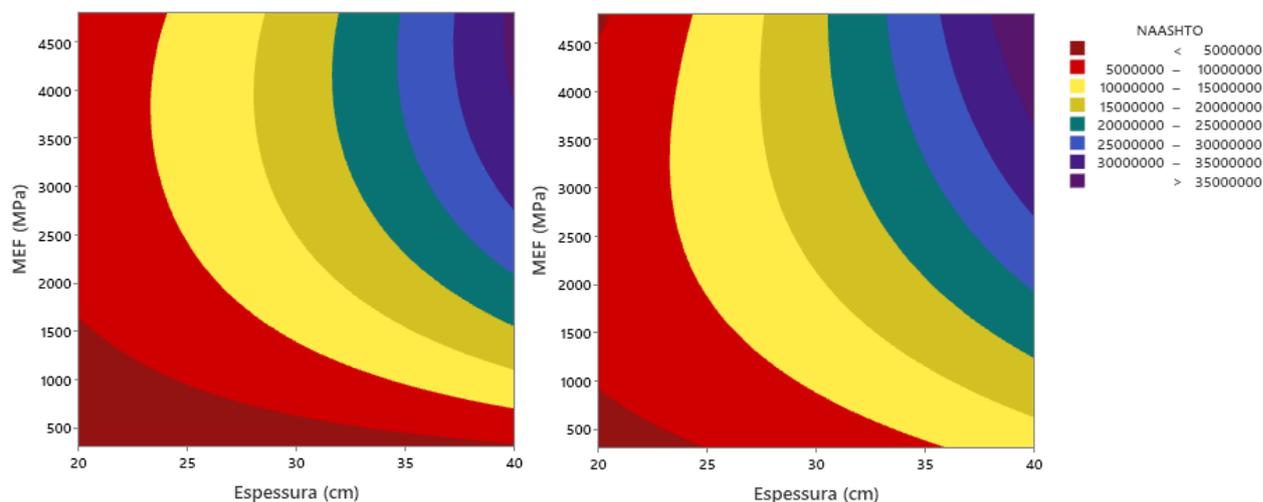


Figura 9: Gráficos de contorno entre o MEF e a espessura da base de solo-cal para estimar o  $N_{AASHTO}$  (entre  $5 \times 10^6$  e  $3,5 \times 10^7$ ) referentes aos modelos (4.15) e (4.16) respectivamente.

É possível observar uma grande semelhança entre os gráficos representados pelas figuras 8 e 9, a ocorrência disso pode ser atribuída aos métodos de falha das estruturas, os quais se mantêm semelhantes mesmo com a adição de 5 cm ao revestimento de concreto asfáltico. No entanto, é possível perceber um aumento mais significativo no  $N_{AASHTO}$  para MEF e espessuras menores. Além de uma maior relação entre o  $N$  crítico e a espessura da base.

Também, os modelos apresentam uma forte relação entre as espessuras de base com o  $N_{AASHTO}$  para solo-cal com MEF mais elevados, essa influência evidencia os métodos de falha de fadiga de base para maiores módulos de elasticidade na flexão e espessuras de revestimento de concreto asfáltico (20 cm).

De forma similar à estrutura A, é possível observar que ao elevar o módulo de resiliência do revestimento de concreto asfáltico das iterações da estrutura B, há um aumento no desempenho estrutural dos pavimentos. No entanto, os métodos de falha dos pavimentos se mantêm, na sua maior parte, semelhantes. De forma que é possível, em um pré-dimensionamento, deduzir o método de falha e o  $N_{AASHTO}$  para as estruturas estudadas.

## 5. CONCLUSÃO

Com base nas análises realizadas, conclui-se que as espessuras dos materiais de solo-cal não apresentam influência na capacidade estrutural dos pavimentos revestidos por concreto asfáltico delgado (5 cm). No entanto, para revestimentos de até 20 cm, há um ganho progressivo no desempenho estrutural do pavimento, quando aumentadas as camadas cimentadas. Constatou-se que o teor e o tipo de cal utilizados influenciam significativamente no desempenho da camada de solo-cal, com teores de 5% e cal calcítica apresentando os melhores resultados de  $N_{AASHTO}$  dos pavimentos. Além disso, materiais de solo-cal compactados na energia modificada apresentaram desempenhos superiores aos compactados na energia normal.

Observou-se que a espessura das camadas de revestimento de concreto asfáltico tem impacto significativo na capacidade estrutural dos pavimentos. Estruturas com 5 cm de revestimento asfáltico que sofrem ruptura por esmagamento de base por um número baixo de eixos padrão, muitas vezes podem ser viabilizadas com um acréscimo de 5 a 10 cm na espessura do revestimento. Além disso, o módulo de resiliência dos revestimentos de concreto também influencia na capacidade estrutural dos pavimentos, de modo a amenizar os efeitos da tensão vertical ao topo da base, aumentando assim o desempenho do pavimento em relação à ruptura por esmagamento de base.

Os pavimentos com camadas de sub-bases compostas por BGS apresentaram uma capacidade estrutural ligeiramente superior em muitos casos, e os mecanismos de ruptura da estrutura são a fadiga e o esmagamento da base. Desse modo, espessuras maiores de base de solo-cal podem resultar em um melhor desempenho. No entanto, em casos em que o método de falha é fadiga da base ou sub-base, a diferença de módulo de resiliência do revestimento não se mostra tão influente quanto os materiais das demais camadas e suas espessuras.

Portanto, a escolha do tipo e teor de cal utilizado na mistura de solo-cal, a espessura das camadas de revestimento de concreto asfáltico e das camadas de sub-base devem ser criteriosamente avaliadas para garantir o desempenho estrutural adequado do pavimento. A combinação de diferentes materiais e espessuras pode resultar em pavimentos mais resistentes e duráveis, evitando a ruptura prematura e reduzindo os custos de manutenção a longo prazo.

## REFERÊNCIAS

ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres) – **Determinação do módulo de resiliência, módulo dinâmico e *flow number* de misturas asfálticas com diversos ligantes asfálticos e faixas granulométricas**, [S.I], 2018.

AZEVEDO, A. L. C., OLIVEIRA, A. JR., PEDROSA, R. A. E RAMALHO, R. W. **Estabilização de solos com adição de cal**. 1998. Dissertação (Pós-Graduação). Belo Horizonte.

CRISTELO, Nuno Miguel Cordeiro. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade do Minho. 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 422-ES: Pavimentação – Solo-Cal – Adição de cal para Melhoria de Subleito Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro, 2019f.

FERRI, Santi. **Contribuições ao estudo do comportamento mecânico de solos de subleito para fins de projeto de pavimentos asfálticos**. 2018. Tese (Doutorado Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

GODOI, L. C. **Aplicação do ensaio de flexão em amostra semicircular para avaliação de trincamento de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 143 p., 2017.

Kleinert, T. R. **Estabilização de solos tropicais com cal e impactos no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

MALYSZ, R. **Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 350 p., 2009.

SOUTH AFRICAN NATIONAL ROADS AGENCY LIMITED. **South African Pavement Engineering Manual - Chapter 10: Pavement Design**. 2 ed.ed. Pretoria, 2014.

SILVA, Hiury Torquato da. **Modelos de previsão de módulo de resiliência de solos**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022.