

19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR)

48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

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

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Henrique Fiuza Froener¹; Thaís Radünz Kleinert¹; Washington Peres Núñez¹; Bruna Calabria Diniz¹ & William Fedrigo¹

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da espessura e da rigidez dos materiais na capacidade estrutural de um pavimento com base e sub-base de solo-cal. Foram estudadas 4 espessuras de revestimento asfáltico (5, 10, 15 e 20 cm), bem como 2 materiais com rigidez distintas. Para as misturas de solo-cal, foram utilizados resultados de dois solos estabilizados com 3 e 5% das cales calcítica e dolomítica, trabalhando-se com ampla variação de espessuras. Foram realizadas análises mecanísticas para a determinação das tensões e deformações e aplicados os modelos do Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico da África do Sul para a determinação do N_{AASHTO} para os diferentes mecanismos de ruptura considerados. 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. Verificou-se melhoria na capacidade estrutural do pavimento, quando empregadas as misturas com 5% de cal calcítica, em comparação com as misturas de 3% de cal calcítica, e 3 e 5% de cal dolomítica.

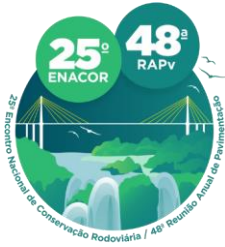
PALAVRAS-CHAVE: solo-cal; pré-dimensionamento de pavimentos; dimensionamento mecanístico-empírico; camadas de cimentadas.

ABSTRACT

This paper aims to evaluate the effect of thickness and stiffness of materials on the structural capacity of a pavement with lime-soil base and subbase. Four thicknesses of asphalt coating (5, 10, 15, and 20 cm) were studied, as well as two materials with different stiffness. For the lime-treated soil mixtures, results from two soils stabilized with 3% and 5% of calcitic and dolomitic lime were used, considering a wide range of thickness variations. Mechanistic analyses were performed to determine stresses and strains, and the models from the South African Mechanistic-Empirical Design Method were applied to determine the N_{AASHTO} for the different failure mechanisms considered. Regression models and contour plots were generated from the results to contribute to the pre-design of pavement structures with lime-treated soil layers. A significant increase in structural capacity was observed when asphalt concrete coatings with thicknesses exceeding 10 cm were applied. It was also found that lime-treated soil mixtures with 5% of calcitic lime, compared to similar pavement structures with lime-treated soil layers containing 3% of calcitic lime or 3% and 5% of dolomitic lime, characterized pavements with better structural capacities when applied to the base and subbase layers.

KEY WORDS: soil-lime; pavement pre-design; mechanistic-empirical design; cemented layers.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e-mail: henriquefroener@hotmail.com; thais.kleinert@ufrgs.br; washington.nunez@ufrgs.br; bruna.diniz@ufrgs.br; william.fedrigo@ufrgs.br



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento das estradas e o aumento do volume de tráfego, torna-se necessário que as estruturas sejam capazes de suportar os esforços solicitantes cada vez maiores (PINTO et al., 2010). Ao construir novos pavimentos, as características do solo e de materiais do local devem ser consideradas, sendo necessária a incorporação de materiais resistentes e duráveis 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).

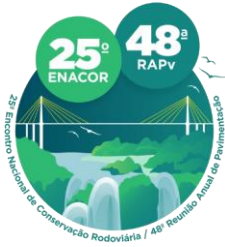
Um bom dimensionamento do pavimento é essencial para prolongar sua vida útil e assegurar viabilidade econômica, atendendo ao tráfego de projeto de forma a minimizar o número e o impacto das manutenções, além de evitar o superdimensionamento. A inclusão de camadas cimentadas em pavimentos asfálticos pode aumentar consideravelmente a capacidade de suporte do pavimento, em função da maior durabilidade do material e do aumento da resistência à fadiga do revestimento asfáltico.

Os solos brasileiros são predominantemente argilosos em muitas regiões, de modo que a cal é o agente estabilizador indicado para tal, uma vez que ela reage com a sílica e a alumina do solo, formando produtos cimentantes. Nacionalmente, a técnica de solo-cal deve ser aplicada com base nas características exigidas pelo projeto e do solo aplicado, conforme Especificação de Serviço 422 (DNIT, 2019). Embora se trate de uma técnica milenar, as especificações nacionais ainda são recentes, gerando dúvidas acerca do comportamento do material, principalmente no âmbito dos parâmetros de dimensionamento. Portanto, este estudo avalia a influência da rigidez das espessuras das camadas de base e de sub-base de solo-cal na capacidade estrutural do pavimento. Como ferramenta de pré-dimensionamento de pavimentos com camadas de solo-cal, busca-se apresentar modelos de regressão e gráficos de contorno que relacionem as características mecânicas e espessuras com o volume de tráfego, caracterizado por um número N_{AASHTO} .

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 os materiais e definida a estrutura do pavimento a ser analisada. 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* (SANRAL). 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. Destaca-se que o N obtido por meio dos modelos da África do Sul baseia-se nos fatores de equivalência de carga da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

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).



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Materiais

Para compor as camadas de solo-cal foram selecionados dois solos tropicais estudados por Kleinert (2021), sendo esses estabilizados com cal calcítica (CaO disponível de 73%) e dolomítica (CaO disponível de 45%). Os solos foram classificados pedologicamente como Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) e Latossolo Vermelho (LV), sendo que as informações acerca de suas classificações são apresentadas na Tabela 1. Destaca-se que a caracterização completa pode ser encontrada em Kleinert (2021).

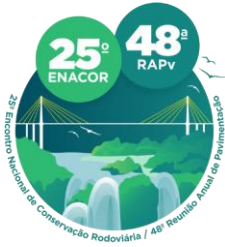
Tabela 1. Dados acerca das classificações dos solos (KLEINERT, 2021)

Solo	Classificações		
Argissolo (PVA)	Granulométrica	Areia Siltosa	
	Metodologia MCT	Solo siltoso não laterítico [NS']	
	Consistência	Plasticidade média	
	IP (%)	LP (%)	LL (%)
	17	30	47
	AASHTO	Solo argiloso [A-7-5(7)]	
	SUCS	Silte arenoso [ML]	
Latossolo (LV)	Granulométrica	Argila Siltosa	
	Metodologia MCT	Solo argiloso não laterítico [NG']	
	Consistência	Plasticidade alta	
	IP (%)	LP (%)	LL (%)
	28	41	69
	AASHTO	Solo argiloso [A-7-5(35)]	
	SUCS	Silte de alta compressibilidade [MH]	

As amostras de solo-cal foram compactadas na energia modificada (EM), sendo empregados dois teores de cal (3 e 5%), além dos tipos distintos de cal utilizados: cal calcítica (CC) e cal dolomítica (CD). Foram analisadas um total de 8 misturas de solo-cal (2 solos, 2 teores de cal e 2 tipos de cal), a fim de verificar os efeitos da variação desses parâmetros nas propriedades do pavimento. As misturas de solo-cal consideradas foram as estudadas por Kleinert (2021), que possuem suas características de massa específica (ρ), MEF, resistência à compressão simples a 28 dias ($RCS_{28\text{dias}}$), deformação na ruptura ($\epsilon_{\text{ruptura}}$) e coeficiente de Poisson (μ) listadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características das misturas de solo-cal estudadas (KLEINERT, 2021)

Emprego	Material	Massa específica (g/cm ³)	Módulo linear (MPa)	RCS _{28dias} (MPa)	$\epsilon_{\text{ruptura}}$ (microstrain)
Base ou sub-base cimentada	PVA-EM-3CD	2,13	2017	1,84	209
	PVA-EM-5CD	2,11	2913	2,22	200
	PVA-EM-3CC	2,11	3772	2,93	207
	PVA-EM-5CC	2,09	4840	3,40	213
	LV-EM-3CD	2,02	823	1,36	221
	LV-EM-5CD	2,01	969	1,59	210
	LV-EM-3CC	2,00	1047	1,32	174
	LV-EM-5CC	1,98	1499	2,17	196



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Inicialmente, também foram verificados materiais de solo-cal compactados na energia normal, porém esses resultaram em pavimentos com N_{AASHTO} baixos, em decorrência das pequenas resistências, ocasionando o esmagamento precoce da base cimentada. Desse modo, foram considerados apenas os materiais de solo-cal compactados na energia modificada, conforme já apresentados na Tabela 2.

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 concretos asfálticos para a camada de revestimento, com valores de módulo de resiliência (MR) de 3032 MPa e 5533 MPa, estudados por Godoi (2017) e ANTT (2018), respectivamente. O objetivo desta escolha foi verificar o comportamento do pavimento variando a rigidez do concreto asfáltico. As características requeridas para as análises mecânicas desses materiais são apresentadas na Tabela 2. Os coeficientes de Poisson são sugeridos pelo *software* AEMC, sendo iguais a 0,2 para solo-cal, 0,3 para CA e 0,4 para subleito.

Tabela 3. Características dos demais materiais utilizados nas análises mecânicas

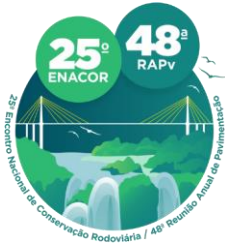
Emprego	Material	Massa específica (g/cm ³)	Módulo linear (MPa)
Revestimento	CA CAP 50/70*	2,41	3032
	CA CAP 50/70**	2,37	5533
Subleito	SL100	1,97	100

*Godoy (2017)

**ANTT (2018)

Estrutura

A estrutura estudada está apresentada na Figura 1, em que o revestimento é de concreto asfáltico e a as camadas de base e de sub-base de solo-cal. Para o concreto asfáltico, foram consideradas as espessuras de 5, 10, 15 e 20 cm. A base e a sub-base variaram entre 20 e 30 cm, sendo analisadas em incrementos de 2 cm. Quando as espessuras da base e da sub-base diferiam, a maior espessura foi atribuída à camada de sub-base. 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.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

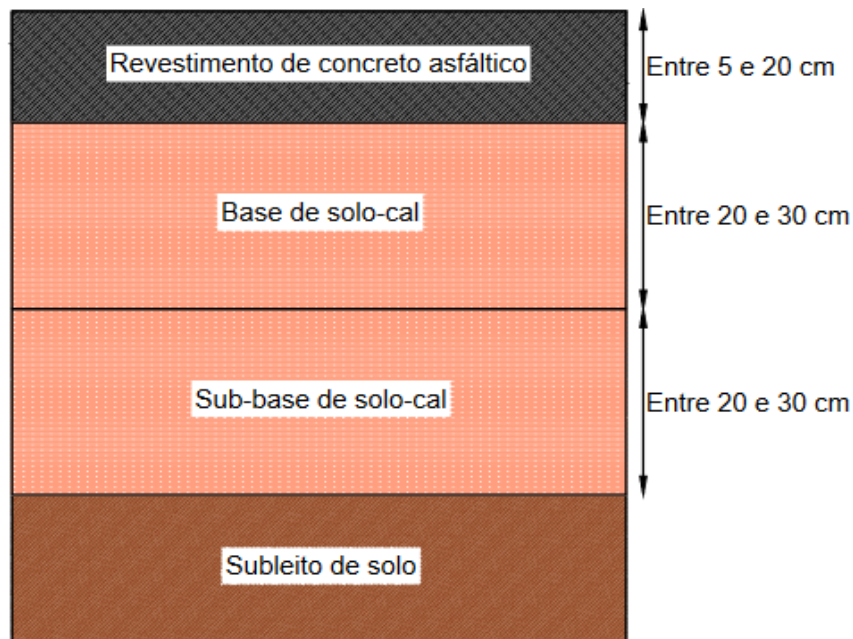
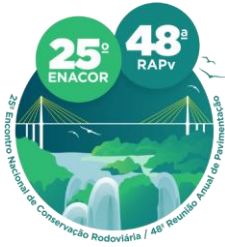


Figura 1. Estrutura considerada nas análises mecánísticas

Destaca-se que para cada estrutura, foram considerados os dois tipos de materiais de concreto asfáltico (Tabela 3) e oito misturas de solo-cal (Tabela 2), considerando as diferentes espessuras de revestimento, base e sub-base. Desta forma, resultou em 704 análises mecánísticas realizadas. 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.

Análises Mecánísticas

Para as análises mecánísticas das estruturas estudadas, foram utilizados os modelos de previsão propostos pelo SAMDM, que retornam valores de N_{AASHTO} . A fim de aplicar o modelo, foi necessário coletar dados pelo *software* AEMC. Esses correspondem às tensões verticais de compressão no topo das camadas cimentadas; às deformações horizontais de tração na fibra inferior das camadas cimentadas e asfálticas; e às deformações verticais de compressão no topo da camada do subleito. Os modelos também empregam índices que variam em função da categoria da rodovia, além de sugerir propriedades de materiais usualmente utilizados. Essas propriedades sugeridas não foram empregadas, tendo em vista que foi possível obter as características reais dos materiais. O nível de confiabilidade 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} . Dessa forma, foram analisados os métodos de ruptura: vida efetiva de fadiga (revestimento), esmagamento avançado das camadas cimentadas (base e sub-base), e a deformação permanente do subleito.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



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, é preciso adicionar o número de solicitações que o pavimento deve suportar a partir desse ponto (*South African Pavement Engineering Manual*, 2014). No entanto, como não há informações disponíveis sobre o comportamento granular das misturas de solo-cal estudadas nesta pesquisa, o valor da vida efetiva de fadiga 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.

RESULTADOS DAS ANÁLISES MECANÍSTICAS

Determinado o N crítico, a partir das análises mecánísticas das diversas interações das composições da estrutura analisada, foi possível elaborar gráficos a fim de observar os efeitos dos fatores controláveis estudados na vida útil dos pavimentos. Os quatro gráficos apresentados nas Figuras 2, 3, 4 e 5 demonstram, cada um, oito iterações da estrutura analisada. Distintos pelo módulo de resiliência do revestimento de concreto asfáltico de 3032 MPa ou 5533 MPa, e pelo material da base e sub-base, de argissolo vermelho amarelo (PVA) ou latossolo vermelho (LV), descritos na Tabela 2. Além disso, são destacados o somatório das espessuras da base e sub-base de 40 ou 60 cm, e a espessura do revestimento de concreto asfáltico, de 5, 10, 15 ou 20 cm.

As Figuras 2 e 3 apresentam os valores de N_{AASHTO} calculados considerando revestimento de concreto asfáltico com módulos de resiliência de 3032 MPa e 5533 MPa, respectivamente. Nessas, as camadas de base e sub-base são em argissolo estabilizado com duas cales (dolomítica e calcítica), nos teores de 3 e 5%, com espessuras combinadas de 40 e 60 cm.

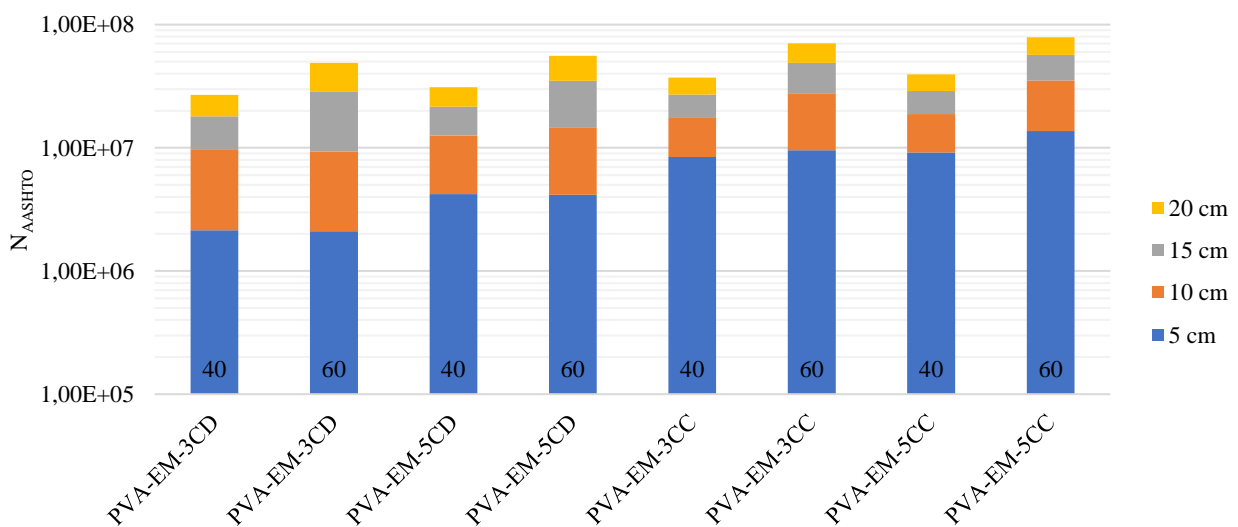
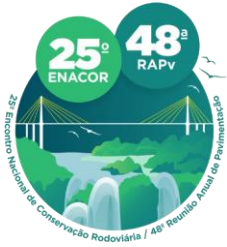


Figura 2. Resultados das análises mecánísticas com revestimento de concreto asfáltico de módulo igual a 3032 MPa com espessuras de 5, 10, 15 e 20 cm, base e sub-base em argissolo com espessuras combinadas de 40 e 60 cm



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br

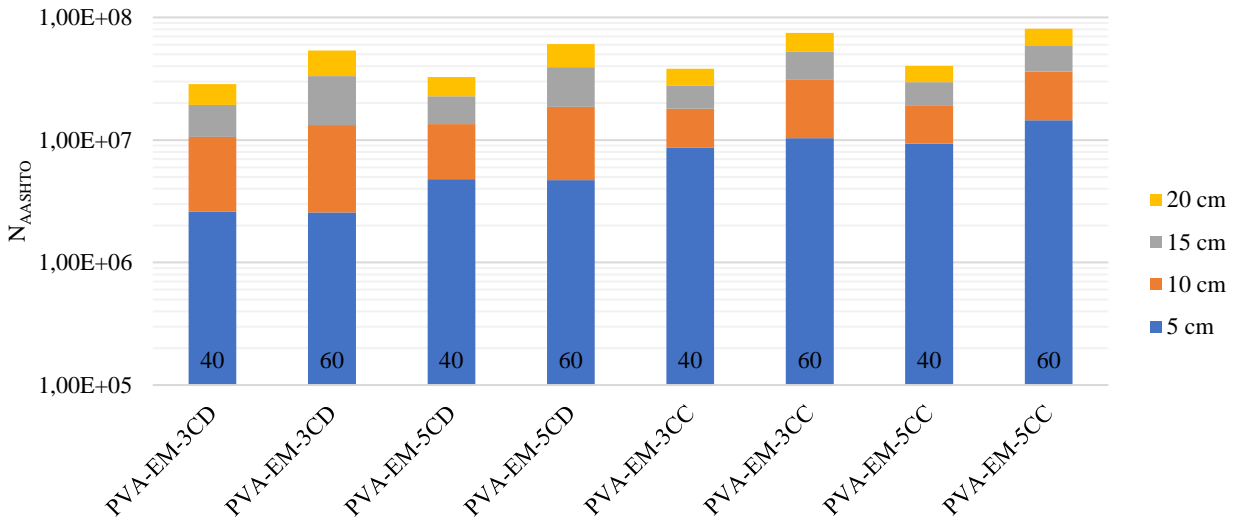


Figura 3. Resultados das análises mecânicas com revestimento de concreto asfáltico de módulo igual a 5533 MPa com espessuras de 5, 10, 15 e 20 cm, base e sub-base em argissolo com espessuras combinadas de 40 e 60 cm

A partir dos resultados das Figuras 2 e 3, observa-se que ao aumentar a espessura combinada das camadas de base e sub-base, há um ganho significativo apenas para estruturas com revestimentos de concreto asfáltico mais robustos (15 e 20 cm). No caso de revestimentos mais delgados (5 e 10 cm), o aumento das espessuras das camadas cimentadas não apresenta melhoria significativa na vida útil do pavimento. Visto que, de acordo com os resultados das análises mecânicas, o método de ruptura predominante para os pavimentos com revestimentos delgados é o esmagamento avançado da base, que depende da tensão vertical no topo da base. Ruptura que é adiada principalmente por revestimentos mais espessos (15 e 20 cm) e de módulo de resiliência mais elevados. Além disso, observa-se que o incremento de 5 para 10 cm de revestimento de concreto asfáltico apresenta melhorias significativas no desempenho do pavimento.

As Figuras 4 e 5, de forma análoga às Figuras 2 e 3, apresentam o N_{AASHTO}, porém com a base e sub-base em latossolo estabilizado com cal.

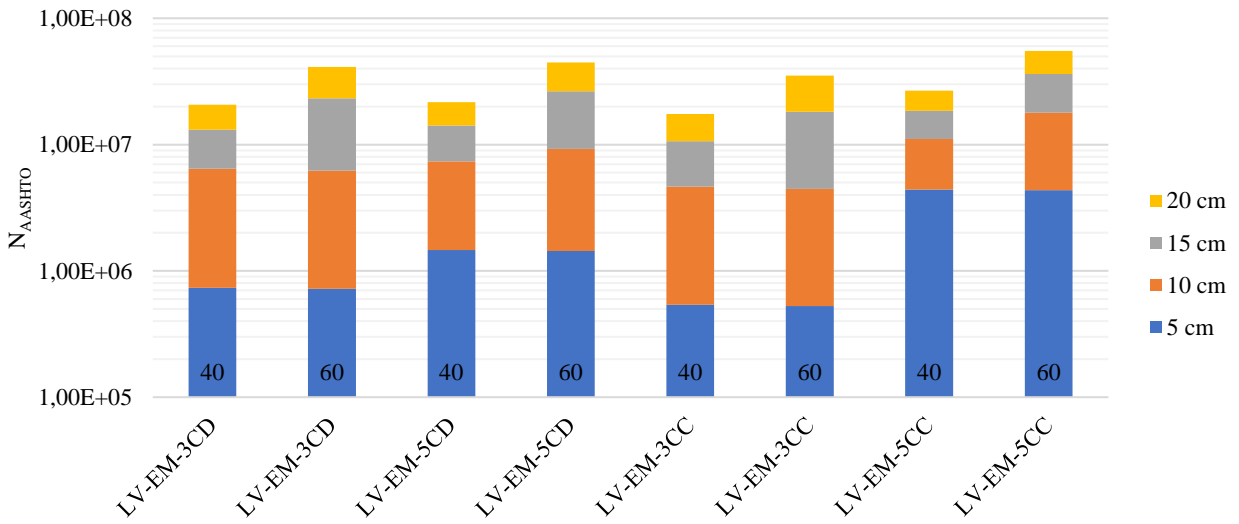
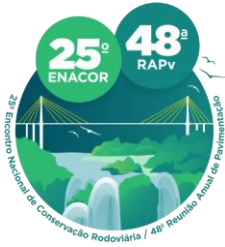


Figura 4. Resultados das análises mecânicas com revestimento de concreto asfáltico de módulo igual a 3032 MPa com espessuras de 5, 10, 15 e 20 cm, base e sub-base em latossolo com espessuras combinadas de 40 e 60 cm



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

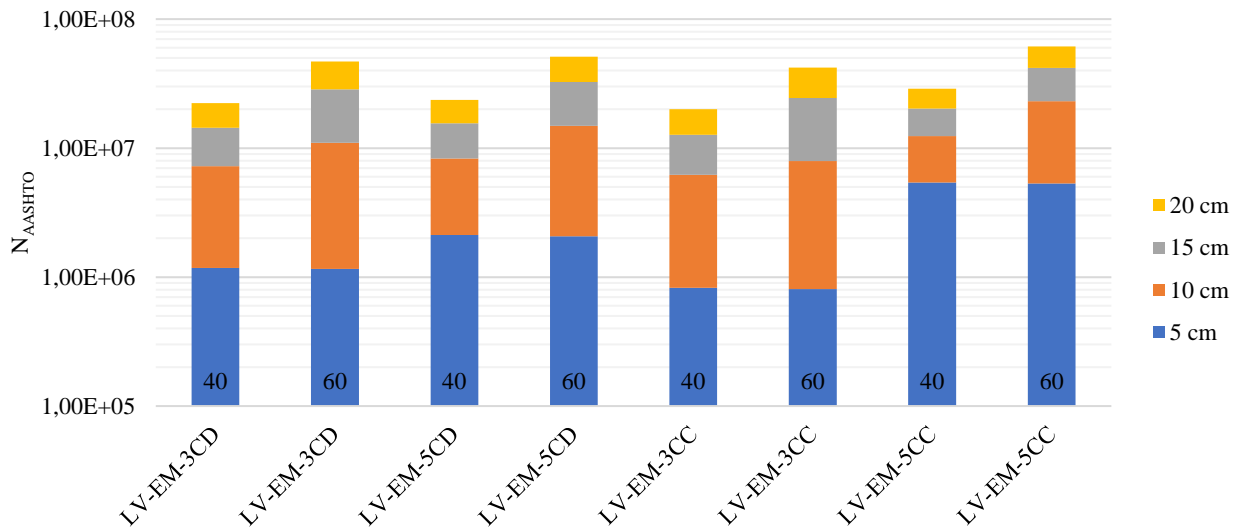


Figura 5. Resultados das análises mecânicas com revestimento de concreto asfáltico de módulo igual a 5533 MPa com espessuras de 5, 10, 15 e 20 cm, base e sub-base em latossolo com espessuras combinadas de 40 e 60 cm

O comportamento das estruturas com base e sub-base em latossolo são similares às formadas por argissolo, porém com N_{AASHTO} inferiores. O aumento das espessuras combinadas da base e sub-base tornam-se relevantes apenas com revestimentos mais espessos (15 e 20 cm) devido ao esmagamento avançado da base.

As estruturas formadas por camadas de base e sub-base em argissolo apresentam maiores valores de N_{AASHTO} do que às em latossolo. Tal resultado que é esperado, uma vez que os valores de módulo de elasticidade na flexão e de resistência à compressão simples das misturas com argissolo são superiores, como pode ser observado na Tabela 2.

Ao comparar os impactos de revestimentos de concreto asfáltico com módulos de resiliência de 3032 MPa e 5533 MPa, em estruturas similares, pode-se constatar que não há um ganho significativo na capacidade estrutural. Porém, os métodos de ruptura referentes à fadiga da base e sub-base, apresentam-se mais críticos 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.

PRÉ-DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO DE PAVIMENTOS COM CAMADAS DE SOLO-CAL

Com o intuito de esclarecer os efeitos da espessura e rigidez dos materiais empregados nas diferentes camadas de pavimento, foram elaborados modelos e gráficos de contorno que relacionam as espessuras combinadas das camadas de solo-cal e seus módulos de elasticidade na flexão (MEF) com seu N_{AASHTO} , que foi obtido a partir das análises mecânicas. Os modelos e gráficos de contorno podem ser utilizados para identificar 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 de pavimentos com camadas em solo-cal.

Com o objetivo de simplificar a avaliação dos dados coletados, optou-se por realizar o



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



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 na Tabela 2.

Foram elaboradas oito equações de regressão que relacionam as espessuras e o MEF das camadas compostas por solo-cal, englobando os materiais de argissolo e latossolo.

As equações de regressão de (1) a (4) foram elaboradas para revestimentos com módulo de 3032 MPa e espessuras de 5, 10, 15 e 20 cm respectivamente. Já as equações de regressão de (5) a (8), englobam revestimentos de concreto asfáltico com módulo de resiliência igual a 5533 MPa e espessuras de 5, 10, 15 e 20 cm respectivamente.

$$N_{AASHTO} = 0,4179 \times MEF \times MEF + 0,2531 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (1)$$

$$N_{AASHTO} = 229795 \times espessura - 3152 \times espessura \times espessura + 0,9413 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (2)$$

$$N_{AASHTO} = 4047,6 \times espessura \times espessura + 0,4169 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (3)$$

$$N_{AASHTO} = 44391,8 \times espessura \times espessura + 0,3443 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (4)$$

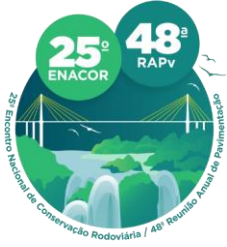
$$N_{AASHTO} = 727 \times MEF + 0,2859 \times MEF \times MEF + 0,2348 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (5)$$

$$N_{AASHTO} = 141260 \times espessura - 0,1219 \times MEF \times MEF + 0,867 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (6)$$

$$N_{AASHTO} = 184771 \times espessura - 0,349 \times MEF \times MEF + 1,085 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (7)$$

$$N_{AASHTO} = 199970 \times espessura - 0,3443 \times MEF \times MEF + 1,019 \times MEF \times espessura \times espessura \quad (8)$$

Destaca-se que o MEF é expresso em MPa e a espessura em centímetros. O coeficiente de determinação (R^2) das equações de regressão (1) a (8) são: 96%, 91%, 98,6%, 99,2%, 95,4%, 97,8%, 98,6% e 98,6%, respectivamente. Os modelos são apenas válidos para o intervalo de MEF de 800 a 4800 MPa e para espessuras combinadas de 40 a 60 cm. Também apenas para o subleito de 100 MPa. Na Figura 6, observa-se oito gráficos de contorno, sendo eles referentes às equações (1) a (8) e cada um com espessuras de revestimento de concreto asfáltico igual a 5, 10, 15 ou 20 cm e módulo de resiliência igual a 3032 ou 5533 MPa.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br

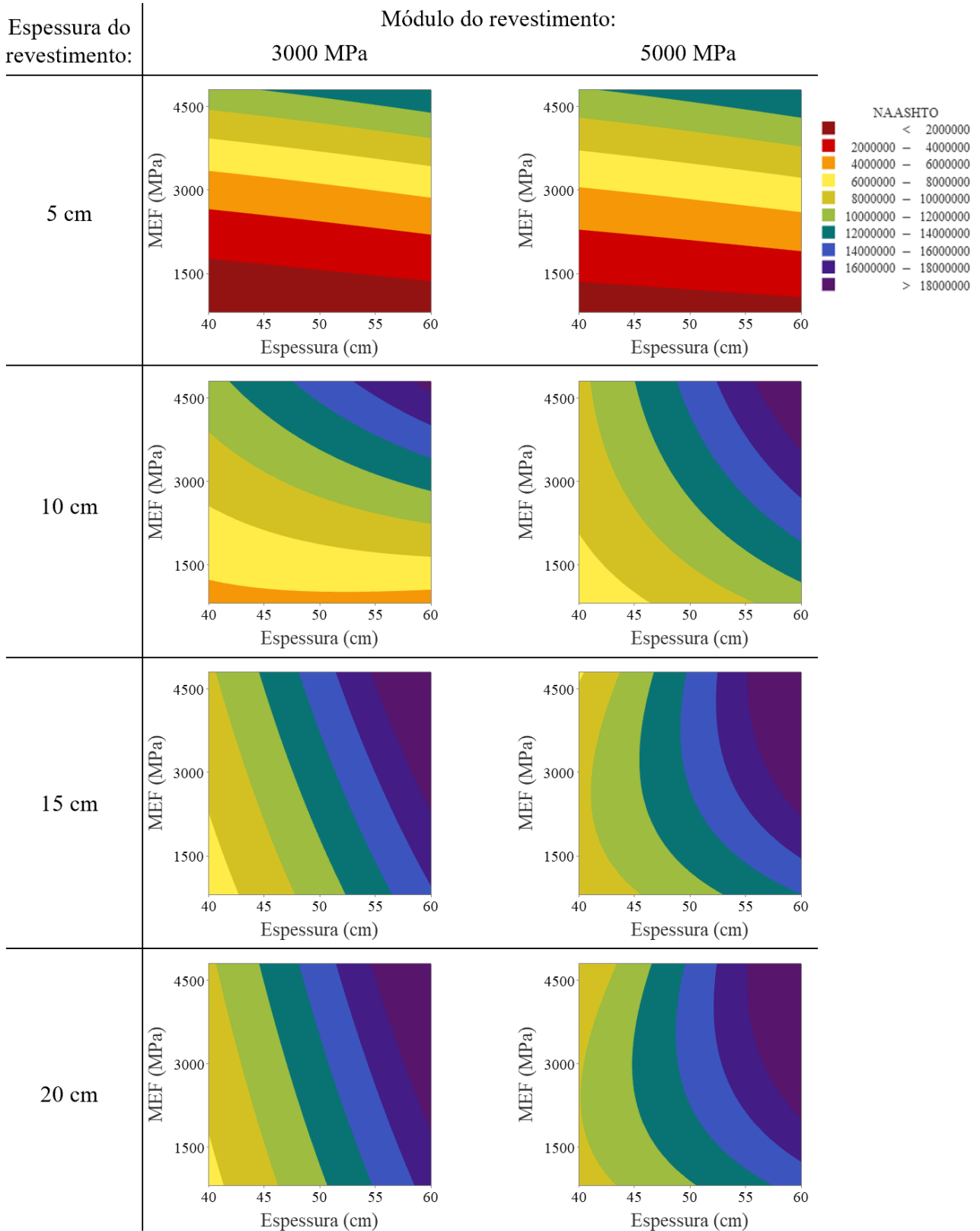
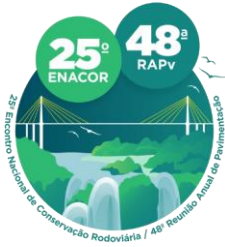


Figura 6. Gráficos de contorno que relacionam o MEF e a espessura combinada das camadas de base e sub-base com o $N_{NAASHTO}$, gerados a partir das equações de regressão



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Na Figura 6 é possível observar graficamente o efeito dos fatores controláveis estudados em cada composição de pavimento. Desta forma, isso possibilita estimar o N_{AASHTO} a partir do módulo de elasticidade à flexão (MEF) e da espessura combinada das camadas de solo-cal (base e sub-base), para os diferentes revestimentos de concreto asfáltico apresentados.

CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas, conclui-se que as espessuras dos materiais de solo-cal não exercem influência na capacidade estrutural dos pavimentos revestidos por concreto asfáltico delgado (5 cm). No entanto, para as demais espessuras de revestimento estudadas, 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 afetam o desempenho do pavimento, com teores de 5% e cal calcítica apresentando os maiores valores de N_{AASHTO} .

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

Portanto, a escolha do tipo e do teor de cal utilizados na mistura de solo-cal, da espessura das camadas de revestimento de concreto asfáltico e das camadas de base e sub-base deve ser criteriosamente avaliada 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 BIBLIOGRÁFICAS

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**, 2018.

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

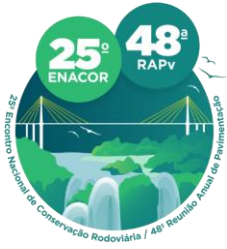
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 422-ES: Pavimentação – Solo-Cal – Adição de cal para Melhoria de Subleito Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro, 2019.

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**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre, 2021.

PINTO, S., PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2ª ed., Rio de Janeiro: Copiarte, 2010.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



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