



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)

### ANÁLISE TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE UM PAVIMENTO CONSIDERANDO DIFERENTES MATERIAIS DE SUBLEITO DA BAHIA

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

*Isabela de Jesus Santos<sup>1</sup>; Mario Sergio de Souza Almeida<sup>1</sup>; Weiner Gustavo Silva Costa<sup>1</sup>; Acbal Rucas Andrade Achy<sup>1</sup>; Ítalo Miller Machado Pereira<sup>1</sup>, Talita da Silva Oliveira<sup>1</sup> & Larissa Rodrigues dos Santos<sup>1</sup>*

#### RESUMO

A Engenharia de Pavimentação está em constante mudança. Com o crescimento do tráfego de veículos, tornou-se imperiosa a necessidade da implantação de uma metodologia de avaliação do comportamento mecânico do pavimento, utilizando a abordagem mecanística-empírica diante dos diferentes materiais disponíveis em cada local. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo realizar uma análise comparativa da influência de quatro materiais, coletadas em diferentes regiões do estado da Bahia, no comportamento tensão-deformação a partir da simulação de um pavimento de referência no software AEMC com esses diferentes materiais na camada de subleito. O programa experimental realizado em laboratório consistiu na realização dos ensaios de: granulometria, limites de liquidez e plasticidade, densidade real dos grãos, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão além de compactação Mini-MCV, perda de massa por imersão e Módulo de Resiliência. Os solos foram classificados em LA' na classificação MCT, materiais satisfatórios para uso em subleito rodoviário. Isso reforça a importância da utilização da classificação MCT frente ao fato que ela permite melhor avaliar o comportamento dos solos finos brasileiros comparado ao método Transportation Research Board (TRB) no qual foram enquadradas como, A-4, A-6 e A-7-6. Da análise mecanística com avaliação para cada material como subleito foi identificado o material SL 03 (A-7-6) como sendo o de provável maior vida útil para a configuração da estrutura de pavimento analisada.

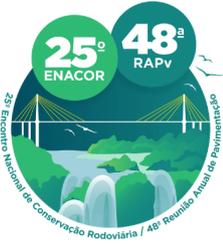
**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimento flexível; *Software* AEMC; MeDiNa.

#### ABSTRACT

Paving engineering is constantly changing. With the growth of vehicle traffic, the need to implement a methodology for evaluating the mechanical behavior of the pavement, using the mechanistic-empirical approach, has become imperative considering the different materials available in each location. In this sense, the present study aimed to carry out a comparative analysis of the influence of four materials, collected in different regions of the state of Bahia, on the stress-strain behavior from the simulation of a reference pavement in the AEMC software with these different materials in the subgrade layer. The experimental program carried out in the laboratory consisted of carrying out the tests of: granulometry, limits of liquidity and plasticity, real density of the grains, California Support Index (ISC) and Expansion in addition to Mini-MCV compaction, loss of mass by immersion and Resilient Modulus. The soils were classified in LA' in the MCT classification, satisfactory materials for use in road subgrade. This reinforces the importance of using the MCT classification in view of the fact that it allows a better evaluation of the behavior of Brazilian fine soils compared to the Transportation Research Board (TRB) method, in which they were classified as A-4, A-6 and A-7-6. From the mechanistic analysis with evaluation for each material as subgrade, material SL 03 (A-7-6) was identified as being the one with the longest service life for the configuration of the analyzed pavement structure.

**KEY WORDS:** Flexible pavement; AEMC software; MeDiNa.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, e-mail: [isabela@aluno.ufrb.edu.br](mailto:isabela@aluno.ufrb.edu.br); [mario.almeida@ufrb.edu.br](mailto:mario.almeida@ufrb.edu.br); [weiner@ufrb.edu.br](mailto:weiner@ufrb.edu.br); [acbal@ufrb.edu.br](mailto:acbal@ufrb.edu.br); [italomillermachado@hotmail.com](mailto:italomillermachado@hotmail.com); [talitaoliveira@aluno.ufrb.edu.br](mailto:talitaoliveira@aluno.ufrb.edu.br); [larissars@aluno.ufrb.edu.br](mailto:larissars@aluno.ufrb.edu.br)



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

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



## INTRODUÇÃO

Construído sobre a superfície final de corte e aterro, o pavimento flexível é constituído, via de regra, por múltiplas camadas finitas de materiais de comportamento elástico e plástico, no caso dos materiais granulares, e até viscoso, no caso das misturas asfálticas. A estrutura do pavimento é projetada para suportar as cargas e solicitações impostas pelo tráfego de veículos, distribuindo as tensões de maneira eficaz ao longo de sua espessura (BERNUCCI *et al.*, 2022). Para um bom desempenho do pavimento é necessário que a fundação da estrutura, ou seja, o subleito, apresente capacidade de suporte compatível com as solicitações demandadas pelo tráfego ao longo da sua vida útil (SANTOS *et al.*, 2020).

Na Engenharia de Pavimentação, os métodos mecanístico-empíricos por meio de instrumentos computacionais, elaborados a partir de princípios teóricos da mecânica dos pavimentos, para análise tensão-deformação atuantes na estrutura das camadas dos pavimentos, vem ganhando força, especialmente pela alta confiabilidade nos resultados e praticidade de manuseio (FERREIRA, 2021; SANTOS *et al.*, 2020).

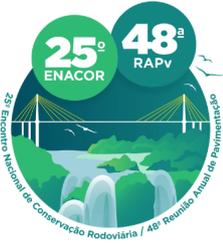
Ao longo dos anos, diversos estudos buscaram avaliar a estrutura do pavimento flexível, por meio dos métodos mecanístico-empíricos (BLASS *et al.*, 2018; CARMO e MARQUES, 2021; SILVA *et al.*, 2021). Santos *et al.* (2019) realizaram uma análise do comportamento de quatro amostras de solo provenientes de diferentes origens geológicas, comumente utilizadas como camada de subleito em rodovias no estado do Rio Grande do Sul. Os autores utilizaram ensaios geotécnicos convencionais, juntamente com os programas computacionais AEMC e AASHTO *Ware Pavement ME Design*, e obtiveram resultados satisfatórios para a utilização desses solos como camada de subleito rodoviário, levando em consideração os limites prescritos pelas normas vigentes.

Na análise estrutural utilizando o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), recomenda-se avaliação das propriedades físicas dos materiais, obtidas através de ensaios laboratoriais, de caracterização geotécnica convencional, como também da metodologia MCT e Módulo de Resiliência (MR), além da avaliação de desempenho mecânico da estrutura do pavimento flexível (DNIT, 2021). Segundo Franco e Motta (2018) o software Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) refere-se a uma sub-rotina do programa computacional MeDiNa, onde é possível realizar cálculos de tensões e deformações no pavimento flexível.

Desta forma, o objetivo do presente estudo foi realizar uma análise comparativa entre 4 materiais de subleito rodoviários, oriundos de diferentes regiões do estado da Bahia, por meio de análise tensão-deformação, utilizando um pavimento flexível de referência e sua influência na vida útil em cada local.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Após identificação e detalhamento das áreas de estudo, onde as amostras de solo foram coletadas, o programa experimental constituiu-se na realização de ensaios de caracterização geotécnica convencional, ensaios para classificação MCT, ensaios Índice Suporte Califórnia (ISC) e Expansão, ensaios de módulo de resiliência, utilizou-se o software AEMC para análise do comportamento mecânico de um pavimento flexível de referência com parâmetros utilizados por Carvalho *et al.* (2020), considerando os valores de densidade,  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  obtidos nos ensaios de módulo de resiliência. O programa experimental foi integralmente desenvolvido no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB).



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

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



## Áreas de Estudo

As amostras deformadas utilizadas no programa experimental foram coletadas por Lima (2020). Segundo a Autora, estas áreas de coleta das amostras estão situadas em 3 diferentes sub-regiões do estado da Bahia, localizadas em Cruz das Almas (12° 40' 12" S e 39° 06' 07" W – SL01 e SL02), Elísio Medrado (12° 56' 47" S e 39° 31' 18" W – SL03) e Morro do Chapéu (11°33' 00" S e 41° 09' 22" WGr – SL04). Estas localizações podem ser observadas na Figura 1.

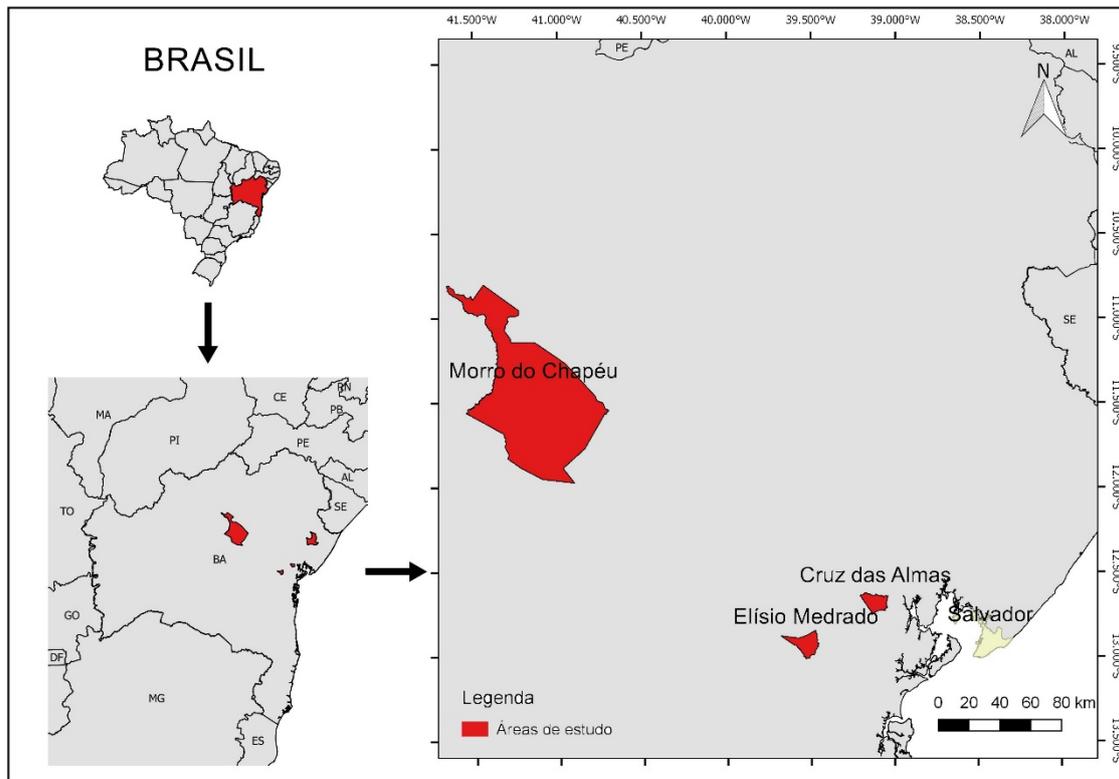
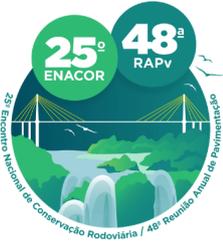


Figura 1. Mapa de localização dos municípios dos solos estudados. (LIMA, 2020).

Ainda segundo a Autora, os quatro perfis de classes de solos representativos são: Argissolo Amarelo Distrocoeso típico (SL01), constituído a partir de Granito, Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (SL02), constituído a partir de Sedimentos da Formação Alter-do-Chão, Latossolo Amarelo Distrófico típico (SL03 e SL04), constituído a partir de Folhelho.

## Classificação pela Metodologia TRB

A caracterização geotécnica convencional das amostras foi realizada através de ensaios de granulometria conjunta (ABNT, 2018), limite de liquidez (ABNT, 2016a), limite de plasticidade (ABNT, 2016b), densidade real de grãos (DNER, 1993), ISC e Expansão (DNIT, 2006). Os solos foram devidamente preparados para cada ensaio de acordo com a norma NBR 6457 (ABNT, 2016c). Os resultados de granulometria e limites de consistência permitiram classificar os solos no método TRB.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



### Classificação Metodologia MCT

Os ensaios necessários para classificação de solos pela metodologia MCT englobam a obtenção de parâmetros relacionados a compactação das amostras em miniatura (Mini-MCV) e determinação da perda de massa por imersão (Pi). O primeiro consistiu na compactação de cinco corpos de prova (CP) em miniatura ( $\varnothing = 50$  mm) com umidades variando entre os CP de, aproximadamente, 2%. Foram aplicados sucessivos golpes no solo com auxílio do compactador Mini-MCV e verificado com auxílio do extensômetro a altura do corpo de prova, interrompendo-se o processo quando um dos critérios foi atingido: a) diferença inferior a 2 mm entre a leitura após 4n golpes e após n golpes; b) intensa exsudação de água no topo e na base do corpo-de-prova; c) 256 golpes. Totalizando 20 CPs compactados.

Posteriormente, foi realizado o ensaio de Perda de Massa por Imersão (Pi), em que, os 20 corpos de prova compactados foram extrudados do molde em aproximadamente 10 mm. Em seguida, as amostras foram imersas em água por 24 h, na posição horizontal, onde recolheu-se a massa eventualmente desprendida, para determinação de sua massa seca. Os ensaios foram realizados conforme o procedimento prescrito nas normas DNER 259 (DNER, 1996), DNER 256 (DNER, 1994a) e DNER 258 (DNER, 1994b).

### Ensaio de módulo de resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência (MR) foram realizados nas 4 amostras de solo não trabalhadas de acordo com a norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018). Foram utilizados 12 pares de tensões, abrangendo combinações de 4 níveis distintos de tensão confinante ( $\sigma_3$ ) e 3 níveis de tensão desvio ( $\sigma_d$ ). É importante destacar que, de acordo com a metodologia estabelecida no ME DNIT 134 (DNIT, 2018), aplica-se inicialmente 500 golpes de condicionamento com um par de tensões ( $\sigma_3 = 0,070$  MPa e  $\sigma_d = 0,070$  MPa).

Cada amostra foi compactada no cilindro tripartido de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, em dez camadas, na energia do Proctor normal, com os respectivos parâmetros de compactação determinados para 8 golpes do ensaio de compactação mini-MCV, o qual corresponde a esta energia (normal), ou seja, da ordem de  $586 \text{ kN.m/m}^3$ .

A relação entre a tensão desviadora aplicada ( $\sigma_d$ ) e a deformação resiliente ( $\epsilon_r$ ) é utilizada para determinar o módulo de resiliência para cada par de tensões aplicado, descrito pela Equação 1. Com base nos 12 valores de MR calculados para os diferentes pares de tensões testados, foram determinadas as constantes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  do modelo que relaciona a variação do módulo de resiliência com a tensão confinante ( $\sigma_3$ ) e a tensão desvio ( $\sigma_d$ ), conforme apresentado na Equação 2.

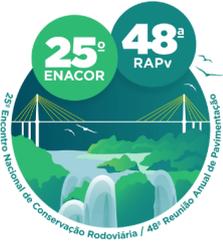
$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (2)$$

em que  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ : constantes de ajuste do modelo;

### Simulação do Pavimento de Referência

Utilizou-se para o dimensionamento do pavimento de referência, a estrutura do pavimento flexível obtida pelos autores Carvalho *et al.* (2020), Segundo estes autores esta estrutura foi idealizada empiricamente, com valores considerados como referência para as rodovias federais sob



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



administração do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) no Estado da Bahia, com número de operações do eixo padrão de 80 kN, com  $N_{\text{projeto}} = 1,6 \times 10^7$  para o *United States Army Corps of Engineers* (USACE) e  $N_{\text{projeto}} = 5,0 \times 10^6$  para o *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). As espessuras destas camadas estão listadas na Figura 2, constituído por Base (B), Sub-base (SB) granulares e Subleito (SL), este último utilizado os solos do presente estudo.

<b>Revestimento (R) = 10 cm</b>
<b>Base (B) = 15 cm</b>
<b>Sub-base (SB) = 15 cm</b>
<b>Subleito (SL) = <math>\infty</math></b>

Figura 2. Pavimento de Referência (adaptado de Carvalho et al., 2020).

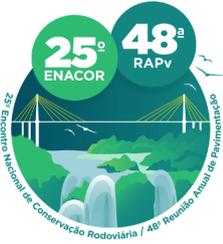
### Análise Tensão-Deformação

A análise tensão-deformação no software Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), sub-rotina do Método Nacional de Dimensionamento de pavimentos asfálticos (MeDiNa), desenvolvidos por Franco e Motta (2020), foi a ferramenta utilizada para avaliação estrutural do pavimento de referência (Figura 2) para diferentes solos de subleito. Nas análises realizadas no AEMC a interface entre as camadas do pavimento foi considerada como aderida e os módulos foram utilizados com variação não linear e, conseqüentemente, foram adotadas as respectivas constantes de regressão determinadas a partir dos ensaios de MR (Equação 2) para cada solo.

Nestas análises aplicou-se uma pressão de pneu de 0,56 MPa em um raio de atuação de 10,8 cm (representando a carga de uma roda do eixo padrão de 80 kN, ou 8,2 t), para obtenção dos valores de: (i) deslocamento vertical no topo do revestimento (D); (ii) deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento ( $\epsilon_t$ ); (iii) deformação vertical no topo do subleito ( $\epsilon_v$ ). Todas as análises foram realizadas entre as duas rodas e sob a roda do semieixo padrão, ou seja, nos pontos A, A', B, B', C e C' da Figura 3, respectivamente. Em todas as análises, a resposta elástica mais crítica foi levada em consideração para a avaliação do comportamento do pavimento.

Após realização da análise estrutural, foi calculado o número equivalente de operações de eixo simples de rodas duplas de 8,2 t acumulado, considerando um período de projeto ( $N_{\text{projeto}}$ ) para o qual o perfil é capaz de suportar. Foram utilizadas as Equações 3 a 5 (DER-SP, 2006) e os valores de k e n, conforme Tabela 1. É importante ressaltar que, das equações apresentadas na Tabela 1, a Equação 4 faz referência aos fatores de equivalência de carga (FEC) da AASHTO, para a determinação do tráfego ou  $N_{\text{previsto}}$ , e as Equações 3 e 5 fazem referência aos FEC da USACE.

Os valores de MR e coeficiente de Poisson das camadas de (R), (B) e (SB), foram os mesmos adotados por Carvalho *et al.* (2020), listados na Tabela 2. Para o subleito foram utilizados o valor de coeficiente de Poisson de 0,40, adotado também da Instrução de Projeto IP- DE-P00/001, do Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo (DER-SP, 2006), e dados de MR obtidos experimentalmente.



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

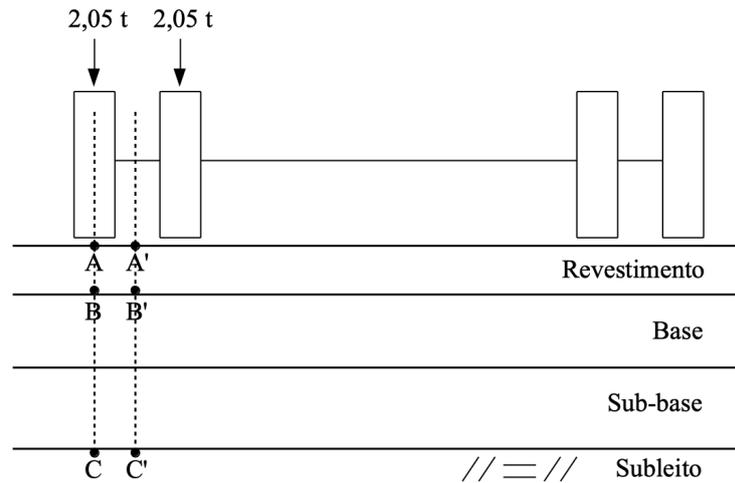


Figura 3 - Pontos de aplicação de carga e análise tensão-deformação.

Tabela 1 - Equações e parâmetros utilizados para o cálculo do número N.

Local de Análise	Equação	k	n	Fonte
Topo do revestimento Equação 3	$N_{tr} = n \sqrt{\frac{10^k}{D}}$	3,01	0,176	DNER PRO 11 (DNER, 1979)
Fibra inferior do revestimento Equação 4	$N_{ir} = k \times \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^n$	$1,092 \times 10^{-6}$	3,512	FHWA (1976) apud DER-SP (2006)
Topo do subleito Equação 5	$N_{sub} = k \times \left(\frac{1}{\epsilon_v}\right)^n$	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762	Dormon e Metcalf (1965) apud DER-SP (2006)

Em que:

$N_{tr}$ :  $N_{adm}$  para o topo do revestimento a ser comparado com o  $N_{USACE}$ ;

$N_{ir}$ :  $N_{adm}$  para a fibra inferior do revestimento a ser comparado com o  $N_{AASHTO}$ ;

$N_{sub}$ :  $N_{adm}$  para o topo do subleito a ser comparado com o  $N_{USACE}$ ;

D: deslocamento vertical/deflexão (mm) no topo do revestimento;

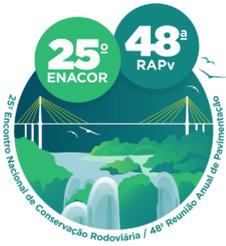
$\epsilon_t$ : deformação específica horizontal de tração para a camada de revestimento;

$\epsilon_v$ : deformação específica vertical de compressão no topo do subleito;

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

Tabela 2. Valores de MR e  $\nu$  das camadas (CARVALHO *et al.*, 2020).

Camada	MR (MPa)	$\nu$
Revestimento	3500	0,30
Base	225	0,35
Sub-base	225	0,35



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

www.rapvenacor.com.br



## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Ensaios de Caracterização Geotécnica Convencional

A Tabela 3 descreve informações referentes a profundidade (PROF) de coleta em cada camada, distribuição granulométrica, Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP), Índice de Plasticidade (IP), densidade real dos grãos ( $\rho_s$ ) e a classificação TRB, das amostras dos solos analisados. A partir dos dados apresentados da caracterização geotécnica na Tabela 3, pode-se constatar que as amostras do SL01 e SL04 têm predominância de areia em sua composição, com valores de 55,5% e 60% e baixos valores de IP, de 12% e NP, respectivamente.

Contudo, observa-se que as amostras do SL02 e SL03 apresentam predominância de finos, apresentando teor de argila+siltos de 51,8% e 58,1%. Podem ser classificados como de baixo a medianamente plástico, com valores de IP de 12% e 14%, respectivamente.

Ainda em relação aos dados apresentados na Tabela 3, todos os solos avaliados foram classificados pela metodologia TRB como solos finos e, portanto, inadequados para uso como subleito.

Tabela 3. Caracterização das amostras deste estudo.

Solo	PROF (cm)	ARG (%)	SIL (%)	ARE (%)	PED (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	TRB
SL01	130-180	16,7	27,6	55,5	0,2	36	24	12	2,68	A-6
SL02	122-180	26,1	25,7	48,2	0,0	37	23	14	2,58	A-6
SL03	30-90	17,4	40,4	41,9	0,2	41	29	12	2,58	A-7-6
SL04	0-48	21,2	18,8	60,0	0,0	-	-	NP	2,63	A-4

Os parâmetros ótimos de compactação, CBR e expansão dos solos de estão apresentados na Tabela 4. Os resultados de CBR e Expansão demonstraram que todas as 4 amostras de solos atendem as exigências do Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006), ou seja, expansão  $\leq 2,0\%$  e CBR  $\geq 2,0\%$ , sendo assim aptos a serem utilizados como camada de subleito rodoviário.

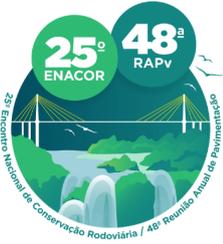
Tabela 4. CBR e expansão dos subleitos.

Solo	$\rho_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	CBR (%)	Expansão (%)
SL01	17,20	13,71	11,10	0,01
SL02	21,00	15,21	12,50	0,03
SL03	17,10	18,51	5,00	0,39
SL04	20,20	10,92	4,02	0,25

### Classificação Metodologia MCT

Os resultados obtidos dos ensaios de compactação mini-MCV (DNER, 1994b), perda de massa por imersão (DNER, 1994a), além da classificação das amostras dos diferentes perfis de solo analisados (DNER, 1996), estão listados na Tabela 5.

Observa-se com os resultados obtidos pela classificação MCT que os solos são tipicamente arenosos de natureza laterítica, todos classificados como LA<sup>1</sup>. Segundo esta metodologia os materiais são adequados para uso em pavimentação, contrariando as constatações relacionadas a classificação TRB, anteriormente apresentada na Tabela 3.



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



Tabela 5. Classificação MCT dos subleitos do presente estudo.

Solo	Índices classificatórios				CLASSIFICAÇÃO MCT
	c'	d'	Pi (%)	e'	
SL01	1,31	150,00	11,00	0,62	LA'
SL02	0,91	175,00	112,00	1,07	LA'
SL03	1,29	119,44	0,00	0,55	LA'
SL04	1,03	152,78	0,00	0,51	LA'

### Módulo de resiliência

Na Tabela 6 estão demonstrados os parâmetros de compactação extraídos das curvas de compactação do ensaio mini-MCV e os valores médios de MR e as respectivas constantes de ajuste (Equação 2). Para melhor avaliação comparativa entre os resultados dos ensaios de MR para os diferentes solos, a variação de MR de cada material está apresentada na Figura 4, em função da tensão da tensão confinante ( $\sigma_3$ ) e da tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) aplicadas nos ensaios, conforme a norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018).

Os valores médios de MR ( $MR_{\text{médios}}$ ) dos solos analisados, apresentados na Tabela 6, foram superiores a 50 MPa, atendendo ao critério estabelecido na IS DNIT 247 (DNIT, 2021), se mostraram apropriados para utilização como camada de subleito rodoviário. Vale salientar todos os corpos de prova foram compactados na energia proctor normal.

Na Figura 4 observa-se que o SL03 apresenta melhor comportamento que os demais solos, com exceção do SL01 para menores valores de tensão confinante. O SL04 apresenta o pior comportamento entre os solos estudados. O efeito da tensão desvio no MR é pequeno entre os materiais testados.

Tabela 6. Dados da moldagem e módulo de resiliência dos subleitos.

Solo	$\rho_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	w (%)	$MR_{\text{médio}}$ (MPa)	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R^2$
SL01	17,20	13,71	266,93	1169,05	0,48	-0,01	0,93
SL02	21,00	15,21	221,13	585,05	0,32	-0,02	0,82
SL03	17,10	18,51	265,04	421,96	0,22	-0,09	0,78
SL04	20,20	10,92	171,57	576,11	0,45	-0,09	0,86

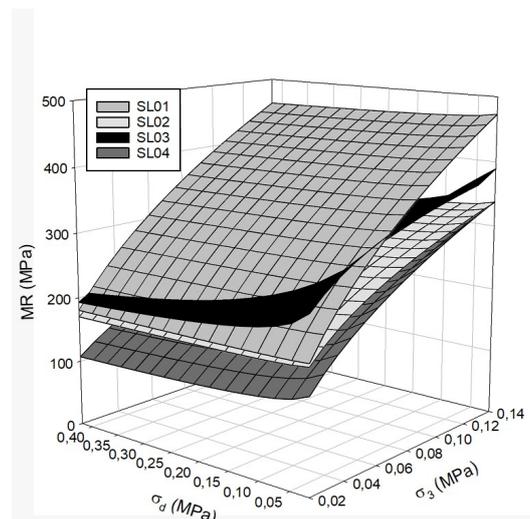
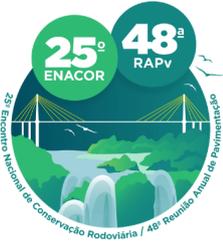


Figura 4. Variação de MR dos solos em função  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$ .



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



### Análise Tensão-Deformação

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos nas simulações realizadas no software AEMC, para o cálculo da deflexão ( $D$ ) no topo do revestimento, das deformações de tração na fibra inferior do revestimento em concreto asfáltico ( $\epsilon_t$ ) e vertical no topo do subleito ( $\epsilon_v$ ) e das solicitações admissíveis utilizando as equações listadas na Tabela 1. Cabe ressaltar que para cada subleito utilizou-se no AEMC seu comportamento não linear caracterizado nos ensaios de MR, utilizando valores de  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  obtidos experimentalmente (Tabela 6).

Tabela 7. Pavimento de referência: Resultado da análise tensão-deformação dos subleitos.

Solo	$D (10^{-2} \text{ mm})$	$\epsilon_t (10^{-4})$	$\epsilon_v (10^{-4})$	$N_{tr}$	$N_{ir}$	$N_{sub}$
SL01	35,2	2,33	3,52	$2,07 \times 10^8$	$6,25 \times 10^6$	$1,69 \times 10^7$
SL02	34,2	2,33	3,38	$2,07 \times 10^8$	$6,25 \times 10^6$	$2,05 \times 10^7$
SL03	28,9	2,29	2,60	$6,33 \times 10^8$	$6,64 \times 10^6$	$7,16 \times 10^7$
SL04	40,6	2,37	4,23	$9,18 \times 10^7$	$5,89 \times 10^6$	$7,05 \times 10^6$

A partir dos resultados obtidos utilizando o pavimento de referência (Tabela 7), observa-se que em todos os casos o  $N_{adm}$  ( $N_{tr}$ ,  $N_{ir}$ ,  $N_{sub}$ ) foi superior ao número de solicitações previsto em projeto ( $N_{projeto}$ ).

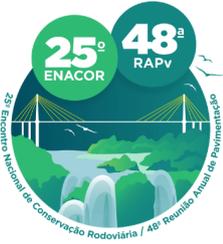
Entretanto, destaca-se que o SL04 apresentou na análise tensão-deformação valores mais elevados de deflexão no topo do pavimento e deformação no topo do subleito, culminando em valores de  $N_{adm}$  menores em relação aos demais subleitos analisados. Isto indica que, comparativamente, a estrutura do pavimento com este subleito tenderá a apresentar patologias e comprometimento estrutural mais precocemente que os demais materiais avaliados. Por outro lado, o SL03 foi, nessa perspectiva, o que apresentou melhor comportamento dentre todos os solos avaliados no presente trabalho (Tabela 7), o qual, junto com o SL04, apresentou baixo valor de CBR, de 5% e 4,02%, respectivamente (Tabela 4). Por outro lado, os materiais SL01 e SL02 foram os que apresentaram os maiores valores deste parâmetro (Tabela 4), correspondendo a 11,1% e 12,5%, respectivamente, os quais não foram traduzidos em estimativas de desempenho e tendência de vidas úteis sensivelmente alongada em relação aos demais materiais. Este resultado reforça o entendimento de que o CBR não é o parâmetro mais indicado para avaliar comportamento mecânico de materiais para pavimentação.

### CONCLUSÃO

O presente trabalho visou realizar uma análise comparativa de vida útil do pavimento utilizando um pavimento de referência, com auxílio do software AEMC, entre 4 amostras de subleitos de diferentes regiões do estado da Bahia. Análises tensão-deformação como as realizadas no presente trabalho, reforçam a importância da verificação mecanicista para tomada de decisão a cerca da escolha dos materiais e definição de estruturas de pavimento na fase de projeto. Complementarmente, além de aumentar o banco de dados de ensaios dinâmicos para materiais de diferentes regiões do estado da Bahia, os resultados do presente estudo serviram para reiterar a necessidade de realização de ensaio dinâmicos para caracterização adequadamente os materiais para pavimentação, em função da incapacidade do ensaio de CBR de exercer essa função.

### AGRADECIMENTO

Ao Laboratório de Pavimentação da UFRB, CNPq e UFRB pelo apoio para realização desta pesquisa.



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

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6459: Solo – determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, 2016a.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7180: Solo – determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, 2016b.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, 2016c.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7181: Solo – análise granulométrica, Rio de Janeiro, 2018.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. Pavimentação asfáltica – Formação Básica para Engenheiros, Rio de Janeiro, PETROBRÁS, ABEDA, 2a edição, 2022.
- Blass, L.; Moli, M.; Bihain, A.; Bueno, L. D.; BUDNY, J.; Altnetter, M. V.; DA SILVA, E. J. G. Modelagem Computacional no Estudo de Deformações em Pavimentos Flexíveis, 2018, *REVISTA CEREUS*.
- Carmo, C. A. T.; Marques, G. L. O. Avaliação comparativa de propriedades mecânicas de misturas asfálticas simples e compostas Comparative evaluation of the mechanical properties of simple and composite asphalt mixtures. *Brazilian Journal of Development*, 7(8), 84306-84329, 2021.
- Carvalho, A. I. S.; Almeida, M. S. de S.; Pedreira, W. J. P.; Costa, W. G. S.; São Mateus, M. do S. C. Influência da Densificação do Solo de Subleito no Desempenho de Pavimentos Flexíveis. Anuário do Instituto de Geociências, [S.L.], v. 43, n. 4, p. 253-262, 18 dez. 2020. Instituto de Geociências - UFRJ.
- Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. DER-SP - Projeto de Pavimentação. IP- DE-P00/001. São Paulo, 53 p., 2006.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER - ME 93: Solo – Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro, 1994.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem GEM, DNER-ME-256: Solos Compactados com Equipamento Miniatura - Determinação da Perda de Massa por Imersão, São Paulo, 1994a.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER ME 258: Solos Compactados em Equipamento Miniatura - Mini-MCV, São Paulo, 1994b.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER-CLA259: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura, São Paulo, 1996.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Manual de pavimentação. 3.ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006. p. 274.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Instrução de Serviço – IS-247: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa. 1.ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2021. p. 22.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Manual de Ajuda do Programa MeDiNa, versão 1.1.5, Brasil, 2020.
- Ferreira, A. D. comparação entre método empírico e mecanístico-empírico para dimensionamento de pavimentos flexíveis, Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 2021.
- Franco, F. A. C. P.; Motta, L. M. G. da. Guia para utilização de Método Mecanístico- empírico: Programas MeDiNa, AEMC e BackMeDiNa – Manual de utilização. Rio de Janeiro: Convênio DNIT/COPPE, 70 p., 2018.
- Lima, A. V. Morfologia de solos coesos e não coesos oriundos de sedimentos cenozoicos no estado da Bahia’, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2020.
- Nogami, J. S. & Villibor, D. F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos, São Paulo, 1995, p. 240.
- Santos, T. A. D.; Pinheiro, R. J. B.; Specht, L. P.; Brito, L. A. T. Análise do desempenho de subleitos rodoviários à luz de conceitos da Mecânica dos Pavimentos. Matéria (Rio de Janeiro), p. 25, 2020.



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

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



Santos, T. A.; Specht, L. P.; Pinheiro, R. J.; Ceratti, J. A.; Brito, L. A. T. Avaliação da resistência e da deformação resiliente de quatro solos de subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul, Transportes, v. 27, n. 1, p. 48-64, 2019.

Silva, N. A. B.; Silva, T. O. D.; Pitanga, H. N.; Marques, G. L. D. O. Use of mechanistic-empirical method of pavement design for performance sensitivity analysis to asphalt pavement fatigue. Matéria (Rio de Janeiro), 26, 2021.