

# Avaliação da resistência e da deformação resiliente de quatro solos de subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul

Thaís Aquino dos Santos<sup>1</sup>, Luciano Pivoto Specht<sup>2</sup>, Rinaldo José Barbosa Pinheiro<sup>3</sup>,  
Jorge Augusto Pereira Ceratti<sup>4</sup>, Lélío Antônio Teixeira Brito<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, thais\_as@hotmail.com

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, luspecht@ufsm.br

<sup>3</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, rinaldo@ufsm.br

<sup>4</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, jorge.ceratti@ufrgs.br

<sup>5</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, leliobrito@gmail.com

## Recebido:

24 de novembro de 2017

## Aceito para publicação:

20 de julho de 2018

## Publicado:

30 de abril de 2019

## Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

## Palavras-chaves:

Solos não saturados,  
Módulo de resiliência,  
Resistência ao cisalhamento,  
Análise mecanicista.

## Keywords:

Unsaturated soils,  
Resilient modulus,  
Shear strength,  
Mechanistic analysis.

DOI:10.14295/transportes.v27i1.1531

## RESUMO

O presente artigo apresenta o estudo do comportamento de quatro solos com origens geológicas diferentes, quanto à sua resistência e deformação resiliente, comumente empregados em subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul. A metodologia aplicada consistiu em ensaios de caracterização física e mecânica, obtenção da curva característica dos solos, além de simulações numéricas assistidas por dois programas computacionais: AEMC e AASHTOWare Pavement ME Design. Os resultados indicaram que os limites descritos em norma para utilização dos solos como material de subleito foram satisfeitos. Verificou-se que uma variação de  $\pm 2\%$  no teor de umidade provocou considerável alteração na resistência desses materiais, evidenciando a influência da sucção na resistência ao cisalhamento dos solos. As análises mecanicistas permitiram constatar a limitação do método de dimensionamento do DNIT, principalmente no que tange à ruptura por fadiga, além de destacar a importância do módulo de resiliência no comportamento da estrutura como um todo.

## ABSTRACT

The present article presents the study of the behavior of four soils with different geological origins, as regards their resistance and resilient deformation, commonly used in road subgrades in the state of Rio Grande do Sul. The methodology consisted of physical and mechanical characterization, obtaining the characteristic curve of the soils, besides numerical simulations assisted by two computational programs: AEMC and AASHTOWare Pavement ME Design. The results indicated that the limits described in standard for use of the soils as subsoil material were satisfied. It was verified that a variation of  $\pm 2\%$  in the moisture content caused a considerable change in the resistance of these materials, evidencing the influence of the suction on the shear strength of the soils. The mechanistic analysis allowed to verify the limitation of the DNIT design method, mainly in relation to fatigue rupture, besides emphasizing the importance of the resilience modulus in the behavior of the structure as a whole.



## 1. INTRODUÇÃO

O pavimento é conceituado como um sistema de camadas elásticas, de espessuras finitas, em que cada camada é constituída por um material diferente, cada uma desempenhando uma função particular na estrutura. Devido ao tráfego, esse sistema está sujeito a repetidas solicitações dinâmicas de cargas de diferentes intensidades, magnitudes e frequências ao longo do tempo. Toda estrutura submetida a essas solicitações apresenta respostas mecânicas ao carregamento cíclico, ou seja, é exposta a tensões que geram deformações permanentes e recuperáveis, sendo que essas deformações devem ser consideradas no dimensionamento de pavimentos.

O subleito recebe uma parcela dessas tensões, devendo apresentar características compatíveis com essas solicitações. Com isso, ao dimensionar-se um pavimento é necessário conhecer o comportamento do subleito, especialmente em relação à deformabilidade e à resistência do solo. O atual método de dimensionamento vigente no Brasil não considera o efeito das deformações resilientes no comportamento mecânico dos materiais utilizados na pavimentação. Porém, é essa deformabilidade resiliente ou elástica das camadas do pavimento e do subleito que condiciona a vida útil da estrutura como um todo, quando solicitadas por flexões sucessivas, podendo ocasionar um dos principais defeitos recorrentes em rodovias brasileiras: a ocorrência de trincas por fadiga (Medina E Motta, 2015).

O Módulo de Resiliência (MR) é considerado um dos parâmetros mais importantes na caracterização do comportamento mecânico dos materiais utilizados em pavimentação, pois define o comportamento resiliente de cada material quando submetido aos carregamentos cíclicos. No Brasil, os primeiros estudos acerca da determinação do módulo de resiliência foram realizados por Preussler (1978) e Svenson (1980).

Ao longo dos anos, diversos estudos relacionados aos fatores que influenciam o MR foram realizados (Medina e Preussler, 1980; Li e Selig, 1994; Werk, 2000; Bonzanini, 2011; entre outros). A considerável influência das deformações resilientes dos solos no desempenho de pavimentos flexíveis também se tornou objeto de estudo (Medina *et al.*, 2006; Ferreira, 2008; Guimarães *et al.*, 2012; dentre outros), evidenciando a importância da consideração da rigidez dos solos empregados em pavimentação, principalmente no que diz respeito ao material de subleito.

Como na maioria das obras de engenharia que sofre processo de compactação, os subleitos, em geral, encontram-se acima do nível d'água e, portanto, apresentam comportamento de solos não saturados. Segundo Fredlund (1996), os solos não saturados apresentam um comportamento singular e não seguem os critérios adotados pela Mecânica dos Solos clássica. O parâmetro determinante para entender-se o comportamento desse tipo de solo é a sucção.

A relação entre a variação do teor de umidade e a sucção de um solo é obtida através da curva de retenção de água, também chamada de curva característica do material. Por meio dessa curva, é possível correlacionar a sucção do solo com outros parâmetros e propriedades, como: resistência ao cisalhamento, permeabilidade, deformabilidade, condutividade hidráulica, entre outros.

No Brasil, onde há o predomínio do clima tropical úmido, o teor de umidade no subleito pode variar em decorrência de diversos fatores relacionados às alterações ambientais da região onde o pavimento encontra-se construído. Desse modo, fica evidente a importância da determinação da sucção em solos utilizados em pavimentação, devido à sua influência nas propriedades mecânicas destes e, conseqüentemente, no desempenho final do pavimento. Gehling *et al.* (1998), Parreira e Gonçalves (2000), Beneveli (2002), Heydinger (2003), Khoury e Zaman (2004), Yang *et al.* (2005), Takeda (2006), Bastos *et al.* (2013) e Salour *et al.* (2014) foram alguns dos autores que comprovaram os efeitos da sucção na deformabilidade e resistência de solos não saturados empregados na pavimentação.

Observando esse contexto, esta pesquisa procura avaliar o comportamento de solos empregados em subleitos de importantes rodovias do estado do Rio Grande do Sul, quanto à sua resistência e deformação resiliente, analisando os fatores que influenciam essas propriedades e o desempenho dos diferentes solos quando aplicados na fundação de um pavimento. Alinhado ao

novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis brasileiro, atualmente em elaboração, o estudo ainda visa contribuir para a disseminação da prática da análise mecanicista e da Mecânica dos Pavimentos na elaboração de projetos e análise do desempenho de pavimentos flexíveis frente ao mecanismo de ruptura por fadiga.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental desta pesquisa consistiu em duas etapas: etapa laboratorial e análise mecanicista. Na etapa de laboratório, foram realizados os ensaios de caracterização física e mecânica, englobando os ensaios para a avaliação da resistência e da deformação resiliente dos solos em estudo. De posse dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, estes foram computados em dois softwares, simulando o comportamento dos materiais em campo e analisando o desempenho dos solos como subleito rodoviário.

### 2.1. Materiais

Para a realização deste estudo, foram definidas quatro jazidas de solo, as quais apresentam uso consolidado em importantes obras rodoviárias no estado do Rio Grande do Sul. A primeira jazida, cujo solo foi denominado solo PE, localiza-se na cidade de Pelotas, na região sul do estado, e constitui o subleito do trecho em duplicação da BR 116 no entorno da cidade. A segunda jazida (solo CB) está localizada na cidade de Coronel Barros, na região noroeste, cujo material foi empregado em uma obra de travessia na BR 285, zona urbana do município. Na região central do estado, na cidade de Santa Maria, encontram-se localizadas a terceira (solo TR) e a quarta jazida (solo RS) adotadas nesta pesquisa, com utilização na Travessia Urbana da BR 287 e na duplicação da RS 509, respectivamente. A Figura 1 apresenta um mapa de localização das referidas rodovias, bem como das jazidas adotadas neste estudo.

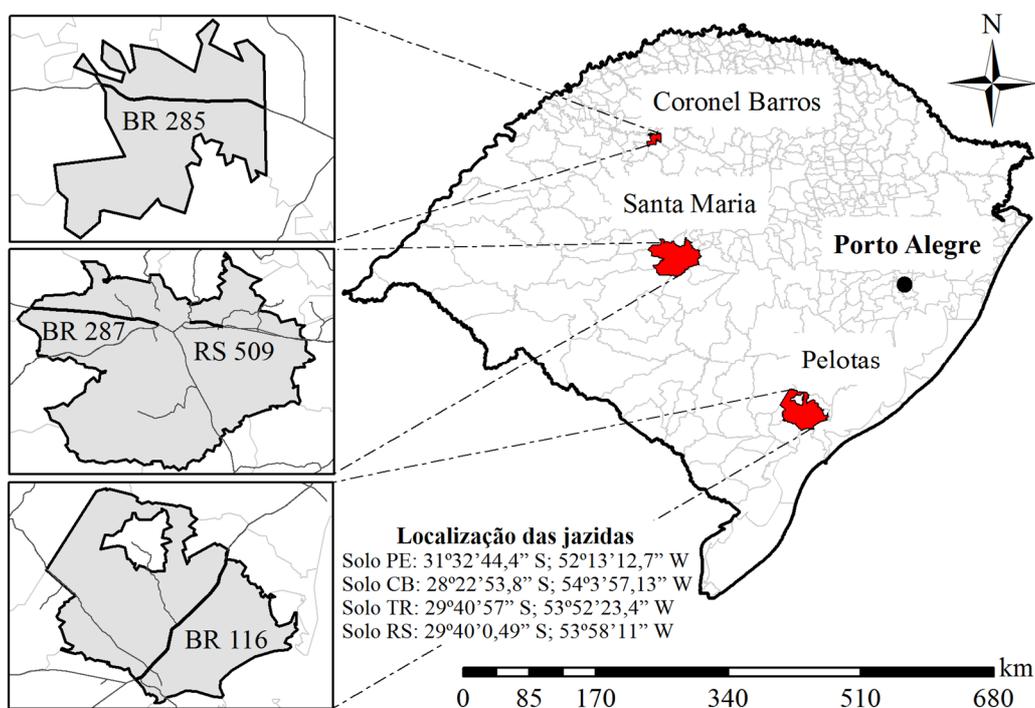


Figura 1. Mapa de localização das rodovias e jazidas

## 2.2. Ensaios de Caracterização Física

A caracterização física dos materiais foi realizada por meio de três conjuntos de ensaios clássicos da Mecânica dos Solos: peso específico real dos grãos (NBR 6508/2016), limites de Atterberg (NBR 6459/2016 e NBR 7180/2016) e análise granulométrica (NBR 7181/2016). Além dos ensaios clássicos, foram realizados os ensaios Mini-MCV (DNER-ME 256/1994) e Perda de Massa por Imersão (DNER-ME 258/1994), para posterior classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical); e a análise química dos materiais, com o intuito de identificar indiretamente o argilomineral predominante presente nos solos em estudo, bem como outras propriedades de interesse na área de pavimentação.

## 2.3. Ensaios de Caracterização Mecânica

Os procedimentos para os ensaios de compactação, ISC (Índice Suporte Califórnia) e expansão seguiram as diretrizes apresentadas nas normas NBR 7182/2016 e NBR 9895/2016, respectivamente. Para realização desses ensaios, foram ensaiadas três amostras na energia Proctor Normal.

A envoltória de resistência e os parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno dos solos em estudo foram obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto, seguindo os procedimentos descritos na normativa americana ASTM D3080/2011. Inicialmente, foram moldados corpos de prova com base nos parâmetros ótimos obtidos na curva de compactação Proctor Normal, seguindo as diretrizes de moldagem do ensaio de ISC (NBR 9895/2016) e, posteriormente, anéis metálicos quadrados (5cm×5cm×2cm) foram esculpados e extraídos. As amostras extraídas foram submetidas a trajetórias de secagem e umedecimento, com a finalidade de verificar a influência da sucção na resistência ao cisalhamento dos solos em estudo. Optou-se por uma variação de  $\pm 2\%$  no teor de umidade, após compactação, por ser uma oscilação capaz de ocorrer em campo.

Os níveis de tensões foram adotados em função da condição de umidade. Para as condições  $W_{ótima}$  (teor de umidade ótima) e  $W_{ótima+2\%}$  (trajetória de umedecimento), foram definidos três níveis de tensões normais aplicadas (25 kPa, 50 kPa e 100 kPa). Devido ao ganho de rigidez, as amostras submetidas à trajetória de secagem ( $W_{ótima-2\%}$ ) apresentaram comportamento peculiar durante a execução do ensaio (alta dilatação) e por esse motivo foram adotados quatro níveis de tensões normais aplicadas: 50 kPa, 80 kPa, 100 kPa e 150 kPa. Registra-se que, devido à redução no teor de umidade do corpo de prova e, conseqüentemente, ao aumento da sucção, a amostra tornou-se mais rígida, oferecendo uma alta resistência ao cisalhamento e sofrendo alta dilatação. Nesse caso, não foi possível a obtenção da tensão cisalhante máxima, pois a amostra não sofreu a ruptura por cisalhamento, sendo necessário a adoção de tensões normais superiores.

Os ensaios triaxiais de cargas repetidas para a determinação do módulo de resiliência foram realizados seguindo o método de ensaio DNIT-ME 134/2010, moldados em um molde tripartido de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, envoltos por uma membrana impermeável, na condição ótima de compactação da energia Proctor Normal. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

Após a realização dos ensaios e a obtenção dos módulos de resiliência em função dos pares de tensões descritos em norma, estes foram analisados por modelos descritos na literatura (Medina e Motta, 2015). A referida análise abordou os modelos comumente utilizados (tensão

confinante, tensão desvio, invariante de tensões, modelo composto e modelo universal da AASHTO) que relacionam os módulos de resiliência com as tensões impostas durante o ensaio. O intuito principal dessa análise foi verificar o modelo que melhor descreve o comportamento resiliente dos solos pesquisados.

## 2.4. Curvas Características Sucção × Umidade

Neste estudo, as curvas características foram obtidas através da técnica do papel filtro e seguiram as instruções de execução contidas em Marinho (1995), Feuerharmel (2007) e na norma americana ASTM D5298/2010.

Segundo Marinho (1997), o método baseia-se no princípio de que um solo, com certa umidade, quando posto em contato com um papel filtro quantitativo, com umidade inferior, faz com que esse último absorva uma certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de pressão. Após o tempo de equalização, os valores de umidade do material poroso e do solo são diferentes, porém a sucção é a mesma. Tendo-se a relação entre sucção e umidade do papel filtro (curva de calibração), a sucção do solo pode ser determinada.

O processo de moldagem foi semelhante ao realizado para os ensaios de cisalhamento direto, diferenciando-se por anéis cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 26 mm de altura. Para a determinação dos pontos da curva característica, as amostras foram submetidas a trajetórias de secagem e umedecimento. Assim, dos oito corpos de prova extraídos para cada solo, seis sofreram processo de secagem e dois de umedecimento.

## 2.5. Análise Mecanicista

Nos últimos anos, a análise mecanicista tem despontado no Brasil como uma importante ferramenta na análise estrutural de pavimentos, tanto para uso em pesquisas quanto em aplicações práticas (DNIT 2006a; DNIT 2006b; Balbo, 2007; Franco, 2007; Bastos, 2013; Medina e Motta, 2015; Santos, 2016; Fernandes, 2016; Fernandes *et al.*, 2017).

Para realização das simulações numéricas no presente trabalho, inicialmente, determinou-se uma composição típica regional. Optou-se por uma estrutura comumente utilizada no estado do Rio Grande do Sul, composta por revestimento de Concreto Asfáltico (CA), Brita Graduada Simples (BGS) na camada de base, Macadame Seco (MS) na sub-base e os diferentes solos pesquisados aplicados no subleito do pavimento (solos PE, CB, TR e RS). O período de projeto escolhido para o dimensionamento foi de 10 anos. O número de solicitações de carga ( $N_{\text{PROJETO}}$ ) de  $2,5 \times 10^7$  foi adotado segundo os estudos de Klamt (2014), baseado nos valores obtidos na contagem da praça de pedágio Retiro, próxima à cidade de Pelotas.

Após a definição do número de solicitações de carga de projeto e da tipologia, esta foi dimensionada através do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis em vigência no Brasil - método do DNIT, seguindo as diretrizes presentes em Souza (1981) e no Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006a). De posse das estruturas devidamente dimensionadas, as análises mecanicistas foram realizadas em dois diferentes softwares: AEMC e *AASHTOWare Pavement ME Design*.

### 2.5.1. AEMC - SisPav

As primeiras análises foram realizadas com o auxílio da ferramenta AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), presente no software SisPav (Franco, 2007). A Tabela 1 apresenta os parâmetros de entrada das estruturas no AEMC.

**Tabela 1:** Dados de entrada na ferramenta AEMC

Camada	Material da Camada	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson
Revestimento	CA	*	5000	0,30
Base	BGS	*	200	0,35
Sub-Base <sup>1</sup>	Macadame Seco	*	300	0,35
Subleito	Solos PE, CB, TR e RS	∞	MR não linear	0,45

\*Espessuras de acordo com o dimensionamento de cada estrutura.

<sup>1</sup>Valores adotados quando houver a camada de sub-base na estrutura.

Os dados de entrada referentes aos módulos de resiliência (exceto subleito) e coeficientes de Poisson seguiram os valores referenciais encontrados na literatura (Balbo, 2007; Bernucci *et al.*, 2010; Ribas, 2014). O fato do MR da sub-base ser superior ao módulo da base está embasado nos recorrentes resultados obtidos em retroanálises de pavimentos flexíveis do estado (Núñez, 1997; Mattos, 2014). No subleito, foram utilizados os módulos de resiliência não lineares dos solos em estudo, obtidos nos ensaios triaxiais de cargas repetidas, uma vez que representam as características de deformabilidade dos solos em função do estado de tensões atuante na estrutura simulada. Para todas as simulações, adotou-se a condição de camadas não aderidas, submetidas ao eixo padrão rodoviário, composto por eixo simples de rodas duplas carregado com 80 kN e pressão de inflação dos pneus de 0,56 MPa.

Obtidas as tensões e deformações atuantes nas estruturas, foi possível, a partir de conceitos da análise mecanicista, avaliar a influência mecânica dos diferentes solos na degradação do pavimento flexível, através de um dos seus principais mecanismos de ruptura – o trincamento por fadiga. A análise foi restrita somente ao mecanismo de ruptura por fadiga, pois partiu-se do princípio que as estruturas dimensionadas não sofrerão ruptura por deformação permanente, conforme preconizado pelo método oficial utilizado (Souza, 1981; DNIT, 2006a). No entanto, vale ressaltar a importância do estudo da deformação permanente de solos utilizados na pavimentação, principalmente no que tange aos avanços dos métodos de dimensionamento mecanístico-empírico.

As deformações de tração no fundo do revestimento ( $\epsilon_t$ ) foram analisadas e através do modelo de previsão de desempenho à fadiga, desenvolvido pela *Federal Highway Administration*, apresentado na Equação 1, os valores admissíveis de solicitações à fadiga foram calculados.

$$N_{AASHTO} = 1,092 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{3,512} \quad (1)$$

em que N: é o número de solicitações admissíveis ao trincamento por fadiga. Para fins de comparação com o N de projeto, adotou-se:  $NUSACE = 3 \cdot NAASHTO$ ;

$\epsilon_t$ : é a deformação horizontal de tração no fundo do revestimento.

Os números de repetições de cargas admissíveis à fadiga ( $N_{FADIGA}$ ) obtidos para cada estrutura em análise foram comparados com o número de solicitações de carga definido em projeto. O redimensionamento, quando necessário, foi realizado aumentando a espessura do revestimento, camada onde há ocorrência do fenômeno de trincamento por fadiga.

### 2.5.2. AASHTOWare Pavement ME Design

O *AASHTOWare Pavement ME Design* é um software comercial de dimensionamento de pavimentos, necessitando de licença para ser utilizado, que acompanha o guia de dimensionamento mecanístico-empírico - MEPDG da AASHTO (AASHTOWare, 2015). A partir do relatório de saída do software, é possível avaliar o desempenho das estruturas frente aos diferentes mecanismos de ruptura. No presente trabalho, só foram analisados os mecanismos de fadiga e deformação permanente.

As estruturas, bem como os dados de entrada, foram os mesmos apresentados para a análise anterior, com exceção da camada de revestimento, para a qual foram utilizadas as características de referência presentes no software (*default*). Nessa análise, utilizou-se o espectro completo de carga por eixo, para cada tipo de eixo, visto que o *AASHTOWare* não caracteriza o tráfego em termos de uma carga por eixo equivalente (*Equivalent Single Axle Load - ESAL*). Em relação ao clima, optou-se por utilizar os dados climáticos da cidade de Savannah, no estado da Geórgia (EUA), devido à semelhança com o clima presente no Rio Grande do Sul. De forma a atender aos limites de projeto, a confiabilidade utilizada foi de 50%.

### 3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1. Ensaios Laboratoriais

A Tabela 2 apresenta as médias dos resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica para os quatro solos em estudo. É possível verificar que os solos PE e RS são bem semelhantes, com predomínio de materiais finos, diferenciando-se no que se refere à fração argila. O solo CB apresentou 68% de partículas inferiores a 0,002 mm, caracterizando um solo altamente argiloso. Por outro lado, o solo TR apresentou um predomínio da fração areia (em torno de 56%). Em relação à plasticidade, os quatro solos foram caracterizados como altamente plásticos. Já no que diz respeito ao peso específico real dos grãos, estes apresentaram valores consistentes com a mineralogia de cada material.

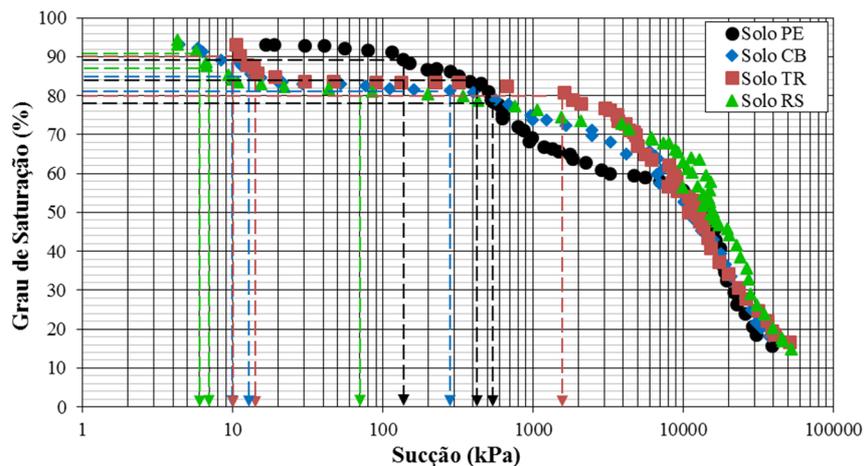
Segundo a classificação MCT, os quatro materiais foram identificados como de comportamento Laterítico Argiloso (LG'), caracterizando um material com possibilidade de alta capacidade suporte, baixa permeabilidade e baixa expansão, com previsão de ótimo comportamento como subleito, evidenciando a importância da classificação MCT no que se refere à classificação de solos tropicais. No sistema de classificação da AASHTO, os solos em estudo foram enquadrados entre os grupos A-6 e A-7-6, indicando materiais com previsão de péssimo comportamento como subleito rodoviário.

Em todos os casos, os valores obtidos para o peso específico aparente seco máximo das amostras apresentaram uma variabilidade aceitável, bem como os valores de umidade ótima. Os solos em estudo apresentaram valores de ISC compatíveis com o esperado ( $ISC \geq 2\%$ ). Os ensaios de expansão apresentaram valores pouco expressivos, inferiores a 1%, previstos devido ao comportamento laterítico dos solos, bem como do argilomineral caulinita presente na sua composição, indicado pelos valores de CTC ( $3 \text{ cmolc/dm}^3 < CTC < 15 \text{ cmolc/dm}^3$ ).

As curvas características sucção  $\times$  umidade dos solos em estudo são apresentadas na Figura 2. É possível observar que elas apresentaram formato bimodal (Duplo "S"), típico de solos com comportamento laterítico (Gitirana Jr. *et al.*, 2015), com exceção do solo PE, com características próximas de uma curva unimodal. As curvas de retenção apresentaram pontos de entrada de ar (VEA) bem definidos, com destaque para o solo TR, onde o patamar, característico desse tipo de curva, apresentou-se horizontal e delimitado. Nota-se ainda a semelhança das curvas características para valores de sucção acima de 10000 kPa. Nesse caso, a diferença entre os materiais torna-se mais perceptível na zona de macroestrutura, porção inicial da curva característica, associada aos poros de maiores dimensões. Autores como Feuerharmel (2007) e Salour *et al.* (2014) observaram tendência semelhante para dois solos coluvionares do sul do Brasil e dois solos de subleito encontrados na Suécia, respectivamente.

**Tabela 2:** Síntese dos resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica

Parâmetros	Solo PE	Solo CB	Solo TR	Solo RS
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	25,64	28,09	25,54	25,75
Limite de Liquidez (%)	41	56	39	47
Limite de Plasticidade (%)	18	25	20	29
Índice de Plasticidade (%)	23	31	19	18
% pedregulho (> 2,0 mm)	1	0	1	2
% areia grossa (0,6 mm – 2,0 mm)	5	2	12	11
% areia média (0,2 mm – 0,6 mm)	15	6	26	16
% areia fina (0,06 mm – 0,2 mm)	22	5	18	15
% silte (2 $\mu$ m – 0,06 mm)	22	19	13	14
% argila (< 2 $\mu$ m)	35	68	30	41
Classificação SUCS	CL	CH	SC	CL
Classificação AASHTO	A-7-6	A-7-6	A-6	A-7-6
$c'$	1,76	1,86	2,06	1,77
$d'$	145,80	60,70	115,40	80,00
Perda de Massa por Imersão – PI (%)	35	78	15	47
$e'$	0,79	1,04	0,69	0,90
Classificação MCT	LG'	LG'	LG'	LG'
Capacidade de Troca Catiônica CTC (cmolc/dm <sup>3</sup> )	5,1	4,2	4,6	4,3
pH (%)	5,3	5,3	4,9	5,0
$w_{ótima}$ (%)	17,1	28,7	15,1	19,9
$\gamma_d máx$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,40	14,71	17,87	16,47
ISC (%)	10	10	14	16
Expansão (%)	0,27	0,24	0,27	0,18

**Figura 2.** Curvas características sucção × umidade dos solos em estudo

Simulando uma possível variação no teor de umidade do subleito após a compactação, analisou-se qual a influência da variação de  $\pm 2\%$  no teor de umidade ótima na sucção dos solos em estudo. O solo PE apresentou uma sucção de 420 kPa na umidade ótima (17,1%), 140 kPa com o acréscimo de 2% (19,1%) e 530 kPa com a redução desse valor (15,1%). O solo CB com teor ótimo de 28,7% apresentou um valor de sucção de 14 kPa, decrescendo para 10 kPa com o acréscimo de 2% (30,7%) e chegando a 280 kPa quando ocorre redução de 2% na umidade ótima (26,7%). A influência mais significativa é perceptível nos valores obtidos para o solo TR, onde, na umidade ótima (15,1%), ele apresenta sucção de 16 kPa, com redução para 10 kPa na condição úmida (17,1%) e um aumento relevante da sucção, atingindo o valor de 1620 kPa, para um decréscimo de 2% (13,1%). O solo RS apresentou a menor variabilidade, com valores de sucção entre 6 kPa para a condição úmida (21,9%), 7 kPa para a umidade ótima (19,9%) e 70 kPa com a redução de 2% nesse valor (17,9%).

É possível verificar que, dependendo do tipo de solo, essa variação de 4% no teor de umidade pode provocar alterações significativas na capacidade de retenção de água desses materiais. Além disso, a sucção é um parâmetro importante no comportamento mecânico dos solos não saturados e qualquer variação nesse parâmetro influencia diretamente nas características de resistência e deformabilidade desses materiais. No caso dos solos estudados, o efeito dessa variação foi mais perceptível com a redução de 2% no teor ótimo (ramo seco), com exceção do solo PE, onde essa variação ocorreu em ambas situações ( $\pm 2\%$ ).

Analisando os parâmetros de resistência ao cisalhamento apresentados na Tabela 3 e as envoltórias de ruptura dos solos apresentadas na Figura 3, nota-se que, com o incremento da tensão normal, houve um acréscimo da tensão de cisalhamento para as três condições estudadas. O intercepto coesivo aumentou com a perda de umidade, devido ao acréscimo no valor da sucção. Isso não ocorreu para todos os valores de ângulo de atrito interno, variando de um solo para o outro.

No que tange aos pavimentos flexíveis, a resistência ao cisalhamento apresenta-se como uma propriedade importante, porém de relevância secundária na análise desse tipo de estrutura. Essa afirmação fundamenta-se no dimensionamento de camadas subjacentes ao subleito de modo a protegê-lo de tensões cisalhantes excessivas e, conseqüentemente, da ruptura por cisalhamento ou deformação permanente (advinda do cisalhamento), preconizado pelo método do DNIT. No entanto, em pavimentos delgados, não selados ou com revestimento primário, a resistência ao cisalhamento torna-se relevante e pode ser determinante na vida útil da estrutura. Nessa situação, a umidade apresenta um forte potencial destrutivo, visto o fácil acesso de água ao material. Variações na umidade de equilíbrio e, em decorrência, na sucção modificam a resposta do solo ao cisalhamento.

De um modo geral, observando a envoltória de cada um dos solos, é possível verificar que para um mesmo valor de tensão normal aplicada, o valor da tensão cisalhante máxima aumenta com o decréscimo do teor de umidade (secagem). Esse comportamento já era esperado, pois, com o decréscimo da umidade, há um acréscimo da sucção, acarretando em um ganho na resistência ao cisalhamento dos materiais.

Levando em consideração uma faixa de tensões normais atuantes em subleitos rodoviários observada por Santos (2016) (50 à 120 kPa), nota-se que o solo TR apresentou o pior comportamento à resistência dentre os solos estudados. Para as mesmas condições, os solos CB e RS apresentaram comportamentos semelhantes, com um leve desempenho superior do solo RS. Em contrapartida, verificou-se a superioridade do solo PE nas condições ótima e seca ( $W_{ótima-2\%}$ ), evidenciando novamente a influência da sucção na propriedade de resistência ao cisalhamento dos solos.

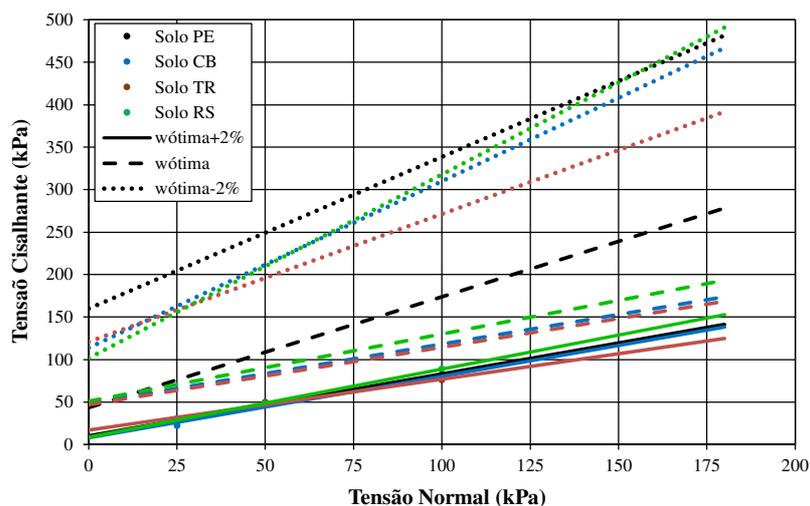
Conforme citado anteriormente, após a realização dos ensaios triaxiais de cargas repetidas, os dados obtidos foram analisados por meio de quatro modelos de previsão do MR presentes na literatura. A Tabela 3 apresenta os parâmetros  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  obtidos para cada modelo analisado, bem como o coeficiente de determinação  $R^2$  de cada par de amostra ensaiada. Destaca-se que o modelo universal da AASHTO (NCHRP 1-37A, 2004) também foi testado, apresentando ajuste estatístico semelhante ao modelo composto. Por este último constituir o modelo adotado no AEMC e no novo método de dimensionamento, atualmente, em desenvolvimento, optou-se por apresentar somente os seus parâmetros de regressão.

**Tabela 3:** Valores de intercepto coesivo, ângulo de atrito interno dos solos e os resultados da modelagem do MR

Condição de Umidade/Modelo	Parâmetros	Solo PE	Solo CB	Solo TR	Solo RS
W <sub>ótima</sub> +2%	c'	10,25	7,75	16,90	8,85
	φ	36,04	35,94	30,92	38,65
W <sub>ótima</sub>	c'	43,35	48,85	46,65	50,95
	φ	52,56	34,80	34,11	38,33
W <sub>ótima</sub> -2%	c'	159,89	113,60	121,16	101,72
	φ	60,79	63,00	56,38	65,18
Tensão Desvio (w <sub>ótima</sub> )	k <sub>1</sub>	138,97	44,05	215,98	218,77
	k <sub>2</sub>	0,01	-0,08	0,17	0,33
	R <sup>2</sup>	0,00	0,06	0,17	0,54
Tensão Confinante (w <sub>ótima</sub> )	k <sub>1</sub>	200,76	64,38	529,45	413,38
	k <sub>2</sub>	0,13	0,05	0,43	0,49
	R <sup>2</sup>	0,11	0,02	0,76	0,83
Invariante de Tensões (w <sub>ótima</sub> )	k' <sub>1</sub>	153,52	53,51	242,81	187,12
	k' <sub>2</sub>	0,09	-0,01	0,35	0,47
	R <sup>2</sup>	0,05	0,00	0,54	0,78
Modelo Composto	k <sub>1</sub>	216,02	76,37	624,31	484,39
	k <sub>2</sub>	0,254	0,311	0,644	0,488
	k <sub>3</sub>	-0,131	-0,252	-0,202	0,065
	R <sup>2</sup>	0,20	0,30	0,89	0,80
<b>Equações Finais – Modelo Composto<sup>1</sup></b>					
Solo PE	$M_R = 216,02 \cdot \sigma_3^{0,254} \sigma_d^{-0,131}$			$M_R = 136 \text{ MPa}^*$	
Solo CB	$M_R = 76,37 \cdot \sigma_3^{0,311} \sigma_d^{-0,252}$			$M_R = 54 \text{ MPa}^*$	
Solo TR	$M_R = 624,31 \cdot \sigma_3^{0,644} \sigma_d^{-0,202}$			$M_R = 144 \text{ MPa}^*$	
Solo RS	$M_R = 484,39 \cdot \sigma_3^{0,488} \sigma_d^{0,065}$			$M_R = 97 \text{ MPa}^*$	

\*Valores de MR para as tensões  $\sigma_3 = 0,05 \text{ MPa}$  e  $\sigma_d = 0,100 \text{ MPa}$ .<sup>1</sup>Equações utilizadas nas análises mecanicistas.

Observando os resultados, nota-se que o modelo composto, proposto por Pezo *et al.* (1992), apresentou o melhor desempenho, pois leva em consideração tanto a tensão confinante quanto a tensão desvio atuante (como variáveis independentes). Vale ressaltar que os parâmetros apresentados correspondem à média das duas amostras ensaiadas e que, mesmo assim, os valores de R<sup>2</sup> foram baixos para os solos PE e CB.

**Figura 3.** Envoltórias de ruptura dos quatro solos para os três teores de umidade ensaiados

A Figura 4 apresenta os gráficos tridimensionais obtidos para o modelo composto dos solos TR e RS. Os demais solos revelaram comportamento semelhante ao do solo TR, não sendo apresentados. Observando os gráficos é possível visualizar o comportamento elástico não linear dos

solos, evidente pela superfície irregular definida pelos módulos de resiliência a partir dos estados de tensões adotados por norma. Os solos PE, CB e TR apresentaram modelos com comportamento semelhante, onde os valores positivos do parâmetro  $k_2$  indicam um acréscimo no módulo de resiliência com a tensão confinante. Esse efeito não ocorre com o incremento da tensão desvio, devido aos valores negativos de  $k_3$ . O único material com comportamento distinto foi o solo RS, em que, além da influência da tensão confinante, o módulo de resiliência aumenta com a tensão desvio.

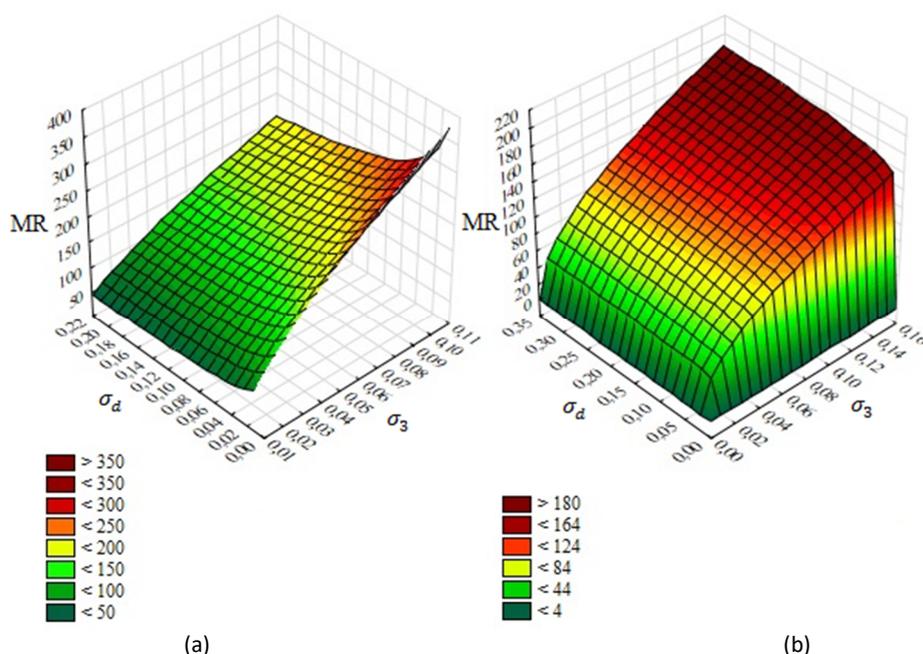


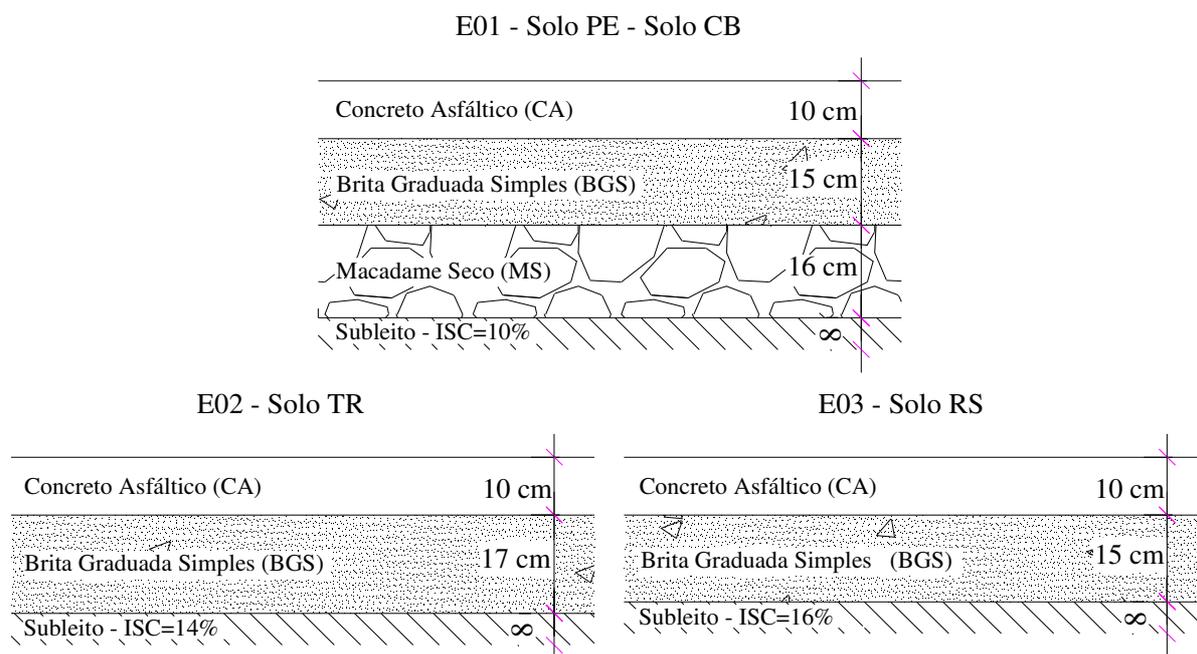
Figura 4. Gráfico tridimensional do modelo composto para o solo TR (a) e solo RS (b)

Para fins de comparação, optou-se pela obtenção de um módulo de resiliência linear. Para tal, adotou-se um par de tensões médio ( $\sigma_3 = 0,05$  MPa;  $\sigma_d = 0,100$  MPa), obtido a partir da norma DNIT-ME 134/2010 e compatível com um possível estado de tensões atuante no subleito, conforme verificado nas análises mecanicistas realizadas. O solo TR apresentou o maior módulo dentre os solos analisados (MR = 144 MPa). Uma possível explicação seria o fato de que o solo TR é o material com maior porcentagem de fração areia e, como visto anteriormente, o modelo não linear obtido para ele mostra uma influência maior da tensão confinante do que da tensão desvio. Como visto nos resultados dos ensaios de caracterização, os solos PE e RS apresentam granulometria similar com cerca de 57% de fração fina, divergindo em relação ao teor de argila presente. Por apresentar um teor de argila de aproximadamente 35%, o solo PE apresentou módulo resiliente próximo ao do solo TR (MR = 136 MPa), enquanto que o solo RS (teor de argila de 41%) apresentou módulo inferior (MR = 97 MPa). O solo CB, material com maior porcentagem de argila, apresentou o menor módulo de resiliência dos solos em estudo (MR = 54 MPa).

### 3.2. Análise Mecanicista

A Figura 5 ilustra as três estruturas dimensionadas em função dos solos em estudo. Ressalta-se que a estrutura E01 foi dimensionada para um ISC de 10%, referente aos solos PE e CB, a estrutura E02 para um ISC=14% (solo TR) e a estrutura E03 com base nos dados do solo RS

(ISC=16%). Nota-se que em razão do uso do método do DNIT, tanto a estrutura E02 quanto a estrutura E03 não apresentaram camada de sub-base.



**Figura 5.** Estruturas dimensionadas a partir do método de dimensionamento do DNIT

Com o intuito de analisar o desempenho dos pavimentos dimensionados através do método adotado pelo DNIT e verificar a influência do módulo de resiliência nessas estruturas, foram utilizados dois programas computacionais que permitiram uma visão geral da resposta mecânica desses pavimentos, quando submetidos à ação do tráfego de veículos.

A Tabela 4 apresenta as deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento, obtidas através da ferramenta AEMC, bem como o número de solicitações que o pavimento suporta sem sofrer ruptura pelo mecanismo de fadiga para as estruturas iniciais analisadas. Na mesma tabela, são apresentadas as novas espessuras de concreto asfáltico, as deformações de tração no fundo do revestimento e o número de solicitações à fadiga para as estruturas redimensionadas, com o objetivo de avaliar a espessura de revestimento necessária para que o pavimento atinja a vida útil de 10 anos sem sofrer ruptura.

**Tabela 4:** Resultados obtidos através da ferramenta AEMC aplicados no modelo de desempenho à fadiga do FHWA

Solo	N <sub>PROJETO</sub>	Estrutural Inicial - DNIT		Estrutura Redimensionada		Espessura (cm)
		$\epsilon_t$	N <sub>FADIGA</sub>	$\epsilon_t$	N <sub>FADIGA</sub>	
Solo PE – E01	2,50E+07	2,92E-04	8,49E+06	2,13E-04	2,57E+07	13,5
Solo CB – E01		3,37E-04	5,13E+06	2,06E-04	2,89E+07	15,5
Solo TR – E02		3,06E-04	7,20E+06	2,11E-04	2,66E+07	14,0
Solo RS – E03		3,62E-04	3,99E+06	2,13E-04	2,57E+07	15,5

Analisando os resultados apresentados para as estruturas iniciais, nota-se que a estrutura E01, dimensionada adotando o solo PE como subleito, sofreu a menor deformação de tração no fundo do revestimento. Isso indica uma rigidez superior desse material. Porém, como citado anteriormente, ao optar-se por utilizar os módulos de resiliência não lineares, a resposta da estrutura será em função do estado de tensões nela atuante. No caso das estruturas E02 e E03

dimensionadas respectivamente para os solos TR e RS, isentas da camada de sub-base, as tensões no topo do subleito foram superiores, o que explica o decréscimo na rigidez desses materiais e as elevadas deformações de tração no fundo do revestimento.

Considerando a faixa de tráfego analisada, em todos os casos, o  $N_{FADIGA}$  foi inferior ao número de solicitações previsto em projeto ( $N_{PROJETO}$ ), ou seja, um pavimento projetado através do método de dimensionamento do DNIT para um período de 10 anos romperá, devido ao trincamento por fadiga, antes do tempo previsto. Isso deixa evidente a importância do módulo de resiliência, em especial do solo empregado no subleito, no comportamento mecânico da estrutura. Outro fato, não menos importante, é a correlação falha entre módulo de resiliência e ISC, comprovado através do comportamento da estrutura E03, quando submetida aos carregamentos cíclicos. Mesmo apresentando o melhor ISC dentre os solos em estudo, a estrutura E03, dimensionada adotando o solo RS como subleito, apresentou o pior desempenho em relação à deformação resiliente, ou seja, a estrutura romperá devido ao trincamento por fadiga, por não apresentar uma estrutura dimensionada adequadamente à sua rigidez.

Logo, para todas as estruturas analisadas, fez-se necessário o redimensionamento da camada de revestimento, variando em acréscimos na ordem de 3,5 cm a 5,5 cm. De modo geral, com o aumento da espessura da camada de revestimento, ocorreu um decréscimo nas deformações de tração no fundo do revestimento e, conseqüentemente, um acréscimo no número de solicitações admissíveis ao trincamento por fadiga, sendo superior ao N definido em projeto.

A projeção do comportamento das estruturas ao longo dos anos em relação à deformação permanente e à ruptura por fadiga, obtida por meio do *AASHTOWare Pavement*, é apresentada na Figura 6. Pode-se perceber que, em nenhum dos casos, os pavimentos atingem o tempo de vida útil para o qual foram dimensionados (10 anos).

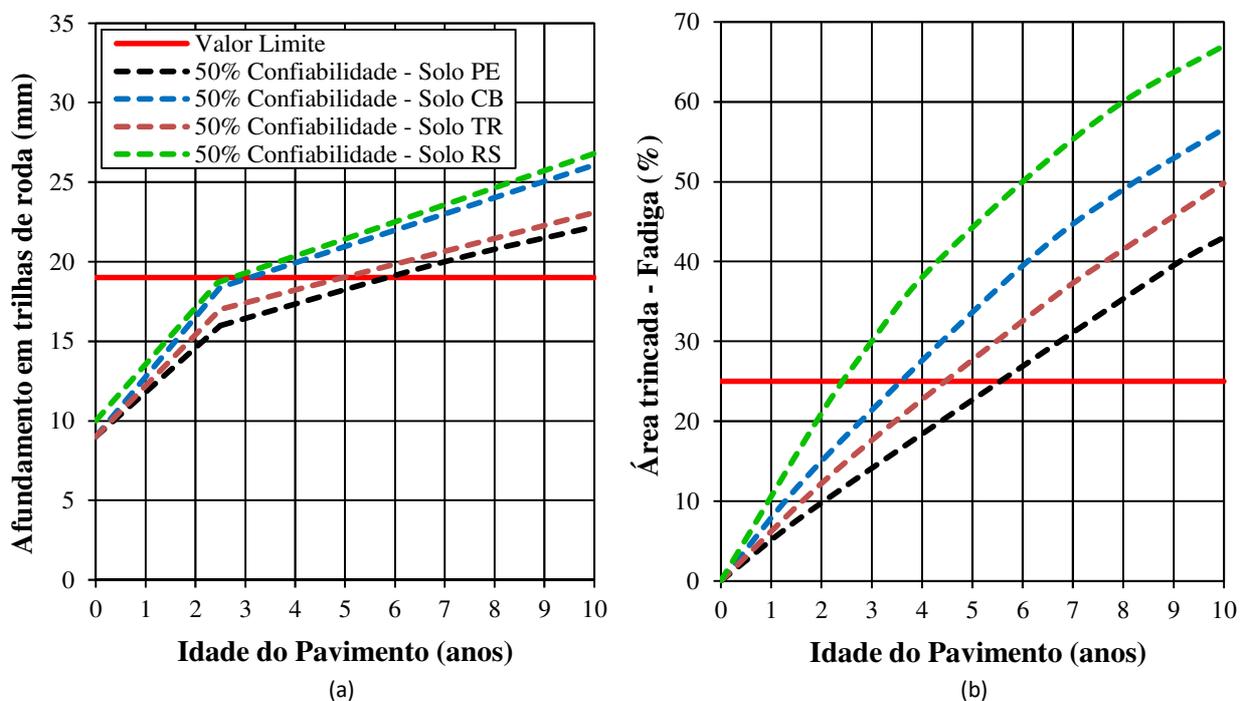


Figura 6. Comportamento dos solos em estudo em relação à deformação permanente (a) e à ruptura por fadiga (b)

A estrutura E01, utilizando o solo PE como subleito, apresentou o melhor desempenho, com vida útil média de cinco anos e meio, sendo o trincamento por fadiga o mecanismo responsável pela ruptura do pavimento. A mesma estrutura adotando o solo CB apresentou uma vida útil bastante inferior, cerca de dois anos e oito meses, rompendo, nesse caso, por deformação permanente. Esse comportamento do pavimento já era esperado, pois o solo CB é um material altamente argiloso, com baixo módulo de resiliência e suscetível a sofrer alta deformação plástica, reforçando a necessidade de estudos acerca do comportamento à deformação permanente de solos empregados na pavimentação.

O solo TR (estrutura E02) apresentou uma vida útil de aproximadamente quatro anos e meio, sendo a fadiga o seu mecanismo de ruptura. Semelhante à análise feita no AEMC, a estrutura E03 (solo RS) também apresentou o pior desempenho no *AASHTOWare*. O seu tempo de vida é de dois anos e quatro meses e o seu mecanismo de ruptura, assim como o solo PE e o solo TR, é o trincamento por fadiga.

Tal qual na análise realizada através da ferramenta AEMC, foi possível comprovar a importância do módulo de resiliência do solo empregado como subleito no comportamento e no desempenho dos pavimentos ao longo dos anos. Em ambas as análises, utilizando diferentes softwares, constatou-se a limitação do atual método de dimensionamento em vigor no Brasil, evidenciando a necessidade da implantação de um novo método, em que as características mecânicas dos materiais empregados em todas as camadas sejam consideradas.

#### 4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados analisados, a peculiaridade dos solos tropicais e a falha na classificação por parte dos sistemas de classificações internacionais ficaram evidentes no que diz respeito às características e classificação dos solos em estudo. Todos os materiais apresentaram valores superiores ao descrito em norma no que se refere aos solos empregados em subleitos rodoviários ( $ISC \geq 2\%$  e  $Expansão \leq 2\%$ ).

Os módulos de resiliência mostraram-se compatíveis com o esperado para solos com essa aplicação, destacando a superioridade de rigidez do solo TR, quando comparado aos demais materiais em estudo. No geral, dentre os modelos de previsão do módulo de resiliência analisados, os modelos composto e da AASHTO apresentaram os melhores ajustes matemáticos, pois consideram o estado de tensões atuante no material. Apesar da tendência brasileira em utilizar o modelo composto, vale destacar os baixos valores de  $R^2$  dos solos PE e CB, evidenciando a necessidade de novas pesquisas acerca de modelos que melhor representem os solos brasileiros.

Ao analisar-se a influência da variação de  $\pm 2\%$  do teor de umidade na sucção dos solos, observou-se um maior impacto na trajetória de secagem, com exceção do solo PE, onde a variação ocorreu em ambas as situações, provavelmente devido à peculiaridade de sua curva característica (comportamento unimodal).

Em relação aos principais parâmetros de resistência, houve aumento da coesão com a perda de umidade, devido ao aumento da sucção. Os valores de ângulo de atrito não seguiram o mesmo comportamento, variando de um solo para o outro. Analisando uma mesma faixa de tensões normais, o solo PE apresentou maior resistência ao cisalhamento nas condições ótima e seca ( $W_{ótima-2\%}$ ), enquanto que o solo TR apresentou o pior desempenho em relação à resistência em todas as condições estudadas. Esse desempenho satisfatório do solo PE confirma a influência da sucção na propriedade de resistência dos solos em estudo.

A partir das análises numéricas realizadas no AEMC, verificou-se que o número de solicitações admissíveis à fadiga, em todos os casos, foi inferior ao número de solicitações previsto em projeto, exigindo o redimensionamento da camada de revestimento. Isso evidencia a limitação do atual método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, no que diz respeito ao mecanismo de ruptura por fadiga, para o nível de tráfego adotado na pesquisa. A correlação entre módulo de resiliência e ISC mostrou-se totalmente falha, evidenciado, nesse caso, pelo comportamento da estrutura E03.

Nas simulações realizadas no *AASHTOWare Pavement ME Design*, nenhuma das estruturas atingiu o tempo de vida de 10 anos para o qual foram dimensionadas, mostrando novamente a limitação do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis adotado pelo DNIT. A maioria das estruturas sofreu ruptura por fadiga, variando o seu tempo de vida útil entre dois anos e quatro meses a cinco anos e meio, dependendo do solo adotado. Somente a estrutura E01, dimensionada para o solo CB, apresentou ruptura por deformação permanente, devido à sua composição granulométrica.

No geral, as análises comprovaram a importância do módulo de resiliência no dimensionamento dos pavimentos, não só dos materiais empregados como subleito, foco deste artigo, como também dos materiais empregados nas demais camadas do sistema.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Rede Temática de Asfalto/Petrobras pelo suporte a pesquisa, ao CNPQ, Fapergs e Capes, pelo apoio financeiro concedido, e às equipes técnicas dos grupos GEPPASV/UFMS e LAPAV/UFGRS, pela contribuição no desenvolvimento deste estudo.

#### REFERÊNCIAS

- AASHTOWare (2015) *AASHTOWare Pavement ME Design – For state-of-the-art pavement design*. Disponível em <<http://www.aashtoware.org/Pavement/Pages/default.aspx>> acesso em novembro, 2015.
- ABNT (2016) *NBR 6459. Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, RJ. 6p. Origem: MB-30.
- ABNT (2016) *NBR 6508. Grãos de solos que passam na peneira de 4.8 mm – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, RJ. 8p. Origem: MB-28.
- ABNT (2016) *NBR 7180. Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, RJ. 3p. Origem: MB-31.
- ABNT (2016) *NBR 7181. Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, RJ. 13p. Origem: MB-32.
- ABNT (2016) *NBR 7182. Solo – Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro, RJ. 10p. Origem: MB-33.
- ABNT (2016) *NBR 9895. Solo – Índice de Suporte Califórnia – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, RJ. 13p.
- ASTM (2011) *D 3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM (2010) *D 5298. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*. Annual Book of ASTM Standards.
- BALBO, J. T. (2007) *Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 558 p.
- BASTOS, J. B. S (2013) *Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- BASTOS, J. B. S.; HOLANDA, A. S.; BARROSO, S. H. A. (2013) Comparação da influência da variação da umidade de compactação e de pós-compactação nas análises e no dimensionamento de pavimentos flexíveis. *Anais do XXVII Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte*, ANPET, Belém, PA.
- BENEVELI, R. M. (2002) *Estudo dos efeitos de umedecimento e secagem na resistência ao cisalhamento de um solo compactado em laboratório*. Dissertação (Mestrado), Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, RJ.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. (2010) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEDA.
- BONZANINI, J. A. F. (2011) *Estudo dos efeitos do tamanho de corpos de prova no módulo de resiliência de quatro solos*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- DNER (1994) *ME 256. Solos compactados com equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão*. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER (1994) *ME 258. Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV*. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2006a) *IPR 719. Manual de Pavimentação*. 3.ed. Rio de Janeiro, RJ. 274p.
- DNIT (2006b) *IPR 720. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ. 310p.

- DNIT (2010) *ME 134. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, RJ.
- FERNANDES, P. G. P. S.; VALOURA, L. R.; ESPÍNDOLA, A. C.; CIRÍACO, T. G. M. (2017) Estudo comparativo dos métodos empírico do DNER e mecanístico-empírico pelo SISPAV aplicado a rodovia BR-316. *Anais do XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte*, ANPET, Recife, v.1, p. 1217 – 1226.
- FERNANDES, W. D. (2016) *Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil e o método da AASHTO*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- FERREIRA, J. G. H. M. (2008) *Tratamento de dados geotécnicos para predição de módulos de resiliência de solos e britas utilizando ferramentas de Data Mining*. Tese (Doutorado), COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- FEUERHARMEL, C. (2007) *Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da formação Serra Geral*. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- FRANCO, F. A. C. P. (2007) *Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV*. Tese (Doutorado), COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- FREDLUND, D. G. (1996) *The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics*. The Fourth Spencer J. Buchanan Lecture, College Station, Texas, A&M University Press, 39p.
- GEHLING, W. Y. Y.; CERATTI, J. A. P.; NÚÑEZ, W. P.; RODRIGUES, M. R. (1998) A study of the influence of suction on the resilient behavior of soils from Southern Brazil. *Proceedings of International Conference on Unsaturated Soils*, Beijing, China, v.1, p. 47-53.
- GITIRANA JR., G. F. N.; MARINHO, F. A. M.; ALFARO SOTO, M. A. (2015) A curva de retenção da água de materiais porosos. In: CAMAPUM DE CARVALHO *et al. (orgs.) Solos não saturados no contexto geotécnico*. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo.
- GUIMARÃES, A. C. R.; SANTOS, G. P. P.; MOTTA, L. M. G. (2012) Mechanical Behavior of Materials used for Paving in the Southwest of the Brazilian Amazon. *Procedia: Social and Behavioral Sciences*, v. 48, p. 3348-3360. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1300.
- HEYDINGER, A. G. (2003) Evaluation of seasonal effects on subgrade soils. *Transportation Research Record*, v. 1821, n.1, p. 47–55. DOI: 10.3141/1821-06.
- KHOURY, N. N.; ZAMAN, M. M. (2004) Correlation between resilient modulus, moisture variation and soil suction for subgrade soils. In: *Geology and Properties of Earth Materials*, Washington, D.C. *Journal of the Transportation Research Board*. n. 1874, p. 99-107. DOI: 10.3141/1874-11.
- KLAMT, R. A. (2014) *Influência da ação do tráfego no custo de construção e restauração de pavimentos asfálticos*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- LI, D.; SELIG, E. (1994) Resilient modulus for fine-grained subgrade soils. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE, v. 120, n. 6, p. 939-957. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:6(939).
- MARINHO, F. A. M. (1995) A técnica do papel filtro para a medição de sucção. *Anais do Encontro sobre Solos Não Saturados*, Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, p.112-125.
- MARINHO, F. A. M. (1997) Medição de sucção em solos. *Anais do III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, NSAT97*, Rio de Janeiro, v. 02, p. 373-397.
- MATTOS, J. R. G. (2014) *Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS – A implantação do projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul*. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- MEDINA, J.; PREUSSLER, E. S. (1980) Características Resilientes de Solos em Estudos de Pavimentos. Rio de Janeiro. *Solos e Rochas*, p. 03-26.
- MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. (2015) *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro, RJ. Editora Interciência. 3ª ed., 638 p.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G.; SANTOS, J. D. G. (2006) Deformability characteristics of brazilian laterites. *Geotechnical and Geological Engineering*. v.24, p. 949-971. DOI: 10.1007/s10706-005-8507-z.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM – NCHRP 1-37A (2004) *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures – Final Report*. Transportation Research Board.
- NÚÑEZ, W. P. (1997) *Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados*. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- PARREIRA, A. B.; GONÇALVES, R. F. (2000) The influence of moisture content and soil suction on the resilient modulus of a lateritic subgrade soil. In: *GeoEng – An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering*, Melbourne, Australia.
- PEZO, R. F.; CLAROS, G.; HUDSON, W. R.; STOKOE II, K. H. (1992) *Development of a reliable resiliente modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design*. Research Report 1177-4F, Center for Transportation Research (CTR), The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
- PREUSSLER, E. S. (1978) *Ensaio Triaxiais Dinâmicos e um solo Arenoso*. Tese (Mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- RIBAS, J. (2014) *Parâmetros elásticos típicos de materiais de pavimentos flexíveis do Rio Grande do Sul e sua aplicação em uma análise de custo/benefício*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- SALOUR, F.; ERLINGSSON, S.; ZAPATA, C. E. (2014) Modelling resilient modulus seasonal variation of silty sand subgrade soils with matric suction control. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 51, No. 12, pp. 1413-1422. DOI: 10.1139/cgj-2013-0484.

- SANTOS, T. A. (2016) *Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- SOUZA, M. L. (1981) *Método de projeto de pavimentos flexíveis*. 3ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, (IPR. Publ. 667).
- SVENSON, M. (1980) *Ensaio Triaxiais Dinâmicos de Solos Argilosos*. Tese (Mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- TAKEDA, M. C. (2006) *A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista*. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, SP.
- WERK, S. M. S. (2000) *Estudo da influência dos métodos de compactação no comportamento resiliente de solos*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- YANG, S. R., HUANG, W. H., TAI, Y. T. (2005) Variation of resilient modulus with soil suction for compacted subgrade soils. *Transportation Research Record*, v. 1913, n. 1, p. 96-106. DOI: 10.3141/1913-10.