



Influência da Densificação do Solo de Subleito no Desempenho de Pavimentos Flexíveis The influence of Subgrade Soil Densification in the Performance of Flexible Pavements

André Iuri Sena Carvalho¹; Mario Sergio de Souza Almeida¹; Wallace John Pereira Pedreira¹; Weiner Gustavo Silva Costa¹ & Maria do Socorro Costa São Mateus²

¹Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas,
Av. Rui Barbosa, 710, 44380-000, Cruz das Almas, BA, Brasil

²Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Av. Transnordestina, s/n, 44036900, Feira de Santana, BA, Brasil
Emails: andreyuri_28@hotmail.com; mario.almeida@ufrb.edu.br; wallacejppedreira@gmail.com; weiner@ufrb.edu.br; somateus@gmail.com

Recebido em: 03/07/2020 Aprovado em: 22/08/2020

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_253_262

Resumo

O presente estudo teve como objetivo avaliar a contribuição de um solo de subleito no desempenho de pavimentos flexíveis, quando submetido a diferentes energias de compactação. Considerando-se que a resposta elástica dos materiais granulares varia em função da densificação, uma areia argilosa da região do Recôncavo da Bahia foi caracterizada e submetida a ensaios de compactação, com energias crescentes, até alcançar a máxima densificação possível para esse material. Em seguida, todas as amostras compactadas foram submetidas ao ensaio de Índice Suporte Califórnia (ISC) e com os valores obtidos, dimensionou-se estruturas de pavimento flexível, em função das diferentes energias de compactação. A análise do comportamento tensão-deformação foi inicialmente realizada para o solo compactado com 26 golpes (energia Intermediária), adotado como estrutura de referência nesse estudo, capaz de suportar um tráfego pesado. A partir desses resultados, as demais estruturas também foram simuladas por meio do software de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC). Os resultados mostraram que, para o solo estudado, a utilização de energia de compactação superior (70 golpes) ao Proctor intermediário (26 golpes) melhorou o desempenho estrutural do pavimento flexível analisado.

Palavras-chave: *Energia de compactação; AEMC; análise mecânica*

Abstract

The present study aimed to evaluate the contribution of a subgrade soil in the performance of flexible pavements, when submitted to different compaction energies. Considering that the elastic response of granular materials varies depending on densification, a clayey sand from the Recôncavo of Bahia region was characterized and subjected to compaction tests, with increasing energies, until reaching maximum possible densification for this material. Then, all compacted samples were submitted to the California Bearing Ratio (CBR) test and with the values, flexible pavement structures were dimensioned, according to the different compaction energies. The analysis of stress-strain behavior was initially performed for the compacted soil with 26 strokes (Intermediate energy), adopted as a reference structure in this study, capable of withstanding heavy traffic. From these results, the other structures were also simulated using the AEMC software. The results showed that, for the studied soil, the use of superior compaction energy (70 strokes) to the intermediate Proctor (26 strokes) improved the structural performance of the analyzed flexible pavement.

Keywords: *Compaction energy; AEMC; mechanical analysis*

1 Introdução

A busca pela racionalização nos projetos de pavimentos flexíveis e semirrígidos passa, necessariamente, pela utilização de materiais locais, minimizando, sobretudo, os impactos que elevadas distâncias de transporte geram sobre os custos finais das obras rodoviárias. O conhecimento das características de um solo em obras Geotécnicas apresenta-se como algo imprescindível, uma vez que o dimensionamento dos pavimentos está intimamente relacionado à qualidade dos materiais de construção disponíveis. Tal conhecimento, que se inicia pela adequada caracterização e classificação do solo (Couto & Gomes, 2019; Silva *et al.*, 2019), pode viabilizar o uso de materiais locais e proporcionar, além da redução de custos, a redução dos impactos ambientais relacionados a estas obras. Entretanto, parte significativa dos solos presentes nos subleitos não atendem, à priori, às especificações mínimas exigidas para sua utilização. As normatizações mais modernas em todo o mundo caracterizam solos para pavimentação, via de regra, em relação ao Módulo de Resiliência (MR) e deformação permanente (ϵ_p). A determinação destes parâmetros no laboratório, através de ensaios triaxiais de cargas repetidas, e no campo, por ensaios não destrutivos e uso de simuladores de tráfego, tem sido estudada por diferentes autores (Cai *et al.*, 2015; Chai *et al.*, 2015; Ji *et al.*, 2015), embora não seja uma rotina na prática da Engenharia Rodoviária. Diferentes iniciativas em todo o mundo vêm buscando caracterizar o MR de solos locais (Mousa *et al.*, 2017) ou mesmo obtê-los através de correlações com outros ensaios (Mousavi *et al.*, 2018; Yao *et al.*, 2018). Neste sentido, Leung *et al.* (2013) reexaminaram as correlações clássicas entre MR e o Índice de Suporte Califórnia, ISC (ou CBR – *California Bearing Ratio*), para uso em solos saprolíticos compactados. Os autores realizaram uma vasta campanha experimental, na qual foi possível estimar o MR com base em valores de ISC e no nível de compactação do solo. Em suas conclusões, os autores mostraram que a influência da densidade de compactação do solo nos valores de ISC e MR é relativamente significativa quando o solo está na condição não saturada, enquanto o grau de saturação se torna um fator predominante quando o solo está na condição mais úmida.

Quando um material de subleito apresenta comportamento deficiente em termos de módulo de resiliência e/ou deformação permanente, parte das soluções rotineiramente adotadas passam por removê-los e substituí-los por outros de qualidade superior, enquanto outras iniciativas buscam utilizar o material contemplando o emprego de sofisticadas técnicas de estabilização (Pancar & Akpınar, 2016; Tang *et al.*, 2016; Eujine *et al.*, 2017). Ambas as soluções culminam em custos expressivos nas obras de pavimentação, as quais, dependendo do seu porte, poderão

ser inviabilizadas. Entretanto, a estabilização do solo local de subleito, quando possível, através de sua compactação (densificação), pode se apresentar como uma alternativa atraente. A utilização de energias de compactação maiores pode promover aumento no ISC e, conseqüentemente, no MR, reduzindo a deformação permanente do solo.

Segundo Tatsuoka & Correia (2018), a massa específica seca máxima (ρ_{dmax}) aumenta e a umidade ótima diminui com o aumento da energia de compactação e o solo se torna mais compactável, normalmente com o aumento no coeficiente de uniformidade sem um aumento excessivo no conteúdo de finos ou com um aumento no diâmetro das partículas para o mesmo coeficiente de uniformidade.

Os benefícios da densificação do solo de subleito também podem ser avaliados por meio de softwares, desenvolvidos para o dimensionamento estrutural das camadas de pavimentos. De acordo com Segundo *et al.* (2016), o uso de software para cálculo de tensões, deformação e deslocamentos em pontos específicos de interesse no pavimento, permite estimar e avaliar a contribuição de cada camada no desempenho do pavimento ao longo do tempo de utilização.

Lima *et al.* (2020) avaliaram o comportamento mecânico de 18 solos finos, classificados pela metodologia MCT como lateríticos, de três regiões do Brasil, a partir de ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente, com amostras compactadas na energia normal (3) e intermediária (15). Adicionalmente, amostras de um dos solos foram compactadas com umidades variando $\pm 2\%$ em relação a ótima, na energia intermediária. Os autores analisaram o comportamento dos diferentes materiais em relação a deformação permanente com auxílio do software de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), que é uma das sub-rotinas para análises tensão-deformação no MeDiNa, eixo central do método de dimensionamento mecânico/empírico brasileiro em desenvolvimento, que também inclui critérios de projeto baseados nas características de materiais das diferentes regiões do país. Os resultados demonstraram que a variação de umidade de $+2\%$ em relação a umidade ótima implicou no aumento da deformação do solo analisado, embora a capacidade estrutural apresentada por todos os solos avaliados, em termos de deformação permanente, os credenciaram para serem utilizados em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis para tráfego considerado pelo DNIT (2006) como leve ($N = 1 \times 10^6$) e como pesado ($N = 1 \times 10^7$).

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência da densificação com o aumento da energia de compactação do solo de subleito, sobre o desempenho e vida útil de pavimentos flexíveis, a partir de dados de ISC de um solo areno-argiloso, típico da região do Recôncavo da Bahia, compactado com energias crescentes, superando as energias normalizadas.

2 Material e Métodos

O solo utilizado neste estudo foi um Latossolo amarelo distrocoeso, de grande ocorrência na região do Recôncavo da Bahia, coletado no campo experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). Segundo Rodrigues *et al.* (2009), estes solos apresentam como características o fato de serem bastante profundos, desenvolvidos sobre material sedimentar e ocuparem áreas de relevo plano e suave ondulado dos tabuleiros.

Os Latossolos, classificados como lateríticos, compreendem solos constituídos por material mineral em avançado estágio de intemperização e baixa capacidade de troca de cátions da fração argila, tendo a caulinita como argilomineral predominante (EMBRAPA, 2018).

O programa experimental desenvolvido foi dividido em cinco etapas principais. A primeira constou da coleta, separação e preparação de amostras de solo para realização de cada ensaio previsto. Na segunda etapa, executou-se os ensaios de caracterização geotécnica e química. Na terceira etapa, foram realizados os ensaios para classificação do solo pela metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical). Na quarta etapa, foram realizados os ensaios de compactação e Índice Suporte Califórnia (ISC), para as diferentes energias de compactação previstas. Por fim, na última etapa, utilizou-se o software AEMC para realizar análise do comportamento mecânico de um pavimento flexível de referência, considerando os resultados de densidade e ISC obtidos para as diferentes energias de compactação testadas.

2.1 Coleta da amostra de solo

A coleta foi realizada a uma profundidade de, aproximadamente, 1 m abaixo da superfície, em uma mesma camada. Foram coletados em torno de 600 kg de solo, suficientes para realizar os ensaios de caracterização geotécnica e química, compactação e ISC. Todos os procedimentos realizados para a coleta das amostras seguiram as recomendações da norma DNER (1994a). A preparação das amostras seguiu as orientações da norma DNER (1994b).

2.2 Ensaio de caracterização do solo

Na caracterização geotécnica foram realizados os ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação (DNER, 1994c), limite de plasticidade (DNER, 1994d), densidade real (DNER, 1994e) e limites de liquidez (DNER, 1994f). Para os ensaios de compactação e ISC, utilizou-se as normas DNIT (2013) e DNIT (2016), respectivamente.

Na caracterização química, para identificação do tipo de argilomineral presente na fração fina do solo estudado, foi realizada uma avaliação para os seguintes atributos

químicos: pH em água e em KCl (relação solo:solução de 1:2,5); cátions trocáveis, por titulação após extração com solução de 1 mol KCl; por fotometria de chama, após extração com Mehlich-1; H+Al extraídos com acetato de cálcio 0,5 molL⁻¹ a pH 7,0 e determinado com NaOH 0,025 molL⁻¹. Baseado nestes dados e no teor de argila do solo, foram calculadas a capacidade de troca de cátions (CTC), pela soma do resultado de bases trocáveis (Ca²⁺ + Mg²⁺ + Na⁺ + K⁺) e acidez (H+Al), e da atividade da argila (T), referente à capacidade de troca de cátions correspondente à fração argila, calculada pela Equação 1, além de calcular saturação por base (V) (EMBRAPA, 2018). Foram avaliados também os teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, presentes na fração de argila do solo, a fim de se determinar as relações moleculares Ki e Kr, as quais indicam a presença de argilominerais existentes no solo, calculados pelas Equações 2 e 3 (EMBRAPA, 2018).

$$T = \frac{CTC \cdot 100}{\text{teor de argila} (\%)} \quad (1)$$

$$Ki = 1,70 \cdot \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (2)$$

$$Kr = 1,70 \cdot \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 \cdot 0,6375} \quad (3)$$

2.3 Ensaio da metodologia MCT

Os ensaios necessários para classificação pela metodologia MCT consistem em compactação de amostras em miniatura (Mini-MCV) e perda de massa por imersão. O primeiro consistiu na compactação, em energias variáveis, de corpos de prova em miniatura ($\varnothing = 50$ mm). Com o solo devidamente preparado, foram aplicados golpes sucessivos no compactador Mini-MCV e a altura do corpo de prova foi verificada com a utilização de extensômetro, interrompendo-se o processo quando atingisse uma das três condições: a) diferença inferior a 2mm 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) atingir 256 golpes.

No ensaio de perda de massa por imersão, os corpos de prova compactados foram extrudados em 10,0 mm para fora do molde cilíndrico. Em seguida, o conjunto foi colocado em posição horizontal e imerso em água, de forma a garantir uma lâmina d'água não inferior a 1 cm acima da superfície externa do molde. Foram colocadas cápsulas para coleta do solo, caso porções dos corpos de prova se desprendessem. Os conjuntos ficaram imersos por 20 horas, no mínimo. Os ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão foram realizados conforme os procedimentos prescritos nas normas DNER (1996), DNER (1994g) e DNER (1994h).

2.4 Ensaios de compactação e ISC

Foram realizados ensaios para determinação das curvas de compactação, com amostras não trabalhadas, nas energias definidas na norma DNIT (2013), que utilizam 12, 26 e 55 golpes. Para cada curva, determinou-se os parâmetros ótimos de compactação, ou seja, a massa específica seca máxima (ρ_{dmax}) e a umidade ótima (w_{ot}) correspondentes. Com o objetivo de alcançar a máxima densificação possível do material, continuou-se aumentando a energia de compactação, em relação a energia anteriormente aplicada, aumentando o número de golpes para 70, 83, 100 e 120, conforme recomendação do DER-PR (2018), até que ρ_{dmax} deixasse de crescer. Com auxílio da Equação 4 foi possível calcular a energia aplicada (Tabela 1), considerando, para cada número de golpes (N), o número de camadas (n) igual a 5, altura de queda do soquete (H) de 45,72 cm, massa do soquete (P) de 4,536 kg e volume do cilindro (V) de 2085 cm³, conforme DNIT (2013).

$$E = \frac{n.N.P.H.98,1}{V} \quad (4)$$

Número de golpes	Energia (kN.m/m ³)
12	585,5
26	1268,5
55	2683,3
70	3415,2
83	4049,4
100	4878,8
120	5854,5

Tabela 1 Energias de compactação utilizadas.

Cada amostra compactada com diferente energia, foi submetida ao ensaio de ISC, seguindo as recomendações da norma DNIT (2016). Em atendimento à norma DNIT (2013), todas as amostras foram pesadas antes e após a imersão em água por 96h. Para quantificar a perda de resistência do solo entre a umidade ótima e a condição inundada, foram moldadas, adicionalmente, amostras na umidade ótima, sendo uma para cada energia, as quais foram ensaiados na prensa de ISC nessa umidade, ou seja, sem imersão (ISC_{OT}).

2.5 Simulação do pavimento de referência

De forma a avaliar os efeitos do aumento da energia de compactação aplicada ao solo de subleito sobre o projeto

de pavimento flexível, foi dimensionada, empiricamente, uma estrutura de referência com as seguintes premissas:

a) número de operações do eixo padrão de 80 kN: ($N_{projeto}$) de $1,6 \times 10^7$, para USACE, e $5,0 \times 10^6$, para AASTHO, tomados como referência os valores médios nas rodovias federais sob administração do DNIT no Estado da Bahia.

b) estrutura composta por 10 cm de revestimento (R) em concreto asfáltico, função do $N_{projeto}$ da USACE (DNIT, 2006), por materiais de base (B) e sub-base (SB) granulares e subleito (SL), sendo este último o próprio solo do presente estudo, compactado na energia do Proctor intermediário, cujas características estão listadas na Tabela 2.

Parâmetro	Camada		
	B	SB	SL
ISC (%)	> 80	> 20	9,4
Expansão (%)	< 0,5	< 1	0
Limite de liquidez (%)	< 25	-	31
Índice de Plasticidade (%)	< 6	-	7
Índice de Grupo (IG)	0	0	3
E. de areia (%)	> 30	-	-
k	1,0	0,89	-

Tabela 2 Características dos materiais das camadas do pavimento de referência.

Para determinação das espessuras das camadas constituintes do pavimento de referência, em centímetro, utilizou-se a Equação 5 da norma DNIT (2006), função do número N adotado e do ISC do subleito (Tabela 1).

Assim, a espessura total mínima do pavimento de referência (H_T), calculada de acordo com a Equação 5, é de 48 cm. Aplicando as inequações previstas na norma DNIT (2006), obteve-se as espessuras das camadas constitutivas do pavimento de referência (P1) apresentado na Figura 1.

$$H_T = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (5)$$

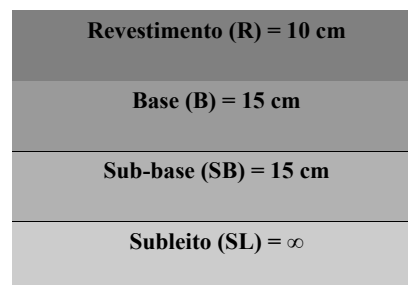


Figura 1 Pavimento de referência (P1).

2.6 Análise tensão-deformação

Após o dimensionamento empírico do pavimento de referência (Figura 1), foram realizadas verificações estruturais através de respostas tensão-deformação, para a estrutura inicialmente dimensionada e considerando as contribuições estruturais da camada de subleito, função das crescentes energias de compactação testadas. Para que essa avaliação estrutural fosse elaborada, utilizou-se conceitos estabelecidos na Mecânica dos Pavimentos. De forma resumida, essa ciência estabelece que para caracterização mecânica de qualquer material de pavimentação, é necessário determinar seu Módulo de Resiliência (MR), sendo este a relação entre a tensão desviadora (s_d) e a deformação resiliente (e_r), em função do estado de tensão a que o material esteja submetido, além do coeficiente de Poisson (ν). Embora o MR e o coeficiente de Poisson devam ser determinados experimentalmente, as normas de projeto de pavimento flexível vigentes no Brasil (DNIT, 2006; DER-SP, 2006) apresentam valores de referência e correlações. Para o solo de subleito estudado, estes parâmetros foram definidos utilizando o DER-SP (2006), que sugere um coeficiente de Poisson igual a 0,40 e a Equação 6 para cálculo do MR para solos lateríticos arenosos (LA') e lateríticos argilosos (LG'). Para esta equação, utilizou-se os valores de ISC que foram determinados em laboratório para as energias de compactação crescentes.

$$MR = 220 \times ISC^{0,8} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (6)$$

Os módulos de resiliência e coeficientes de Poisson das demais camadas do pavimento de referência foram adotados também da norma DER-SP (2006) e estão listados na Tabela 3.

Atributo	Camada		
	R	B	SB
MR (kgf/cm ²)	35000	2250	2250
ν	0,30	0,35	0,35

Tabela 3 Valores de MR e ν das camadas (DER-SP, 2006).

A análise tensão-deformação considerou a interface entre as camadas como não aderida e foi realizada por meio do software AEMC (Lima *et al.*, 2020). Conforme sugerido por Segundo *et al.* (2016), aplicou-se uma pressão de pneu de 5,6 kgf/cm² 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 obter os valores de: (i) deslocamento vertical no topo do revestimento (D); (ii) deformação horizontal de

tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_r); (iii) deformação vertical no topo do subleito (ϵ_v). Todas as análises foram realizadas entre as duas rodas do semieixo padrão, ou seja, nos pontos B, D e E da Figura 2, respectivamente.

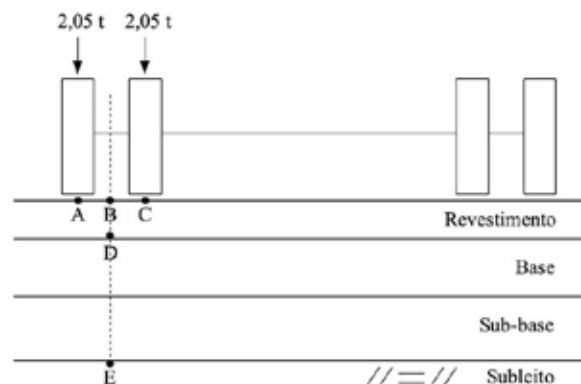


Figura 2 Pontos de aplicação de carga e análise tensão/deformação.

Ainda de acordo com Segundo *et al.* (2016), após realizada a análise estrutural, calculou-se o número equivalente de operações de eixo simples de rodas duplas de 8,2 t acumulado, considerando um período de projeto ($N_{projeto}$) para o qual o perfil é capaz de suportar. Foram utilizadas as Equações 7 a 9 (DER-SP, 2006) e os valores de k e n , conforme Tabela 4. Vale salientar que, das equações apresentadas na Tabela 4, a Equação 8 faz referência aos fatores de equivalência de carga (FEC) da AASHTO, para a determinação do tráfego ou $N_{previsto}$, e as Equações 7 e 9 fazem referência aos FEC da USACE. Os cálculos foram realizados para as espessuras da camada de revestimento de 10; 12,5 e 14 cm, e para as camadas de base e sub-base de 15 e 20 cm.

Local de análise	Equação	k	n	Fonte
Topo do revestimento Eq. 7	$N_{ir} = \sqrt[n]{\left(\frac{10^k}{D}\right)}$	3,01	0,176	DNER-PRO 11/1979
Fibra inferior do revestimento Eq. 8	$N_{ir} = kx \left(\frac{1}{\epsilon_r}\right)^n$	$1,092 \times 10^{-6}$	3,512	FHWA (1976) <i>apud</i> DER-SP (2006)
Topo do subleito Eq. 9	$N = kx \left(\frac{1}{\epsilon_v}\right)^n$	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762	Dornon e Metcalf (1965) <i>apud</i> DER-SP (2006)

Tabela 4 Equações e parâmetros utilizados para o cálculo do número N.

Fonte: Adaptado de Segundo *et al.* (2016).

Influência da Densificação do Solo de Subleito no Desempenho de Pavimentos Flexíveis

André Iuri Sena Carvalho; Mario Sergio de Souza Almeida; Wallace John Pereira Pedreira;
Weiner Gustavo Silva Costa & Maria do Socorro Costa São Mateus

Em que:

N_{tr} : $N_{previsto}$ para o topo do revestimento;

N_{ir} : $N_{previsto}$ para a fibra inferior do revestimento;

N_{sub} : $N_{previsto}$ para o topo do subleito;

$\epsilon_t = \epsilon_{tr}$: deformação específica horizontal de tração para a camada de revestimento;

ϵ_v : deformação específica vertical de compressão no topo do subleito;

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

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

3 Resultados e Discussões

3.1 Caracterização e classificação do solo de subleito

Os resultados dos ensaios de caracterização química estão apresentados na Tabela 5.

Os índices Ki e Kr refletem o grau de intemperização do solo e indicam o argilomineral presente no mesmo. Quando Ki e Kr são superiores a 0,75, existe uma predominância de argilominerais do grupo caulinita (1:1). A presença de montmorilonita (2:1) fica definida quando se tem Ki superior a 2,2, e alta capacidade de troca de cátions (> 17 cmolc/kg) (EMBRAPA, 2018).

Como pode ser observado, o solo estudado como subleito apresenta mineralogia caulinitica e os resultados obtidos para V e CTC confirmam sua classificação como Latossolo, uma vez que possui baixa saturação por bases ($V < 50\%$), capacidade de troca de cátions inferior a 17 cmolc/kg, e, conseqüentemente, uma atividade baixa da fração argila, ocasionada pelo avançado processo de intemperização.

Propriedade	Valor
V (%)	40,00
Al ₂ O ₃ (%)	8,94
SiO ₂ (%)	12,43
Fe ₂ O ₃ (%)	3,47
CTC (cmolc/kg)	3,10
Ki	2,36
Kr	1,90
T (cmolc/kg)	8,09

Tabela 5 Caracterização química do Solo.

A caracterização geotécnica apresentada na Tabela 6 mostra um percentual praticamente igual de areia (49%)

e finos (50% de silte e argila). O índice de plasticidade igual a 7 % (baixa plasticidade) e a massa específica dos sólidos indicam predominância de comportamento arenoso e, portanto, o solo estudado pode ser caracterizado como uma areia argilosa. De acordo com a classificação TRB (A – 4), o solo estudado é siltoso com pequena quantidade de material grosso e argila. Por se tratar de um solo laterítico, esta classificação não se aplica por não evidenciar as características específicas de tal solo. Para este caso, utiliza-se a metodologia MCT, que é apropriada a solos lateríticos. Desta forma, de acordo com os resultados de Mini-MCV e perda de massa por imersão, o solo estudado apresenta comportamento compatível com areias argilosas bem graduadas, que possuem argila de natureza laterítica em sua composição sendo, portanto, classificado como LG'. Tais solos, ainda de acordo com a metodologia MCT, possuem baixa expansão, média contração, podendo ser empregados como revestimento primário, proteção à erosão, base de pavimento, subleito compactado e reforço de subleito compactado.

Propriedades do solo	Valor
Limite de liquidez - w_L (%)	31
Limite de plasticidade - w_p (%)	24
Índice de plasticidade - IP (%)	7
Massa específica dos sólidos - ρ_s (g/cm ³)	2,59
Pedregulho (2 mm < diâmetro < 75 mm) (%)	1
Areia grossa (0,425 mm < diâmetro =< 2 mm) (%)	21
Areia fina (0,075 mm < diâmetro =< 0,425 mm) (%)	28
Silte (0,005 mm =< diâmetro =< 0,075 mm) (%)	12
Argila (diâmetro < 0,005 mm) (%)	38
Classificação TRB	A-4
IG	3
Classificação MCT	LG'
Cor	Amarelo

Tabela 6 Propriedades Geotécnicas do solo estudado.

3.2 Parâmetros de compactação e ISC do solo de subleito

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros de compactação para as diferentes energias adotadas, e os resultados dos ensaios de ISC com imersão por 96h ($ISC_{(IM)}$) e na umidade ótima sem imersão ($ISC_{(OT)}$), a relação entre estes parâmetros ($ISC_{(IM)/(OT)}$) e os valores de umidade das amostras após imersão, antes do ensaio de $ISC_{(IM)}$ (w_{IM}). São apresentados também os percentuais de variação da massa específica seca máxima ($\Delta\rho_{dmax}$) de cada curva em relação à energia anteriormente aplicada e os respectivos valores da porosidade (n) resultantes de cada energia.

Influência da Densificação do Solo de Subleito no Desempenho de Pavimentos Flexíveis

André Iuri Sena Carvalho; Mario Sergio de Souza Almeida; Wallace John Pereira Pedreira;
Weiner Gustavo Silva Costa & Maria do Socorro Costa São Mateus

Conforme pode ser observado na Tabela 7, o aumento da energia de compactação produziu elevação de ρ_{dmax} e consequente redução de w_{ot} , até a energia de compactação correspondente à 83 golpes, quando houve queda progressiva para 100 e 120 golpes, devido, provavelmente, à laminação das camadas de solo promovida pela quantidade excessiva de golpes. O ganho na massa específica seca máxima, após a energia correspondente a 55 golpes foi muito pequeno e a partir de 83 golpes, houve queda nesse parâmetro.

A porosidade das amostras compactadas, como era de se esperar, reduziu. Isto aconteceu até a energia correspondente a 70 golpes, havendo aumento para número de golpes maiores, uma vez que o excesso de energia promove laminação das camadas de solo, conforme já explicado.

Os valores de ISC apresentaram aumento com a energia de compactação e em proporções muito superiores

quando comparado ao ganho sofrido pela massa específica seca máxima. Estes resultados mostram que apesar da relação entre massa específica aparente seca máxima e ISC ser direta, ela não é linear, com coeficiente de variação do ajuste exponencial (R^2) de 0,98 para as duas condições do ensaio (com e sem imersão), conforme mostrado na Figura 3.

Os valores de $ISC_{(IM)}$ mostram que a imersão/inundação promoveu perda de resistência no solo compactado para todas as energias utilizadas, com maior perda para 12 golpes, onde o valor de $ISC_{(IM)}$ representa 17,2% do valor encontrado na condição ótima e com menor perda para 83 golpes (máxima densificação e menor teor de umidade após imersão), quando o $ISC_{(IM)}$ equivale a 57,8% do $ISC_{(OT)}$. Por fim, o solo comprova seu comportamento laterítico não apresentando expansão.

Atributo	Número de golpes						
	12	26	55	70	83	100	120
w_{ot} (%)	14,09	13,78	13,56	12,52	12,22	12,52	12,78
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,681	1,797	1,889	1,941	1,959	1,918	1,894
$\Delta\rho_{dmax}$ (%)	-	+6,90	+5,12	+2,75	+0,93	-2,09	-1,25
n	0,35	0,31	0,27	0,25	0,26	0,26	0,27
$ISC_{(OT)}$ (%)	11,6	38,7	65,2	89,3	92,8	86,5	74,1
$ISC_{(IM)}$ (%)	2,0	9,4	18,3	50,7	53,6	45,7	24,0
Exp (%)	0	0	0	0	0	0	0
$ISC_{(IM)/(OT)}$ (%)	17,2	24,2	28,1	56,8	57,8	52,8	32,4
w_{IM} (%)	23,3	19,0	14,5	13,7	13,5	15,3	15,2

Tabela 7 Parâmetros de controle dos ensaios de compactação e ISC do solo de subleito.

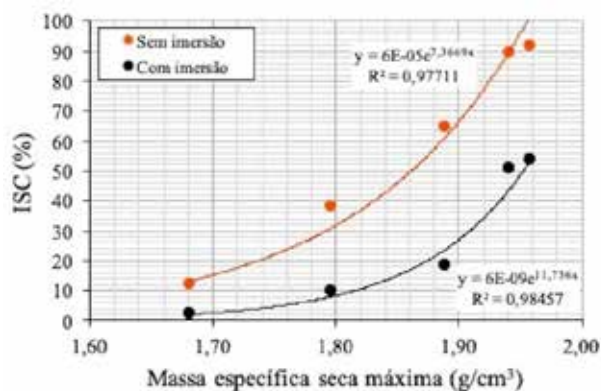


Figura 3 Variação do ISC em função da massa específica seca máxima.

3.3 Análise tensão-deformação

A Tabela 8 apresenta os valores de MR do subleito, estimados em função do ISC_{IM} obtido em laboratório (Equação 6), para diferentes energias de compactação, e os resultados das simulações realizadas no AEMC, para o cálculo da deflexão (D) no topo do pavimento, da deformação de tração na fibra inferior do revestimento em concreto asfáltico (ϵ_{tr}), deformação vertical no topo do subleito (ϵ_v) e das solicitações admissíveis.

Nota-se da Tabela 8 que os valores de MR, estimados com auxílio da Equação 6, crescem consideravelmente até a máxima densificação alcançada pelo material (83 golpes). Os resultados obtidos demonstram que o pavimento de referência

Influência da Densificação do Solo de Subleito no Desempenho de Pavimentos Flexíveis

André Iuri Sena Carvalho; Mario Sergio de Souza Almeida; Wallace John Pereira Pedreira;
Weiner Gustavo Silva Costa & Maria do Socorro Costa São Mateus

dimensionado (P1), considerando o subleito compactado na energia do Proctor intermediário, apresentou N_{ir} ($1,44 \times 10^6$) cerca de 1/3 de $N_{projeto}$ (AASTHO), ou seja, $5,0 \times 10^6$. Os valores admissíveis de solicitações estimadas para o topo do pavimento (N_{tr}) e topo do subleito (N_{sub}), entretanto, foram superiores ao $N_{projeto}$ (USACE). Assim, ao manter-se esta estrutura inicialmente dimensionada a análise tensão-

deformação indica que o pavimento apresentará trincamento excessivo, em função da deformação de tração na fibra inferior do revestimento, bem antes do final da sua vida útil adotada de 10 anos. Ao realizar-se a mesma análise para as demais energias, a partir de 55 golpes, observa-se que o pavimento também apresenta deficiência em todas as energias no valor de N_{ir} , estando, portanto, subdimensionado.

Atributo	Número de golpes				
	12	26	55	70	83
ISC _(M) (%)	2,0	9,4	18,3	50,7	53,6
MR (kgf/cm ²)	383	1321	2251	5087	5318
D (10 ⁻² mm)	113,3	51,0	38,2	27,0	26,6
e_{tr}	$4,45 \times 10^{-4}$	$3,54 \times 10^{-4}$	$3,27 \times 10^{-4}$	$2,99 \times 10^{-4}$	$2,98 \times 10^{-4}$
e_v	$3,97 \times 10^{-4}$	$1,77 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-4}$	$5,95 \times 10^{-5}$	$5,72 \times 10^{-5}$
N_{tr}	$2,69 \times 10^5$	$2,51 \times 10^7$	$1,30 \times 10^8$	$9,32 \times 10^8$	$1,01 \times 10^9$
N_{ir}	$6,44 \times 10^5$	$1,44 \times 10^6$	$1,90 \times 10^6$	$2,60 \times 10^6$	$2,63 \times 10^6$
N_{sub}	$9,54 \times 10^6$	$4,47 \times 10^8$	$3,09 \times 10^9$	$8,03 \times 10^{10}$	$9,69 \times 10^{10}$

Tabela 8 Pavimento de referência (P1 - revestimento de 10 cm e 15 cm para sub-base e base): Resultados da análise estrutural considerando diferentes módulos de resiliência do subleito.

Como a deficiência apresentada pelo pavimento encontra-se na excessiva deformação de tração do revestimento, calculada para todas as energias, cabe aumentar primeiramente a espessura da camada de revestimento asfáltico para 12,5 cm (espessura sugerida pelo DNIT, 2006), mantendo-se as demais espessuras de base e sub-base. A análise estrutural do pavimento após o ajuste na espessura (P2) da camada de revestimento está apresentada na Tabela 9.

Com o aumento da espessura do revestimento, o pavimento permaneceu subdimensionado para a energia de compactação do subleito de 26 golpes (Proctor intermediário). Contudo, para a energia de 70 golpes, a

deficiência observada foi resolvida e o pavimento passou a atender a todos os critérios de ruptura estabelecidos, em termos de solicitações admissíveis.

Novas análises foram realizadas, aumentando a espessura das camadas de forma a viabilizar a energia de compactação do subleito no Proctor intermediário. Os resultados mostraram que a estrutura do pavimento com 14 cm de revestimento, 20 cm de base e 20 cm de sub-base (P3) atende a todos os critérios de falha (Tabela 10). Isto equivale a um acréscimo na espessura do revestimento de 12%, 33% de base e 33% de sub-base em relação a estrutura anteriormente dimensionada, considerando o subleito compactado com 70 golpes (Tabela 9).

Atributo	Número de golpes				
	12	26	55	70	83
ISC _(M) (%)	2,0	9,4	18,3	50,7	53,6
MR (kgf/cm ²)	383	1321	2251	5087	5318
D (10 ⁻² mm)	98,6	44,5	33,1	23,2	22,9
e_{tr}	$3,58 \times 10^{-4}$	$2,85 \times 10^{-4}$	$2,62 \times 10^{-4}$	$2,39 \times 10^{-4}$	$2,38 \times 10^{-4}$
e_v	$3,12 \times 10^{-4}$	$1,44 \times 10^{-4}$	$9,67 \times 10^{-5}$	$4,94 \times 10^{-5}$	$4,75 \times 10^{-5}$
N_{tr}	$5,94 \times 10^5$	$5,45 \times 10^7$	$2,93 \times 10^8$	$2,21 \times 10^9$	$2,38 \times 10^9$
N_{ir}	$1,38 \times 10^6$	$3,08 \times 10^6$	$4,14 \times 10^6$	$5,72 \times 10^6$	$5,80 \times 10^6$
N_{sub}	$3,01 \times 10^7$	$1,19 \times 10^9$	$7,95 \times 10^9$	$1,95 \times 10^{11}$	$2,35 \times 10^{11}$

Tabela 9 Pavimento ajustado (P2 – revestimento de 12,5 cm e 15 cm para sub-base e base): Resultados da análise estrutural considerando diferentes módulos de resiliência do subleito.

Influência da Densificação do Solo de Subleito no Desempenho de Pavimentos Flexíveis

André Iuri Sena Carvalho; Mario Sergio de Souza Almeida; Wallace John Pereira Pedreira;
Weiner Gustavo Silva Costa & Maria do Socorro Costa São Mateus

Atributo	Número de golpes				
	12	26	55	70	83
ISC _(M) (%)	2,0	9,4	18,3	50,7	53,6
MR (kgf/cm ²)	383	1321	2251	5087	5318
D (10 ⁻² mm)	88,4	41,4	31,6	23,0	22,6
e _{tr}	2,99 x 10 ⁻⁴	2,47 x 10 ⁻⁴	2,31 x 10 ⁻⁴	2,15 x 10 ⁻⁴	2,14 x 10 ⁻⁴
e _v	2,38 x 10 ⁻⁴	1,10 x 10 ⁻⁴	7,42 x 10 ⁻⁵	3,79 x 10 ⁻⁵	3,65 x 10 ⁻⁵
N _{tr}	1,10 x 10 ⁶	8,22 x 10⁷	3,81 x 10 ⁸	2,32 x 10 ⁹	2,56 x 10 ⁹
N _{ir}	2,60 x 10 ⁶	5,09 x 10⁶	6,44 x 10 ⁶	8,29 x 10 ⁶	8,43 x 10 ⁶
N _{sub}	1,09 x 10 ⁸	4,31 x 10⁹	2,81 x 10 ¹⁰	6,88 x 10 ¹¹	8,23 x 10 ¹¹

Tabela 10 Pavimento ajustado (P3 – revestimento de 14 cm e 20 cm para sub-base e base): Resultados da análise estrutural considerando diferentes módulos de resiliência do subleito.

4 Conclusões

O aumento da densificação da camada de subleito se mostrou uma estratégia eficiente de estabilização do solo estudado, com influência direta e substancial sobre o comportamento mecânico da estrutura de pavimento flexível inicialmente projetada. Caso essa estratégia não fosse adotada haveria aumento excessivo das espessuras das camadas de base, sub-base e revestimento dimensionadas para que a vida útil de 10 anos para o pavimento fosse atingida, sem a ocorrência de trincas e deformações excessivas de maneira precoce, o que, em última análise, promoveria substancial aumento de custos de implantação do pavimento.

A escolha dessa metodologia, no entanto, deve ser avaliada técnica e economicamente em relação a outras soluções de estabilização, principalmente no que diz respeito à execução.

5 Referências

Cai, Y.; Sun, Q.; Guo, L.; Juang, C.H. & Wang, J. 2015. Permanent deformation characteristics of saturated sand under cyclic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 52: 795–807.

Chai, G.W.; van Staden, R. & Loo, Y. 2015. In Situ Assessment of Pavement Subgrade Using Falling Weight Deflectometer. *Journal of Testing and Evaluation*, 43(1): 140–148.

Couto, B.O.C. & Gomes, R.C. 2019. Aplicação da Metodologia MCT para Determinação da Erodibilidade de Solos em Taludes de Corte Rodoviários na Região do Quadrilátero Ferrífer. *Anuário do Instituto de Geociências*, 43: 191-198.

DER-PR. 2018. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. Terraplenagem – Aterros. ES-T 06/18. Paraná, 10 p.

DER-SP. 2006. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. Projeto de Pavimentação. IP-DE-P00/001. São Paulo, 53 p.

DNER. 1994a. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. PRO 003: Coleta amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro, 4 p.

DNER. 1994b. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 41: Solo - Preparação de Amostras para Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro, 4 p.

DNER. 1994c. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 51: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 12 p.

DNER. 1994d. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 82: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p.

DNER. 1994e. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 93: Solo – Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro, 4 p.

DNER. 1994f. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 122: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 7 p.

DNER. 1994g. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 256: Solos Compactados com Equipamentos em Miniatura – Determinação da Perda de Massa por Imersão. Rio de Janeiro, 6 p.

DNER. 1994h. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 258: Solos Compactados com Equipamentos Miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro, 14 p.

DNER. 1996. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. CLA 259: Classificação de Solos Tropicais para Finalidades Rodoviárias Utilizando Corpos-de-prova Compactados em Equipamentos Miniatura. Rio de Janeiro, 6 p.

DNIT. 2006. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. IPR – 719: Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 274 p.

DNIT. 2013. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. ME 164: Solo – Compactação Utilizando Amostras não Trabalhadas. Rio de Janeiro, 7 p.

DNIT. 2016. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. ME 172: Solo – Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras não Trabalhadas. Brasília, 17 p.

Influência da Densificação do Solo de Subleito no Desempenho de Pavimentos Flexíveis

André Iuri Sena Carvalho; Mario Sergio de Souza Almeida; Wallace John Pereira Pedreira;
Weiner Gustavo Silva Costa & Maria do Socorro Costa São Mateus

- EMBRAPA. 2018. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Brasília, DF, 355 p.
- Eujine, G.N.; Chandrakaran, S. & Sankar, N. 2017. Accelerated Subgrade Stabilization Using Enzymatic Lime Technique. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(9): 1–7.
- Ji, R.; Nantung, T.; Siddiki, N.; Liao, T. & Kim, D. 2015. Field and Laboratory Determination of Subgrade Resilient Modulus and its Application in Pavement Design. *Journal of Testing and Evaluation*, 43(5): 1109-1119.
- Lima, C.D.A.; Motta, L.M.G.; Aragão, F.T.S & Guimarães, A.C.R. 2020. Mechanical Characterization of Fine Grained Lateritic Soils for Mechanistic Empirical Flexible Pavement Design. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(1): 1-14.
- Leung, G.L.M; Wong, A.W.G. & Wang, Y.H. 2013. Prediction of resilient modulus of compacted saprolitic soils by CBR approach for road pavement subgrade: a re-examination. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(4): 403–417.
- Mousa, R.; Gabr, A.; Arab, M.G.; Azam, A. & Badawy, S. 2017. Resilient modulus for unbound granular materials and subgrade soils in Egypt. In: MATEC Web of Conferences, 17: 1-12.
- Mousavi, S.H.; Gabr, M.A. & Borden, R.H. 2018. Resilient modulus prediction of soft low-plasticity Piedmont residual soil using dynamic cone penetrometer. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10: 323-332.
- Pancar, E.B. & Akpınar, M.V. 2016. Comparison of Effects of Using Geosynthetics and Lime Stabilization to Increase Bearing Capacity of Unpaved Road Subgrade. *Advances in Materials Science and Engineering, Special Issue*, 8 p.
- Rodrigues, M.G.F.; Nacif, P.G.S; Costa, O.V. & Olszewski, N. 2009. Solos e suas Relações com as Paisagens Naturais no Município de Cruz das Almas – B. *Revista de Biologia e Ciência da Terra*, 9(2): 193-205.
- Segundo, I.G.R.; Branco, V.T.F.C.; Vasconcelos, K.L. & Holanda, A.S. 2016. Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. *Revista Transportes*, 24(4): 85-94.
- Silva, T.O.; Neto, S.L.S.D.; Ferraz, R.L.; Pitanga, H.N. & Paes, B.S.T. 2019. Susceptibilidade à Erodibilidade de Solos Residuais com Base em Correlações de Propriedades Geotécnicas Físico-Mecânicas. *Anuário do Instituto de Geociências*, 42: 188-195.
- Tang, X.; Stoffels, S.M. & Palomino, A.M. 2016. Mechanistic-empirical approach to characterizing permanent deformation of reinforced soft soil subgrade. *Geotextiles and Geomembranes*, 44: 429-441.
- Tatsuoka, F. & Correia, A.G. 2018. Importance of controlling the degree of saturation in soil compaction, *Procedia Engineering*, 143: 556-565.
- Yao, Y.; Zheng, J.; Zhang, J.; Peng, J. & Li, J. 2018. Model for Predicting Resilient Modulus of Unsaturated Subgrade Soils in South China. *Journal of Civil Engineering*, 22(6):2089-2098.