



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



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

DEFORMABILIDADE DE SUBLEITOS ARGILOSOS A LUZ DA VARIÇÃO DE UMIDADE PÓS COMPACTAÇÃO: ANÁLISE DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

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

Luigi Tavares Gomes¹; Paula Taiane Pascoal¹; Magnos Baroni¹; Luciano Pivoto Specht¹; Lucas Dotto Bueno¹; Deividi da Silva Pereira¹

RESUMO

Os solos tropicais lateríticos, quando densificados por processos de compactação, tendem a melhorar seu desempenho em relação aos seus comportamentos plásticos e elásticos, sendo amplamente utilizados em camadas de pavimentos. No entanto, devido à sua suscetibilidade às variações climáticas e de umidade, podem apresentar comportamento indesejável. Diante desse problema, este estudo tem como objetivo investigar o desempenho de subleitos constituídos por solo argiloso laterítico em relação à variação de umidade, avaliando diferentes condições de umidade, de compactação e trajetórias de umedecimento e secagem. A metodologia adotada consistiu, inicialmente, no dimensionamento de três estruturas para diferentes números N, seguindo o método em vigor no Brasil. Em seguida, com parâmetros de resiliência e deformabilidade para cada condição de umidade, foi utilizada a ferramenta computacional AEMC para análises numéricas, a fim de determinar as tensões principais atuantes em diferentes profundidades no subleito. Assim, ao utilizar o Modelo de Guimarães, foi possível determinar os afundamentos de trilha de roda e avaliar a ocorrência de *shakedown* para cada caso. Os resultados indicam que, quando submetidos aos processos de evaporação característicos de climas quentes, os subleitos ganham rigidez devido ao aumento da sucção, o que melhora seu desempenho em termos de deformabilidade. No entanto, quando em contato com água, seja devido à ineficiência de dispositivos de drenagem e impermeabilização ou a precipitações extremas, os subleitos tendem a ter seu desempenho prejudicado, apresentando elevados acréscimos de deformações plásticas. No entanto, observa-se que o aumento da espessura do revestimento asfáltico reduz a ocorrência de afundamento de trilha de roda em relação ao aumento de umidade no subleito.

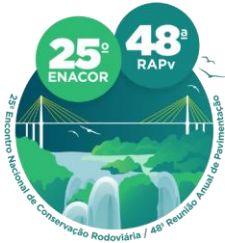
PALAVRAS-CHAVE: solo laterítico; AEMC; deformação permanente; módulo de resiliência; *shakedown*.

ABSTRACT

Tropical lateritic soils, when compacted through compaction processes, tend to improve their performance in terms of plastic and elastic behaviors, and are widely used in pavement layers. However, due to their susceptibility to climate and moisture variations, they may exhibit undesirable behavior. In view of this problem, this study aims to investigate the performance of subgrades composed of lateritic clayey soil in relation to moisture variation, evaluating different moisture conditions, compaction trajectories, and wetting and drying cycles. The adopted methodology initially consisted of designing three structures for different N values, following the current method in Brazil. Then, with resilience and deformability parameters for each moisture condition, the computational tool AEMC was used for numerical analyses to determine the principal stresses acting at different depths in the subgrade. Thus, by using the Guimarães Model, it was possible to determine the rut depths and assess the occurrence of *shakedown* for each case. The results indicate that when subjected to the characteristic evaporation processes of hot climates, the subgrades gain stiffness due to increased suction, which improves their performance in terms of deformability. However, when in contact with water, either due to inefficient drainage and waterproofing devices or extreme precipitation events, the subgrades tend to have their performance compromised, with significant increases in plastic deformations. Nevertheless, it is observed that increasing the thickness of the asphalt coating reduces the occurrence of rutting due to increased moisture in the subgrade.

KEY WORDS: lateritic soil; AEMC; permanent deformation; resilient modulus; *shakedown*.

¹ Universidade Federal de Santa Maria, gomes_8@hotmail.com; paulatpascoal@gmail.com; magnos.baroni@gmail.com; luspecht@ufsm.br; lucas.bueno@ufsm.br; dsp@ufsm.br



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

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

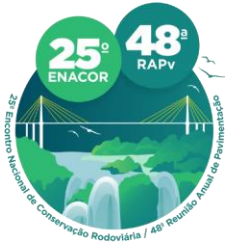
O modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil e 99% da malha rodoviária pavimentada é de pavimentos flexíveis, constituídos de camadas de revestimento asfáltico sobre materiais granulares e subleito. A solução a ser adotada no que se refere a espessuras, camadas e materiais está condicionada ao comportamento estrutural e a interação destes, frente as ações solicitantes. Ao executar um pavimento, deve-se considerar o fato de o pavimento ser uma estrutura em que cada camada apresenta características próprias e estão sujeitas a esforços distribuídos horizontalmente e verticalmente, até atingir o subleito (BERNUCCI *et al.*, 2022). Sendo assim, as tensões e deformações em toda estrutura do pavimento dependem, principalmente, da espessura das camadas e da rigidez dos materiais.

Camapum de Carvalho *et al.* (2015) evidenciam a necessidade de uma visão ampla ao utilizar solos tropicais na pavimentação. A utilização destes solos exige uma compreensão ampla nas propriedades físico-químicas e do seu comportamento mecânico. Para a aplicação, os solos passam pelo processo de compactação, o qual consiste na sua densificação, visando melhorar seu comportamento, principalmente em relação ao seu desempenho elástico e plástico (CRISPIM *et al.*, 2011; MEDINA E MOTTA, 2015).

Lekarp e Dawson (1999), Werkmeister *et al.* (2001) e Guimarães (2009) indicam que, um projeto adequado se inicia pela seleção de materiais eficientes quanto à rigidez e à resistência, para que sejam capazes de acumular as deformações permanentes sem sofrer com deformações irreversíveis na superfície do pavimento. Sendo assim, a investigação da deformabilidade torna-se extremamente importante.

Existem basicamente dois tipos de comportamentos dos solos quanto à sua plasticidade. Em um, a deformação é crescente até a ruptura do material, e no outro, é crescente até que se atinja um estado de equilíbrio cessando este aumento. Nesse sentido, quando ocorre a estabilização da deformação permanente e o material passa a apresentar apenas o comportamento elástico, ocorre o fenômeno denominado *shakedown* (DAWSON E WELLNER, 1999; WERKMEISTER *et al.*, 2001). Logo, ao selecionar o material a ser utilizado, busca-se que ele apresente acomodamento ou tendência ao acomodamento.

Frente as análises e/ou escolha do material terroso, a variação da umidade de solos de subleito pós compactação é um problema factual, uma vez que a água pode atingir o subleito por meio de infiltração por trincas pré-existentes, percolação ou ascensão inesperada do nível freático (SILVA, 2009). De acordo com Khoury *et al.* (2003), ao passar do tempo, o teor de umidade do subleito varia em função das mudanças do meio, e ainda, por vezes, este agrava-se com a ineficiência dos dispositivos de drenagem. Sendo assim, a variação de umidade do subleito está sujeita às ações climáticas e se enquadram dentro de uma faixa de variação, denominada como umidade de equilíbrio. A umidade de equilíbrio do subleito é o valor médio de variação ao longo dos anos, após a fase de acomodação dos primeiros meses de serviço (MEDINA E MOTTA, 2015; GEHLING *et al.*, 2015; KERN, 2017). Diversos estudos em regiões tropicais do Brasil indicam que, quando o sistema de drenagem é eficiente, o estado de equilíbrio é atingido meses após a construção. Nesses casos, o equilíbrio ocorre em condições abaixo da condição ótima (MEDINA E MOTTA, 1988; BERNUCCI, 1995; NÚÑEZ, 1997; KERN, 2017). A redução da umidade de equilíbrio quando comparada com a umidade ótima, tende a trazer melhora no comportamento mecânico do solo em vista à atuação da sucção. Em contrapartida, a umidade pode ser acrescida, na ocorrência de dispositivos de drenagem ineficientes, regiões de relevo plano, devido ao tipo de solo, ausência de capeamento dos acostamentos ou até por eventos climáticos extremos, o que acarreta num comportamento indesejado para a estrutura.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Essas variações de umidade do subleito podem causar danos na estrutura do pavimento, conforme constatado por Vestena (2021), que monitorou o afundamento de trilha de roda (ATR) em três segmentos monitorados, e associou este, a variação da umidade do subleito e à deformabilidade dos materiais granulares empregados na base e sub-base. O comparativo entre o comportamento dos materiais avaliados em laboratório, em diferentes condições de análises, e o desempenho destes em campo, é possível através de simulações computacionais que seguem os preceitos mecanístico-empíricos.

Visando compreender os fenômenos que ocorrem em um solo compactado que sofre com trajetória de secagem e de umedecimento após sua compactação, simulando a ocorrência desta variação de campo, o presente artigo teve como objetivo analisar as tensões que atingem o subleito em diferentes condições de umidade e suas respectivas deformações. Para tanto, foram utilizados os preceitos do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis vigentes no Brasil para o dimensionamento de três estruturas. Posteriormente, realizou-se modelagens numéricas utilizando o programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) para avaliar as tensões atuantes em diferentes profundidades do subleito. Os coeficientes de regressão não linear de módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP) foram utilizados como parâmetros de entrada nessas modelagens. Com base nas informações obtidas, utilizando a expressão de Guimarães (2009), foi possível determinar as deformações permanentes específicas (ϵ_p) e seus respectivos valores de ATR. Além disso, efetuou-se análises de *shakedown* para as tensões atuantes no subleito utilizando o Modelo de Dawson e Wellner (1999). Essa abordagem permitiu uma análise detalhada das deformações permanentes e sua relação com os valores de ATR, considerando os parâmetros específicos das estruturas dimensionadas e as características do subleito.

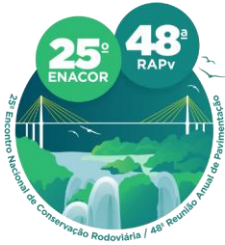
MATERIAIS E MÉTODOS

Dimensionamento das estruturas e modelagens numéricas

A ferramenta computacional Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) permite o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos em estruturas, sendo amplamente empregado em *frameworks* de cálculo para avaliar e dimensionar pavimentos rodoviários. Utilizou-se desta ferramenta para obter as tensões principais presentes no subleito (σ_1 , σ_2 , σ_3), e verificar a distribuição dessas ao submeter essa camada a processos de secagem ou umedecimento, além de avaliar o comportamento em relação à sua condição de compactação na umidade ótima.

Logo, para fim de análise holística das distribuições de tensões na camada do subleito a luz da variação de umidade, dimensionou-se três estruturas para diferentes números de solicitações de projeto (N), adotando respectivamente N de $5,00 \times 10^5$, $7,50 \times 10^6$ e $5,00 \times 10^7$, conforme as orientações apresentadas no método de dimensionamento em vigência no Brasil (SOUZA, 1981; DNIT, 2006). Assim, optou-se por estruturas compostas por concreto asfáltico (CA) como camada de revestimento, brita graduada simples (BGS) como base e o solo argiloso laterítico compactado na energia intermediária com Índice de Suporte California (ISC) de 16,4% no subleito do pavimento.

A Figura 1 apresenta a composição de materiais selecionados para conceber as camadas estruturais do pavimento. Nessa, evidencia-se os pontos de análise localizados em diferentes profundidades no subleito, situados no eixo de simetria da aplicação de carga do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf, sendo em uma das trilhas de roda distribuída a carga de 4,1 tf e tendo a aplicação de 2,05 tf por roda.



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

www.rapvenacor.com.br

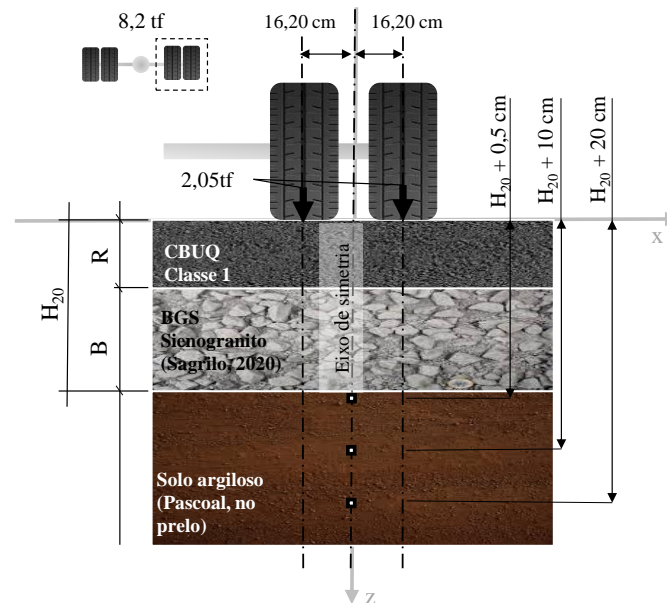


Figura 1. Composição das estruturas dimensionadas, e pontos de análise no subleito.

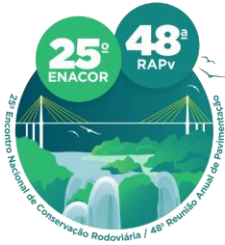
O solo de subleito analisado na presente pesquisa é oriundo da zona de transição entre a Planície Litorânea e o Escudo Sul-Riograndense, no estado do Rio Grande do Sul, e tem sua caracterização física, classificação e parâmetros de compactação apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do solo avaliado (PASCOAL, 2023, no prelo)

Caracterização física		Limites de Atterberg	
Massa específica real dos grãos (g/cm^3)	2,75	Liquidez (%)	45
% pedregulho ($>2,0$ mm)	7	Plasticidade (%)	33
% areia grossa (0,6 - 2,0 mm)	10	Índice de plasticidade (%)	12
% areia média (0,2 - 0,6 mm)	9	Classificação	
% areia fina (0,06 - 0,02 mm)	20	AASHTO	A-7-5
% silte (2,0 μm - 0,06 mm)	20	SUCS	MH
% argila ($< 2,0$ μm)	34	MCT	LG'
Compactação na Energia Intermediária		Índice de Suporte Califórnia	
Umidade ótima (%)	20,1	ISC	16,4
Massa específica aparente seca (g/cm^3)	1,685	Expansão	0,18

Para avaliar este solo frente às variações de umidade, Pascoal (2023, no prelo) compactou amostras na umidade ótima e massa específica aparente seca máxima e realizou ensaios de módulo de resiliência (DNIT 134, 2018) e de deformação permanente (DNIT 179, 2018), nas condições de umidade ótima, umidade de compactação e trajetória de -2% de secagem, e umidade de compactação e trajetória de +2% de umedecimento. Os resultados foram utilizados para obtenção dos parâmetros de resiliência e de deformação permanente (DP), respectivamente, por meio dos modelos Composto (PEZO *et al.*, 1992) e de Guimarães (2009), considerados no *framework* do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa).

Para compor a camada de base das estruturas avaliadas, adotou-se a BGS caracterizada por Sagrilo (2020), composta por agregado de sienogranito, presente na mesma zona de transição entre a



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

www.rapvenacor.com.br



Planície Litorânea e o Escudo Sul-Riograndense, com energia de compactação modificada e curva granulométrica enquadrada na Faixa C do DNIT (2006).

Dado que o objetivo deste estudo é avaliar apenas as deformações permanentes no subleito, sem considerar os mecanismos de deterioração por fadiga, optou-se por utilizar como revestimento o CA Classe 1, disponibilizado no banco de dados do MeDiNa, para todas as estruturas dimensionadas.

A Tabela 2 apresenta as propriedades dos materiais utilizados nas camadas das estruturas, bem como os parâmetros utilizados como dados de entrada no AEMC e no Modelo de Guimarães.

Tabela 2. Parâmetros dos materiais pertinentes ao conjunto de análises.

Camada Material	Energia de compactação	γ_d (g/cm ³)	$W_{ót}$ (%)	Condição de umidade	MR (k1;k2;k3)	DP (Ψ_1 ; Ψ_2 ; Ψ_3 ; Ψ_4)	Fadiga (k1;k2)	Poisson
Revestimento CBUQ - Classe 1	-	2,40	-	-	5764 MPa	-	5,496E-11; -3,253	0,30
Base BGS - Sienogranito	Modificada	2,25	5,1	-	1896,11; 0,612; 0,164	0,019; -0,908; 1,816; 0,226	-	0,35
				Wót	696,065; 0,491; -0,101	0,179; 1,069; 0,742; 0,076	-	0,45
Subleito Solo laterítico (PASCOAL, 2023, no prelo)	Intermediária	1,68	20,0	Wót +2% pós compactação	234,393; 0,533; -0,319	0,17; -0,021; 2,233; 0,108	-	0,45
				Wót -2% pós compactação	769,611; 0,322; 0,048	0,00367; -0,6268; 1,2277; 0,0969	-	0,45

Determinação do afundamento de trilha de roda

Diante das tensões principais (σ_1 , σ_2 , σ_3), determinadas por meio de análises numéricas no AEMC, e dos parâmetros de deformabilidade dos solos obtidos a partir das regressões não lineares dos resultados de ensaios triaxiais de cargas repetidas, se fez possível obter os percentuais de deformações permanentes específicas (ε_p) correspondentes para cada situação ao utilizar o Modelo de Guimarães (2009), expresso na Equação 1.

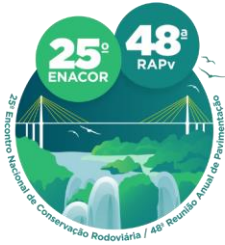
$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \left(\frac{\sigma_3}{\rho_{atm}} \right)^{\psi_2} \left(\frac{\sigma_d}{\rho_{atm}} \right)^{\psi_3} N^{\psi_4} \quad (1)$$

Em que:

ε_p (%): deformação específica plástica;

ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 , ψ_4 : parâmetros de regressão;

σ_3 : tensão confinante;



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

www.rapvenacor.com.br



σ_d : tensão desvio;

N: número de ciclos de aplicação de carga;

P_{atm} : pressão atmosférica ou tensão de referência de 0,10135 MPa.

A tensão desviadora é a diferença entre a tensão principal maior (σ_1) e a tensão principal menor (σ_3), e a tensão confinante corresponde à tensão principal menor.

Neste estudo, para a análise do ATR foram avaliadas apenas as deformações permanentes na camada de subleito, considerando as demais camadas como indeformáveis. Os resultados de ATR partiram da multiplicação da deformação permanente específica pela altura correspondente da camada em que o ponto avaliado está localizado (h_i), conforme mostrado na Equação 2.

$$ATR_i = \varepsilon_{p_i} \cdot h_i \quad (2)$$

Análises da ocorrência de *Shakedown*

Para avaliar os domínios de *shakedown* resultantes das diferentes combinações de tensões aplicadas nos pontos investigados, considerando as diferentes condições de umidade do subleito, seguiu-se as orientações de Dawson e Wellner (1999). Desta forma, foram analisadas as taxas de incremento da deformação permanente ao adotar uma variação de tráfego de $5,00 \times 10^4$, até atingir os respectivos valores de N de projeto para cada estrutura. Essas análises foram realizadas em conjunto com os resultados dos ensaios laboratoriais, nos quais utilizou-se os pares de tensões definidos de acordo com os preceitos da normativa do DNIT (2018).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

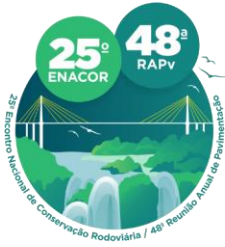
Dimensionamento das estruturas

Seguindo as diretrizes do método em vigência para o dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil (SOUZA, 1981), foram dimensionadas inicialmente três estruturas para diferentes valores de N, levando em consideração o valor do ISC. Vale ressaltar que, em alguns casos, a espessura da camada de base foi inferior ao mínimo estabelecido nas normativas técnicas, sendo adotado o valor mínimo de 15 cm. Dessa forma, determinou-se os pontos de análise das tensões e deformações no AEMC. A Tabela 3 apresenta as espessuras das estruturas dimensionadas, juntamente com os pontos avaliados nas análises numéricas.

Tabela 3. Estruturas dimensionadas e pontos de análise

Estrutura	N	Espessuras dimensionadas (cm)		Pontos de análise no AEMC (x; y; z)		
		Revestimento	Base	0,5 cm do topo do subleito	10 cm do topo do subleito	20 cm do topo do subleito
E1	$5,00 \times 10^5$	2,50	23,00	0; 0; 26,00	0; 0; 35,50	0; 0; 45,05
E2	$7,50 \times 10^6$	7,50	17,00	0; 0; 24,50	0; 0; 34,00	0; 0; 44,00
E3	$5,00 \times 10^7$	12,50	15,00	0; 0; 28,00	0; 0; 37,50	0; 0; 47,50

Evidencia-se que o método de dimensionamento utilizado, prescreve maiores espessuras de revestimento conforme venha a se requerir maiores solicitações de tráfego, além de que visa distribuir as cargas do tráfego de forma adequada, evitando que ocorra deformações excessivas no



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

www.rapvenacor.com.br



subleito. Portanto, observa-se que as estruturas com espessuras menores de revestimento asfáltico apresentaram maiores espessuras de camada de base.

Análises numéricas

As distribuições das tensões principais atuantes no subleito das estruturas dimensionadas, obtidas por meio das modelagens numéricas no AEMC, são apresentadas na Figura 2. Observa-se que as maiores tensões principais estão concentradas na parte superior do subleito e se dissipam à medida que se avança em profundidade, convergindo para valores ínfimos. Consequentemente, as tensões desviadoras são menores na parte superior do subleito e aumentam ao longo da profundidade devido à diminuição das tensões confinantes. No entanto, a partir de uma determinada profundidade, essas tensões desviadoras tendem a diminuir devido ao efeito de espraio das tensões verticais causadas pelas ações do carregamento dinâmico.

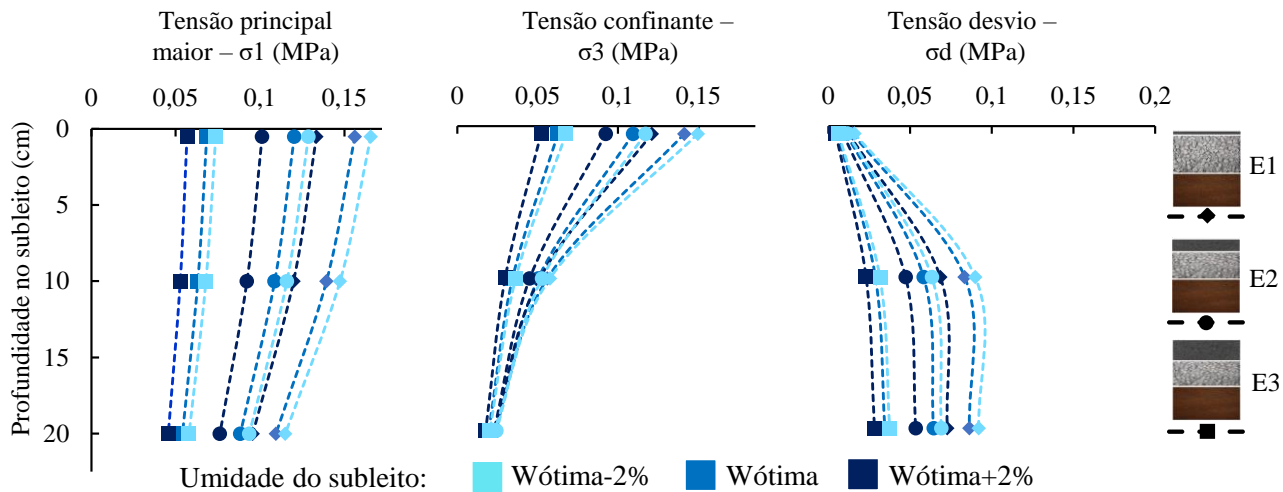
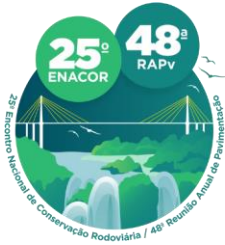


Figura 2. Distribuição de tensões *versus* profundidade no subleito

A estrutura 1 (E1), com um revestimento asfáltico de 2,5 cm de espessura correspondente a um tratamento superficial, apresenta as maiores tensões que atingem o subleito, mesmo tendo a maior espessura da camada de base em comparação com as outras estruturas avaliadas. Por outro lado, a estrutura 3 (E3), que possui o maior revestimento asfáltico entre todas, mostra uma atenuação dessas tensões. Isso demonstra que a camada de revestimento, que é a camada mais rígida de toda a estrutura, absorve a maior parte das tensões aplicadas em um pavimento rodoviário. Em relação à análise da distribuição de tensões no subleito em função da variação de umidade, nota-se que quando ocorre o processo de secagem no solo laterítico avaliado, o subleito ganha rigidez e é capaz de suportar maiores tensões devido à ação da sucção e do enrijecimento. No entanto, o mesmo não ocorre durante o processo de umedecimento, que resulta em reduções significativas na capacidade do subleito de absorver as tensões e assim suportá-las.

A Tabela 4 apresenta os pares de tensões obtidos através do AEMC para serem utilizados no Modelo de Guimarães (2009), a fim de determinar as deformações permanentes específicas ao avaliar os pontos localizados a uma profundidade de especificamente 20 cm abaixo do topo do subleito. Observa-se que a razão de tensões (σ_1/σ_3) no ponto de análise aumenta à medida que a espessura do revestimento diminui, resultando em situações mais críticas e propensas a maiores deformações permanentes específicas.



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

www.rapvenacor.com.br



Tabela 4. Pares de tensões e deformações permanentes específicas a 20 cm do topo do subleito

Estrutura	Condição do subleito	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_1/σ_3 (*)	ϵ_p (**)
E1	Wót +2%	0,023	0,073	4,2	0,346
	Wót	0,023	0,086	4,7	0,088
	Wót -2%	0,023	0,092	5,0	0,029
E2	Wót +2%	0,023	0,053	3,4	0,232
	Wót	0,024	0,064	3,7	0,091
	Wót -2%	0,024	0,069	3,8	0,026
E3	Wót +2%	0,018	0,028	2,6	0,068
	Wót	0,019	0,035	2,8	0,053
	Wót -2%	0,020	0,038	2,9	0,016

(*) $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_1$

(**) Deformação específica permanente (ϵ_p) adimensional. Quando multiplicada pela altura (mm) do ponto em análise resulta no ATR (mm) desse.

Afundamento de trilha de roda

A Figura 3a ilustra os valores de afundamento de trilha de roda para as três estruturas dimensionadas, de acordo com seus respectivos valores de N de projeto, considerando três condições de umidade do subleito. Observa-se que, à medida que se avança na profundidade do subleito, o processo de umedecimento do solo aumenta consideravelmente as deformações permanentes em comparação com as outras condições para as E1 e E2. Essa influência é ainda maior na estrutura E1, devido à sua menor espessura de revestimento e à sua exposição a uma razão tensões de σ_1/σ_3 maior do que as demais estruturas.

Ao analisar a estrutura E3, nota-se que o umedecimento do subleito não causa grandes impactos no afundamento de trilha de roda, como ocorre nas outras estruturas. Isso se deve ao fato de que essa possui uma espessura de revestimento maior, favorecendo a uma melhor distribuição e atenuação das tensões que alcançam as camadas subjacentes.

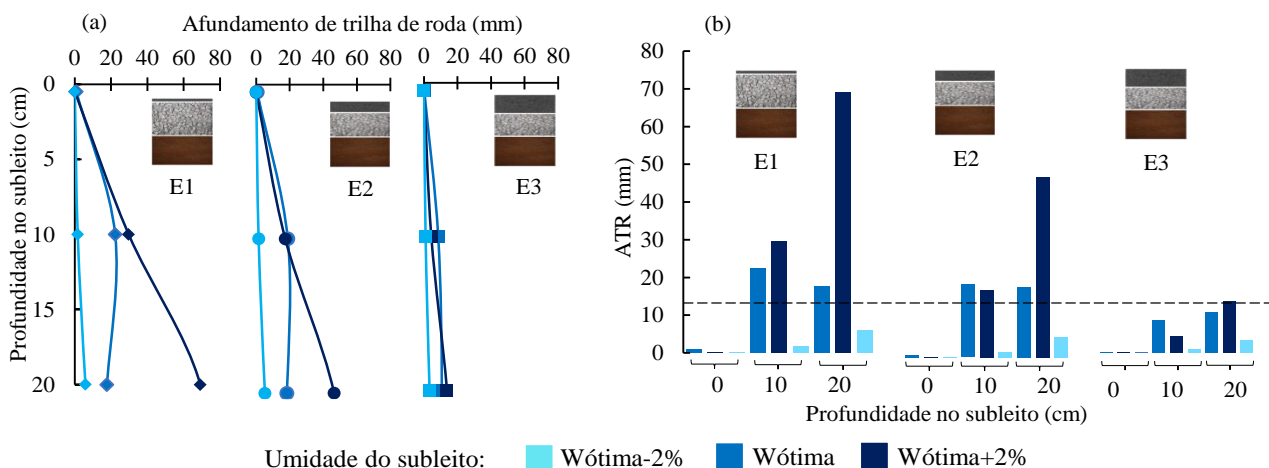
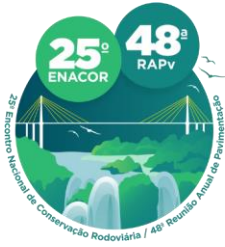


Figura 3. Afundamento de trilha de roda *versus* profundidade *versus* condição de umidade



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

www.rapvenacor.com.br



Na Figura 3b, ao evidenciar a percepção do processo de secagem do solo, observa-se uma considerável diminuição do ATR em comparação com outros processos de umidade do subleito. Esse fato foi destacado por Medina e Motta (2015), ao expor que subleitos rodoviários compostos por solos tropicais compactados artificialmente, quando combinados com sistemas de drenagem eficientes, tendem a atingir a umidade de equilíbrio, sendo essa menor do que a umidade ótima de compactação. Como resultado, devido ao aumento da sucção, aumenta-se a rigidez do solo e assim a deformabilidade sob cargas repetidas é reduzida.

Perante o exposto, ao estabelecer o limite de 12,00 mm para ATR, valor a partir do qual indica-se comprometimento estrutural do pavimento (IPR, 2006), constatou-se que todas as estruturas avaliadas do subleito, após o processo de secagem, satisfizeram esse critério. No entanto, todas que passaram pelo processo de umedecimento, apresentaram valores superiores a esse limite. Já ao avaliar a condição de umidade ótima do subleito, apenas a E3 acatou a esse preceito e foi considerada satisfatória.

Análise da ocorrência de *Shakedown*

As avaliações de *shakedown* obtidas a partir de ensaios laboratoriais nos corpos de prova submetidos a diferentes trajetórias de umidade estão representadas na Figura 4, juntamente com as análises que utilizam modelagens numéricas para determinar as deformações permanentes.

Devido à consideração de parâmetros diferentes dos utilizados nas análises dos ensaios, como os pares de tensões e o número de aplicações de cargas maiores, correspondentes ao número N de cada estrutura, as análises realizadas por meio de modelagens numéricas apresentaram divergências em relação aos resultados dos ensaios laboratoriais, resultando em ordens de deformações permanentes maiores. Nesse contexto, ao avaliar laboratório *versus* análise numérica, evidencia-se o aumento da escala do eixo das abcissas ao passo que a umidade do subleito aumenta.

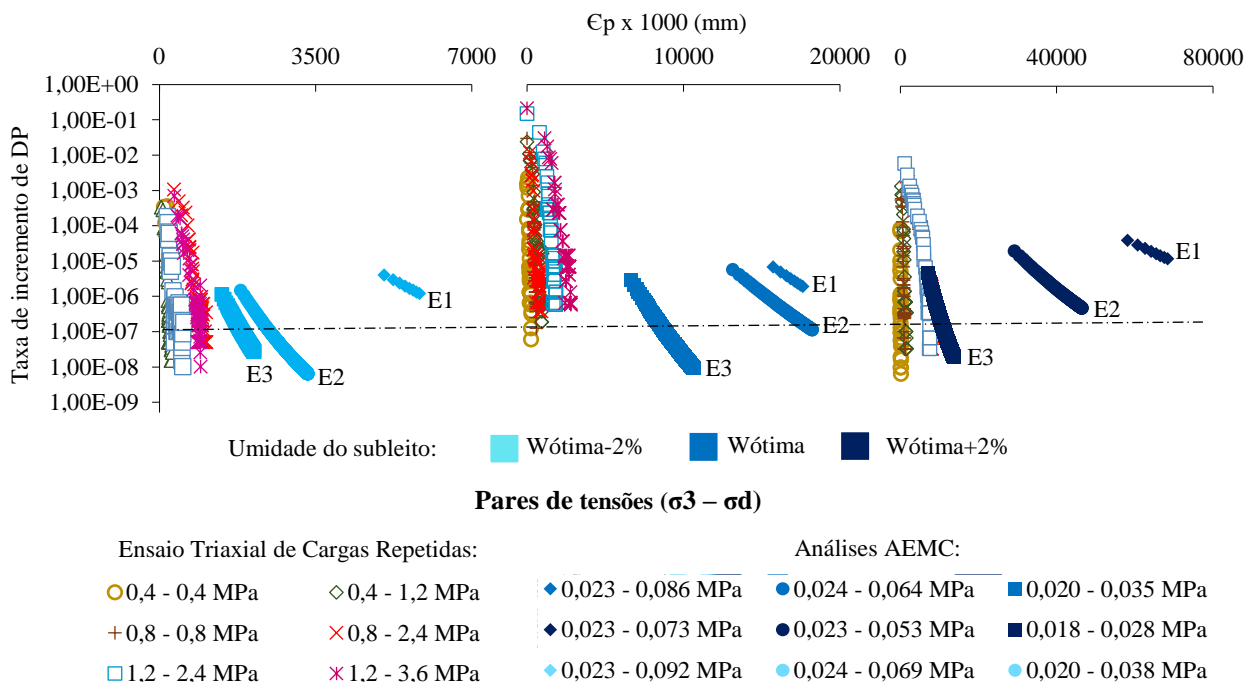
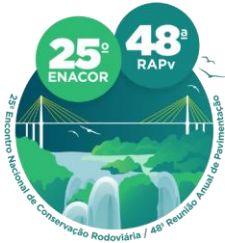


Figura 4. Avaliação de *shakedown* pelo Modelo de Dawson e Wellner (1999), triaxial de cargas repetidas *versus* análises numéricas



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

www.rapvenacor.com.br



Ao analisar os resultados do ensaio triaxial de cargas repetidas, é evidente que se predomina os domínios de *shakedown* para o domínio A. Nesse domínio, ocorre o acomodamento plástico do material, em que as deformações plásticas diminuem até que apenas respostas elásticas sejam observadas após um certo número de solicitações, chegando a atingir a taxa de incremento de deformação permanente por ciclo de carga na ordem de 10^{-7} . Essas características são desejáveis para subleitos rodoviários, como mencionado por Guimarães (2001).

A Figura 5 mostra os resultados das análises numéricas aplicadas ao Modelo de Dawson e Wellner (1999). Observa-se que as estruturas com camadas de revestimento mais finas e/ou teores de umidade do subleito acima do valor de compactação tendem a apresentar domínios de *shakedown* indesejáveis. Nesses casos, o material tende a acomodar-se plasticamente apenas em magnitudes de deformação plástica consideráveis. Já ao passo que se analisa as estruturas que ganharam rigidez devido ao processo de secagem e consequentemente aumento de sucção, verifica-se a ocorrência tangível de acomodamento plástico com deformações permanentes de grandezas consideravelmente menores.

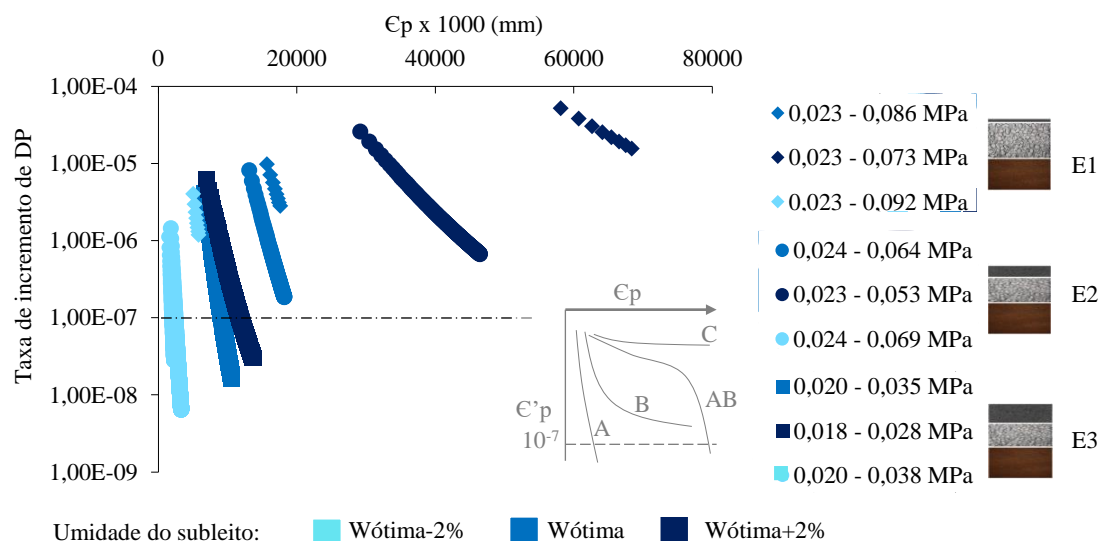
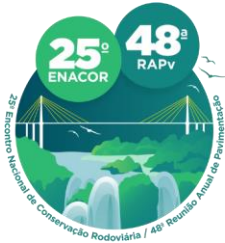


Figura 5. Avaliação de *shakedown* pelo Modelo de Dawson e Wellner (1999), análises numéricas

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao utilizar parâmetros de deformabilidade e resiliência dos solos para as condições de umidade de compactação e trajetórias de umedecimento e secagem, realizou-se modelagens numéricas em torno de três estruturas dimensionadas para diferentes valores de número N . Em seguida, ao relacionar as tensões principais presentes em diferentes pontos do subleito com seus parâmetros de deformabilidade, calculou-se os valores correspondentes de deformação permanente usando o Modelo de Guimarães (2009). Os resultados indicam que a variação de umidade do subleito pode, em alguns casos, minimizar os valores de ATR durante os processos de secagem, e em casos de umedecimento, essa variação pode prejudicar drasticamente o desempenho, resultando em valores elevados de ATR.

Os pares de tensões retirados das análises numéricas apresentaram-se dentro dos limites superiores dos pares de tensões utilizados nos ensaios laboratoriais. No entanto, durante as análises de *shakedown* dos resultados dos ensaios de triaxial de cargas repetidas, em conjunto com as análises numéricas, ao utilizar as prescrições de Dawson e Wellner (1999), identificou-se algumas



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

www.rapvenacor.com.br



divergências. Essas surgiram devido às diferenças entre os pares de tensões, razões de tensões e número de aplicações de carga utilizados. Já ao avaliar exclusivamente os resultados das análises numéricas, é possível observar claramente os domínios de *shakedown* nas estruturas que passaram pela trajetória de secagem do subleito, com acomodamento plástico para deformações permanentes de pequena magnitude.

Devido às menores espessuras de revestimento asfáltico, as estruturas E1 e E2 não conseguiram distribuir e atenuar adequadamente as tensões que agem no subleito, ao contrário das estruturas mais robustas, como a E3. Assim, os valores de ATR para E1 e E2, no final de seus períodos de projeto, foram elevados, excedendo os limites prescritos, exceto nos casos em que as estruturas foram submetidas a um processo de secagem do subleito.

É conhecido que os solos tropicais lateríticos, quando compactados na umidade ótima, tendem a aumentar sua resistência ao cisalhamento, reduzir sua deformabilidade e permeabilidade. À medida que tendem a reduzir seus teores de umidade, esses convergem para umidade de equilíbrio, que resulta em um aumento da sucção entre suas partículas, levando a um aumento da rigidez e à redução das deformações permanentes à luz das solicitações de cargas repetidas. No entanto, devido à sua granulometria fina, esses solos são altamente suscetíveis a apresentar um desempenho indesejado quando expostos à água. Isso ressalta a importância de estruturas de pavimentos rodoviários que possuam sistemas de drenagem e/ou impermeabilização eficientes, a fim de impedir a trajetória de umedecimento do subleito.

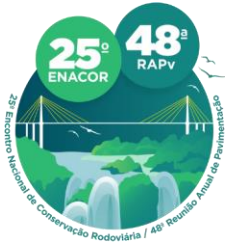
Diante a isso, vale ressaltar que conforme apresentado nas avaliações de ATR e *shakedown*, a estrutura E1 apresentou pior comportamento em relação as demais analisadas, tendo as maiores magnitudes de aumento de ATR conforme se aumenta a umidade do subleito. Essa geralmente, corresponde a estruturas dimensionadas para rodovias de tráfego leve, que em alguns casos despreza-se a execução de capeamento dos acostamentos de forma adequada, possibilitando o umedecimento das camadas subjacentes e vindo então apresentar desempenho desfavorável a sua vida útil. Diante disso, torna-se evidente a necessidade de realizar o capeamento de acostamentos em rodovias dimensionadas para baixo fluxo de tráfego.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, a CNPq e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pelas bolsas de pesquisa disponibilizadas. Agradecem também ao apoio da ANP/PETROBRAS, associado ao investimento de recursos oriundos das Cláusulas de P,D&I, e ao suporte ao desenvolvimento desta pesquisa através do Termo de Execução Descentralizada - TED Nº 00545/2022/IPR/DPP/DNIT SEDE (SEI 12931123), celebrado entre esta Autarquia e UFSM.

REFERÊNCIAS

- BERNUCCI, L. L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEDA, 2022.
- CAMAPUM, J. C., GITIRANA, G., MACHADO, S. MASCARENHA, M. M. A., FILHO, F. C. S. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. ABMS, São Paulo, 2015.
- CRISPIM, F. A., LIMA, D.C., SHAEFER, C. E. G. R., SILVA, C. H. C., CARVALHO, C. C. B., BARBOSA, P. S. A., BRANDÃO, E. H. **The influence of laboratory compaction methods on soil structure: mechanical and micromorphological analysis**. Soils and Rocks, 34, 91-98, 2011.
- DAWSON, A.; WELLNER, F. **Plastic behaviour of granular materials**. Final Report ARC Project 933. University of Nottingham, 1999.



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

www.rapvenacor.com.br



- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT ME 134: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 18p., 2018a.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT ME 179: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio.** Rio de Janeiro, 20p., 2018b.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Publicação IPR – 719: Manual de pavimentação.** Rio de Janeiro, 2006.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Publicação IPR – 720: Manual de restauração de pavimentos asfálticos.** Rio de Janeiro, 2006.
- GEHLING, W. Y. Y. et al. **Estruturas de pavimento no contexto dos solos não saturados.** Solos não saturados no contexto geotécnico. ABMS, cap. 25, São Paulo, 687-731, 2015.
- GUIMARÃES, A.C.R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.
- KERN, C. **Análise de desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto no Rio Grande do Sul: a avaliação de um pavimento submetido à oscilação do lençol freático.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- KHOURY, N. N. et al. **Effect of soil suction on resilient modulus of subgrade soil using the filter paper technique.** In: Annual Meeting of Transportation Research Board, 82, 2003, Washington, D.C. Proceedings... Washington, D.C.: TRB, 2003.
- LEKARP, F., DAWSON, A. **Modelling permanent deformation behavior of unbound granular materials.** Construction and Building Materials, 12, N. 1, 9-18, Elsevier Science Ltd, 1998.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M.G. **Mecânica dos Pavimentos.** 2. ed. Rio de Janeiro: SIBI/UFRJ, 570 p, 2006.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M.G. **Mecânica dos Pavimentos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 638 p, 2015.
- PEZO, R. F., CLAROS, G, HUDSON, W. R., STOKOE II, K. H. **Development of reliable resilient modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design.** Research Report, 1992.
- SAGRILO, A.V. **Estudo de Deformabilidade e Empacotamento de Britas com Diferentes Origens Litológicas do Estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2020.
- SILVA, B. A. **Análise mecânica de um pavimento rodoviário submetido à oscilação de lençol freático simulada em modelo físico de verdadeira grandeza.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2009.
- SOUZA, M. L. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** 3 ed. rev. e atual, Rio de Janeiro, 1981.
- VESTENA, P. M. **Segmentos experimentais na BR 116/RS empregando TLAflex, HIMA e 55/75-E (SBS): caracterização avançada e monitoramento.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.
- WERKMEISTER, S., DAWSON, A. R., WELLNER, F. **Permanent Deformation Behavior of Granular Materials and the Shakedown Concept.** Transportation Research Record 1757, 75- 81. 2001.