



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR  
[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



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

### DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLO ARGILOSO LATERÍTICO POR MEIO DA METODOLOGIA MULTISTÁGIOS

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

*Luiz Henrique Ferrador Ben<sup>1</sup>; Paula Taiane Pascoal<sup>1</sup>; Patricia Rodrigues Falcão<sup>1</sup>; Magnos Baroni<sup>1</sup>; Luciano Pivoto Specht<sup>1</sup> & Marcel Neitzke<sup>1</sup>*

#### RESUMO

No presente artigo, verificou-se a deformação permanente de um solo argiloso de comportamento laterítico empregado em subleito. Por ser um material sujeito a grandes deformações quando submetido a elevadas tensões, a caracterização quanto a plasticidade é pertinente, criando assim uma demanda maior pela investigação de suas propriedades plásticas. No Brasil, essa avaliação segue um protocolo extenso, envolvendo diversas amostras e condições distintas de tensões, porém, outros países já utilizam ensaios em multiestágios como forma de avaliar a deformação permanente. Diante do exposto, neste artigo é apresentado um comparativo do protocolo estágio único frente a dois protocolos multiestágios adaptado a duas diferentes condições de aplicações de ciclos de cargas, sendo a primeira delas realizadas para seis distintos pares de tensões variando as tensões confinante e desvio, e a segunda com a tensão confinante fixada e variando apenas a tensão de desvio. Pode-se concluir que as deformações permanentes acumuladas crescem à medida que as tensões aplicadas aumentam e que elas apresentam uma tendência ao acomodamento, resultado fortemente alinhado com o identificado pela metodologia dita tradicional. Frente a isso a utilização da metodologia multiestágios é promissora para uma caracterização prévia do material, possibilitando identificar tendência de comportamentos para diversos parâmetros com um menor tempo de ensaio e uma menor quantidade de material, podendo vir a ser utilizada como critério de escolha entre jazidas. Ainda, são necessários mais estudos de forma a validar o protocolo para um conjunto maior de materiais.

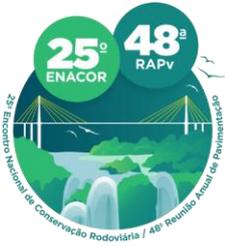
**PALAVRAS-CHAVE:** ensaios triaxiais de cargas repetidas; deformabilidade; solo tropical; pavimentação.

#### ABSTRACT

In this paper, the permanent deformation of a clay soil with lateritic behavior used as subgrade was verified. Because it is a material subject to large deformations when subjected to high stresses, the characterization regarding plasticity is pertinent, thus creating a greater demand for the investigation of its plastic properties. In Brazil, this evaluation follows an extensive protocol involving various samples and different stress conditions. However, other countries already use multi-stage tests to evaluate permanent deformation. In this article, a comparison is presented between the conventional standardized protocol and two multi-stage protocols adapted to two different conditions of cyclic load applications. The first condition involved six different pairs of varying confining and deviator stresses, while the second condition kept the confining stress fixed and varied only the deviator stress. It can be concluded that the accumulated permanent deformations increase as the applied stresses increase, and they tend to stabilize, which is strongly aligned with the findings of the traditional methodology. Therefore, the use of multi-stage methodology shows promise for preliminary material characterization, enabling the identification of behavioral trends for various parameters with shorter testing time and less material required. It could be used as a criterion for selecting between deposits. It should be noted that the protocol addressed in this study was specific to this material, and each behavior should be evaluated individually.

**KEY WORDS:** repeated triaxial tests; deformability; tropical soil; pavement.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Santa Maria, [luizhfb@hotmail.com](mailto:luizhfb@hotmail.com); [paulatpascoal@gmail.com](mailto:paulatpascoal@gmail.com); [falcao.rodriques.patricia@gmail.com](mailto:falcao.rodriques.patricia@gmail.com); [magnos.baroni@gmail.com](mailto:magnos.baroni@gmail.com); [luspecht@ufsm.br](mailto:luspecht@ufsm.br); [neitzkemarcel@gmail.com](mailto:neitzkemarcel@gmail.com)



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR  
[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



## INTRODUÇÃO

O pavimento flexível sofre deformações ao longo da vida útil, sendo que isso danifica as diferentes camadas que compõem a sua estrutura. O excesso das deformações pode causar o afundamento de trilha de roda (ATR), que juntamente com o trincamento por fadiga são os principais defeitos dos pavimentos flexíveis (LEKARP *et al.*, 2000; CERNI *et al.*, 2012; MEDINA; MOTTA, 2015).

A deformação permanente é, por definição, o resultado do acúmulo de deformações não recuperáveis oriundos da ação dos carregamentos, visto que os materiais não são completamente elásticos (UZAN, 2004). A deformação plástica pode interferir na segurança e no conforto do usuário, pois pode saturar as camadas subjacentes, acumular água ao longo da trilha de roda e dificultar a movimentação do veículo ao longo da via (BERNUCCI *et al.*, 2022). Como forma de minimizar os danos causados pelo ATR, o dimensionamento por intermédio do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) possibilita a concepção do pavimento a partir dos esforços aos quais ele estará sujeito, avaliando a rigidez e a danificação das camadas, com o intuito de verificar o comportamento da deformação permanente para as camadas granulares e para as de solo (DNIT, 2020).

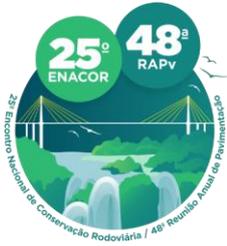
Diante disso, a partir de adaptações da normativa brasileira, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar dois protocolos para o ensaio de deformação permanente com aplicação de múltiplos estágios. Ambas as condições foram propostas para avaliar as cargas em um solo argiloso com comportamento laterítico. Tal procedimento objetivou avaliar a possível redução de tempo e quantidade de material demandado. Os resultados destas avaliações são comparados com os resultados do protocolo de estágio único, realizados por Pascoal (2020), para o mesmo solo e energia de compactação, como forma de validar os resultados/parâmetros obtidos pelo protocolo multiestágios.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ensaio de deformação permanente, realizado através do equipamento triaxial de cargas repetidas, tem objetivo de compreender o comportamento e determinar propriedades plásticas para serem utilizadas na previsão do desempenho dos materiais quanto a este mecanismo de degradação, analisando então, a resposta estrutural do pavimento. Por conseguinte, no Brasil, realiza-se a caracterização de propriedades plásticas do material através da aplicação de pelo menos 150.000 ciclos de carga para cada par de tensões confinante e desvio, de acordo com a normativa do DNIT 179 (DNIT, 2018). A caracterização plástica de um material é finalizada após a realização de pelo menos seis pares de tensões válidos, podendo ser realizado para nove pares de tensões. Tal procedimento demanda considerável tempo de preparo das amostras, uma vez que cada amostra submetida a um par demanda em torno de 21 horas no equipamento citado, com aplicação da tensão a frequência de 2 Hz.

A partir do ensaio de deformação permanente é possível distinguir tipos de comportamento dos materiais quanto a resistência à ruptura plástica, em função dos graus de tensões aplicados. Dessa maneira, através do indicado na norma do DNIT 179 (2018), os materiais podem apresentar quatro comportamentos distintos. O Tipo I e II consideram um acomodamento plástico (*shakedown*) do material, indicando uma tendência à estabilização da deformação permanente com o número de ciclos de carregamentos, diferindo um do outro em relação ao valor alto de deslocamento acumulado. O Tipo III indica que o material não se acomoda, ao passo que no Tipo IV, o material atinge a ruptura com baixos números de repetições de ciclos de carga.

Seguindo os preceitos de Dawson e Wellner (1999) e Werkmeister *et al.* (2001) pode-se identificar através de análises o acomodamento (*shakedown*), sendo possível encontrar o comportamento A (ocorrência de *shakedown*), comportamento B (*plastic creep*) e C (*incremental collapse*). Ainda, de acordo com o DNIT (2018), o material analisado pode apresentar o comportamento AB, englobando



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

www.rapvenacor.com.br



materiais com significativas deformações iniciais seguindo de acomodamento plástico. Ao realizar essas análises, para verificar se o material atingiu o *shakedown*, a taxa de acréscimo das deformações permanentes por ciclo de aplicação de carga deve estar na ordem de  $10^{-7} \times 10^{-3}$  m por ciclo de aplicação de carga.

Para obtenção dos parâmetros plásticos, seguindo a recomendação da normativa vigente, utiliza-se o método descrito por Guimarães (2009), conforme a equação 01, amplamente utilizado pela literatura técnica nacional e este modelo está incluído no *framework* do MeDiNa.

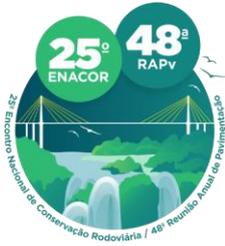
$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \left( \frac{\sigma_3}{\rho_0} \right)^{\psi_2} \cdot \left( \frac{\sigma_d}{\rho_0} \right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (1)$$

Em que  $\varepsilon_p$  (%) representa a deformação específica plástica;  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $\psi_3$ ,  $\psi_4$  são parâmetros de regressão do ensaio;  $\sigma_3$  é a tensão confinante;  $\sigma_d$  a tensão desvio;  $\rho_0$  a pressão de referência (atmosférica) e  $N$  o número de ciclos de aplicação de carga. Uma alternativa para a avaliação do comportamento plástico de materiais é o ensaio de deformação permanente multiestágios, no qual uma única amostra é submetida a diferentes estados de tensões. Diversos pesquisadores realizaram ensaios multiestágios com variações de até quatro estado de tensões, geralmente com 10.000 ciclos de solicitações a cada estado, para diversos materiais empregados no subleito, sub-base ou base de pavimentos (CERNI *et al.*, 2012; XIAO *et al.*, 2015; NAZZAL *et al.*, 2020a; NAZZAL *et al.*, 2020b). Ensaios com cinco ou mais variações de tensões também vem sendo realizados ao longo dos últimos anos, seguindo normativas internacionais ou adaptações realizadas a partir dessas normas (SONG AND OOI, 2010; HUSSAIN *et al.*, 2011; ERLINGSSON E RAHMAN, 2013; RAHMAN E ERLINGSSON, 2015; SALOUR *et al.*, 2016; ERLINGSSON *et al.*, 2017; DELONGUI *et al.*, 2018; NGUYEN E AHN, 2019; NAEINI *et al.*, 2021; BEN *et al.* 2022).

Frente a isso foram realizadas a comparação para distintos protocolos voltados ao ensaio de deformação permanente com aplicação de múltiplos estágios. A condição 1 foi realizada conforme proposto por Pascoal (2020), enquanto a condição 2 foi realizada a partir de uma adaptação da normativa europeia (BSI, 2004), seguindo protocolos já difundidos na literatura (SONG AND OOI, 2010; HUSSAIN *et al.*, 2011; ERLINGSSON E RAHMAN, 2013; RAHMAN E ERLINGSSON, 2015; SALOUR *et al.*, 2016; ERLINGSSON *et al.*, 2017; DELONGUI *et al.*, 2018; NGUYEN E AHN, 2019; NAEINI *et al.*, 2021).

## MATERIAIS E MÉTODOS

O solo em estudo foi extraído do horizonte pedológico B, de uma jazida no município de Cruz Alta, na mesorregião Noroeste Rio-Grandense, a mesma utilizada para execução de um trecho situado na RS-342. A área de coleta apresenta latossolos vermelho-escuros de textura média argilosa e profundos (LEMOS, 1973). O solo utilizado na presente pesquisa foi caracterizado por Pascoal *et al.* (2021). A caracterização física e química do solo em estudo fora realizada de acordo com as seguintes normativas: análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, com e sem defloculante, seguindo os preceitos da NBR 7181 (ABNT, 2016); massa específica real dos grãos, seguindo os princípios da NBR 6508 (ABNT, 2016) e limites de Atterberg de acordo com as normas da NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016). Além disso foram realizados ensaios de análise química e fluorescência de Raio-X. Os resultados destas caracterizações constam na Tabela 1. Cabe ressaltar que o processo de formação de solos lateríticos são produtos de intensa intemperização que resultam na lixiviação de minerais menos resistentes. Salienta-se ainda que devido a esse processo ocorre a redução de SiO<sub>2</sub> (Dióxido de Silício) e o aumento de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Óxido de Ferro) e Al(OH)<sub>3</sub> (Óxido



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



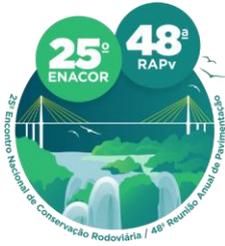
de Alumínio). Conforme pode ser observado, há uma alta concentração de óxidos de ferro e alumínio. Portanto os resultados quanto a caracterização Fluorescência do Raio-X corroboram com a os resultados obtidos através da classificação MCT.

Tabela 1. Ensaio de caracterização física, química, classificação e caracterização quanto a resiliência do solo (PASCOAL *et al.*, 2021)

Caracterização física		Caracterização química	
% areia grossa (0,6 - 2,0 mm)	0	Capacidade de troca de cátions	1,8
% areia média (0,2 - 0,6mm)	8	Cátions básicos Ca/K/Mg	0,3/0,02
% areia fina (0,06 - 0,2mm)	25	Cmol (dm <sup>3</sup> )	0,4
% silte (2µm - 0,6mm)	26	Saturação - Al/Bases (%)	55,6/9,2
% argila (%2µm)	41	Matéria orgânica (%)	0,20
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	27,8	pH	5,8
Limite de liquidez (%)	55	<b>Fluorescência do Raio-X em %</b>	
Limite de plasticidade (%)	44	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,88
Índice de plasticidade (%)	11	SiO <sub>2</sub>	32,45
<b>Classificação</b>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,38
Classificação AASHTO	A-7-6	TiO <sub>2</sub>	4,72
Classificação SUCS	MH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,99
Classificação MCT	LG'	Outros	2,58
<b>Compactação – Energia Intermediária</b>			
Umidade ótima (%)	25,6	MEAS (kg/m <sup>3</sup> )	1625
<b>Parâmetros resilientes - Modelo composto</b>			
k1: 739,2	k2: 0,34	k3: 0,00	R <sup>2</sup> : 0,90

Pelo fato deste material ter sido empregado na RS-342 na energia normal para o corpo do aterro, e na energia intermediária para a camada final de terraplanagem, e considerando o fato de apresentar bom comportamento frente às solicitações no que tange a resiliência e a deformação permanente, conforme constatado por Pascoal (2020), optou-se por considerar a energia intermediária na presente pesquisa. Sendo assim, a compactação foi realizada nesta energia, utilizando um cilindro tripartido de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, em 10 camadas, com 27 golpes por camada, considerando a altura de queda de 30,5 cm e o soquete de 2,5 kg, Como forma de validação das amostras, o DNIT (2018) admite uma tolerância de  $\pm 0,5\%$  em relação a umidade ótima. Como essa mesma normativa não indica critério de variação da densidade máxima, foi adotado uma variação de  $\pm 1\%$  em relação ao grau de compactação para a validação da compactação do corpo de prova.

O equipamento triaxial de cargas repetidas é utilizado para realizar o ensaio de deformação permanente. De acordo com a normativa vigente, a frequência de aplicação de cargas recomendada é de 2 Hz, podendo ser utilizadas frequências de 1 até 5 Hz, sendo a duração do pulso de carga para qualquer frequência de 0,1 segundo. Durante todo o ensaio, a tensão confinante é mantida constante (não cíclica). Inicialmente, deve-se aplicar ciclos de condicionamento com finalidade de realizar o ajuste entre o pistão e o cabeçote. A Tabela 2 demonstra os nove pares de tensões confinante e desvio, preconizados na norma do DNIT (2018). A presente normativa permite a realização do ensaio em seis pares de tensões, desde que estes sejam representativos. Sendo assim, Lima *et al.* (2019) investigaram a melhor combinação de pares e estes estão demarcados na Tabela 2.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 2. Pares de tensão para o ensaio de deformação permanente (DNIT, 2018)

Número do par de tensões	Tensão confinante $\sigma_3$ (KPa)	Tensão desvio $\sigma_d$ (KPa)	Razão de tensões $\sigma_d / \sigma_3$
1*		40	1
2	40	80	2
3*		120	3
4*		80	1
5	80	160	2
6*		240	3
7		120	1
8*	120	240	2
9*		360	3

\* Pares de tensões selecionados ao ensaio de DP (LIMA *et al.*, 2019)

### Deformação Permanente Estágio Único

Pascoal (2020) realizou ensaios de deformação permanente seguindo o protocolo da norma do DNIT (2018), em que aplicou um par de tensões em cada amostra por pelo menos 150.000 ciclos, na frequência de 2 Hz, sendo que, cada amostra foi submetida ao ensaio por aproximadamente 22 horas, levando assim um mínimo de 9 dias para a caracterização completa via metodologia supracitada. A Figura 1 apresenta a deformação acumulada para os diferentes pares de tensões aplicados.

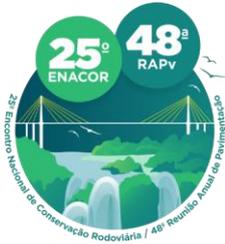
Dentre os resultados obtidos, se faz possível identificar padrões entre a razão dos pares de tensão ( $\sigma_d/\sigma_3$ ) e a deformação observada, pois quanto maior a tensão desviadora a qual o material está submetido, maiores são as deformações permanentes para uma mesma tensão confinante. Dentre os comportamentos identificados, pode-se observar que os pares de razão 1 obtiveram as menores deformações acumuladas. Analogamente, pares que apresentaram maiores deformações foram em maioria de razão 3 entre tensões, em que foi identificado uma deformação acumulada de 1,22 mm. Por meio de regressão múltipla linear, Pascoal (2020) obteve os parâmetros para o Modelo de Guimarães (2009), considerando para o cálculo a  $\rho_0$  de 0,1 MPa, obtendo o demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de DP pelo modelo de Guimarães (2009) (PASCOAL, 2020)

Solo – Energia Intermediária	$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_3$	$\psi_4$	$R^2$
	0,017	0,699	0,517	0,103	0,933
	$E_p = 0,017 (\sigma_3/\rho_0)^{0,699} (\sigma_d/\rho_0)^{0,517} N^{0,103}$				

Quanto a análise do material no que diz respeito ao padrão de suas deformações, foi constatado a ocorrência do fenômeno de *shakedown*, conforme demonstrado na Figura 1 (b). Salienta-se ainda que todas as amostras tendem ao acomodamento, apresentando comportamento A, conforme Dawson e Wellner (1999) E um comportamento Tipo I segundo a normativa DNIT (2018).

Guimarães (2009) explica que a taxa de variação da DP pode ser nula com o acréscimo de ciclos de carga ou tende a diminuir bastante quando o material está próximo do acomodamento. Sendo assim, constata-se que, a partir de determinado número de ciclos de aplicação de cargas, as deformações tenderam a se tornar constantes, apresentando variações pequenas. A fim de investigar esse



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



acontecimento, a Figura 2 apresenta a porcentagem de deformação total para cada corpo de prova aos 1.000, 10.000, 50.000 e 100.000 ciclos de repetição de cargas. Ao atingir 1.000 ciclos de ensaio de DP, ocorreu uma variação de 67% a 76% na deformação acumulada total, com exceção das amostras submetida ao menor par de tensões que atingiu 51% da deformação total aos 1.000 ciclos. Ao atingir 10.000 ciclos de repetição de carga, a deformação permanente acumulada nas seis amostras submetidas a diferentes pares de tensão já se aproximava de 80%. No final dos 50.000 ciclos, as amostras apresentaram de 90% a 99% da deformação total.

Figura 1. (a) DP acumulada; (b) Investigação da ocorrência de *shakedown* (PASCOAL, 2020).

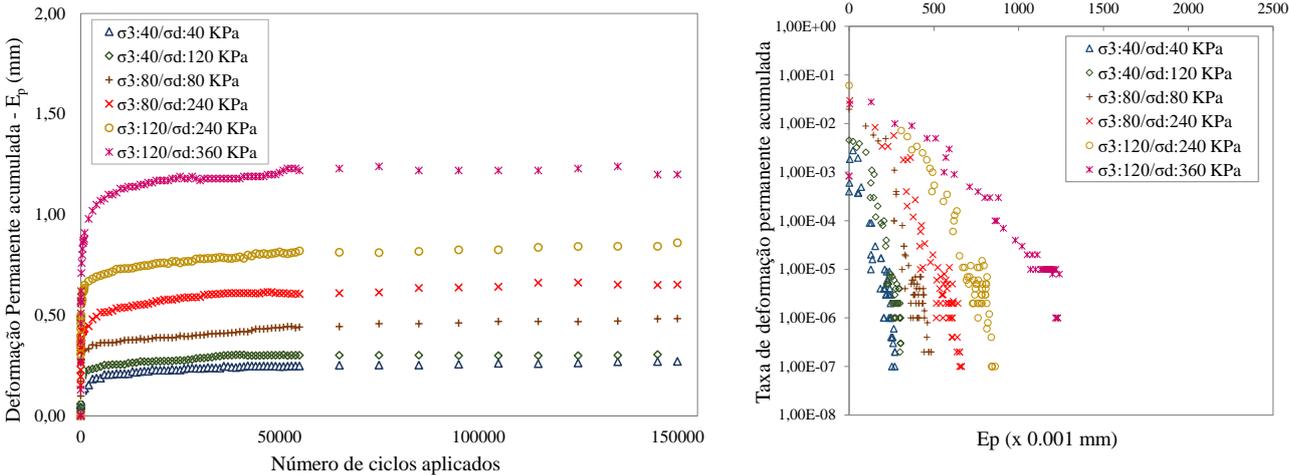
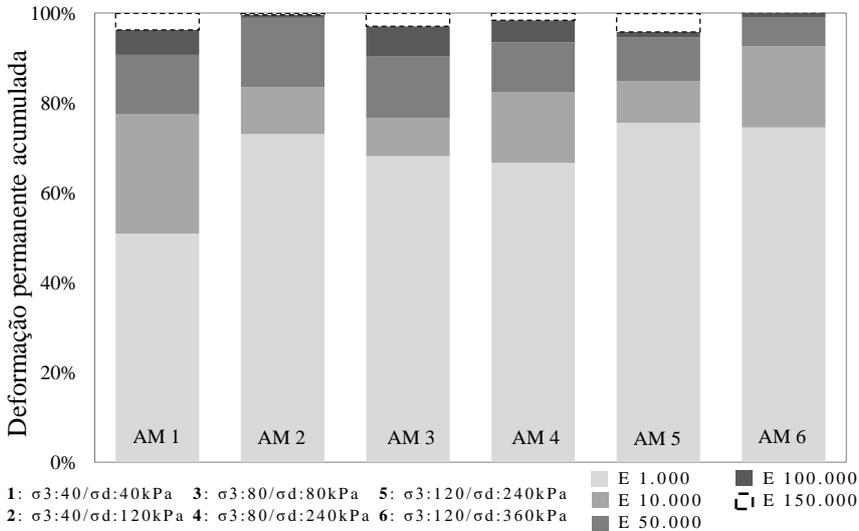
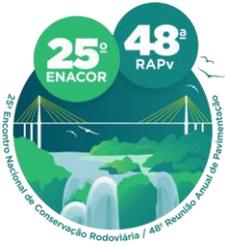


Figura 2. Deformação permanente acumulada ao final dos ciclos 1.000, 10.000, 50.000 e 100.000 (Adaptado de PASCOAL, 2020).



**Deformação Permanente Multiestágios**

A metodologia multiestágios (m-e) vem à tona uma vez que o ensaio de deformação permanente de estágio único, mesmo quando utilizado o protocolo reduzido, acaba demandando um longo período, desgastando assim a parte mecânica dos equipamentos, além de necessitar uma maior quantidade de material. Frente a isso o Song e Ooi (2010), Delongui *et al.* (2018), Nguyen e Ahn (2019), aplicaram



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

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



a normativa europeia EM 13286-7 (BSI, 2004) como forma de investigar a viabilidade da metodologia aplicada a diferentes materiais de uso na pavimentação.

Na busca em compreender a metodologia multiestágios para caracterizar propriedades plásticas do material, propõem-se por intermédio da presente pesquisa, a realização de ensaios triaxiais de cargas repetidas através de dois protocolos multiestágios distintos. Tal fato objetiva analisar qual deles se assemelha aos resultados encontrados na metodologia de estágio único. Portanto, propõem-se a variação no número de repetições por ciclos de cargas, as tensões de desvio e as tensões confinantes, de acordo com as seguintes condições:

- Condição 1: 10.000 ciclos para cada um dos pares 1, 3, 4, 6, 8 e 9 da Tabela 2 (ensaio realizado em triplicata);
- Condição 2: 10.000 ciclos para todos os pares da Tabela 2, em três amostras diferentes, fixando a tensão confinante e variando a tensão de desvio da seguinte forma:
  - Tensão confinante fixada em 40 kPa e tensão de desvio variando em 40, 80, 120 kPa;
  - Tensão confinante fixada em 80 kPa e tensão de desvio variando em 80, 160, 240 kPa;
  - Tensão confinante fixada em 120 kPa e tensão de desvio variando em 120, 240, 360 kPa.

A escolha de realizar os ensaios com 10.000 ciclos de repetição se justifica pelas conclusões obtidas ao realizar o procedimento em estágio único. Além disso, tomou-se como base os preceitos da normativa BSI (2004).

Como forma de analisar os resultados através das distintas metodologias, se fez necessário realizar um comparativo entre o comportamento da deformação permanente e a ocorrência de *shakedown*. Desta forma, pode-se realizar um comparativo com os resultados obtidos por Pascoal (2020) aplicando a metodologia de estágio único para o mesmo material, em comparativo as duas metodologias m-e.

## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### Deformação Permanente Multiestágios – Condição 1

A Tabela 4 demonstra as deformações obtidas após o final de cada aplicação de um par de tensões (10 mil ciclos de solicitação), em que se constata similaridade entre as três amostras dentro de todos os pares de tensões aplicados, apresentando uma faixa entre 3% e 17% dentre os coeficientes de variação. Cabe ressaltar que as maiores variações ocorreram para o par de tensões  $\sigma_3$ : 40 kPa e  $\sigma_d$ : 40 kPa e menores variações para pares de  $\sigma_3$ : 120 kPa e  $\sigma_d$ : 360 kPa. Para a condição 1, em que seis pares foram aplicados em sequência em uma mesma amostra, pode-se constatar que com as crescentes tensões submetidas, houve acréscimo nas deformações identificadas. Na Figura 3 (a), verifica-se que, a partir dos mil ciclos aplicados para cada tensões, as deformações vão se tornando constantes, com pequenas variações entre elas, exceto para o último par. Nas três amostras submetidas ao mesmo protocolo, o par de tensões que ocasionou deformações acentuadas foi o  $\sigma_3$ : 120 kPa e  $\sigma_d$ : 360 kPa, devido à sua magnitude e a relação  $\sigma_d/\sigma_3$  ser de 3.

Ao observar às deformações permanentes acumuladas das três amostras, constata-se um comportamento semelhante em todas, na qual é possível verificar uma tendência ao acomodamento das deformações plásticas, classificando-as como Tipo I ou II, de acordo a norma do DNIT (2018) e conforme Dawson e Wellner (1999). Para a análise da ocorrência do *shakedown*, devido à similaridade das deformações acumuladas ao final dos 10.000 ciclos entre as 3 amostras, optou-se por calcular a média desses valores. Assim, utilizou-se a média das deformações acumuladas das amostras para obter os parâmetros pelo modelo de Guimarães (2009). A Figura 3 (b) apresenta a análise de ocorrência do *shakedown* para o valor médio encontrado.



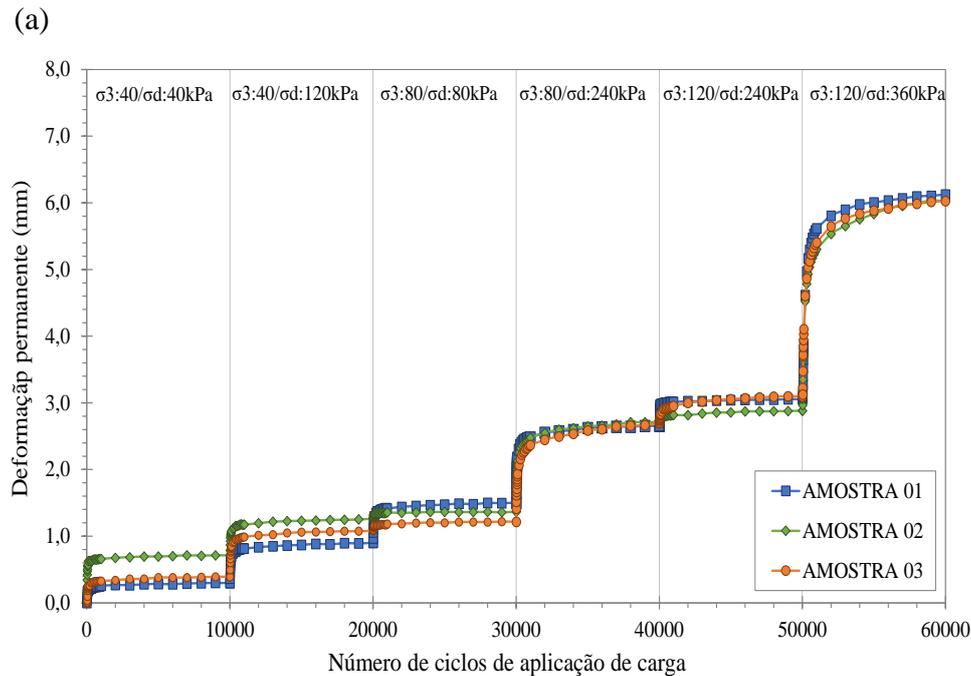
19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR  
[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)

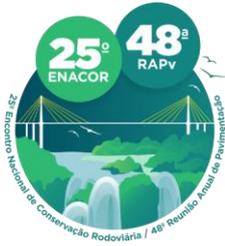


Tabela 4. Análise das deformações nas amostras submetidas a condição 1

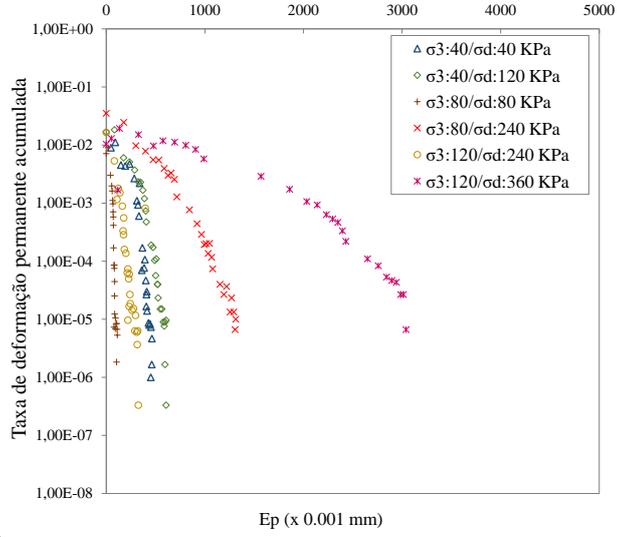
Amostra	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_d/\sigma_3$	E 10.000 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão	Coefficientes de Variação (%)
AM 01				0,030			
AM 02	40	40	1	0,042	0,037	0,006	17
AM 03				0,039			
AM 01				0,061			
AM 02	40	120	3	0,055	0,062	0,008	12
AM 03				0,070			
AM 01				0,012			
AM 02	80	80	1	0,011	0,012	0,002	12
AM 03				0,014			
AM 01				0,116			
AM 02	80	240	3	0,135	0,133	0,017	12
AM 03				0,149			
AM 01				0,041			
AM 02	120	240	2	0,038	0,040	0,002	4
AM 03				0,040			
AM 01				0,308			
AM 02	120	360	3	0,315	0,306	0,011	3
AM 03				0,294			

Figura 3. (a) DP multiestágios – condição 1; (b) Análise da ocorrência de *shakedown* – condição 1.





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

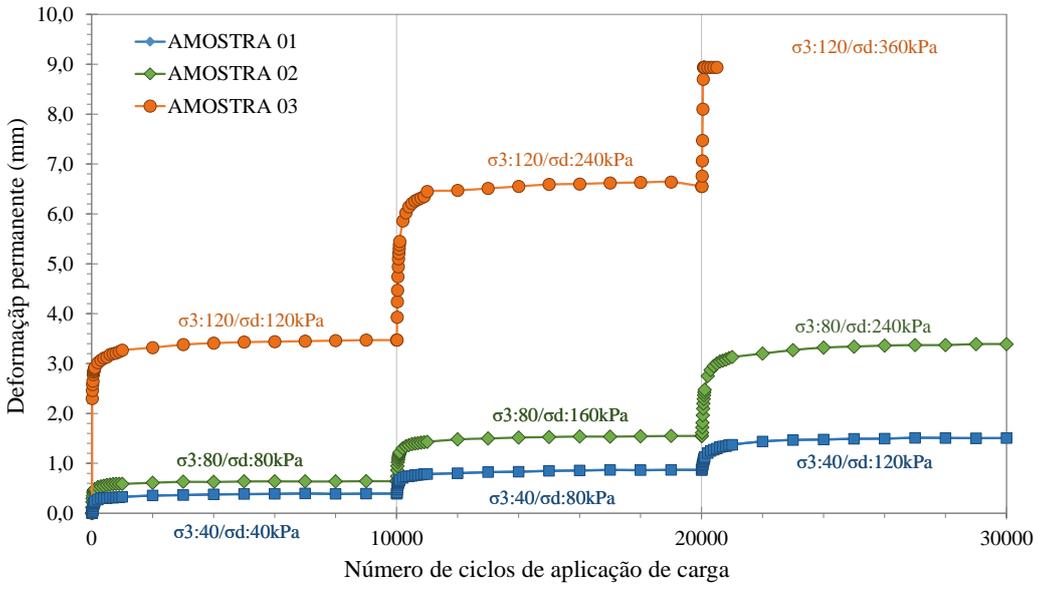


(b)

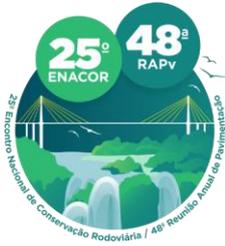
**Deformação Permanente Multiestágios – Condição 2**

No segundo protocolo de ensaio multiestágios, a amostra submetida a tensão confinante de 120 kPa sofreu elevadas deformações, tanto que inviabilizou a aquisição de dados, tendo assim o ensaio encerrado no último par de tensões, conforme demonstrado na Figura 4. As outras duas amostras que tiveram as tensões confinantes fixadas em 40 e 80 kPa, sofreram deformações leves ao comparar com a confinante de 120 kPa.

Figura 4. Deformação permanente multiestágios – condição 2



Na Tabela 5 está apresentado um resumo da deformação acumulada nos seguintes ciclos de repetição de cargas: 50, 100, 500, 1.000, 5.000, 10.000, para cada par de tensão aplicado, totalizando os 30.000 ciclos, sendo 10.000 ciclos de cada um dos três pares de tensão aplicados na norma. Para a condição 2 do protocolo multiestágios não foi possível concluir as análises devido a deformações excessivas identificadas na amostra 6 para o par  $\sigma_3$ : 120 kPa e  $\sigma_d$ : 360 kPa. Devido à grande magnitude da deformação identificada, o *Rectilinear Displacement Transduce* (RDT) não teve



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



curso suficiente para realizar a aquisição de dados a partir dos 1000 ciclos de aplicação de cargas para o terceiro par de tensões submetido a qual a amostra foi submetida, inviabilizando assim a análise de deformação acumulada e conseqüentemente a investigação frente a ocorrência do fenômeno de *shakedown*.

Tabela 5. Análise das deformações das amostras submetidas a condição 2

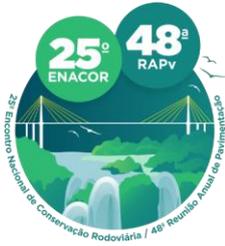
Amostra	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_d/\sigma_3$	Deformação (mm)					
				E50	E100	E500	E1000	E5000	E10000
04	40	40	1	0,0136	0,0241	0,0301	0,0328	0,0383	0,0393
		80	2	0,0200	0,0276	0,0354	0,0391	0,0455	0,0475
		120	3	0,0140	0,0258	0,0427	0,0505	0,0622	0,0636
05	80	80	1	0,0407	0,0480	0,0565	0,0588	0,0637	0,0641
		160	2	0,0433	0,0577	0,0744	0,0789	0,0886	0,0908
		240	3	0,0547	0,0926	0,1450	0,1580	0,1790	0,1840
06	120	120	1	0,2780	0,2920	0,3130	0,3270	0,3430	0,3470
		240	2	0,1470	0,1980	0,2740	0,2980	0,3120	0,3080
		360	3	0,2150	0,2390	0,2390	-	-	-

### Comparativo entre metodologia estágio único e os protocolos m-e

Pelo fato de não concluir o protocolo 2 em função das elevadas deformações em uma das amostras por conta da uma limitação de aquisição de dados, embora tenha um procedimento promissor, o comparativo entre este protocolo e o estágio único, será limitado a análises do comportamento das amostras durante o ensaio, sem considerar a pesquisa de ocorrência de *shakedown* seguindo os preceitos de Dawson e Wellner (1999). Os resultados obtidos nas três amostras do protocolo 2 m-e indicam que elas possuem comportamento Tipo I ou Tipo II, em que tendem a ter acomodamento plástico. Neste caso, este procedimento poderia ser utilizado para uma caracterização prévia do comportamento deste solo. No protocolo 1 m-e, as amostras são similares entre si, assim como demonstraram ter comportamento Tipo I para os cinco pares de tensões as quais foram submetidas. Além de comportamento Tipo II para o maior par de tensões ( $\sigma_3$ : 120 kPa e  $\sigma_d$ : 360 kPa). Sendo assim, para a presente análise este material tende a acomodar plasticamente, mesmo com apenas 10.000 ciclos de aplicação de cada par de tensões, corroborando com o concluído por Pascoal (2020). O mesmo ocorre ao analisar a ocorrência de *shakedown* para as amostras do protocolo 1, em que se pode notar um comportamento do tipo A para todos os pares de tensões, exceto para o par  $\sigma_3$ : 120 e  $\sigma_d$ : 360 kPa, sendo assim, ao serem submetidos a estas solicitações, quanto compactados nas condições ideais na energia intermediária, este solo tende a apresentar um comportamento satisfatório no que tange ao afundamento de trilha de roda. Ao ser solicitado as tensões mais elevadas ( $\sigma_3$ : 120 e  $\sigma_d$ : 360 kPa), o comportamento pode ser caracterizado como transicional entre níveis A e B, demandando assim uma análise de maior rigor quanto à influência desses pares no comportamento do material. Este mesmo comportamento único, que tem seus resultados apresentados na Figura 1.

### CONCLUSÃO

A caracterização dos materiais empregados no subleito de pavimentos é de suma importância considerando sua influência na ocorrência de patologias, principalmente do afundamento das trilhas de rodas. Caracterizar o material frente a sua deformação plástica pode trazer respostas quanto ao seu comportamento, sua tendência ao acomodamento, e até previsão do seu desempenho ao longo das solicitações. Diante disso e visando propor uma alternativa para redução da metodologia de ensaio, este estudo propôs uma avaliação do comportamento plástico de um solo laterítico, por meio de ensaio



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

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

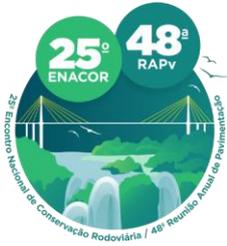


de deformação permanente multiestágios em duas diferentes condições, comparando aos resultados obtidos pelo protocolo convencional da normativa vigente. Nas duas condições da metodologia multiestágios foi identificada a estabilização das deformações, tornando-as praticamente constantes, com poucos ciclos de aplicação de tensões. Comportamento esse análogo ao identificado pelo ensaio realizado pela metodologia convencional. Outra semelhança entre as distintas metodologias foi o comportamento frente a pares de razão  $\sigma_d/\sigma_3$ : 3, sendo  $\sigma_3$ : 120 kPa e  $\sigma_d$ : 360 kPa, que ocasionou deformações de elevadas magnitudes.

Ao observar o comportamento das metodologias multiestágios frente as deformações permanentes, constata-se um padrão entre as amostras analisadas, na qual é possível verificar uma tendência ao acomodamento das deformações plásticas, classificando-as como Tipo I ou II, de acordo a norma do DNIT (2018) corroborando com o comportamento identificado para o método convencional. Portanto, a aplicação da metodologia multiestágios mostrou-se eficiente para o critério de seleção dos materiais, uma vez que é possível identificar comportamentos semelhantes à metodologia tradicional em relação ao tipo de deformação e ao comportamento diante das diferentes razões de tensões. No entanto, é necessária uma investigação aprofundada sobre a utilização desse protocolo para determinar parâmetros de deformação permanente, uma vez que seria necessário aplicar os conceitos de *time hardening* (ERLINGSSON E RAHMAN, 2013), nos quais a deformação permanente acumulada estabelecida pelas condições de solicitação e pelo tempo são consideradas para calcular o número equivalente de ciclos de carga necessário para atingir a mesma deformação no caso de um único estágio. Vale ressaltar que o comportamento observado através das metodologias proposta tende a ser diferente para materiais distintos, demandando assim uma avaliação individual para cada caso específico. Portanto, essa proposta busca uma maior compreensão utilizando menos material e menor tempo de equipamento, sendo uma prática com grande potencial em termos de agilidade e conveniência na caracterização dos materiais. Em pesquisas futuras, indica-se a aplicação dos conceitos de *time hardening* para obtenção de parâmetros de deformação permanente, garantindo assim caracterização completa quanto a propriedades plásticas através unicamente da metodologia multiestágios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016.
- BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.
- BEN, L.H.F., SAGRILO, A.V.S., PASCOAL, P.T., FEYH, G.A., BARONI, M., SPECHT, L.P. Investigação da deformação permanente de brita graduada simples a partir da metodologia multiestágios. Revista Estradas (Porto Alegre), 27, 74-79, 2022.
- BERNUCCI, *et al.* Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.
- BS EN 13286-7. Unbound and hydraulically bound mixtures—cyclic load triaxial test for Unbound Mixtures British Standard Institute, 2004.



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

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



- CERNI, G., CARDONE, F., VIRGILI, S., CAMILLI, S. Characterisation of permanent deformation behavior of unbound granular materials under repeated triaxial loading. *Construction and Building Materials*, 28, 79-87, 2012.
- DELONGUI, L., MATUELLA, M., NÚÑEZ, W. P., FEDRIGO, W., SILVA FILHO, L. C. P., CERATTI, J. A. P. Construction and Demolition Waste Parameters for Rational Pavement Design. *Construction and Building Materials*, 105-112, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.086>.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE 2020, DNIT inicia procedimentos para transição do método de dimensionamento de pavimentos, <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/paginas-de-pesquisas/novo-metodo-de-dimensionamento-mecanistico-empirico-de-pavimentos-asfalticos,2020>.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Norma DNIT 179/2018: pavimentação: solos: determinação da deformação permanente: instrução de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Norma DNIT 134/2018: pavimentação: solos: determinação do módulo de resiliência: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- DAWSON, A., WELLNER, F. Plastic behavior of granular materials. Final Report ARC Project 933. University of Nottingham, 1999.
- ERLINGSSON, S., RAHMAN, S., SALOUR, F. Characteristics of Unbound Granular Materials and Subgrades Based on Multistage RLT Testing. *Transportation Geotechnics*. 13, 28-42, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.009>.
- ERLINGSSON, S., RAHMAN. Evaluation of Permanent Deformation Characteristics of Unbound Granular Materials by Means of Multistage Repeated-Load Triaxial Tests. *Transportation Research Record*, 2369 (1), 2013, <https://doi.org/10.3141/2369-02>.
- GUIMARÃES, A. C. R. Um Método Mecânico 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.
- LEMONS, R. C. Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica, EMBRAPA, Boletim Técnico nº 30. Recife, PE, 1973.
- LEKARP, F., ISACSSON, U., DAWSON, A. State of the art. I: RESILIENT RESPONSE OF UNBOUND AGGREGATES. *Journal of Transportation Engineering ASCE*, 126 (1). p. 66-75, 2000.
- LEKARP, F., ISACSSON, U., DAWSON, A. State of the art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering ASCE*, 126 (1). p. 76-83, 2000.
- LIMA, C. D. A, MOTTA, L. M. G, ARAGÃO, F. T. S. Análise das Tensões Aplicadas nos Ensaio de Deformação Permanente de Solos e Britas para o Dimensionamento Mecânico-Empírico De Pavimentos. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 1222-1233, 2019.
- MEDINA, J., MOTTA, L. M.G. Mecânica dos Pavimentos. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 638 p, 2015.
- NAEINI, M., MOHAMMADINIA, A., ARULRAJAH, A., HORPIBULSUK, S. Recycled Glass Blends with Recycled Concrete Aggregates in Sustainable Railway Geotechnics. *Sustainability*, 13, 2463, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13052463>
- NAZZAL, M. D., MOHAMMAD, L. N., AUSTIN, A. Evaluating Laboratory Tests for Use in Specifications for Unbound Base Course Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 32 (4), 1-8, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003042](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003042).
- NAZZAL, M. D., MOHAMMAD, L. N., AUSTIN, A., AL HOSAINI, A. Effect of Moisture Content on the Shakedown Limits of Base Course Materials. *Transportation Research Record*, 2675 (1), 2020.
- NGUYEN, T. H. AHN, J. Experimental Evaluation of The Permanent Strains of Open-Graded Aggregate Materials. *Road Materials and Pavement Design*, (22) (7) p. 1667-1678, 2019.
- PASCOAL, P.T. Avaliação do comportamento resiliente e deformação permanente do solo empregado no pavimento rodoviário da RS 342. 2020. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.
- PASCOAL, P.T., SAGRILO, A.V., BARONI, M., SPECHT, L.P., PEREIRA, D.S. Evaluation of the influence of compaction energy on the resilient behavior of lateritic soil in the field and laboratory. *Soils and Rocks*, 44 (4), 202107132120, 2021.
- RAHMAN, M. S., ERLINGSSON, S. Modelling the Moisture Dependent Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials. *Procedia Engineering*, 143, 921-928, 2016.