



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)

### COMPORTAMENTO RESILIENTE DE SOLOS DE UM ATERRO FERROVIÁRIO

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

*Lidiane Hellen dos Santos Santana<sup>1</sup>; Antonio Carlos Rodrigues Guimarães<sup>1</sup>; Lisley Madeira Coelho<sup>1</sup>; Caio Vinícius Schlögel<sup>2</sup>*

#### RESUMO

O transporte ferroviário apresenta elevada capacidade de movimentar cargas a longas distâncias por um baixo custo e, desempenha um papel significativo na manutenção de uma economia saudável. Porém, as vias nacionais existentes têm apresentado sucessivas patologias as quais necessitam constantes atividades de manutenção, prejudicando a operação. A aplicação de princípios de mecânica dos pavimentos a estruturas ferroviárias, sejam novas ou existentes, tem sido cada vez mais frequente, haja vista sua melhor acurácia na previsão do comportamento tensão versus deformação das camadas do pavimento ferroviário. Para este fim se faz necessária a realização dos ensaios fundamentais da mecânica dos pavimentos, notadamente o ensaio de módulo resiliente. Neste contexto, no presente estudo descreve-se o comportamento resiliente, considerando variados modelos de enquadramento, de 11 amostras de solos de um aterro ferroviário no interior do estado de São Paulo, o qual apresentava um histórico de patologias recorrentes. Na etapa de campo foram realizados ensaios de sondagem para investigação do solo de fundação do aterro e ensaios triaxiais de cargas repetidas para obtenção do módulo resiliente das amostras de solo coletadas. Os resultados dos ensaios de sondagem revelaram a possível presença de solos moles na fundação do referido aterro, e os obtidos do ensaio triaxial de cargas repetidas indicaram valores homogêneos e relativamente baixos para módulo resiliente, apresentando melhor enquadramento nos modelos de Witczak e Uzan (1981) e Titi et al. (2006).

**PALAVRAS-CHAVE:** (Módulo de resiliência; Systrain; Ensaio triaxial).

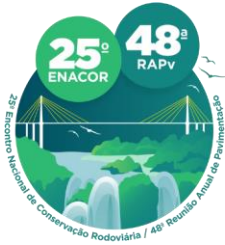
#### ABSTRACT

The railway transport has a high capacity to move cargo over long distances at a low cost and plays a significant role in maintaining a healthy economy. Nevertheless, the existing national roads have presented successive pathologies that require constant maintenance activities, jeopardizing the operation. The application of sidewalk mechanics principles to railway structures, whether new or existing, has been increasingly frequent, given its better accuracy in predicting the stress-strain behavior of railway sidewalk layers. For this purpose, it is necessary to perform fundamental tests of sidewalk mechanics, especially the resilient modulus test. In this context, the present study describes the resilient behavior, considering several framing models, of 11 soil samples from a railroad embankment railroad in the interior of São Paulo state, which presented a history of recurrent pathologies. In the field stage, borehole tests were performed to investigate the foundation soil of the embankment and repeated load triaxial tests to obtain the resilient modulus of the soil samples collected. The results of the borehole tests revealed the possible presence of soft soils in the foundation of the embankment, and those obtained from the repeated load triaxial test indicated homogeneous and relatively low values for resilient modulus, better fitting the models of Witczak and Uzan (1981) and Titi et al. (2006).

**KEY WORDS:** (Resilient Modulus; Systrain; Triaxial Test).

<sup>1</sup> Instituto Militar de Engenharia, e-mail: [lidiane.santos@ime.eb.br](mailto:lidiane.santos@ime.eb.br); [guimaraes@ime.eb.br](mailto:guimaraes@ime.eb.br); [madeiralisley@gmail.com](mailto:madeiralisley@gmail.com)

<sup>2</sup> Rumo Logística, e-mail: [caio.schlogel@rumolog.com](mailto:caio.schlogel@rumolog.com)



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

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



## INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário se destaca na infraestrutura de transporte de um país pois apresenta elevada capacidade de movimentar cargas pesadas concentradas a médias e longas distâncias, por um baixo custo e, além disso, desempenha um papel significativo na manutenção de uma economia saudável. De acordo com Gomes (2018), as ferrovias desenvolvem-se ao longe de grandes distâncias, e, por vezes em regiões com diferentes características geotécnicas, e em virtude dessa variabilidade, o emprego de ensaios laboratoriais para determinação de propriedade de resistência, deformabilidade e permeabilidade dos solos constituintes de cada camada são cada vez mais necessários.

Para Selig e Waters (1994), o desempenho do sistema de via férrea resulta de uma complexa interação entre seus componentes em resposta ao carregamento do trem. Nesse sentido, caso a infraestrutura do pavimento ferroviário ao longo do seu ciclo de vida apresentar falhas, é necessário recorrer à ensaios que sejam capazes de identificar a raiz do problema.

Neste cenário, na área geotécnica é possível determinar o módulo resiliente dos materiais aplicados nas camadas do pavimento ferroviário a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas em laboratório, porém, é um procedimento considerado especial, por exigir equipamentos relativamente complexos e caros, tornando restrito o seu uso fora das instituições acadêmicas ou de pesquisa. Diversos pesquisadores como Lee et al. (1997), Bernucci (1995) e Guimarães (2009), entre outros recomendaram, ao longo dos anos, correlações empíricas entre o módulo de resiliência e outros parâmetros geotécnicos de fácil obtenção.

No Brasil, para a determinação do MR, utiliza-se a norma do DNIT-ME 134/2018. O Módulo de Resiliência é avaliado por meio de modelos consagrados na literatura, porém há outros modelos disponíveis na literatura e utilizados em outros países, tendo sido selecionados alguns para enquadramento dos resultados obtidos no presente trabalho, conforme será mostrado na sequência.

Nesse sentido, o objetivo desse artigo foi descrever o comportamento resiliente de 11 amostras de um mesmo aterro ferroviário, o qual vinha apresentando recorrentes patologias. Foram considerados variados modelos de comportamento, para que fosse possível uma análise comparativa.

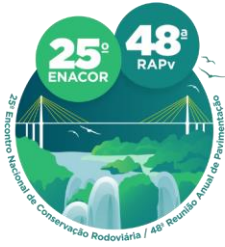
O trabalho faz parte de um estudo mais amplo, o qual incluirá a modelagem numérica do comportamento estrutural da plataforma, para fins de identificação da origem das patologias, bem como o projeto de alternativas para solução do problema.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### Pavimento Ferroviário E Mecânica Dos Pavimentos

O pavimento ferroviário é um termo consagrado por Medina & Motta (2015) e corresponde a um sistema multicamadas – subleito, sublastro, lastro dormente e trilhos – que têm como objetivo resistir à ação de sucessivos veículos de via. Porém, em termos de literatura internacional este termo não é consagrado, sendo comum a utilização da expressão railway track e similares, que são frequentemente traduzidos no Brasil por via permanente. Entretanto, a via permanente também pode incluir outras estruturas como bueiros, por exemplo, de modo que o termo pavimento ferroviário parece ser mesmo o mais adequado.

A mecânica dos pavimentos trata do estudo do dimensionamento de camadas do pavimento afim de que sejam resistentes aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima. Medina & Motta (2015) destacam que para o correto dimensionamento dessa estrutura a escolha dos materiais deve



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

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



ocorrer de acordo com as condições a que é exposta, tais como, tráfego, clima geologia e geotecnia, condições ambientais, topografia, drenagem e aspectos operacionais. Além disso, a seleção dos materiais deve levar em conta a granulometria, deformação permanente e módulo de resiliência.

### Módulo De Resiliência

Para Li e Selig (1994) o módulo de resiliência representa uma noção da rigidez elástica do material, ou seja, quanto maior for a sua deformabilidade menor será o seu MR. De acordo com a AREMA (2009) a utilização do módulo de resiliência é um dos principais fatores para a avaliação da qualidade dos materiais empregados nas camadas dos pavimentos.

De acordo a norma DNER-ME 134/2018, o módulo de resiliência, MR, é obtido através de ensaios triaxiais de cargas repetidas, considerando a aplicação de 18 pares de tensões, com frequência de 1Hz, entre outros aspectos, podendo ser expresso pela Equação 1:

$$MR = \sigma_d / \epsilon_r \quad (1)$$

em que  $\sigma_d$ : tensão desviadora (MPa ou kgf/cm<sup>2</sup>);  
 $\epsilon_r$ : deformação axial resiliente mm/mm (recuperável).

Medina & Motta (2015) apresentam o módulo de resiliência através de uma expressão em função do estado de tensões aplicado durante o ensaio triaxial de cargas repetidas, conforme apresentado na Equação 2. Além disso, o módulo de resiliência também pode ser representado em relação à tensão confinante, conforme apresentado na Equação 3.

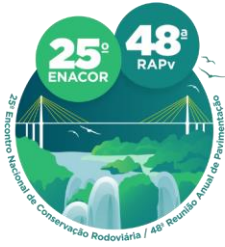
$$Mr = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (2)$$

$$Mr = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (3)$$

em que  $k_1$ ,  $k_2$ : constantes de regressão do modelo obtidas com os resultados do ensaio triaxial de carga repetida;

$\sigma_d$ : tensão desviatória;  
 $\sigma_3$ : tensão confinante.

Na literatura existem diversos modelos definidos para obtenção do módulo de resiliência. Para análise, é considerado um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que quanto mais próximo do valor unitário, maior será a adequação do modelo para a verificação do MR. Na Tabela 1 são apresentadas as equações utilizadas para a obtenção dos valores de MR e  $R^2$  nesta pesquisa. O software SysTrain© possui um módulo (MRCal) que possibilita o cálculo dos parâmetros de vários modelos, tendo sido utilizado no presente trabalho.



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

www.rapvenacor.com.br



**Tabela 1.** Modelos para Previsão de Módulo de Resiliência. (AUTOR, 2023).

Modelos de Referência	Equações
Composto (Svenson, 1980; Macêdo, 1996)	$MR = k1 * \sigma_3^{k2} \sigma_d^{k3}$
Witczak e Rada (1981)	$MR = k1 * (\sigma_{sum} / Pa)^{k2} * (\sigma_d / Pa)^{k3}$
Witczak e Uzan (1988)	$MR = k1 * Pa * (\sigma_{sum} / Pa)^{k3} * (\sigma_{oct} / Pa)^{k3}$
Titi et al. (2006)	$MR = k1 * Pa * (\sigma_{sum} / Pa)^{k2} * (\sigma_d / Pa + 1)^{k3}$
Ni et al. (2002)	$MR = k1 * (\sigma_3 / Pa + 1)^{k2} * (\sigma_3 / Pa + 1)^{k3}$
NCHRP 1-28A (2004)	$MR = k1 * Pa * (\sigma_d / Pa)^{k2} * (\sigma_{oct} / Pa + 1)^{k3}$

sendo MR: Módulo de Resiliência (MPa);  
k1, k2 e k3: Coeficientes de regressão;  
 $\sigma_{sum}$ : soma das tensões principais/invariante de tensões (kPa);  
 $\sigma_{oct}$ : Tensão octaédrica (kPa);  
Pa: Pressão atmosférica;  
 $\sigma_3$ : Tensão confinante (kPa);  
 $\sigma_3$ : Tensão desvio (kPa).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Etapa De Campo

Inicialmente, foram identificadas patologias na plataforma ferroviária de um aterro ferroviário, a fim de se determinar os pontos para a coleta dos materiais necessários para a realização da etapa de laboratório. A Figura 1 apresenta as patologias identificadas, as quais foram afundamentos plásticos que causaram danos no lastro da ferrovia e comprometem a estabilidade dos veículos de via em circulação; bolsões de água a partir da abertura do topo do aterro o que torna a via mais deformável.

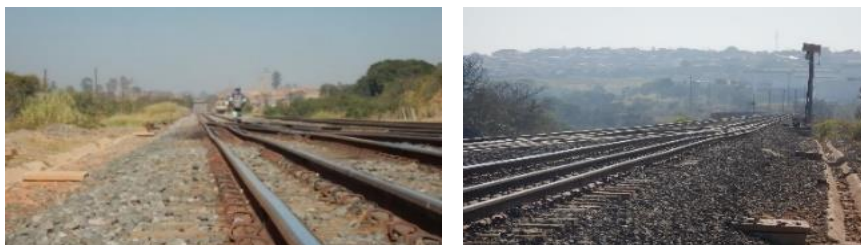
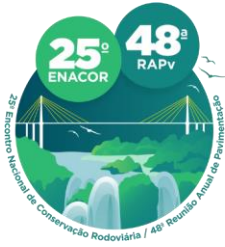


Figura 1. Patologias identificadas no aterro ferroviário. Afundamentos e Quebra de Lastro (AUTOR, 2023).

### Ensaio de Sondagem Tipo SPT (Standard Penetration Test)

Os ensaios de sondagem do tipo SPT se fizeram necessários para investigação do solo de fundação do aterro, bem como do próprio corpo do aterro em si, pois havia a possibilidade de se tratar de região de solo mole, fato que implicaria uma necessidade de serviços de estabilização bastante invasivos. O ensaio consistiu na cravação de um amostrador padrão sob uma mesma energia em três trechos de 15cm de profundidade com a consequente coleta de amostra para a caracterização tátil visual dos materiais (NBR 6484, 2020). Os ensaios foram para verificar a possível presença de solos moles na fundação do referido aterro e, além disso, foram coletadas 11 amostras deformadas para a realização dos ensaios triaxiais de cargas repetidas em 6 pontos distintos na lateral e ao longo da via.



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

www.rapvenacor.com.br



As 11 amostras coletadas para ensaios de laboratório e respectivos dados de ensaios de compactação são os seguintes:

- PI-ZFY\_ZYU-01/CAD01 de 0,00 a 0,52m ( $\gamma_d=18,18\text{kN/m}^3$ ; Wot= 14,29%);
- PI-ZFY\_ZYU-01/CAD01 de 0,52 a 1,00m ( $\gamma_d=17,82\text{ kN/m}^3$ ; Wot= 14,60%);
- PI-ZFY\_ZYU-02/CAD02 de 0,00 a 0,55m ( $\gamma_d=17,48\text{ kN/m}^3$ ; Wot= 14,11%);
- PI-ZFY\_ZYU-02/CAD02 de 0,55 a 1,00m ( $\gamma_d=17,68\text{ kN/m}^3$ ; Wot= 15,65%);
- PI-ZFY\_ZYU-03/CAD03 de 0,00 a 0,58m ( $\gamma_d=16,95\text{ kN/m}^3$ ; Wot= 16,51%);
- PI-ZFY\_ZYU-03/CAD03 de 0,58 a 1,00m ( $\gamma_d=17,70\text{ kN/m}^3$ ; Wot= 15,17%);
- PI-ZFY\_ZYU-04/CAD04 de 0,00 a 0,53m ( $\gamma_d=18,44\text{ kN/m}^3$ ; Wot= 12,34%);
- PI-ZFY\_ZYU-04/CAD04 de 0,53 a 1,00m ( $\gamma_d=17,93\text{ kN/m}^3$ ; Wot= 15,13%);
- PI-ZFY\_ZYU-05/CAD05 de 0,00 a 0,61m ( $\gamma_d=19,00\text{ kN/m}^3$ ; Wot= 11,68%);
- PI-ZFY\_ZYU-05/CAD05 de 0,61 a 1,00m ( $\gamma_d=17,56\text{ kN/m}^3$ ; Wot= 14,21%);
- PI-ZFY\_ZYU-06/CAD06 de 0,00 a 0,50m ( $\gamma_d=17,54\text{ kN/m}^3$ ; Wot= 15,97%);
- PI-ZFY\_ZYU-06/CAD06 de 0,50 a 1,00m ( $\gamma_d=17,65\text{ kN/m}^3$ ; Wot= 16,34%).

## Etapa De Laboratório

### *Ensaio De Módulo De Resiliência*

Para avaliar as características mecânicas dos materiais, o módulo de resiliência é um parâmetro de suma importância. A execução do ensaio triaxial de cargas repetidas reflete em laboratório as condições de carregamento impostas em campo. Para a realização desta pesquisa todo o procedimento de ensaio seguiu as diretrizes da norma do DNIT para a determinação de Módulo de Resiliência (DNER-ME 134/2018). O objetivo do ensaio foi estimar o comportamento dos solos nas camadas finais de terraplenagem do referido aterro ferroviário.

Para cada amostra foi moldado um corpo de prova na condição de umidade ótima de compactação, dado que foi obtido da curva de compactação na energia Proctor Intermediária conforme a NBR 7182 (2016). Na execução do ensaio foi utilizado um corpo de prova de metal tripartido envolto por uma membrana permeável conforme mostra a Figura 2. Os valores de tensão de desvio aplicada, tensão confinante e módulo de resiliência para cada estado de tensão foram obtidas com auxílio computacional.



Figura 2. Equipamento utilizado para a realização do ensaio triaxial de cargas repetidas (AUTOR, 2023).



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

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



## Etapa de Modelagem

### *Cálculo Dos Modelos Para Avaliação Do Módulo De Resiliência*

A partir dos resultados obtidos pelo ensaio de Módulo de Resiliência para as 11 amostras foi possível realizar o enquadramento do padrão de comportamento resiliente em 5 (cinco) modelos de previsão de comportamento. Para o cálculo dos parâmetros de cada modelo utilizou-se o módulo MRCalc do software SysTrain©.

A partir daí, foi possível avaliar além dos valores absolutos de MR dos materiais, a realização de um estudo comparativo dos modelos de previsão selecionados, considerando-se as 11 amostras selecionadas.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Sondagem SPT

A análise dos ensaios de sondagem tipo SPT nos sete pontos estudados indicou o seguinte:

- SPT1: argila arenosa Nspt 4-5 de profundidade 2,30 metros;
- SPT2: silte argiloso médio a duro de profundidade 4-5 metros;
- SPT3: silte argiloso mole a média de profundidade 2,0 metros;
- SPT4: argila dura;
- SPT5: silte argiloso médio Nspt 6 de profundidade 1,8 metros;
- SPT6: argila siltosa média Nspt 6 de profundidade 1,0 metro; e
- SPT7: Nspt 5-7 de profundidade 1,8 metros.

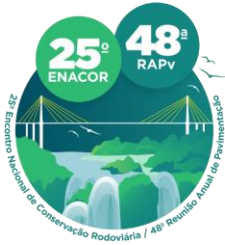
Observa-se desse resumo dos resultados que os materiais das camadas finais variam entre argila arenosa e silte argiloso, apresentando valores de Nspt baixos. Ou seja, de fato não são materiais de boa qualidade. Porém, a camada de fundação do aterro apresentou Nspt elevado em todos os pontos, descartando a possibilidade de existência de solos moles, eventualmente responsáveis por recalque do aterro.

Da mesma forma, nas camadas intermediárias do aterro os valores de Nspt são compatíveis com os esperados para este tipo de estrutura, de onde se pode concluir que o corpo central do aterro também não parece ser o responsável pelas patologias observadas na grade ferroviária.

Além disso, o nível d'água mostrou-se bem baixo – inferior a 8,0 metros – indicando que as variações de umidade nas camadas superiores devem-se à água da chuva mesmo, e não a variação do lençol freático.

### Ensaio De Módulo De Resiliência

Com base nos resultados dos ensaios triaxiais de cargas repetidas para 18 pares de tensão, foram obtidos os valores médios do módulo resiliente resultante a partir de uma média aritmética. Na Tabela 2 são apresentados os resultados para o MR médio de cada amostra.



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

www.rapvenacor.com.br



Tabela 2. Resultados de MR obtidos em laboratório (AUTOR, 2023).

Ponto	Profundidade (m)	MR médio (MPa)
PI-01A	0,00 - 0,52	145,73
PI-01B	0,52 - 1,00	91,02
PI-02A	0,00 - 0,22	78,39
PI-02B	0,22 - 1,00	262,26
PI-03A	0,00 - 0,58	50,76
PI-03B	0,58 - 1,00	147,73
PI-04A	0,00 - 0,53	127,95
PI-04B	0,53 - 1,00	179,58
PI-05A	0,00 - 0,61	96,69
PI-06A	0,00 - 0,50	96,71
PI-06B	0,50 - 1,00	54,71
Média		121,05

Observa-se que em apenas 5 (cinco) das amostras ensaiadas os valores de módulo de resiliência estão acima de 100 MPa. Os valores típicos para MR são recomendados para auxiliar os projetistas de pavimentos. Por exemplo, a Tabela 3 mostra as faixas e os valores típicos de MR de variados materiais obtidos com o teor ótimo de umidade, de acordo como sistema de classificação de solos USCS (NCHRP 1-37A, 2004).

Tabela 3. Intervalos de valores típicos de módulo resiliente de materiais granulares com teor ótimo de umidade (NCHRP 1-37A, 2004).

Descrição	Módulo resiliente (MPa)		Média (MPa)
	Mínimo	Máximo	
Cascalho ou cascalho arenoso, bem graduado	272	290	283
Cascalho ou cascalho arenoso, mal graduado	245	276	262
Cascalho argiloso ou cascalho de areia de argiloso	166	259	148
Areia ou cascalho de areia, bem graduado	193	259	221
Areia ou cascalho de areia, mal graduado	166	228	193
Areia sedimentada ou cascalho de areia sedimentada	193	259	221
Areia argilosa ou areia de cascalho argilosa	148	193	166

Ou seja, a partir dos dados de referência mostrados na Tabela 3 tem-se quer os módulos de resiliência médios de areias argilosa, ou areias pedregulhosas argilosas, variam entre 148 MPa e 193 MPa, tendo como valor médio 166 MPa, portanto acima da maioria dos resultados obtidos para os solos estudados no presente trabalho.

BERNUCCI et.al. (2008) afirmam que valores de MR entre 100 e 400 MPa correspondem à materiais granulares, como por exemplo brita graduada simples. Em caráter geral, os resultados de módulo de resiliência foram abaixo do esperado para utilização nas camadas finais de terraplenagem da plataforma ferroviária, indicando que os solos não possuem bom comportamento resiliente, ainda que utilizando-se a umidade ótima de compactação para a execução do ensaio.

Nas Figuras de 3 a 13 são apresentados os gráficos com a variação dos valores de Módulo de Resiliência em relação à tensão confinante (modelo arenoso) quanto à tensão de desvio (modelo argiloso) com os respectivos resultados de  $R^2$  para cada amostra.



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

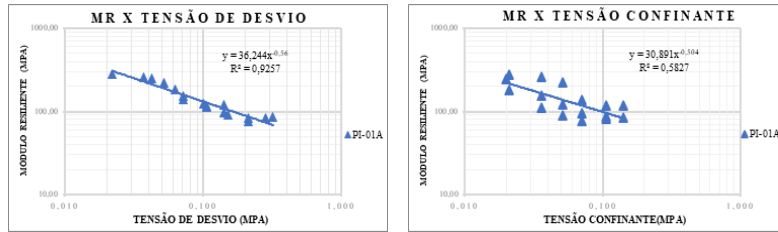


Figura 3. Valores de MR em função das tensões de desvio e confinantes – Amostra PI-01A (AUTOR, 2023).

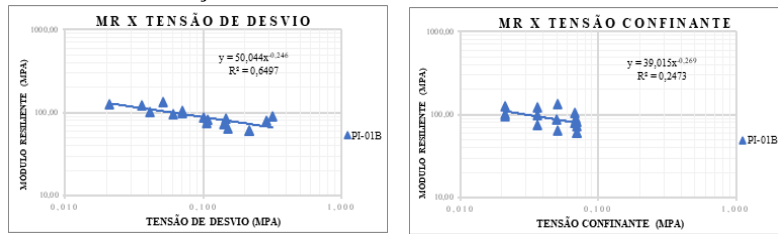


Figura 4. Valores de MR em função das tensões de desvio e confinantes – Amostra PI-01B (AUTOR, 2023).

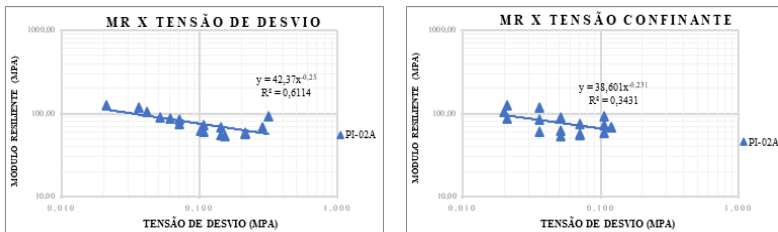


Figura 5. Valores de MR em função das tensões de desvio e confinantes – Amostra PI-02A (AUTOR, 2023).

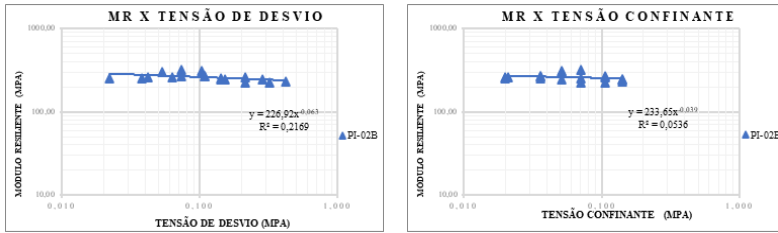


Figura 6. Valores de MR em função das tensões de desvio e confinantes – Amostra PI-02B (AUTOR, 2023).

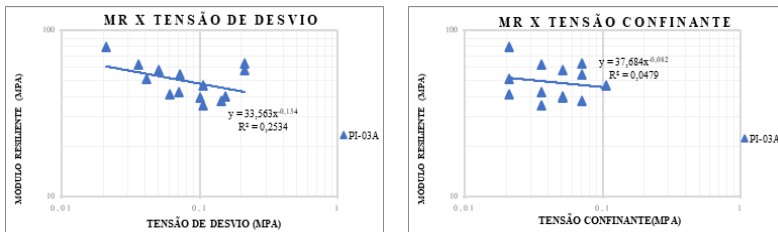


Figura 7. Valores de MR em função das tensões de desvio e confinantes – Amostra PI-03A (AUTOR, 2023).

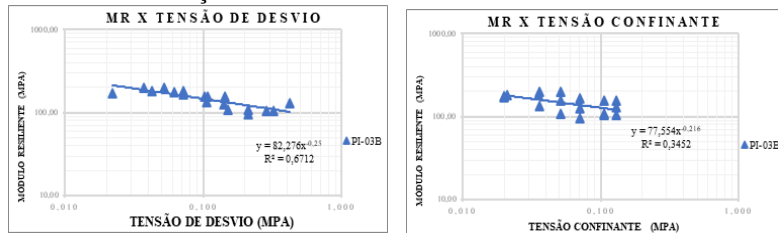
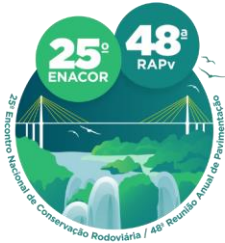


Figura 8. Valores de MR em função das tensões de desvio e confinantes – Amostra PI-03B (AUTOR, 2023).





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

www.rapvenacor.com.br

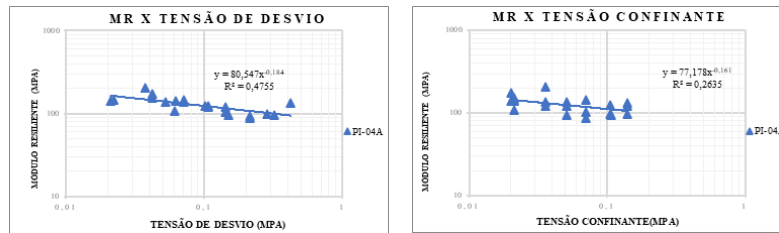


Figura 9. Valores de MR em função das tensões de desvio e confinantes – Amostra PI-04 A (AUTOR, 2023).

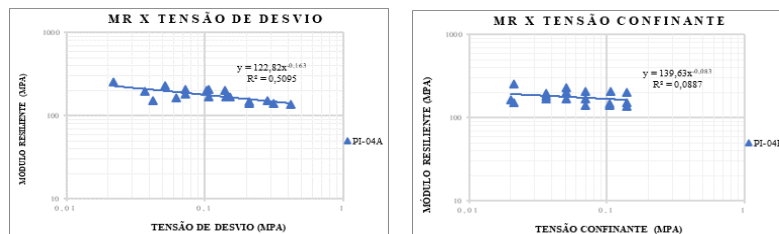


Figura 10. Valores de MR em função das tensões de desvio e confinantes – Amostra PI-04 B (AUTOR, 2023).

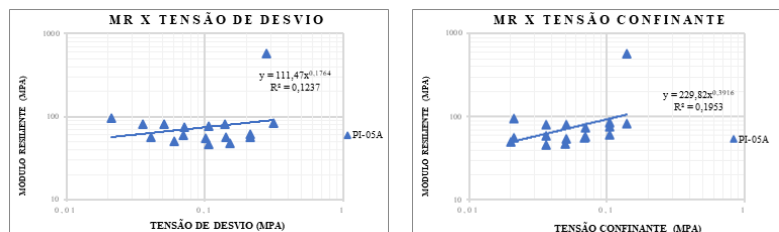


Figura 11. Valores de MR em função das tensões de desvio e confinantes – Amostra PI-05 A (AUTOR, 2023).

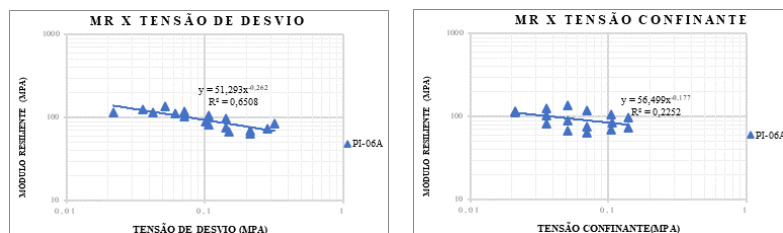


Figura 12. Valores de MR em função das tensões de desvio e confinantes – Amostra PI-06 A (AUTOR, 2023).

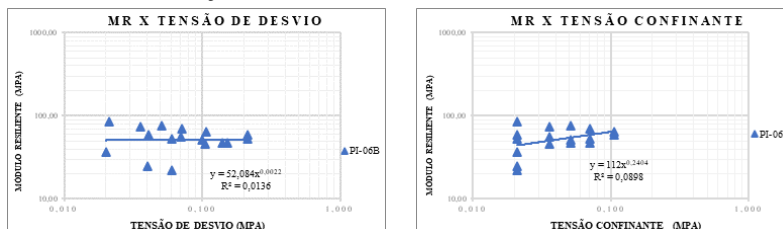


Figura 13: Valores de MR em função das tensões de desvio e confinantes – Amostra PI-06 B (AUTOR, 2023).

No que se refere ao comportamento dos materiais em relação às variações das tensões, observou-se que a maioria deles apresentaram tendência para o modelo argiloso, ou seja, em função da tensão de desvio ( $\sigma_d$ ). No entanto, os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) não ficaram próximos de 1, que é um indicativo de bom enquadramento. Apenas a amostra PI-01A apresentou, na umidade ótima, boa correlação com a tensão de desvio, ou seja, mais próxima de 1.

Os resultados encontrados a partir dos valores obtidos no ensaio triaxial de cargas repetidas também foram enquadrados em diversos modelos encontrados na literatura, conforme mostrado na Tabela 4,



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

www.rapvenacor.com.br

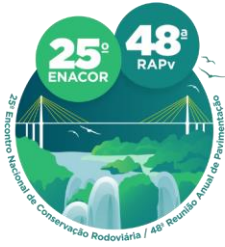


na qual são mostrados os parâmetros dos modelos selecionados.

Tabela 4. Análise estatísticas dos modelos utilizados para estudo comparativo (AUTOR, 2023).

Amostra	Coefficientes	Modelo Composto	Witczack e Rada (1981)	Witczack e Usan (1988)	Titi et al. (2006)	Ni et.al (2002)	NCHRP P1-28A
PI-01A	k1	41,83	137,56	918,23	1357,64	2834,86	3201,29
	k2	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,28	-0,16
	k3	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52	-1,04	-1,76
	R <sup>2</sup>	0,8455	0,8455	0,8455	0,8455	0,7653	0,898
PI-01B	k1	71,1325	66,0512	454,35	651,88	127,65	1265,58
	k2	0,2	0,32	0,32	0,32	0,36	0,04
	k3	-0,36	-0,48	-0,48	-0,48	-0,68	-0,92
	R <sup>2</sup>	0,6995	0,72	0,72	0,72	0,6168	0,5635
PI-02A	k1	40,87	72,8753	565,39	719,22	119,56	2855,17
	k2	0,04	0,04	0,04	0,04	0	0,12
	k3	-0,32	-0,32	-0,32	-0,32	-0,6	-0,48
	R <sup>2</sup>	0,6224	0,6226	0,6226	0,6226	0,4717	0,48
PI-02B	k1	251,7096	233,3085	2041,54	2302,58	286,75	1047,07
	k2	0,08	0,12	0,12	0,12	0,20	-0,28
	k3	-0,12	-0,16	-0,16	-0,16	-0,24	-0,12
	R <sup>2</sup>	0,2928	0,2875	0,2875	0,2875	0,3685	0,4988
PI-03A	k1	41,4491	35,1709	249,32	347,11	59,71	580,20
	k2	0,2	0,32	0,32	0,32	0,4	-0,08
	k3	-0,32	-0,44	-0,44	-0,44	-0,52	-0,24
	R <sup>2</sup>	0,3714	0,3776	0,3776	0,3776	0,1713	0,0954
PI-03B	k1	82,7075	127,5966	904,52	1259,28	224,36	2155,72
	k2	0,08	0,16	0,16	0,16	0,28	0,04
	k3	-0,36	-0,44	-0,44	-0,44	-0,72	-0,96
	R <sup>2</sup>	0,8176	0,8176	0,8176	0,8176	0,792	0,7386
PI-04A	k1	80,3942	111,9984	895,46	1105,34	180,04	1822,67
	k2	0,08	0,08	0,08	0,08	0,28	0,12
	k3	-0,28	-0,28	-0,28	-0,28	-0,72	-1,28
	R <sup>2</sup>	0,5691	0,5683	0,5683	0,5683	0,642	0,6391
PI-04B	k1	171,8752	119,9021	824,78	1183,34	215,87	2257,41
	k2	0,24	0,4	0,4	0,4	0,56	0,24
	k3	-0,32	-0,48	-0,48	-0,48	-0,6	-1,08
	R <sup>2</sup>	0,7669	0,7714	0,7714	0,7714	0,7015	0,6367
PI-05A	k1	3286,3168	15,684	121,68	154,79	20,92	198,56
	k2	1,2	1,52	1,52	1,52	1,96	1,48
	k3	0,2	-0,32	-0,32	-0,32	0,48	-0,56
	R <sup>2</sup>	0,2695	0,239	0,239	0,239	0,2939	0,2354
PI-06A	k1	82,4672	77,6746	584,77	766,59	121,12	1192,45
	k2	0,16	0,24	0,24	0,24	0,4	0
	k3	-0,28	-0,36	-0,36	-0,36	-0,52	-0,44
	R <sup>2</sup>	0,3392	0,3452	0,3452	0,3452	0,2718	0,1818
PI-06B	k1	211,7228	29,7896	224,27	294,00	34,95	405,33
	k2	0,48	0,76	0,76	0,76	1,12	0,04
	k3	-0,08	-0,36	-0,36	-0,36	0,08	0,84
	R <sup>2</sup>	0,3196	0,3349	0,3349	0,3349	0,388	0,3325

Após a análise da Tabela 4 observou-se que em todos os modelos estudados as correlações ficaram abaixo de 0,90. Os modelos que mais se ajustaram aos critérios de enquadramento do módulo de resiliência foram de Witczak e Usan (1981) e Titi et al. (2006). Apesar de não apresentarem correlações ( $R^2$ ) acima de 0,90 esses modelos são indicados para utilização de materiais com granulometrias diversificadas, destacando-se na utilização de solos com granulometrias finas, os quais, conforme os resultados apresentados pela sondagem se enquadram os solos destacados nesta



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

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



pesquisa.

Ao analisarmos as estatísticas do  $R^2$  para o modelo Composto proposto por Macêdo (1996) nenhum resultado apresentou correlação satisfatória, ou seja, maior que 0,90. Apenas a amostra PI-01A apresentou convergência próxima a esse valor. O modelo NCHRP quando comparado aos outros modelos apresentados apresentou em caráter geral o menor desempenho em relação ao coeficiente de determinação, sendo assim, não foi indicado para a obtenção do valor do módulo de resiliência

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo descrever o comportamento resiliente de 11 amostras de solos coletados em um aterro ferroviário, de forma a fundamentar análises estruturais futuras para fins de identificação da origem de patologias recorrentes na via.

Os ensaios de sondagem do tipo SPT revelaram que os solos utilizados variam entre argila arenosa e silte argiloso, sobretudo com valores de  $N_{spt}$  baixos indicando que os solos apresentam caráter expansivo, ou seja, pouca resistência.

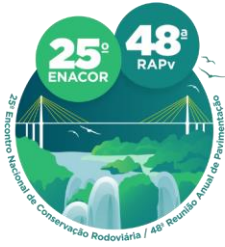
Com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ) observou-se que as amostras coletadas em relação às variações das tensões apresentaram melhor ajuste em função da tensão de desvio;

Os ensaios triaxiais de cargas repetidas evidenciaram que os solos coletados a apresentam baixa resistência, ou seja, não possuem bom comportamento resiliente ainda que os ensaios tenham sido executados na umidade ótima de compactação;

Por fim, ao analisar os modelos resilientes analisados foi possível, através das correlações, definir qual o modelo que melhor se ajusta para obtenção do módulo de resiliência a partir coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de cada amostra. Os modelos mais adequados para analisar o comportamento resiliente dos solos foram de Witczak e Uzan (1981) e Titi et al. (2006).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AREMA. (2009) Manual for Railway Engineering- Volume 1 – Chapter- Chapter 4- Rail. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, USA.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016) NBR 7182: Solo – Ensaio De Compactação. Rio De Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2020) NBR 6484: Solo –Sondagem de simples reconhecimento SPT –Método de ensaio. Rio de Janeiro, p. 28.
- BERNUCCI L.L.B. (1995) Considerações Sobre o Dimensionamento de Pavimentos Utilizando Solos Lateríticos para Rodovias de Baixo Volume de Tráfego, São Paulo, Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 237p.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. E.; SOARES, J. B. (2008). Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros, Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro, 475 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNIT 134/2010 – Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio
- GOMES, M. A. (2018) Estudo de Solos Tropicais de Granulometria Transicional para Emprego em Pavimento Ferroviário. Dissertação de Mestrado. IME. Rio de Janeiro.
- GUIMARÃES, A. C. R. (2009) Um Método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 56 p.
- LEE, W.; BOHRA, N.C.; ALTSCHAEFFL, A.G. E WHITE, T.D., (1997) Resilient Modulus of Cohesive Soils, ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, no 123(2), pp. 131-136.



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

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



LI, D.; SELIG, E. Resilient modulus for fine-grained subgrade soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 120, No. 6, pp. 939-957, 1994.

MACÊDO, J. A. G. DE. *Interpretação de Ensaios Defletométricos para Avaliação Estrutural de Pavimento Flexível* Macêdo, 1996, 1996.

MOTTA, L.M.G. DA; MEDINA, J. (2015) *Mecânica dos Pavimentos*. 3º ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência..

NHCRPP 1-37A. (2004) Summary of the 2000, 2001, and 2002 AASHTO guide for the design of new and rehabilitated pavement structures. National Cooperative Highway Research Program.

NI B., Hopkins T. C., Sun L., Beckham T. L. (2002) Modelling the resilient modulus of soils. *Anais. 6th international conference on the bearing capacity of roads, Railways and air fiel.* v. 2, p. 1131-42. são-Deformação da Via Férrea. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

RADA, G.; WITCZAK, M. W. Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Material. *Transportation Research Record*, p. 23-33, 1981.

SELIG, E. T. E J. M. WATERS (1994) *Track Geotechnology and Substructure Management*. Editora Thomas Telford, Londres, Inglaterra.

SYSTRAIN. (2016). *Manual do SYSTRAIN - Versão 1.3*. Intituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil: Elgayer Engenharia.

TITI, H., B. ELIAS, e S. HELWANY. Determination of typical resilient modulus values for selected soils in wisconsin. SPR 0092-03-11, Wisconsin Departamento of Transportation, University of Wisconsin, Milwaukee, May 2006.

WITCZAK M. W., UZAN J. (1988). *The universal airport pavement design system, Report I of V: Granular material characterization*. Dissertação (mestrado) Programa de Engenharia Civil). University of Maryland. Maryland.