



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA ENTRE DIFERENTES EQUIPAMENTOS TRIAXIAIS COM MATERIAL SINTÉTICO

Priscila Oliveira Folly¹; Camila Antunes Martins¹; Luisa Carla de Alencar Menezes¹; Antônio Carlos Rodrigues Guimarães¹

RESUMO

Verifica-se, atualmente, esforços governamentais contínuos que visam a adoção de métodos mecanísticos para o dimensionamento de pavimentos, destacando a necessidade crucial de padronizar componentes e métodos associados aos ensaios de laboratório. Especificamente, no que se refere ao ensaio de Módulo Resiliente (MR) de solos e britas, existe uma considerável variedade de equipamentos, entre eles modelos nacionais e importados que, eventualmente, podem ter diferentes atualizações. Dessa forma, torna-se fundamental identificar divergências entre os resultados obtidos em diferentes equipamentos, utilizando como referência as exigências estipuladas nas normas técnicas. Nesse contexto, o presente estudo visa observar o comportamento resiliente do nylon 6.0, um material com propriedades e características mecânicas estabelecidas. Para tanto, foram conduzidos ensaios de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo DNIT 134/2018-ME, com o objetivo de determinar, por meio de parâmetros estatísticos, os resultados que melhor representam o comportamento do nylon em dois equipamentos distintos, denominados neste estudo de A e B. Tendo em vista os deslocamentos (LVDT's) e os diferentes métodos empregados para aplicação de tensão, ratifica-se a importância da implementação de um método de calibração de equipamentos triaxiais, afim de aumentar a confiabilidade dos resultados. O estudo contribui significativamente para o avanço na padronização e na precisão dos ensaios de módulo resiliente de solos e britas, fornecendo informações importantes para a melhoria contínua dos métodos de projeto de pavimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Módulo de Resiliência; Calibração; Equipamento Triaxial Dinâmico.

ABSTRACT

Currently, there are continuous government efforts aimed at adopting mechanistic methods for pavement design, highlighting the crucial need to standardize components and methods associated with laboratory tests. Specifically, regarding the Resilient Modulus (MR) test of soils and aggregates, there is a considerable variety of equipment, including both domestic and imported models, which may eventually have different updates. Therefore, it is essential to identify discrepancies among the results obtained from different equipment, using the requirements stipulated in technical standards as a reference. In this context, the present study aims to observe the resilient behavior of nylon 6.0, a material with established mechanical properties and characteristics. To this end, tests were conducted following the guidelines established by DNIT 134/2018-ME, with the objective of determining, through statistical parameters, the results that best represent the behavior of nylon in two different equipment, referred to in this study as A and B. Considering the displacements (LVDTs) and the different methods employed for applying tension, the importance of implementing a calibration method for triaxial equipment is emphasized to increase the reliability of the results. The study significantly contributes to the advancement of standardization and precision in resilient modulus tests of soils and aggregates, providing important insights for the continuous improvement of pavement design methods.

KEY WORDS: Resilient Modulus; Calibration; Dynamic Triaxial Equipment.

¹ Instituto Militar de Engenharia, priscilafolly@ime.eb.br; camilaantunes@ime.eb.br; luisacarlaam@hotmail.com; guimaraes@ime.eb.br.



INTRODUÇÃO

O pavimento deve ser dimensionado de forma que possa garantir a segurança operacional, estabilidade e eficiência para os veículos transitarem em diversas velocidades, sob diferentes cargas por eixo. Para assegurar que a via desempenhe de forma adequada tal finalidade, é fundamental que os materiais empregados na pavimentação estejam em conformidade com as normas estabelecidas. É a geometria da via também deve atender aos parâmetros geométricos normatizados, a fim de que todos os componentes do sistema desempenhem suas funções de forma adequada em diversas condições operacionais e ambientais (INDRARATNA; SALIM; RUJIKIATKAMJORN, 2011).

O ensaio para determinação do Módulo de Resiliência (MR) é fundamental na compreensão acerca do comportamento resiliente dos materiais de pavimentação, isto é, sua capacidade em retornar ao seu estado inicial após o término do carregamento exercido pelo tráfego. A obtenção deste parâmetro auxilia na previsão do comportamento mecânico do pavimento a partir da análise dos fatores que causam deformação e deterioração na via (BATHURST; RAYMOND, 1987).

No que diz respeito ao ensaio para determinação do MR, Ferreira (2008) destaca que, para que os resultados obtidos sejam representativos, isto é, apresentem nível de confiabilidade adequado, é necessário um número grande de amostras.

No Brasil, o ensaio utilizado para determinar o MR em solos e britas segue as diretrizes estabelecidas pelas normas DNIT 134/2018-ME e DNIT 181/2018-ME. No entanto, para uma compreensão mais aprofundada dos resultados desses ensaios, faz-se necessário desenvolver uma metodologia que empregue amostras compostas por materiais sintéticos com características conhecidas. Esse procedimento possibilita a automação dos equipamentos, visando evitar possíveis erros de leitura, uma vez que os dispositivos possuem tecnologias e componentes diversos. Por exemplo, a calibração dos corpos de prova compostos por material sintético nos equipamentos designados como A e B. Pretende-se analisar se há divergência nos resultados entre os equipamentos examinados. A hipótese deste trabalho é de que os valores de MR obtidos em dois equipamentos triaxiais dinâmicos distintos, mesmo com diferentes componentes e métodos de obtenção dos resultados de MR, apresentam módulos semelhantes.

MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio de determinação do Módulo de Resiliência (MR) permite analisar a deformação da amostra após a aplicação de tensões de desvio padronizadas a partir de diferentes aplicações de pulso de carga em curta duração. Essa deformação é dimensionada utilizando parâmetros numéricos e aplicada a modelos elásticos não lineares. A deformação resiliente (ϵ_r) é obtida por meio da deformação da amostra em relação ao posicionamento do transdutor de deslocamento e pode ser calculada pela Equação 1.

$$\epsilon_r = \frac{\delta_r}{H_0} \quad (1)$$

Em que (ϵ_r) é a deformação específica recuperável ou resiliente; δ_r é o deslocamento resiliente ou recuperável e; H_0 é a altura de referência do medidor de deslocamento (LVDT) em mm.

O MR pode ser obtido pela relação entre a tensão desvio aplicada (σ_d) e a deformação específica resiliente (ϵ_r) e é dado por meio da Equação 2.



$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2)$$

Onde M_R é o Módulo de Resiliência; σ_d corresponde à tensão desvio aplicada repetidamente e; ε_r é a deformação específica axial resiliente.

Normas para Ensaios de Módulo de Resiliência

No Brasil, o ensaio é regulamentado pelo DNIT 134/2018-ME para materiais não estabilizados quimicamente e pelo DNIT 181/2018-ME para materiais estabilizados quimicamente. A Tabela 1 destaca as características recomendadas por essas normas para os componentes do equipamento triaxial dinâmico.

Tabela 1. Recomendações das normas brasileiras para determinação do MR.

Componentes	DNIT 134/2018-ME	DNIT 181/2018-ME
Tipo de material	Materiais não estabilizados quimicamente.	Materiais estabilizados quimicamente.
Posicionamento LVDT	São fixos diametralmente na amostra, presos ao cabeçote superior e apoiados na alça ou posicionados no terço-médio.	São fixos na alça de suporte do corpo de prova, ou seja, lado de dentro da câmara, posicionado no terço-médio do corpo de prova.
Faixa de leitura	Leitura do deslocamento de 1×10^{-3} mm, com faixa de leitura de, no máximo, 0,5 mm.	Leitura do deslocamento de 1×10^{-3} mm, com faixa de leitura de, no máximo, 0,5 mm.
Quantidade de LVDT	2	2
Frequência exigida	1Hz (60 ciclos por minuto), que corresponde à duração do pulso de carga de 0,1s e 0,9s de repouso.	1Hz (60 ciclos por minuto), que corresponde à duração do pulso de carga de 0,1s e 0,9s de repouso.
Sistema de aplicação das tensões	Cilindro de pressão a ar comprimido com pistão de carga ou uso de prensa hidráulica com estrutura que permite a aplicação de cargas repetidas.	Cilindro de pressão a ar comprimido com pistão de carga ou uso de prensa hidráulica com estrutura que permite a aplicação de cargas repetidas.

Segundo a norma americana AASHTO T 307-99 (2021), o ensaio de MR é diferenciado pelo número de repetições da tensão desvio, duração e frequência do carregamento e níveis de carregamento. Já a norma britânica BS EN 13286-7 (2004) é utilizada para misturas não ligadas e ligadas hidraulicamente.

O modelo universal não-linear foi desenvolvido no projeto NCHRP 1-28A (AASHTO, 2014a) para caracterização do MR de materiais não tratados, sub-base e subleito. Este modelo foi atualizado com a inserção do *software* M-E PDG que faz parte do novo guia de dimensionamento da AASHTO, resultando-se na norma NCHRP 1-37A (AASHTO, 2014b). A Tabela 2 apresenta as características preconizadas pelas respectivas normas.

Componentes	AASHTO T 307-99 (2021)	BS EN 13 286-7 (2004)	NCHRP 1-28A (AASHTO, 2014A)
Tipo de material	Materiais não estabilizados quimicamente.	Classe dos materiais granulares com misturas não ligadas e ligadas hidraulicamente.	Materiais granulares não tratados, sub-base e subleito.



Posicionamento LVDT	São utilizados um par na vertical e um par na horizontal da amostra, fixados nas braçadeiras com grampos de comprimento medido na metade do diâmetro da amostra.	São utilizados três LVDT's para verificar as deformações axiais, fixados verticalmente a 120° (graus), medindo ao longo dos 100 mm centrais da amostra e, três para as deformações radiais, instalados horizontalmente a 120° na metade do corpo de prova.	São fixados um par de LVDT no topo e um par fixado junto as braçadeiras localizadas a 1/4 da amostra.
Faixa de leitura	Apresentam sensores mais precisos (extensômetro óptico e sensor sem contato), com linearidade, $\pm 0,25\%$ da escala total; repetibilidade, $\pm 1\%$ da escala total; sensibilidade mínima, 2mv/V (AC) ou 5mv/v (DC).	Faixa de leitura com 0,000015 polegada (0,00038 mm) de deformação vertical e horizontal.	Faixa de leitura com 0,000015 polegada (0,00038 mm) de deformação vertical e horizontal.
Quantidade de LVDT	4	6	4
Frequência exigida	Tensão axial cíclica é aplicada em 1 s (1Hz de frequência), sendo 0,1s de carga e 0,9s de repouso. O intervalo pode variar entre 0,9s até 3,1s.	Frequência de carregamento deve ser mantida entre 0,2Hz e 10Hz.	1Hz (60 ciclos por minuto), que corresponde à duração do pulso de carga de 0,1s e 0,9s de repouso e duração para materiais de base/sub-base é 0,2s duração seguida por um período de descanso de 0,8s duração para materiais de subleito.
Sistema de aplicação das tensões	Célula de carga eletrônica com capacidade para o carregamento máximo necessário e sensibilidade de 0,5%	A norma não deixa explícito qual o sistema de aplicação deve ser usado para as tensões no método A e no método B.	Cilindro de pressão a ar comprimido com pistão de carga. A célula de carga eletrônica localizada dentro da célula triaxial.

No procedimento para determinar o MR nos equipamentos, ambas as normas apresentam duas fases. Na primeira fase ocorre o condicionamento, visando reduzir as deformações plásticas. Já na segunda, são aplicados os pares de tensões confinante e desvio, predefinidos pelo método de ensaio e, simultaneamente, à aplicação das tensões são medidas às deformações específicas resilientes correspondentes (MOREIRA, 2022).

Os LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*), transdutores de deslocamento, apresentam características distintas conforme o equipamento utilizado, como, por exemplo, o posicionamento, que também é modificado conforme a norma empregada.

Outros fatores que alteram o resultado do módulo de resiliência em ensaios laboratoriais são: magnitude das tensões, razão de tensões principais (σ_1/σ_3), repetições da tensão desvio, histórico de tensões, duração e frequência da aplicação da tensão desvio, categoria de agregado, densidade e umidade da compactação, grau de saturação e número de aplicações de carga (LI e SELING, 1994).



Ainda, de acordo com Vianna (2002), outros dois fatores que apresentam grande relevância são a calibração dos equipamentos e o conhecimento adquirido pelo operador na utilização dos equipamentos.

Conceito estatístico para determinação do MR

O valor do MR é modelado pela função de regressão linear, onde é possível realizar a comparação entre duas ou mais variáveis por meio do diagrama de dispersão para verificar o melhor modelo de comportamento do módulo de resiliência. Esse modelo é caracterizado pelo coeficiente de determinação (R^2), o qual permite a identificação do melhor enquadramento. O R^2 , conhecido como correlação linear ou r de Pearson, refere-se ao nível de relação entre duas variáveis quantitativas, variando de -1 a 1. Sendo expresso pela Equação 3:

$$r_{xy} = \frac{\sum z_x z_y}{N} \quad (3)$$

Onde: r_{xy} – Coeficiente de Correlação; z_x – Desvio padrão da viável um; z_y – Desvio padrão da variável dois; N – Tamanho do conjunto de dados.

Quando o valor obtido de R^2 for igual a 0 significa que não há dependência linear entre as variáveis analisadas. Já no caso de obtenção de valores maiores do que zero, indica a existência de uma relação diretamente proporcional entre as variáveis. Dessa forma, à medida que o valor de uma variável aumenta, ocorre o mesmo com a outra variável. Contudo, quando são obtidos valores inferiores a zero, há uma relação inversamente proporcional entre as variáveis, ou seja, na medida que uma variável aumenta a outra diminui.

No que diz respeito aos materiais sintéticos utilizados na confecção dos corpos de prova de referência, estes apresentam alta rigidez e são caracterizados pelos resultados do coeficiente de variação, cujo objetivo é testar a repetibilidade e reprodutividade dos valores de MR (VIANNA, 2002; CLAROS *et al.*, 1990). O corpo de prova de lucite, analisado por Barksdale e Alba (1997), apresentou coeficiente de variação de 5,2% e 2,4%, respectivamente, ou seja, valores de MR homogêneos, independente da tensão aplicada de acordo com a norma do DNIT.

O conceito de coeficiente de variação, assim como o de desvio padrão, corresponde a uma medida de dispersão, contudo, despreza a influência da ordem de grandeza das variáveis, dado que, demonstrando o quão afastados da média encontram-se os dados, independentemente das unidades de medidas que as séries de dados estão. É dado pela Equação 4:

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} \quad (4)$$

Em que: CV – Coeficiente da variação; s – Desvio padrão; \bar{X} – Média aritmética.

Quanto maior for o coeficiente de variação, mais dispersos os dados estão em relação à média, e quanto menor o coeficiente, mais homogêneos os dados são. Usualmente, são adotadas as seguintes métricas para avaliar tal dispersão: $CV < 15\%$ - baixa dispersão (dados homogêneos); $15\% \leq CV \leq 30\%$ - média dispersão; e $CV > 30\%$ alta dispersão (dados heterogêneos).



METODOLOGIA

O diagrama a seguir (Figura 1) apresenta o planejamento dos experimentos realizados com material sintético, apresentando o critério de escolha do material e o procedimento experimental realizado.

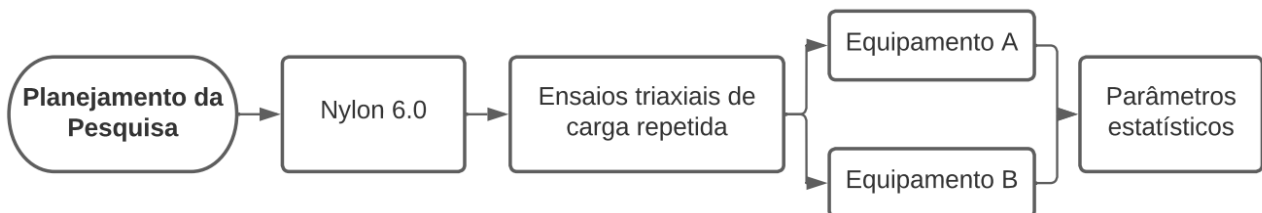


Figura 1. Estrutura experimental com material sintético.

O material sintético utilizado foi o nylon 6.0 em virtude de que este material apresenta propriedades físicas e mecânicas conhecidas, conforme procedimento proposto por Vianna (2002). Ainda de acordo com o autor, esse polímero apresentou o melhor comportamento no ensaio triaxial de carga repetida, levando em consideração o fundamento da repetibilidade e reprodutividade dos ensaios e, devido a isso, foi utilizado para verificar a acurácia nos resultados e a calibração do equipamento utilizado na época.

O procedimento para realização do ensaio triaxial dinâmico está descrito conforme a norma DNIT 134/2018-ME. Este método de ensaio foi realizado em triplicata em ambos os equipamentos. Utilizou-se um corpo de prova de material sintético de nylon 6.0 extrudado para realização dos ensaios, conhecido como poliamida, que é caracterizado por apresentar elevada resistência. Esse material é utilizado na fabricação de engrenagens, fios e tecidos. O corpo de prova apresenta diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, e está representado na Figura 2.



Figura 2. Amostra de nylon 6.0.

Quanto aos equipamentos utilizados neste estudo, foram adotados dois modelos de fabricação nacional, os quais são capazes de executar ensaios triaxiais dinâmicos e são compostos por diferentes acessórios, bem como distintas técnicas de operação. No presente estudo foram utilizados dois equipamentos triaxiais dinâmicos: o equipamento A (Figura 3) e equipamento B (Figura 4), ambos de fabricação nacional, porém com distintos acessórios e técnicas de operação. Os equipamentos apresentam como principal diferença o posicionamento dos LVDTs.



		AY111HN, 0.2 IN, AC-AC ultra precision.
Frequência do ensaio	1Hz e 2Hz	1Hz e 2Hz
Aplicação das tensões	Tensão confinante aplicada pelo ar comprimido e a tensão desvio pelo pistão pneumático.	Tensão confinante aplicada pelo ar comprimido e a tensão desvio pelo pistão pneumático.

Tabela 4. Características dos Equipamentos Triaxiais – Equipamento B.

CARACTERÍSTICAS	Equipamento B – Versão 2000	Equipamento B – Versão 2022
Fonte de alimentação	220 volts AC	220 volts AC
Fabricação	Nacional	Nacional
Tipo de ensaio realizado pelo equipamento	Triaxial dinâmico. possível realizar ensaio das normas DNIT 134/2018-ME, DNIT 181/2018-ME, DNIT 179/2018-IE.	Triaxial dinâmico. possível realizar ensaio das normas DNIT 134/2018-ME, DNIT 181/2018-ME, DNIT 179/2018-IE.
Programa de leitura dos resultados	Interface homem-máquina (IHM) touchscreen 7”.	Interface homem-máquina (IHM) touchscreen 7”.
Dimensões do corpo de prova	Diâmetro de 100 mm x 200 mm de altura.	Diâmetro de 100 mm x 200 mm de altura.
Posicionamento do LVDT	Utiliza TR1 e TR2 com resolução de medição de 0,001mm, fixados na parte superior da amostra, com a alça presa na amostra.	Utiliza TR1 e TR2 com resolução de medição de 0,001mm, fixados na parte superior da amostra, medindo o terço médio.
Frequência do ensaio	1Hz	1Hz
Aplicação das tensões	Tensão confinante com ar comprimido e o atuador pneumático aplica a célula de carga.	Tensão confinante com ar comprimido o atuador pneumático aplica a célula de carga.

As Tabelas 3 e 4, evidenciam as diferenças de especificações dos dois equipamentos, sendo equipamento A e equipamento B. Percebe-se, dessa forma, a significativa influência da calibração e do mecanismo de operação de cada equipamento na obtenção dos resultados. O equipamento A, mesmo na versão 2022, encontra-se com especificações distintas da norma DNIT 134/2018-ME, quando especifica a necessidade de instalação da faixa de medição dos LVDTs no terço médio da amostra.

Inicialmente foi conduzida uma fase de condicionamento da amostra nos equipamentos. Nesta etapa, uma sequência de cargas foi aplicada para mitigar a influência das deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações da tensão de desvio, seguindo o mesmo procedimento empregado em solos. A ausência de condicionamento pode resultar em interferências nas medições do módulo de resiliência devido a essas deformações. No ensaio triaxial com nylon 6.0, a frequência adotada para a aplicação das cargas repetidas é de 1 Hz (60 ciclos por minuto), com cada ciclo tendo uma duração de 1 segundo, dos quais 0,10 são dedicados à aplicação e 0,9 ao repouso, conforme estabelecido pelo DNIT 134/2018-ME.



Os dados obtidos foram analisados utilizando parâmetros estatísticos, como o coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de variação (CV), a fim de observar a dispersão dos resultados de MR obtidos em cada equipamento avaliado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de Módulo de Resiliência (MR) obtidos para os dos materiais sintéticos, conforme estudo de Vianna (2002), geralmente variam entre 3.200 MPa a 4.000 MPa no equipamento A (Tabela 5) e entre 98 e 433 MPa no equipamento B.

Tabela 5. Resultado do módulo de resiliência no Equipamento A.

	Teste 1 Nylon	Teste 2 Nylon	Teste 3 Nylon
MR máx(MPa)	4.301,00	3.607,00	4.482,00
MR mín(MPa)	3.152,00	2.912,00	2.612,00
MR médio (MPa)	3.963,28	3.188,11	4.002,72
Desvio padrão	304,54	153,92	432,55
Coef. de variação	7,7%	4,8%	10,8%

Tabela 6. Resultado do módulo de resiliência no Equipamento B.

	Teste 1 Nylon	Teste 2 Nylon	Teste 3 Nylon
MR máx(MPa)	967,00	766,00	194,00
MR mín(MPa)	144,00	197,00	46,00
MR médio (MPa)	411,17	432,17	97,56
Desvio padrão	226,07	190,34	42,59
Coef de variação	55,0%	44,0%	43,7%

Os valores de módulo de resiliência dos materiais sintéticos estudados por Vianna (2002) situaram-se entre 1.000 MPa e 2.000 MPa. No entanto, cabe salientar que os equipamentos utilizados neste estudo foram atualizados com componentes mais sofisticados, como posicionamento do LVDT e aplicação de tensão com pistão pneumático, o que pode justificar essa divergência nos resultados.

Os resultados de MR no equipamento A resultou em valores duas vezes maior que à referência de Vianna (2002), enquanto o equipamento B, resultou em valores de um quarto. De acordo com Vianna (2002), o Nylon 6.0 possui propriedades mecânicas específicas, como um módulo de elasticidade à compressão de 1.800 MPa (ASTM D695) e uma dureza Rockwell de R100 (ASTM D785 / ISO 2039-2). Isso confirma que os valores fornecidos pelo equipamento A correspondem à dureza do material, enquanto os resultados do equipamento B estão inconsistentes com a rigidez aparente do material.

Essa disparidade entre os resultados dos equipamentos pode ser atribuída à variação no posicionamento e sensibilidade dos LVDTs. Assim, verifica-se que é imprescindível desenvolver um plano de automação e calibração dos equipamentos para avaliar e padronizar os resultados independentemente do equipamento utilizado.

Para melhor entendimento da comparação entre os valores de MR foi utilizado o conceito de coeficiente de variação, que busca por meio do desvio padrão amostral e a média do MR para verificar a dispersão entre os dados. Na Tabela 5 é possível verificar a homogeneidade dos resultados que apresentaram variação de 4,8% a 10,8%, ou seja, representam a uniformidade entre os valores no

equipamento A. E a Tabela 6 representa os valores do equipamento B, com variação de 44% a 55%, apresentando heterogeneidade de dados.

As Figuras 5 e 6 apresentam a correlação entre as tensões confinantes e de desvio, bem como os resultados de MR.

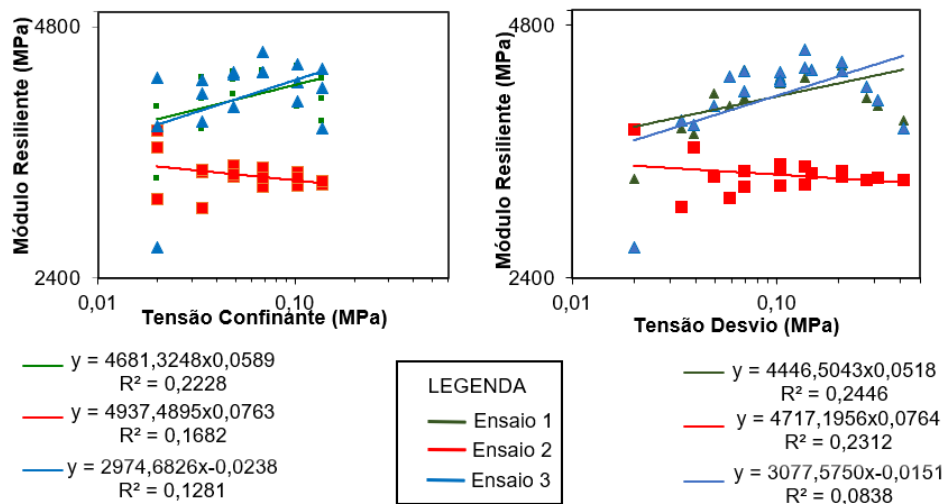


Figura 5. Correlação das tensões e MR no equipamento A.

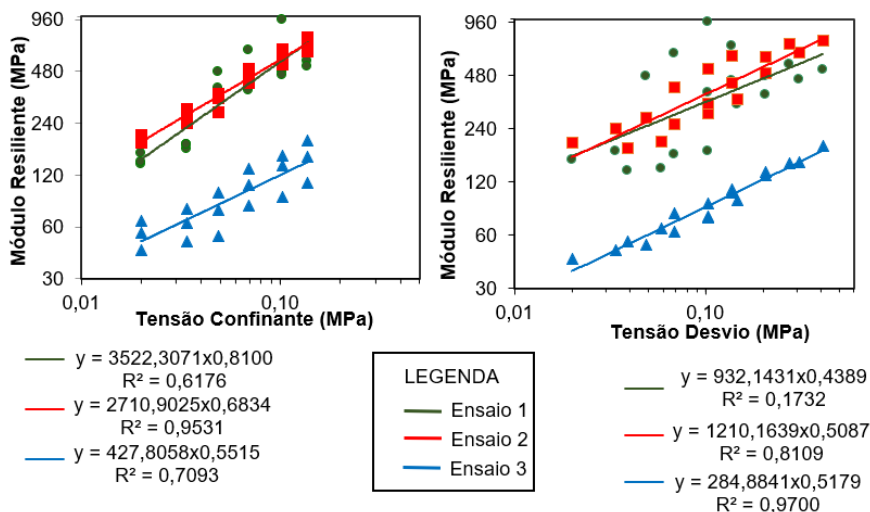


Figura 6. Correlação das tensões e MR no equipamento B.

Ao analisar os valores de R^2 obtidos pela correlação entre as tensões confinantes e de desvio e os resultados de MR (Figura 5), observa-se que, ao aumentar a tensão de desvio, o módulo de resiliência não apresenta variações significativas no equipamento A. Isso indica a uniformidade da amostra, sendo que valores de R^2 mais próximos de zero são considerados mais adequados. Portanto, é coerente que o R^2 seja baixo. Por outro lado, o equipamento B (Figura 6) apresentou valores de R^2 próximos de 1, o que indica um erro de sensibilidade nos sensores, conforme mencionado anteriormente, e esse efeito foi observado devido à alta rigidez do material sintético.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos resultados dos ensaios de módulo de resiliência nos equipamentos A e B, constatou-se uma diferença significativa. No equipamento A, o coeficiente de determinação se aproximou mais de zero, indicando que as tensões aplicadas à categoria de solos interferem pouco na rigidez do nylon 6.0, resultando em pouca variação entre os valores de MR. Por outro lado, no equipamento B, o valor de R^2 se aproximou de 1, o que não é satisfatório, pois os resultados de MR não correspondem adequadamente às propriedades do material ensaiado.

Outro conceito estatístico utilizado para avaliar a dispersão dos resultados de MR foi o coeficiente de variação, que apresentou menos de 15% de dispersão, indicando dados homogêneos para o equipamento A, independentemente do estado de tensão. Isso representa a alta resistência da amostra de material sintético.

A partir dessas análises, foi possível observar que o material sintético apresentou valores distintos para os resultados do módulo de resiliência nos equipamentos A e B. No entanto, conclui-se que o posicionamento e a sensibilidade dos sensores para medir as deformações, assim como o método de aplicação das tensões de cada equipamento, são de grande importância para analisar os resultados.

Essa discrepância de comportamento pode estar relacionada às peculiaridades de cada equipamento, tais como o posicionamento dos LVDTs, onde no equipamento A são posicionados no terço médio da amostra, presos por uma alça com distância de 0,712 mm da base e do topo, enquanto no equipamento B, estes verificam as deformações elásticas na amostra desde o topo até a pedra porosa, fixados no top cap, sem contato direto. Assim, conclui-se que os equipamentos necessitam de uma padronização do posicionamento dos LVDTs e do método de aplicação das tensões.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo suporte fornecido para a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAASHTO T 307-99. Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. Washington, DC: [s.n.], 2021.
- BARKSDALE, R.D.; ALBA, J., 1997. Laboratory Determination of resilient Modulus for Flexible Pavement Design. Final Report prepared for National Cooperative Highway Research Program Transportation Reserch Board National Research Council.
- BATHURST, R. J.; RAYMOND, G. P. Geogrid reinforcement of ballasted track. Transportation Research Board, v. 1, n. 1153, p. 8–14, 1987.
- BS EN 13286-7 (2004). Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. CEN.
- CLAROS, G.; HUDSON, W.R.; STOKOE II, K.H., 1990. Modifications to Resilient Modulus Testing Procedure and Use of Synthetic Samples for Equipment Calibration. TRR 1278.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 181 ME: Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2018.



- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 134 ME: Pavimentação – Solos: Determinação do Módulo de Resiliência - Método de Ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2018.
- FERREIRA, J. G. H. M. Tratamento de Dados Geotécnicos Para Predição de Módulos de Resiliência de Solos e Britas Utilizando Ferramentas de Data Mining. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.
- GOMES, M. S.; HELAL, A. M. P.; FILHO, J. C. Análise do comportamento mecânico de um pavimento ferroviário através de um estudo comparativo entre os ensaios de CBR e módulo de resiliência. Periódico do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da UNDB. N. 3, v. 1, 2015.
- GUIMARÃES, A. C. R. Estudo de deformação permanente em solos e teoria do shakedown aplicada a pavimentos flexíveis. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- INDRARATNA, B.; SALIM, W.; RUJKIATKAMJORN, C. Advanced rail geotechnolog y ballasted track. [S.l.]: CRC press, 2011.
- LI, D.; SELING, E. T. Resilient modulus for fine grained subgrade soils. Asce, v. 120, n. 6, p.939-957. 1994.
- MINISTÉRIO DA DEFESA. CENTRO DE EXCELÊNCIA EM ENGENHARIA DOS TRANSPORTES. MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES: Plano Nacional de Logística e Transporte Relatório. Brasília, 2018.
- MOREIRA, C. R. C. L. A. Módulo de Resiliência de Solos Arenosos Finos Lateríticos do Estado de São Paulo Determinado por meio do Ensaio Triaxial Cíclico. São Paulo, 2022.
- NCHRP 1-28A. Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design. National Cooperative Highway Research Program Research Results Digest N°. 285. 2004.
- NCHRP 1-37A. Summary of the 2000, 2001, and 2002. AASHTO guide for the design of new and rehabilitated pavement structures. National Cooperative Highway Research Program Research. 2004.
- VIANNA, A. A. D. Contribuição para o Estabelecimento de um Material Padrão e de Metodologia para Calibração de Equipamentos de Ensaio Dinâmicos. Dissertação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, 2002.