



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

COMPORTAMENTO RESILIENTE DE BRITA GRADUADA SIMPLES DE UM TRECHO DA RODOVIA BR-116/RS

*Beatriz Oliveira de Sousa Silva¹; Lislely Madeira Coelho¹; Jonathan de Oliveira Guimarães¹;
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães¹*

RESUMO

O módulo de resiliência (MR) é um parâmetro de crucial importância nas análises mecânicas que envolvem a estimativa das tensões e deformações na estrutura do pavimento quanto à ação do tráfego, visto que representa a capacidade do solo de resistir à deformação permanente sob cargas repetidas. Para este fim se faz necessária a realização dos ensaios fundamentais da mecânica dos pavimentos, notadamente o ensaio de módulo resiliente, que é calculado a partir da relação entre a carga aplicada e a deformação vertical resultante. Neste contexto, no presente estudo descreve-se o comportamento resiliente, considerando variados modelos para previsão do MR, de amostras de brita graduada simples (BGS) com diferentes teores de umidade, como também do revestimento asfáltico de um trecho da obra de melhoria da capacidade e duplicação da BR-116/RS, subtrecho Guaíba-Pelotas. Para complementar as análises dos ensaios dinâmicos de laboratório, foram coletados dados deflectométricos, de forma a poder comparar os módulos elásticos obtidos nas retroanálises das bacias de deflexão com os módulos de resiliência de laboratório. As amostras foram moldadas utilizando-se os teores de umidade de 3,6%, 6,2% e 7,5%. Os resultados obtidos do MR médio foram, respectivamente, 181,32 MPa, 196,77 MPa e 224,26 MPa. Assim, a análise indicou uma relação direta entre a umidade do BGS e o MR, percebendo uma progressão crescente no valor médio do MR em resposta ao aumento da umidade, o que indica uma sensibilidade significativa da resposta resiliente do BGS às variações de umidade. Entretanto, identificou-se que não foi determinada a umidade ótima para o BGS, embora tenha sido constatado o aumento geral do MR com o aumento da umidade.

PALAVRAS-CHAVE: Mecânica dos Pavimentos; Módulo de Resiliência; Materiais de Pavimentação.

ABSTRACT

The resilience modulus (RM) is a parameter of crucial importance in mechanistic analyzes that involve the estimation of stresses and deformations in the pavement structure in relation to traffic action, as it represents the soil's ability to resist permanent deformation under repeated loads. To this end, it is necessary to carry out fundamental pavement mechanics tests, notably the resilient modulus test, which is calculated based on the relationship between the applied load and the resulting vertical deformation. In this context, the present study describes the resilient behavior, considering various models for predicting the RM, of samples of simple graded crushed stone (GCS) with different moisture contents, as well as the asphalt coating of a section of the capacity improvement work and duplication of BR-116/RS, Guaíba-Pelotas subsection. To complement the analyzes of the dynamic laboratory tests, deflectometric data were collected, in order to be able to compare the elastic moduli obtained in the back analyzes of the deflection basins with the laboratory resilience moduli. The samples were molded using moisture contents of 3.6%, 6.2% and 7.5%. The results obtained from the average MR were, respectively, 181.32 MPa, 196.77 MPa and 224.26 MPa. Thus, the analysis indicated a direct relationship between BGS humidity and MR, noticing an increasing progression in the average MR value in response to increasing humidity, which indicates a significant sensitivity of the BGS's resilient response to humidity variations. However, it was identified that the optimal humidity for the BGS was not determined, although a general increase in RM was found with increasing humidity.

KEY WORDS: Pavement Mechanics; Resilience Module; Paving Materials.

¹ Instituto Militar de Engenharia, e-mail: beatrizoss@ime.eb.br; madeiralisley@gmail.com; jonathan.guimaraes@ime.eb.br; guimaraes@ime.eb.br



INTRODUÇÃO

A qualidade dos pavimentos viários exerce uma influência direta e significativa na eficiência operacional do transporte rodoviário e no panorama econômico de um país. Considerando a extensão territorial do Brasil e a predominância deste meio de transporte para o deslocamento de cargas e passageiros, é necessário assegurar a qualidade da infraestrutura de transportes, garantindo, conseqüentemente, os pavimentos em condições de desempenho satisfatório (Rocha, 2020).

O dimensionamento apropriado de um pavimento deve garantir que, ao longo da repetida passagem dos eixos dos veículos, não haja ocorrência de trincas excessivas na camada de revestimento devido à fadiga por deformação resiliente. Para isso, as espessuras das camadas da estrutura e suas características devem ser definidas a fim de atender as condições e os efeitos dinâmicos do tráfego (Pascoal, 2020).

As características de deformabilidade e resistência à ruptura por meio de provas de carga são obtidas através de coleta de amostras e ensaios de laboratório. Através desses dados torna-se possível definir a causa de problemas estruturais de pavimentos para restauração e/ou avaliação funcional.

Tratando-se da Mecânica dos Pavimentos, o Módulo de Resiliência (MR) é caracterizado através do comportamento elástico dos materiais sobre carregamento cíclico, podendo ser obtido por meio de ensaios de carga cíclica ou por meio da retroanálise das medidas de deflexão (Norback e Motta, 2018).

O objetivo principal do presente trabalho é descrever o comportamento resiliente, considerando variados modelos de enquadramento e diferentes teores de umidade, de amostras de brita graduada simples (BGS) utilizadas em um pavimento de um trecho da BR-116/RS.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pavimento Rodoviário e Mecânica dos Pavimentos

A mecânica dos pavimentos aborda o estudo do dimensionamento das camadas do pavimento para garantir que sejam capazes de suportar os esforços causados pelo tráfego de veículos e pelas condições climáticas. Medina e Motta (2015) ressaltam que para o dimensionamento adequado dessa estrutura, a escolha dos materiais deve considerar as condições às quais ela estará exposta, incluindo tráfego, clima, geologia e geotecnia, condições ambientais, topografia, drenagem e aspectos operacionais. Além disso, a seleção dos materiais deve levar em consideração a granulometria, a deformação permanente e o módulo de resiliência.

Módulo de Resiliência

Segundo Li e Selig (1994), o conceito de módulo de resiliência indica a elasticidade do material. Um material com alta elasticidade apresentará um alto MR, ou seja, esse material sofrerá pouca deformação elástica sob uma determinada tensão. Por outro lado, um material com baixa elasticidade apresentará um baixo MR, ou seja, esse material sofrerá uma maior deformação elástica sob a mesma tensão. Conforme as diretrizes da AREMA (2009), a avaliação da qualidade dos materiais utilizados nas camadas dos pavimentos é fortemente influenciada pelo módulo de resiliência. A norma DNIT 134/2018 – ME estipula que o módulo de resiliência, MR, seja



determinado por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas, envolvendo a aplicação de 18 pares de tensões com frequência de 1Hz, entre outros critérios, podendo ser expresso pela Equação 1.

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

Em que:

σ_d : tensão desviadora (MPa ou kgf/cm²); e
 ε_r : deformação axial resiliente mm/mm (recuperável).

Medina & Motta (2015) propõem uma expressão para o módulo de resiliência utilizando o estado de tensões aplicado durante o ensaio triaxial de cargas repetidas e duas constantes k_1 e k_2 , conforme mostrado a seguir na Equação 2. Além disso, o módulo de resiliência também pode ser expresso em relação à tensão confinante e às constantes k_1 e k_2 , como 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;
 σ_d : tensão desviatória; e
 σ_3 : tensão confinante.

Na literatura, diversos modelos são definidos para determinar o módulo de resiliência. Por exemplo, Witczak e Rada (1981) realizaram um estudo no qual propuseram um modelo empírico a fim de prever o MR de misturas asfálticas baseado em propriedades volumétricas e mecânicas do material. Ni et al. (2002) propuseram um estudo no qual desenvolveram um modelo utilizando redes neurais artificiais para prever o MR de solos de subleito com base em diversas propriedades do solo. Titi et al. (2006) desenvolveram modelos de regressão para prever o MR de materiais de subleito e de base não ligados, baseados em propriedades físicas e características de carga. O estudo utilizou dados laboratoriais e de campo para formular equações de regressão que relacionam o MR a variáveis como o teor de umidade, a densidade seca, e as tensões de confinamento e desvio.

Para avaliação dos diversos modelos de referência utilizados neste estudo, considerou-se como parâmetro o coeficiente de determinação (R^2), visto que quanto mais próximo de 1 maior será a adequação do modelo de regressão para a determinação do MR, fornecendo uma boa medida da capacidade do modelo de explicar a variância dos dados. Na Tabela 1, são apresentadas as equações utilizadas para calcular os valores de MR e os respectivos valores de R^2 deste estudo. O software SysTrain© inclui um módulo (MRCal) que permite o cálculo dos parâmetros de vários modelos, e foi utilizado neste trabalho.



Tabela 1. Modelos para previsão de módulo de resiliência. (Santanab *et al.*, 2023).

Modelos de Referência	Equações
Composto (Svenson, 1980; Macêdo, 1996)	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$
Witczak e Rada (1981)	$MR = k_1 \cdot (\sigma_{sum}/Pa)^{k_2} \cdot (\sigma_d/Pa)^{k_3}$
Witczak e Usan (1988)	$MR = k_1 \cdot Pa \cdot (\sigma_{sum}/Pa)^{k_2} \cdot (\sigma_{oct}/Pa)^{k_3}$
Titi et al. (2006)	$MR = k_1 \cdot Pa \cdot (\sigma_{sum}/Pa)^{k_2} \cdot (\sigma_d/Pa + 1)^{k_3}$
Ni et al. (2002)	$MR = k_1 \cdot (\sigma_3/Pa + 1)^{k_2} \cdot (\sigma_3/Pa + 1)^{k_3}$
NCHRP I-28A (2004)	$MR = k_1 \cdot Pa \cdot (\sigma_d/Pa)^{k_2} \cdot (\sigma_{oct}/Pa + 1)^{k_3}$

Sendo:

MR: Módulo de Resiliência (MPa);

k_1 , k_2 e k_3 : Coeficientes de regressão;

σ_{sum} : soma das tensões principais/invariante de tensões (kPa);

σ_{oct} : Tensão octaédrica (kPa);

Pa: Pressão atmosférica;

σ_3 : Tensão confinante (kPa);

σ_d : Tensão desvio (kPa).

O modelo composto, refere-se a uma adaptação do modelo de Pezo (1993) e analisado por Macêdo (1996), podendo ser utilizada por qualquer tipo de solo, considerando os valores do conjunto de tensões confinante e desvio. Assim, segundo estudos dos coeficientes de correlação, R^2 tendem a atingir um valor maior que 0,9.

Na equação de Witczak e Rada (1981), é realizada pelos autores uma correlação entre os valores de MR, que vão influenciar no comportamento resiliente de materiais com granulometria retida na peneira 200. Conforme Macêdo 1996 a importância para este método é o grau de saturação e a energia de compactação do corpo de prova.

Na equação de Witczak e Usan (1988) foi proposto o modelo considerando o primeiro invariante e a tensão cisalhante octaédrica, esta é responsável pelas deformações angulares ou distorções atuantes no plano octaédrico. Sendo utilizadas para materiais de granulometria grossa e fina.

Titi et al (2006) propõem a determinação das propriedades de módulo de resiliência de solos de Wisconsin, com classificação de solos de fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia, e solos siltsos. Na proposta de Ni et al. (2002), utiliza-se as pressões confinante, desvio e atmosférica para verificar o enquadramento do MR. Já o modelo proposto pela NCHRP (2004) apresenta aplicabilidade universal para materiais de comportamento não linear.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A BR-116, uma das principais artérias rodoviárias longitudinais do Brasil, desempenha um papel crucial nos diversos tipos de transporte e na integração regional e social. Essa rodovia promove a circulação de pessoas e a troca cultural entre diversas partes do país, facilitando a circulação de



cargas e pessoas, além de promover a troca cultural entre diversas partes do país. Situada no corredor que atravessa o norte do Estado do Rio Grande do Sul até a fronteira com o Uruguai ao sul, esta rodovia estratégica serve como uma importante via de acesso não apenas para os centros urbanos e econômicos ao longo de seu trajeto, mas também para o porto marítimo de Rio Grande, um ponto vital para o comércio internacional da região. Além disso, essa rodovia complementa outros modos de transporte, como ferrovias e hidrovias, otimizando a logística e o escoamento da produção. Nesse contexto, a compreensão detalhada da localização e do ambiente circundante da BR-116 é apresentada na Figura 1.

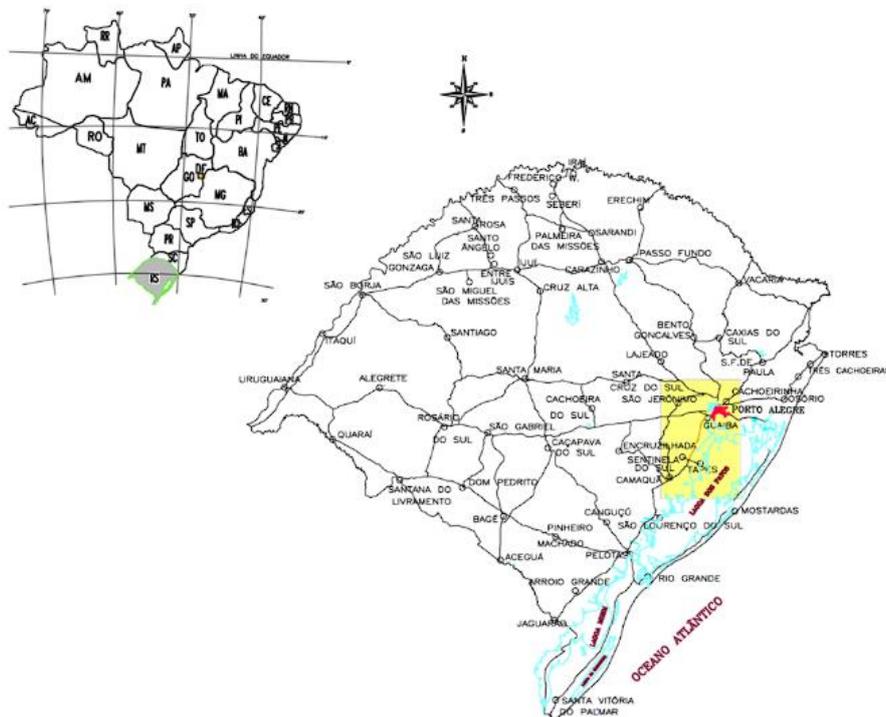


Figura 1. Localização da Rodovia BR-116/RS. (AUTOR, 2024).

Caracterização Física

A base da BR-116 a ser analisada neste estudo é uma base de brita graduada simples (BGS), composta por material pétreo de origem granítica proveniente das instalações de britagem da empresa Eldorado mineração Eireli, localizada na cidade de Eldorado do Sul/RS, estrada Monte Alegre, Km 4,4, distrito de Bom Retiro. Os ensaios de caracterização foram realizados no laboratório da Solotec, localizado na Rua Doutor Ernesto Miranda, Porto Alegre/RS.

Ensaio Mecânicos

Para analisar as propriedades mecânicas dos materiais, o módulo de resiliência é um parâmetro de extrema importância. A condução do ensaio triaxial de cargas repetidas replica, em ambiente laboratorial, as condições de carga encontradas em campo. Neste estudo, todos os procedimentos experimentais seguiram as diretrizes estabelecidas pela norma do DNIT para a determinação do



Módulo de Resiliência (DNIT 134/2018 – ME). O objetivo do ensaio foi avaliar o comportamento da camada de base, a partir da variação de umidade.

Para cada teor de umidade, foi moldado um corpo de prova utilizando-se o molde tripartido, conforme ilustrado na Figura 2. O processo de moldagem observou os procedimentos previstos na norma DNIT 443/2023 – ME, empregando a energia Proctor modificada. Após a moldagem, cada amostra foi submetida a ensaios específicos para determinar os valores de tensão de desvio aplicada, tensão confinante e módulo de resiliência. Esses ensaios são essenciais para avaliar a capacidade dos materiais de suportar cargas repetidas e prever seu desempenho a longo prazo sob condições de tráfego. Para cada estado de tensão foram obtidos os valores do MR com o auxílio de ferramentas computacionais.



Figura 2. Montagem de corpo de prova. (AUTOR, 2024).

Etapa de Modelagem

Cálculo dos Modelos para Avaliação do Módulo de Resiliência

A partir dos resultados obtidos pelo ensaio de Módulo de Resiliência para a amostra de BGS, foi possível realizar o enquadramento do padrão de comportamento resiliente em 6 (seis) 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.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização Física

Os materiais granulares a serem utilizados na base de brita graduada apresentam as características físicas descritas na Tabela 2. Para a composição granulométrica da BGS, foi adotada a norma DNIT 141/2022 – ES, base estabilizada granulometricamente, com enquadramento na faixa A, com as seguintes porcentagens: brita 2” (27,5%), brita ¾ (27,5%) e pó de pedra (45,0%). O enquadramento granulométrico da mistura é observado na Figura 3.



Tabela 2. Características físicas dos materiais granulares. (AUTOR, 2024).

ISC (%) na umidade ótima	176,59
Expansão (%)	0,00
Limite de Liquidez	NP
Limite de Plasticidade	NP
Equivalente de Areia (%)	63,30
Densidade Real do Agregado Graúdo (g/m ³) retido na peneira 3/4"	2,642
Densidade Aparente (g/m ³)	2,604
Absorção do Agregado Graúdo (%)	0,56
Índice de Forma (%)	0,80
Desgaste Los Angeles (%)	20,72
Teor de Argila em Torrões	Não

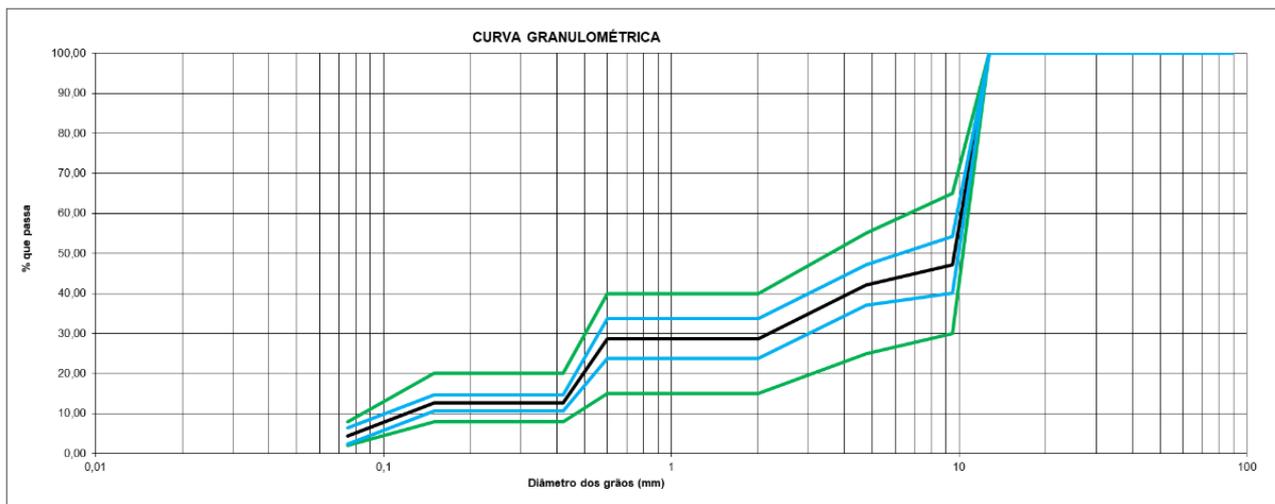


Figura 3. Enquadramento Granulométrico da Mistura. (AUTOR, 2024).

Ensaio de Módulo de Resiliência

Com base nos resultados dos ensaios triaxiais de cargas repetidas, de módulo de resiliência, para 18 pares de tensão, foram obtidos os valores médios de MR resultante a partir de uma média aritmética. Na Tabela 3 são apresentados os resultados para o MR médio de cada amostra, que se diferenciam pelo teor em porcentagem de umidade utilizada, sendo A1 (3,9%), A2 (6,2%) e A3 (7,5%), como também suas respectivas massas específicas aparente seca (MEAS).

Tabela 3. Resultados de MR médio obtidos em laboratório. (AUTOR, 2024).

Amostra	MR (MPa)	MEAS (g/cm ³)	Umidade (%)
A1	181,32	2,10	3,6
A2	196,77	2,15	6,2
A3	224,26	2,21	7,5



Observa-se que em todas as amostras os valores de módulo de resiliência estão acima de 100 MPa. Bernucci *et.al.* (2008) afirmam que valores de MR entre 100 e 400 MPa correspondem à materiais granulares, como por exemplo uma brita graduada simples. Em caráter geral, os resultados investigados de MR foram dentro do esperado para utilização em camada de base de pavimento rodoviário, indicando que a BGS estudada possui bom comportamento resiliente, em ambas as umidades investigadas.

Contudo, a observação de que o valor médio do módulo de resiliência aumentou à medida que a umidade da brita graduada foi incrementada sugere que a umidade ótima de referência (ou de projeto) pode não ser a verdadeira umidade ótima para esse material. Isso implica que existe potencial para melhorar ainda mais as propriedades resilientes da brita graduada através da otimização da umidade durante o processo de preparação do material.

Essa constatação destaca a importância de investigações adicionais para determinar a umidade ideal que maximize o desempenho do material. Porém, muito provavelmente tal variação de umidade ótima deve estar associada ao tamanho dos moldes utilizados nos ensaios de compactação, haja vista que para os ensaios triaxiais de cargas repetidas são adotados moldes tripartidos de dimensões 10 cm x 20 cm, enquanto a compactação foi feita nos moldes proctor tradicionais. Em 2023 o DNIT publicou a normal DNIT 443/2023 – ME, que é uma norma específica para solução dessas disparidades: Pavimentação – Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos – Método de ensaio.

Nas Figuras 4 a 9 são apresentados os gráficos com a variação dos valores de Módulo de Resiliência em relação à tensão confinante e à tensão de desvio com os respectivos resultados de R^2 para cada amostra.

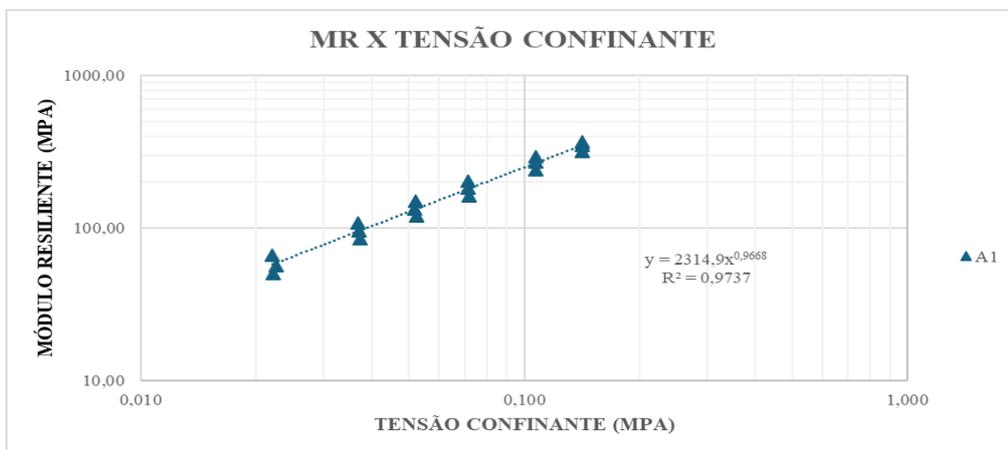


Figura 4. Valores de MR em função das tensões confinantes – Amostra A1 (AUTOR, 2024).

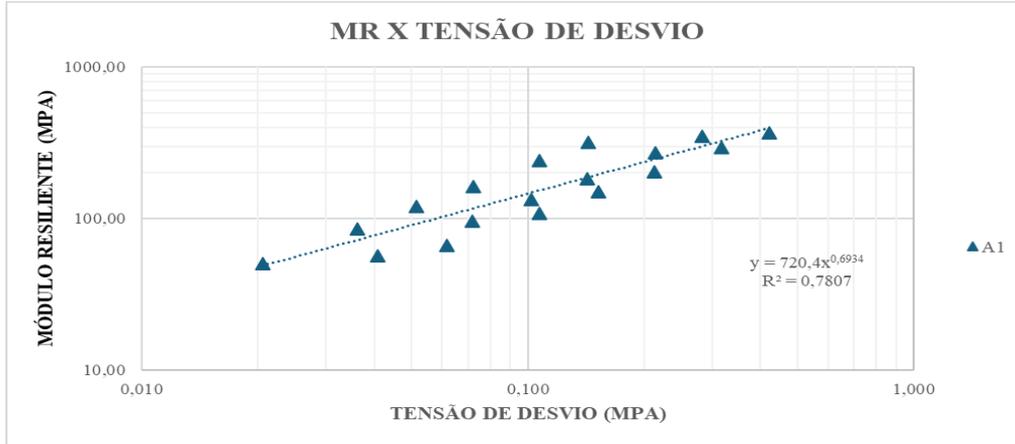


Figura 5. Valores de MR em função das tensões de desvio – Amostra A1 (AUTOR, 2024).

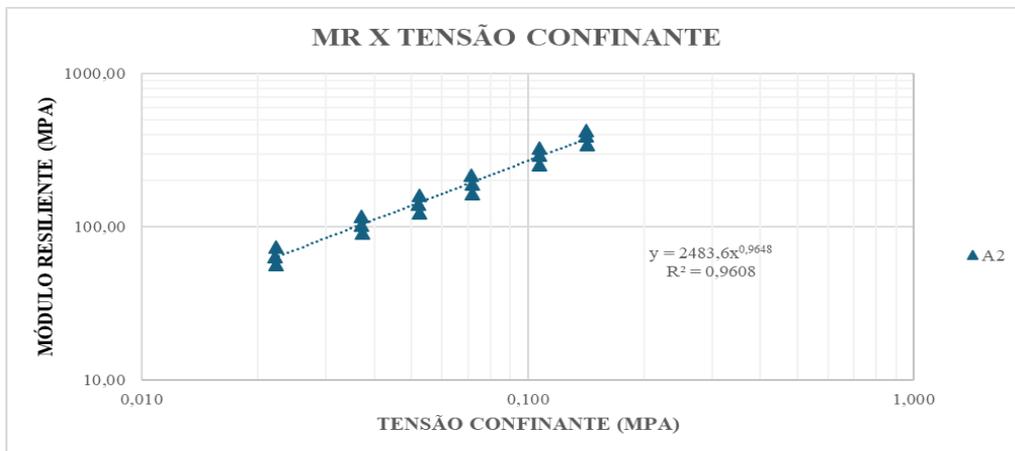


Figura 6. Valores de MR em função das tensões confinantes – Amostra A2 (AUTOR, 2024).

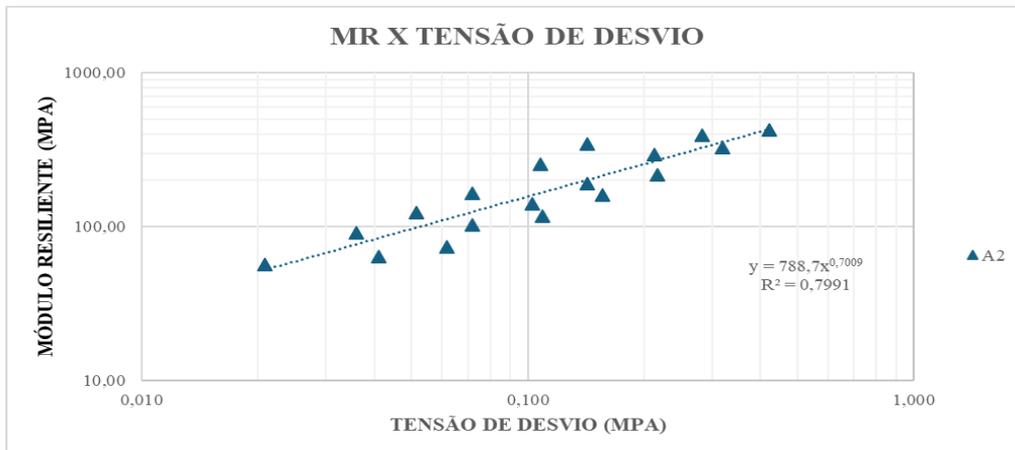


Figura 7. Valores de MR em função das tensões de desvio – Amostra A2 (AUTOR, 2024).

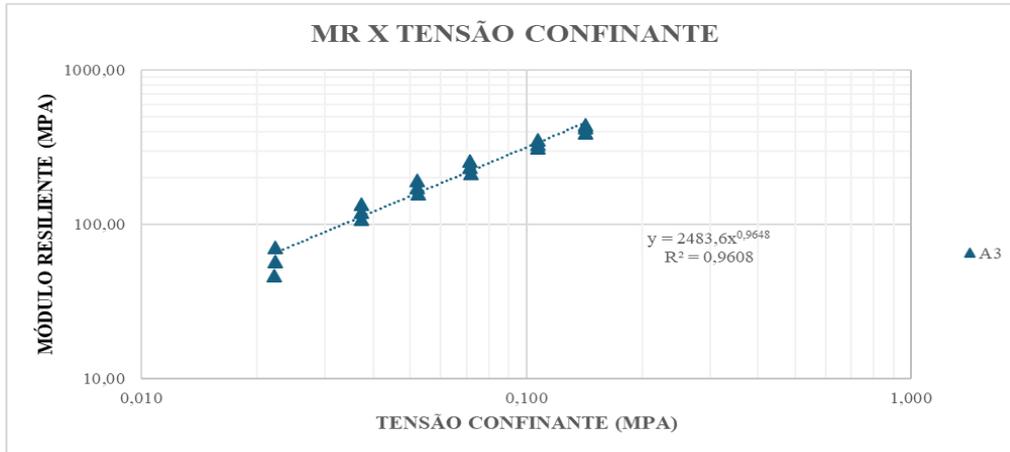


Figura 8. Valores de MR em função das tensões confinantes – Amostra A3 (AUTOR, 2024).

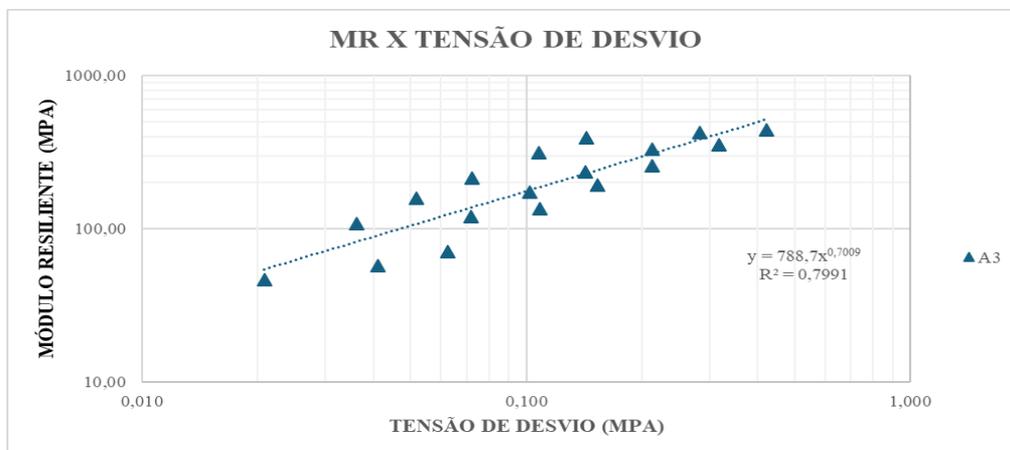


Figura 9. Valores de MR em função das tensões de desvio – Amostra A3 (AUTOR, 2024).

No que se refere ao comportamento dos materiais em relação às variações das tensões, observou-se que a BGS analisada nesse estudo tem grande influência tanto da tensão desvio, quanto da tensão confinante. Contudo, apresenta melhores correlações em função da tensão confinante. Além disso, é importante destacar que, apesar das variações na umidade durante o teste, os valores de R^2 permaneceram consistentes em todos os casos. Isso sugere que a variação de umidade não teve interferência nessa característica, visto que, os valores de R^2 são semelhantes. Essa constância nos valores de R^2 reforça a confiabilidade e a consistência dos resultados obtidos. No entanto, é importante ressaltar que mais pesquisas são necessárias para explorar completamente o impacto da umidade e outras variáveis ambientais no comportamento mecânico dessa BGS.

A Tabela 4 apresenta os resultados do enquadramento dos valores de MR obtidos para a BGS estudada, considerando diversos os modelos disponíveis no MRCalc do software Systrain, na qual são mostrados os coeficientes de regressão dos modelos selecionados, a fim de verificar o melhor enquadramento do comportamento resiliente.



Tabela 4. Análise estatística dos modelos utilizados para estudo comparativo. (AUTOR, 2024).

Amostra	Coefficientes	Modelo Composto	Witczack e Rada (1981)	Witczack e Usan (1988)	Titi et al. (2006)	Ni et.al (2002)	NCHRP P1-28A
A1	k ₁	2071,7194	45,5296	375,1382	449,3418	50,7622	554,2161
	k ₂	0,8	1,16	1,16	1,16	1,8	1,16
	k ₃	0,16	-0,24	-0,24	-0,24	0,28	-0,52
	R ²	0,9983	0,9975	0,9975	0,9975	0,9792	0,999
A2	k ₁	2417,9805	44,0397	362,8626	434,6381	50,8692	571,8691
	k ₂	0,8	1,24	1,24	1,24	1,8	1,16
	k ₃	0,2	-0,24	-0,24	-0,24	0,36	-0,44
	R ²	0,9983	0,9978	0,9978	0,9978	0,9888	0,997
A3	k ₁	2375,5327	52,0037	403,4631	513,2368	64,4855	712,5074
	k ₂	0,8	1,24	1,24	1,24	1,88	1,2
	k ₃	0,12	-0,32	-0,32	-0,32	0,2	-0,68
	R ²	0,9931	0,9929	0,9929	0,9929	0,9617	0,9974

Em relação aos coeficientes de regressão, percebe-se que todos os valores de k_1 e k_2 são positivos, o que indica o aumento do MR em função da tensão confinante, e que os valores de k_3 foram positivos para os modelos “Composto e Ni et al. (2002)”, acarretando influência da tensão desvio em seu comportamento. O k_1 alcançou maiores valores para a situação que utilizou o modelo composto, sendo a amostra A2 a mais afetada. Comportamento inverso ocorreu para o k_2 , em que utilizando o modelo composto resultaram em menores valores desse coeficiente. Para o k_3 , os valores se apresentaram bem próximos. Em todos os casos, as estatísticas de R^2 apresentaram correlações satisfatórias, visto que todos os valores são bem próximos a 1,00.

CONCLUSÃO

Neste estudo, investigou-se o comportamento resiliente da BGS em relação aos diferentes níveis de umidade, com o objetivo de entender sua influência nas propriedades estruturais do material. Ao longo da análise, observou-se uma relação direta entre a umidade da BGS e o módulo de resiliência, com um aumento progressivo no valor médio do módulo de resiliência à medida que a umidade foi aumentada. Essa tendência indica uma sensibilidade significativa da resposta resiliente da BGS às variações de umidade, sugerindo a existência de uma umidade ótima que maximiza suas propriedades estruturais.

Além disso, identificou-se que, apesar do aumento geral do módulo de resiliência com o aumento da umidade, ainda não foi determinada a umidade ideal para a BGS. Portanto, há uma oportunidade para pesquisas futuras visando a otimização das propriedades resilientes da BGS através da identificação precisa da umidade ótima.

Em relação aos coeficientes de regressão dos modelos analisados, sugerem uma complexidade no comportamento resiliente da BGS, que responde tanto à tensão desvio quanto à tensão confinante. Através das correlações, não é possível definir qual o modelo que melhor se ajusta para obtenção do módulo de resiliência a partir coeficiente de determinação (R^2), visto que todos os modelos apresentaram excelentes ajustes, acima de 0,9. Adicionalmente, a análise dos coeficientes de



regressão destaca a importância de considerar demais modelos existentes na literatura para uma compreensão mais precisa do comportamento resiliente do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA). (2009). "Manual for Railway Engineering." AREMA, Landover, MD.
- Bernucci, L. B., Motta, L. M., Ceratti, J. A. P., Soares, J. B. (2008) Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ, 475 p.
- DNIT 134/2010 – ME. (2010). "Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio". Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasil.
- DNIT 141/2022 – ES. (2022). "Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço." Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasil.
- DNIT 443/2023 – ME. (2023). "Pavimentação - Solos - Ensaio de Compactação Utilizando Moldes Tripartidos - Método de Ensaio." Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasil.
- Li, D., & Selig, E. T. (1994). "Resilient Modulus for Fine-Grained Subgrade Soils." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 6, 939-957 p.
- Motta, L.M.G. DA; Medina, J. (2015) Mecânica dos Pavimentos. 3º ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2004). "Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design." *NCHRP Report 1-28A*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Ni, F., Ali, H.A., & Nazarian, S. (2002). "Prediction of Resilient Modulus of Subgrade Soils Using Artificial Neural Networks." *Transportation Research Record*, No. 1786, pp. 34-41.
- Norback, C., Motta, L. M. G. (2018) Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de duas misturas solo-brita. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Gramado, Rio Grande do Sul, 12 p.
- Pascoal, P. T. (2020) Estudo da influência da compactação no comportamento resiliente e deformação permanente de solo laterítico do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria / UFSM, 192 p.
- Rocha, M. L. (2020) Influência dos módulos de resiliência iniciais no procedimento de retroanálise de pavimentos flexíveis. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de Estruturas e Materiais, Universidade Federal de Juiz de Fora / UFJF, 247 p.
- Santana, L. A., Silva, M. J., Santos, P. H., & Oliveira, R. B. (2023). "Análise do módulo de resiliência de misturas asfálticas: Métodos e Influências." *Revista de Engenharia Civil*, vol. 14, no. 3, pp. 215-230.
- Systrain. (2016). Manual do SYSTRAIN – Versão 1.3. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil: Elgayer Engenharia.
- Titi, H. H., El-Badawy, S. M., & Awed, A. M. (2006). "Prediction of Resilient Modulus of Unbound Granular Materials and Subgrade Soils Using Regression Models." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1952, pp. 153-163.
- Witczak, M.W., & Rada, G.R. (1981). "Simple Performance Test for Superpave Mix Design." *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 50, pp. 600-632.