

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/673

## Comportamento resiliente de solo compactado frente a diferentes condições de ensaio e histórico de tensões

Luiz Henrique Ferrador Ben

Discente de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,  
luizhfb@hotmail.com

Paula Taiane Pascoal

Discente de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,  
paulatpascoal@gmail.com

Magnos Baroni

Docente em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,  
magnos.baroni@gmail.com

Mauricio Silveira dos Santos

Discente de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,  
Docente na Universidade Federal do Pampa, mauriciosilveira@unipampa.edu.br

Luciano Pivoto Specht

Docente em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, luspecht@ufsm.br

**RESUMO:** A estrutura rodoviária está sujeita a extensos ciclos de cargas e submetida a uma variedade de carregamentos. A investigação do histórico de tensões no comportamento mecânico dos materiais, principalmente quanto a sua resposta resiliente, demonstra importância na previsão do comportamento de pavimentos. Diante disso, o objetivo deste estudo foi verificar o comportamento resiliente de solo compactado em três diferentes condições de aferição da deformação elástica, sendo um seguido a normativa vigente, em outro caso durante o ensaio de deformação permanente, e após o protocolo de deformação permanente, visando identificar a influência do histórico de tensões na deformabilidade do solo. Concluiu-se que a contribuição do histórico de tensões após o ensaio de deformação permanente, resulta em ganho de rigidez em relação ao ensaio convencional. Já o módulo de resiliência durante o ensaio de deformação permanente, apresentou uma tendência de comportamento elástico para os pares de tensões elevado, devido as altas deformações durante o ensaio. Assim, fica evidente que a aferição das propriedades elásticas após o material ser submetido a um histórico de tensões é de grande relevância para caracterização assertiva de suas propriedades e que a aferição durante o ensaio de deformação permanente pode não ser representativa ao material, devido a deformação resiliente acentuada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas, Deformabilidade, Subleito Rodoviário, Deformação Permanente, Módulo De Resiliência.

**ABSTRACT:** The road structure is subjected to extensive cycles of loads and exposed to a variety of loadings. Investigating the stress history in the mechanical behavior of materials, especially regarding their resilient response, demonstrates importance in predicting pavement behavior. Therefore, the objective of this study was to verify the resilient behavior of compacted soil under three different conditions of elastic deformation measurement, one following the current standard, another during the permanent deformation test, and after the permanent deformation protocol, aiming to identify the influence of stress history on soil deformability. It was concluded that the contribution of stress history after the permanent deformation test results in increased rigidity compared to the conventional test. On the other hand, the resilient modulus during the permanent deformation test showed a tendency towards elastic behavior for high stress pairs, due to the high deformations during the test. Thus, it is evident that assessing the elastic properties after the material has been subjected to stress history is of great relevance for the accurate characterization of its properties and that measurement

during the permanent deformation test may not be representative of the material, due to pronounced resilient deformation.

**KEYWORDS:** Triaxial Load Test, Deformability, Road Subgrade, Permanent Deformation, Resilient Modulus.

## 1 INTRODUÇÃO

No que tange aos solos e materiais granulares empregados na pavimentação, existe uma crescente preocupação quanto às suas propriedades atreladas a deformabilidade, tornando os ensaios para a caracterização de tais propriedades objeto de maior número de investigações atualmente. Por esses materiais serem responsáveis por garantir suporte estrutural para o revestimento asfáltico e atenuar as tensões de tráfego, demandam um rigoroso protocolo de caracterização prévia a sua aplicação.

A caracterização da deformabilidade de solos e granulares, e a aplicação correta desses constituintes, são capazes de atuar ativamente na previsão do surgimento de patologias como trincamento por fadiga e afundamento de trilha de roda, que são os principais defeitos que acometem e comprometem a malha rodoviária nacional. No momento que esses materiais são submetidos a um excesso em suas deformações acabam originando esses mecanismos de deterioração e danificação, que podem ser considerados os principais defeitos presentes em pavimentos flexíveis (LEKARP et al., 2000; CERNI et al., 2012; MEDINA e MOTTA, 2015). Tais patologias promovem uma acentuada degradação da estrutura rodoviária comprometendo conforto, a segurança e a economia do usuário do modal rodoviário.

No caso do correto dimensionamento e da posterior execução da camada em questão, ao decorrer de determinado número de solicitações o material deixa de apresentar deformações plásticas e por resultado não contribui mais para o afundamento de trilha de roda no topo do revestimento. Do contrário, em caso de dimensionamento ou execução incorretas, o material pode acumular deformações indefinidamente, contribuindo de forma ativa para a ruptura da estrutura (WERKMEISTER et al., 2001; SOLIMAN & SHALABY, 2015).

Balbo (2007) define elasticidade como sendo a propriedade de um dado material não preservar deformações residuais, ou seja, cessada a ação das solicitações que deformam o material, ele volta a assumir sua forma original. Em contrapartida, a plasticidade é definida como sendo a propriedade inversa, ou seja, a capacidade do material preservar deformações residuais depois de cessado o estado de esforços ao qual foi submetido, sendo tais deformações também denominadas plásticas ou permanentes.

Levando em conta a variabilidade de constituintes empregados em uma estrutura rodoviária e para atender aos critérios presentes no novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) foram propostas normas que regem a investigação da deformabilidade de diversos materiais que compõem o pavimento, destacando-se o ensaio de Deformação Permanente (DP) regido pela norma DNIT 179/2018, e o Módulo de Resiliência (MR) regulamentado pela norma do DNIT 134/2018.

Tendo em vista o comportamento múltiplo do material quando submetido às tensões impostas, em sua tese, Guimarães (2009) sugere o cálculo do módulo de resiliência ainda durante o ensaio de deformação permanente, para avaliar o comportamento resiliente decorrente da aplicação das cargas, assim como imediatamente após o ensaio de DP, permitindo observar como a influência do histórico de tensões atua no comportamento resiliente do material, e permitindo estimar tal propriedade ao longo de toda a vida útil do pavimento.

Ainda alinhado com essa análise Santos (2020) constatou que ao decorrer do período de ação dos carregamentos, diferentes materiais tendem a sofrer um incremento nos seus valores de módulo de resiliência, uma vez que sofrem alterações estruturais a ponto de suas propriedades elásticas não serem previstas adequadamente pelo modelo composto.

Decorrente dos fatores supracitados, o presente artigo teve como objetivo a investigação das propriedades resilientes durante e após o ensaio de deformação permanente, confrontando os resultados com os obtidos pelo ensaio padrão da normativa. Para isso, fez-se o uso de um solo que fora empregado em subleito rodoviário, com a finalidade de aferir o efeito do histórico de tensões impostas e compreender o comportamento do material às suscetíveis variações decorrentes do rearranjo estrutural.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O solo de objeto de estudo foi empregado como subleito rodoviário em um trecho da duplicação da BR 116/RS (km 351, sentido norte). O solo foi coletado em amostras deformadas diretamente da jazida, localizada no Km 351, à beira do corpo estradal. O material foi submetido a ensaios de caracterização físicas de acordo com as normativas demonstradas na Tabela 1, além de ter o ensaio de compactação realizado pela normativa atual de vigência do DNIT. O solo foi classificado como solo argilo silto-arenoso, classificado como A-7-5 (AASHTO, 1973) e identificado como um silte elástico (MH) pela classificação unificada SUCS (ASTM, 1983), embora mesmo consagrados mundialmente, apresentam limitações quando aplicados a solos tropicais tipicamente encontrados no Brasil. A Tabela 1 demonstra os parâmetros obtidos através da caracterização física e mecânica.

Tabela 1. Caracterização física e parâmetros de compactação do solo

| Ensaio/classificação e normativa                 | L2                     |
|--|------------------------|
| % pedregulho (2,0 – 4,0 mm)                      | 8                      |
| % areia grossa (0,6 – 2,0 mm)                    | 15                     |
| % areia média (0,2 – 0,6 mm)                     | Análise granulométrica |
| % areia fina (0,06 – 0,2 mm)                     | NBR 7181 (ABNT, 2016)  |
| % silte (2 $\mu$ m – 0,06 mm)                    | 23                     |
| % argila (%2 $\mu$ m)                            | 39                     |
| Massa esp. real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )   | NBR 6458 (ABNT, 2016)  |
| Limite de liquidez (%)                           | NBR 6459 (ABNT, 2016)  |
| Limite de plasticidade (%)                       | NBR 7180 (ABNT, 2016)  |
| Índice de plasticidade (%)                       | -                      |
| Massa esp. apa. seca máxima (kg/m <sup>3</sup> ) | DNIT 443 (DNIT, 2023)  |
| Umidade ótima (%)                                | 16,0                   |

A compactação das amostras ocorreu através do molde tripartido de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, na condição de umidade ótima e densidade máxima seguindo os preceitos regidos pela normativa DNIT 443/2023, procedimento esse executado em 10 camadas, tendo cada camada recebido 27 golpes considerando a altura de queda de 30,5 cm e soquete de 2,5 kg, conforme a normativa indica para compactação na energia intermediária. Ainda, conforme DNIT (2018), admite-se uma tolerância de 0,5% em relação a umidade ótima, e foi adotado uma variação de  $\pm 1\%$  em relação ao grau de compactação da amostra, uma vez que não existe um critério de variação da densidade máxima das amostras.

A caracterização dos materiais quanto a sua deformabilidade foi realizada através do equipamento triaxial de cargas repetidas, em que a amostra é submetida a um conjunto de tensões atuantes, denominadas como tensão desvio ( $\sigma_d$ ) e tensão confinante ( $\sigma_3$ ). As tensões impostas têm o objetivo de reproduzir as condições no qual o material é submetido em campo, sendo assim, o  $\sigma_d$  reproduz os esforços impostos pela passagem dos veículos na estrutura, atuando então de forma dinâmica, e o  $\sigma_3$  é equivalente ao confinamento que o material devido a compactação e seu peso próprio. Tal dinâmica se aplica para a realização da caracterização tanto de deformação específica elástica (resiliente), quanto para a aferição da deformação específica plástica (permanente).

Se tratando do ensaio de Módulo de Resiliência, a normativa DNIT ME 134 (DNIT, 2018) rege a determinação deste parâmetro em laboratório, tendo como objetivo final realizar a aferição dos deslocamentos recuperáveis entre o ponto onde a tensão desvio aplicada é máxima e o fim do ciclo que é o descarregamento. Para as verificações do material em questão utilizou-se a sequência de tensões para a determinação do MR para solos do subleito, conforme indicado na normativa, que compõem 12 pares de tensões, aplicados em uma única amostra, reproduzido em triplicata.

Para obtenção dos parâmetros resilientes, após a realização do ensaio triaxial de cargas repetidas, se torna necessário a realização de uma regressão com os dados. Diante de diversos modelos consolidados na literatura, optou-se pelo uso da equação 1 proposta por Pezo et al. (1992), denominada Modelo Composto, uma vez que tal modelo apresenta vantagem por apresentar uma grande aplicabilidade a solos de grãos finos, bases de grãos grosseiros e materiais de subleito, conservando razoável precisão na previsão de comportamento

destes materiais. Ainda, é o modelo que está inserido no MeDiNa e vem sendo amplamente utilizado no país.

$$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (1)$$

Em que:  $M_R$ : módulo de resiliência;  $k_1, k_2, k_3$ : parâmetros de regressão;  $\sigma_3$ : Tensão confinante;  $\sigma_d$ : Tensão desvio.

Conforme a normativa DNIT 179/2018, o ensaio de Deformação Permanente regulamenta a realização de nove pares de tensões para a caracterização das propriedades plásticas, cada par aplicado em uma amostra. Entretanto, Lima et al. (2019) avaliaram combinações diferentes de pares de tensões, indicando que a realização de seis pares pode ser satisfatória para representar o comportamento plástico de solos. Com isso, os seis estados de tensões foram considerados na presente pesquisa, sendo aplicados cada um em uma amostra, com a repetição de 150000 ciclos, na frequência de 2 Hz. Sendo assim, foram considerados os seguintes pares, sendo  $\sigma_3 - \sigma_d$ : 0,04 – 0,04 MPa; 0,04 – 0,12 MPa; 0,08 – 0,08 MPa; 0,08 – 0,24 MPa; 0,12 – 0,24 MPa; 0,12 – 0,36 MPa. Após a realização dos ensaios, foram obtidos os parâmetros de deformação permanente a partir do modelo de Guimarães (2009), indicado na Equação 2, sendo tal modelo uma recomendação da normativa vigente para a obtenção dos parâmetros plásticos a partir dos dados oriundos do ensaio e amplamente utilizado pela literatura técnica nacional e incluso no framework do MeDiNa.

$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (2)$$

Em que:  $\varepsilon_p(\%)$ : deformação específica plástica;  $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ : parâmetros de regressão;  $\sigma_3$ : Tensão confinante;  $\sigma_d$ : Tensão desvio;  $\rho_0$ : Tensão referência (tensão atmosférica);  $N$ : Número de ciclos de carga.

Visando atingir os objetivos da presente pesquisa, durante o ensaio de DP, foi realizada a aquisição do comportamento elástico do material, podendo assim exemplificar o comportamento resiliente durante uma extensa aplicação de tensões, fato que se assemelha ao que é imposto em campo. Por fim, após o extenso ensaio de DP, as amostras foram submetidas ao protocolo determinação do MR para solos do subleito, fornecendo então mais uma perspectiva do comportamento do material no que se refere a suas propriedades resilientes, após a extensa aplicação de ciclos.

Como resultado dos procedimentos experimentais, nos quais se buscou avaliar o efeito do histórico de tensões e realizar uma aferição quanto aos métodos para uma melhor modelagem dos parâmetros resilientes do material, foi elaborada uma análise comparativa entre os dados experimentais e os respectivos modelos obtidos a partir dos ensaios de MR e DP. Foram comparados os seguintes cenários quanto a obtenção de parâmetros resilientes:

- Condição 1: aquisição dos parâmetros resilientes por meio do ensaio convencional de MR, conforme DNIT ME 134 (DNIT, 2018);
- Condição 2: aquisição do comportamento resiliente durante o ensaio de deformação permanente, sendo os valores de MR obtidos a partir da aquisição da deformação resiliente durante o N de 1 a 150000 ciclos para cada um dos 6 ensaios/pares de tensões considerados;
- Condição 3: aquisição do módulo de resiliência após o ensaio de DP, sendo realizado de acordo com DNIT ME 134 (DNIT, 2018), após as amostras terem sido submetidas ao ensaio de Deformação Permanente DNIT 179 (DNIT, 2018).

### 3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DE RESULTADOS

Inicialmente, apresenta-se o resultado do ensaio de módulo de resiliência, que nas análises subsequentes, serão intitulados como MR ref. Assim, a Figura 1 demonstra o comportamento de três amostras que foram submetidas ao ensaio de módulo de resiliência e a posterior obtenção dos parâmetros resilientes do modelo composto (Figura 1 (a)). À medida que as tensões foram aumentando, o módulo de resiliência também foi aumentando para os seis primeiros pares de tensões. Contudo, do 7º ao 12º par de tensões, o incremento da tensão desvio resultou num decréscimo do módulo de resiliência. Os parâmetros resilientes estão apresentados na sequência, e podem ser utilizados para as diferentes tensões desvio e confinante.

A Figura 2 apresenta a deformação permanente específica ( $\epsilon_p$  (%)) ao decorrer dos ciclos de aplicação de cargas para as seis amostras avaliadas. Pode-se identificar uma tendência a maiores deformações no tratar de pares de tensões de razão entre tensões de 3. Ainda, são apresentados os parâmetros de deformação permanente com base no modelo de Guimarães (2009). Conforme evidenciado, as amostras avaliadas apresentaram comportamento Tipo I, de acordo com a normativa vigente, em que tendem ao acomodamento plástico ou *shakedown*, pois com poucos ciclos de carregamento, já tenderam à estabilização para os níveis de tensões aplicados.

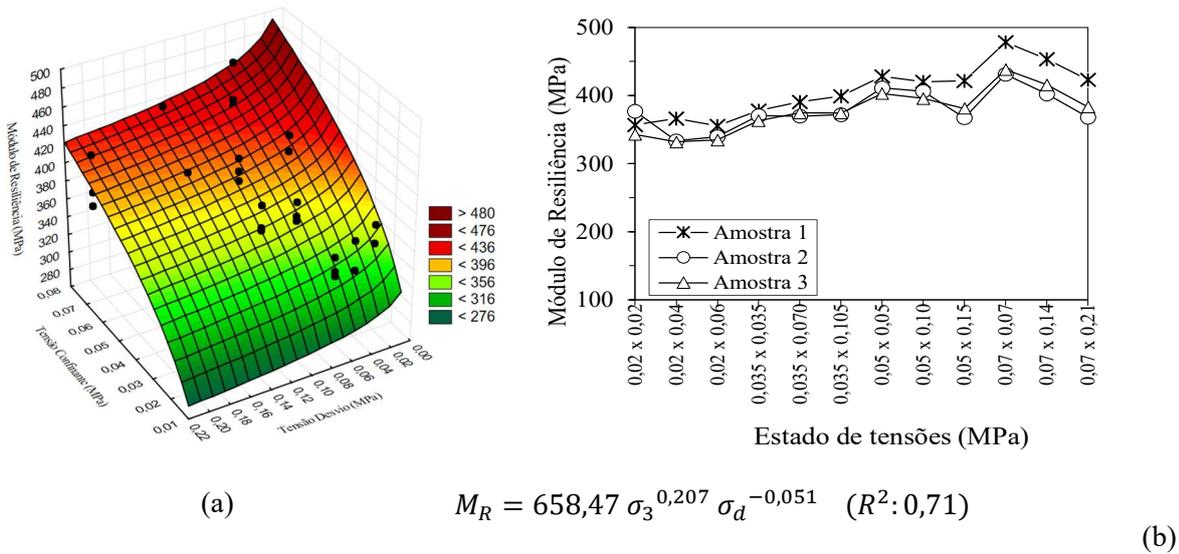


Figura 1. Comportamento resiliente do solo, avaliado pelo modelo composto

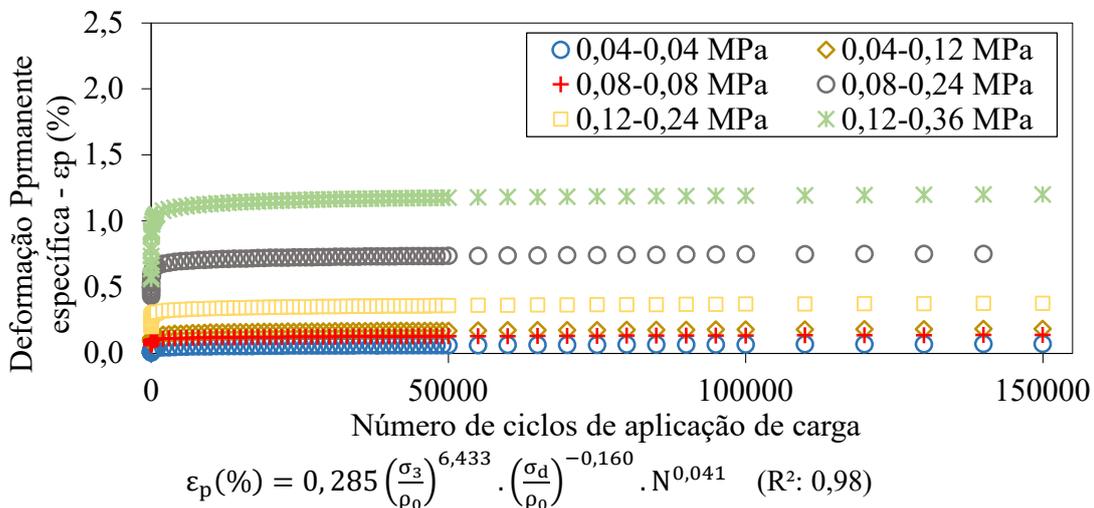


Figura 2. Deformação Permanente Específica ao decorrer dos ciclos.

Outra etapa realizada foi a aferição da deformação elástica durante o ensaio de deformação permanente. Nesta, apresentada na Figura 3, é possível observar que as maiores magnitudes de tensões resultaram em maiores deformações resilientes específicas. A medida em que foram sendo aplicados os ciclos de aplicações de cargas, as deformações elásticas foram diminuindo, devido a densificação da amostra. Os dois pares de tensões de razão 1 (0,04 – 0,04 MPa e 0,08 – 0,08 MPa) apresentaram as menores deformações resilientes, seguido dos pares de razão 2, e por fim, as maiores deformações apresentadas pelos pares de razão 3 (0,08 – 0,24 MPa e 0,12 – 0,36 MPa).

Como produto final da análise, foi realizada uma análise comparativa entra as três condições propostas para a aquisição e verificação do comportamento resiliente. A Figura 4 expõe valores referentes ao

comportamento resiliente para as três condições em termos de MR médio, mínimo e máximo. O “MR ref.” refere-se ao protocolo convencional, em que as amostras foram submetidas apenas ao ensaio de MR.

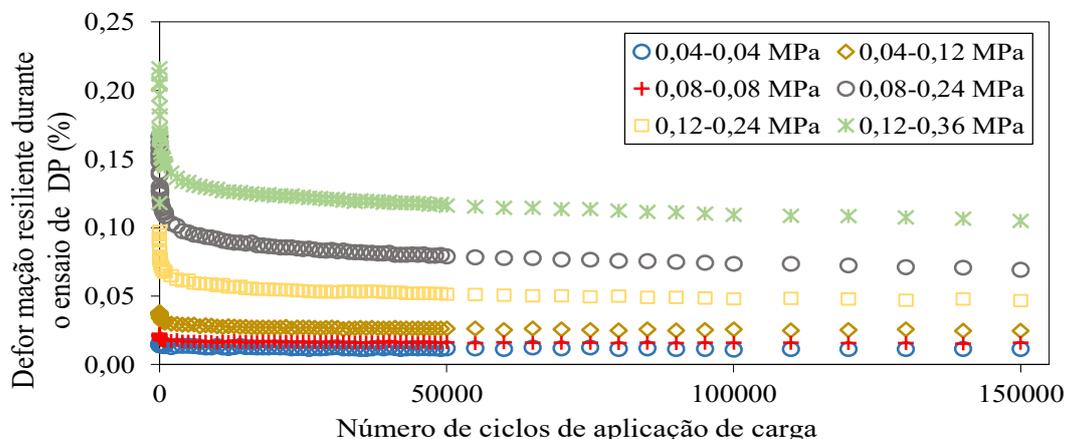


Figura 3. Deformação Resiliente durante o ensaio de Deformação Permanente.

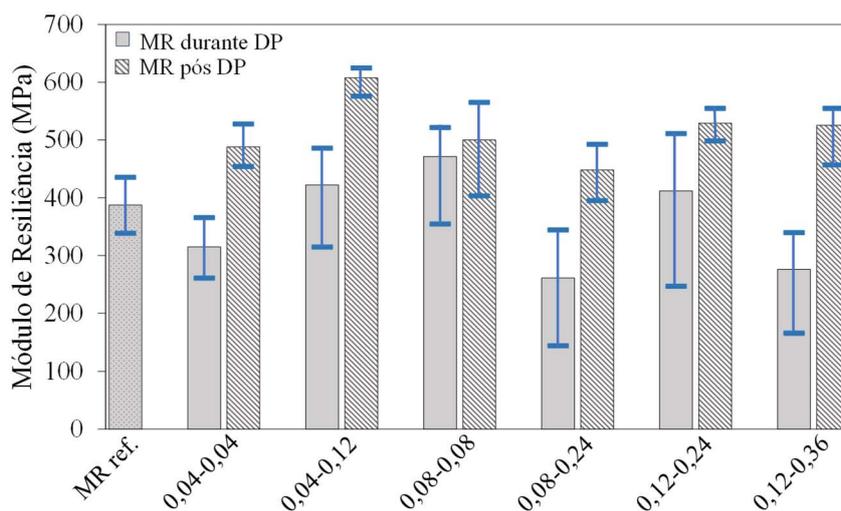


Figura 4. Comparativo entre os módulos de resiliência.

Apresenta-se, de forma evidente, o acúmulo de rigidez da condição MR pós DP em relação ao MR convencional, reforçando o comportamento indicado por Guimarães (2009), Santos (2020) e Pascoal (2020), decorrente do rearranjo estrutural imposto pelas deformações plásticas da amostra ao decorrer do extenso ciclo de repetições das cargas

Já no tratar do comportamento resiliente durante o ensaio de DP, nota-se clara influência do par de tensões a qual a amostra é submetida, uma vez que para as amostras que sofreram maiores deformações (0,08–0,24 MPa e 0,12–0,36 MPa) são de razão 3. Assim, percebe-se uma forte tendência a um comportamento de caráter mais elástico decorrentes das altas deformações, logo o comportamento do material a estas condições acaba por ser menos rígido, mesmo essas amostras tendo acumulado as maiores deformações plásticas.

Devido ao fato de existir várias formas de analisar o módulo de resiliência, e ao fato de o MR médio não ser uma verdade absoluta, visto que ele considera a média entre 12 pares de tensões distintos, na Figura 4 foram apresentados os módulos máximos e mínimos apresentados para cada condição avaliada. Ao analisar estes dados, é notório que a variação entre os máximos e mínimos foi muito superior na condição do MR avaliado durante a DP, sendo assim, conclui-se que ao analisar o comportamento resiliente dessa condição, não é possível inferir a respeito do MR desse material. Assim, ressalta-se que é necessário caracterizar todos os materiais, pois são inúmeros os fatores que influenciam no comportamento resiliente e de deformação permanente.

#### 4 CONCLUSOES

Realizou-se um estudo para diferentes aferições das propriedades resilientes de um solo empregado como subleito rodoviário, analisadas três condições de MR, sendo a metodologia convencional, a aquisição da deformação resiliente durante a execução do ensaio de DP, e o MR após ao ensaio de DP. A partir de uma análise comparativa entre os comportamentos identificados para cada uma das condições, pode-se observar que a aquisição do MR pós DP quando comparada com a metodologia convencional, apresenta grande acréscimo de resiliência para as seis condições de tensões aplicadas no ensaio de DP. Esse comportamento tende a ser o identificado em campo, de forma que, à medida que o pavimento vai sendo solicitado pelo tráfego de veículos, a resposta do material se torna mais eficiente frente as tensões impostas, e por consequência se comporta de forma mais resistente às deformações elásticas, reduzindo os danos associados à fadiga, o que de fato, é bastante favorável ao desempenho do pavimento. Contudo, esse comportamento poderá acontecer desde que as condições ideias de drenagem estejam garantidas. Tal comportamento corrobora com o avaliado por Guimarães (2009), Santos (2020) e Pascoal (2020), destacando o papel relevante do histórico de tensões frente a resposta resiliente do material.

Entretanto, no que tange ao comparativo da aquisição do MR durante a DP, com o MR convencional, torna-se visível o quão dispersa é a aquisição de dados, podendo destacar os pares de razão entre tensões de 3. Assim, elevadas deformações tanto resilientes quanto permanentes, acabam por resultar em respostas elásticas insatisfatórias durante a aplicação dos ciclos, trazendo a conclusão de que, à medida que ocorre um incremento por parte da tensão desvio, obtém-se uma um comportamento cada vez mais acentuado das respostas elásticas, indicando baixa rigidez mesmo que submetido a um extenso protocolo de aplicação de cargas. Esse fato também foi observado nas análises do MR referência, demonstrados na Figura 1 (b), em que, a tensão desvio agiu de maneira que nos pares mais acentuados de tensões, o MR diminui com o incremento dela.

Ressalta-se o fato de o MR médio não ser representativo para todas as condições de tensões impostas, sendo necessária uma análise global, com a consideração quanto a valores máximos e mínimos para a obtenção de uma faixa de módulo resiliente com maior aplicabilidade as diversas condições, na impossibilidade de analisar o módulo para as tensões realmente requeridas.

Ainda, os comportamentos e tendências identificados se aplicam em específico ao solo objeto de estudo, uma vez que cada material carrega consigo diferentes particularidades. Por fim, pode-se concluir que a aquisição de parâmetros resilientes, após o ensaio de deformação permanente acrescenta ao processo grande representatividade com o que pode ser observado em campo, em que as deformações plásticas influenciam de forma ativa na resposta resiliente do material.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, DNIT, Oowntec Soluções em Engenharia e a UFSM pelo incentivo e fomento à pesquisa.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 6458. Grãos de Pedregulho retidos na peneira de abertura de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 7180: Solo: determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 7181: Solo: análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 7182: Solo: Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Balbo, J. T. (2007) *Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração*. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 558 p.

- Cerni, G., Cardone, F., Virgili, S., Camilli, S. (2012) Characterization of Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials Under Repeated Triaxial Loading. *Construction and Building Materials*, 28. p.79-87.
- Departamento Nacional de Infraestrutura De Transportes. (2018). *DNIT ME 134: Pavimentação –Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura De Transportes. (2018). *DNIT IE 179: Pavimentação –Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Guimarães, A. C. R. (2009) *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 352p.
- Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A. (2000) State of the art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering ASCE*, 126 (1). p. 66-75.
- Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A. (2000) State of the art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering ASCE*, 126 (1). p. 76-83.
- Lima, C. D. A, Motta, L. M. G, Aragão, F. T. S. (2019) Análise das Tensões Aplicadas nos Ensaios de Deformação Permanente de Solos e Britas para o Dimensionamento Mecanístico-Empírico De Pavimentos. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, *Anais...* p. 1222-1233.
- Medina, J.; Motta, L. M.G. (2015) *Mecânica dos Pavimentos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 638 p.
- Pascoal, P.T. (2020) *Avaliação do comportamento resiliente e deformação permanente do solo empregado no pavimento rodoviário da RS 342*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Pezo, R. F., Claros, G, Hudson, W. R., Stokoe II, K. H. (1992) Development of reliable resilient modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design. *Research Repor*.
- Soliman, H., Shalaby, A. (2015) Permanent deformation behavior of unbound granular base materials with varying moisture and fines content. *Transportation Geotechnics*, 4, p. 1-12.
- Santos, T. A. dos. (2020) *A influência da sucção na deformabilidade de subleitos rodoviários: efeitos da variação de umidade, método de compactação e gênese dos solos*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.
- Werkmeister, S., Dawson, A. R., Wellner, F. (2001) Permanent Deformation Behavior of Granular Materials and the Shakedown Concept. *Transportation Research Record*, 1757 (01-0152), p. 75-81.