

Proposta de delimitação do comportamento resiliente de dois solos tropicais através de análise multifatorial.

Claudeny Simone Alves Santana, M.Sc.

Doutoranda, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, claudeny.santana@pet.coppe.ufrj.br

Alexandre Simas de Medeiros, Eng.

Doutorando, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, alexandre.simas@pet.coppe.ufrj.br

Marcelino Aurélio Vieira da Silva, D.Sc

Professor, Programa de Engenharia de Transportes/PET/COPPE RJ, Brasil, marcelino@pet.coppe.ufrj.br

RESUMO: A pesquisa trata de um estudo baseado no comportamento resiliente de 02 solos a serem aplicados como camadas de infraestrutura de pavimento flexível, um solo argiloso adicionado 0,25% de fibra de buriti e um solo arenoso adicionado 2% de emulsão asfáltica do tipo RL-1C e RM-1C. Tomando por base a norma DNIT 134/2018-ME Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio e norma AASHTO T 307-99 (2012) *Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. Foram moldados corpos de prova nas dimensões 10 x 20 cm em três pontos distintos da curva de compactação: ramo seco, umidade ótima e ramo úmido para cada solo e em seguida realizado o ensaio de módulo de resiliência. A análise dos resultados contou com a verificação da interação entre os fatores distintos que podem influenciar o resultado, para isso, usou-se a análise multifatorial conforme Montgomery (2014) e o teste de hipóteses. Em seguida foi verificado o comportamento dos materiais, separando os valores de módulos por grupo de tensão confinante e tensões desvio de acordo com a curva de compactação. Constatou-se que a depender do compósito formado, o material pode apresentar comportamentos distintos, por pares de tensão, que podem ajudar na análise quanto ao seu desempenho para o pavimento. Foi possível observar que as amostras de solos com fibra de buriti apresentaram 3 comportamentos diferentes denominados α , β e γ e que o solo arenoso com emulsão apresentou o comportamento α na maioria dos ciclos, diferindo apenas nos 2 últimos ciclos com o comportamento β , demonstrando que a umidade influencia sobremaneira na resposta mecânica do composto solo-emulsão.

PALAVRAS-CHAVE: Solos, Pavimentos, Comportamento Resiliente, Análise Multifatorial.

ABSTRACT:

The research deals with a study based on the resilient behavior of two soils to be applied as layers of flexible pavement infrastructure: a clayey soil added with 0.25% of buriti fiber and a sandy soil added with 2% of RL-1C and RM-1C type asphalt emulsion. Drawing upon DNIT 134/2018-ME Pavement – Soils – Determination of Resilience Modulus – Test Method and AASHTO T 307-99 (2012) *Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials* standard, specimens were molded in dimensions of 10 x 20 cm at three distinct points of the compaction curve: dry branch, optimum moisture, and wet branch for each soil, followed by the resilience modulus test. The analysis of results involved verifying the interaction among different factors that can influence the outcome. For this purpose, multifactorial analysis according to Montgomery (2014) and hypothesis testing were employed. Subsequently, the behavior of the materials was examined, segregating modulus values by confining stress group and deviator stress according to the compaction curve. It was observed that depending on the composite formed, the material may exhibit different behaviors, by stress pairs, which can aid in analyzing its performance for pavement. It was possible to observe that the samples of soils with buriti fiber presented three different behaviors, denoted as α , β , and γ , whereas the sandy soil with emulsion exhibited behavior α in most cycles, differing only in the last two cycles with behavior β , demonstrating that moisture significantly influences the mechanical response of the soil-emulsion composite.

KEYWORDS: Soils, Pavement, Resilient Behavior, Multifactorial Test.

1 INTRODUÇÃO

Para que a rodovia cumpra a vida útil a qual foi projetada, em alguns casos quando as características mecânicas do solo não são suficientes, é necessário a substituição deste solo por um material com melhores condições mecânicas ou conferir ao solo utilizado, por questões geográficas e econômicas, o provimento de uma estabilização, ou seja, a inserção de um material neste solo que melhore suas condições geotécnicas para que ele obtenha o suporte necessário ao esforços a que este pavimento será submetido.

Neste caso os resíduos gerados em todos os setores produtivos é um fato, além de ser uma boa alternativa para a pesquisa de materiais que possam atuar como agentes estabilizantes de solos na construção de rodovias, desta maneira o desenvolvimento de metodologias e tecnologias que atuem no acondicionamento e reaproveitamento dos resíduos é um fator preponderante para o desenvolvimento sustentável e a manutenção de recursos naturais em todos os setores.

Autores como por exemplo Tamossaki et. al. (2023) apontam que solos estabilizados e solos reforçados tem a sua resistência ao cisalhamento, a plasticidade, a durabilidade, a permeabilidade melhoradas e geralmente, o módulo de elasticidade do compósito formado entre o solo e o material estabilizante tem o seu desempenho aumentado, o que contribui para a construção de uma infraestrutura rodoviária capaz de resistir ao tráfego atingindo a vida de projeto calculada, conforme o seu critério de dimensionamento.

Uma crescente possibilidade é explicada por Carvalho, Cavalcanti e Nóbrega (2009) que afirma que as fibras vegetais vêm sendo utilizadas na substituição de reforços sintéticos em compósitos poliméricos por exemplo, apresentando um grande potencial de aplicação tecnológica, devido principalmente seu baixo custo, disponibilidade, biodegradabilidade, reciclabilidade e propriedades mecânicas satisfatórias.

Relacionado à emulsões, Andavam & Kumar (2020) concluíram que as emulsões asfálticas são um material eficaz para melhorar as propriedades de solos, principalmente arenosos, pois garante uma melhor interface entre as partículas de areia e o ligante. Os autores afirmaram que as emulsões asfálticas oferecem vantagens como facilidade de aplicação, baixo consumo de energia, impacto ambiental reduzido e maior durabilidade do pavimento.

Neste sentido a presente pesquisa tem como finalidade delimitar o comportamento resiliente de dois solos tropicais, selecionados a partir da caracterização Miniatura Compactada Tropical (MCT), por Nogami e Villibor (1995), como critério de escolha dos solos para a presente pesquisa um solo argiloso (LG') estabilizado com 0,25% de fibra de buriti e um solo arenoso (NA) estabilizado com 2% de emulsão RL-1C realizando o ensaio de módulo de resiliência conforme as normas DNIT 134/2018-ME Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – método de ensaio e norma AASHTO T 307-99 (2012) *Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials* e analisando os resultados através de uma análise multifatorial (3 fatores), conforme Montgmorey (2014).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Solos

Os solos foram extraídos de jazidas de material para aplicação em camada de infraestrutura de pavimentos o solo 01 (NA) da cidade do Rio de Janeiro – RJ. o solo 02 (LG') foi proveniente da cidade de São Miguel do Tapuio – PI.

Os ensaios foram conduzidos no laboratório de Lesfer – PET/COPPE/UFRJ, onde na Tabela 1 apresenta-se os parâmetros físicos e geotécnicos destes materiais, conforme as normas brasileiras vigentes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes e da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Tabela 1. Características física e geotécnicas dos solos estudados.

Parâmetros	Solo 1	Solo 2
LL	NP	30,9
LP	NP	20,3
Densidade Real dos grãos	2,87 g/cm ³	2,63 g/cm ³

Massa específica aparentemente seca	2,25 g/cm ³	2,14 g/cm ³
Número de vazios (e)	0,274	0,229
Umidade ótima	9,42 %	6,8%
Classificação HRB	A-2-4	A4
Classificação SUCS	SM	CL
Classificação MCT	NA	LG'
Passante #0,075	18%	62%

2.1.2 Fibra de Buriti

O buriti (*Mauritia Flexuosa*), conhecido como a “Árvore da Vida”, além de fornecer matéria-prima para remédios, alimento, artesanato e abrigo, o buriti desempenha um papel importante para a manutenção de nascentes e cursos d’água no Cerrado, sendo assim fundamental para o ecossistema e para as populações que nele vivem (Sampaio, 2012).

Para obtenção da fibra, sua palha extraída da folhada é passada por um processo de secagem simples ao ar e comercializada em feixes, para uso principalmente com artesanato e decoração, por sua flexibilidade e força. (v. Figura 01). Para utilização as fibras foram cortadas no comprimento de 15 mm e misturada ao solo no estado seco (solo e fibra) no teor de 0,25% de fibra em relação ao peso da amostra de solo.



Figura 1. Aspecto da fibra de buriti após o processo de corte.

Em termos de degradação com o meio, tendo em vista o efeito possível de degradabilidade interna, este parâmetro não foi adotado, mas é possível usar, biocidas nas fibras. Seria necessário fazer cápsulas do tempo para avaliar como a biodegradabilidade afetaria a resistência do solo e se este efeito seria relevante às características mecânicas do compósito.

2.1.3 Emulsão RL-1C

A emulsão asfáltica é um material derivados de petróleo em dispersão na água, os agentes dispersantes atuam lentamente no processo de cura e devido à este tempo é denominado de ruptura lenta: RL-1C.

A emulsão foi obtida por doação e na mistura ao solo com 2% de teor da emulsão, a água foi incorporada, resultando em uma mistura menos viscosa. Em seguida, o solo foi homogeneizado, foram coletadas amostras da mistura (solo + emulsão + água) para verificar o teor de umidade e garantir que o a presença de água não influenciaria a resposta mecânica dos testes como variável adicional.

2.2 Métodos

2.2.1 Ensaio de Compactação e Módulo de Resiliência

O procedimento foi conduzido por etapas, o solo foi separado, destorroado e pesado, 3,5 kg por amostra e seco em estufa (100 °C), realizou-se o ensaio de compactação, em 5 pontos no cilindro tripartido, com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de comprimento sem os estabilizantes e com os estabilizantes.

Usou-se a energia intermediária (26 golpes), por se tratar de solos de jazidas utilizadas para composição de sub-bases de estradas existentes., para após, realizar a mistura com o solo.

Conhecidos então a umidade ótima, os pontos do ramo seco e úmido da curva, foram compactadas amostras na umidade ótima (hot), aproximadamente -2% da hot e um ponto no ramo úmido (aproximadamente +2%). Para o solo com fibra, a inserção destas, foi realizada com o solo seco, homogêneo e apenas em seguida, umedecido para se proceder a compactação. O solo com emulsão, a água da compactação foi adicionada à emulsão. Em seguida, as amostras foram identificadas e conduzidas para o ensaio triaxial de cargas repetidas, como ilustrado na Figura 2, a fim de se determinar o Módulo de Resiliência (MR), segundo orientações da norma DNIT 134/2018-ME e AASHTO T 307-99 (2012).

Para os solos emulsionados (solo 1) o ensaio de módulo de resiliência foi realizado aos 7 dias e a cura ao ar sem controle de temperatura. Para o solo com fibra (solo 2) o ensaio foi conduzido logo após a compactação, tendo em vista que por ser laterítico, poderia surgir trincas oriundas da característica inerente ao solo e não à fibra.



Figura 2. (A) Aspecto da amostra de solo-emulsão (B) Aspecto da amostra solo-fibra (C) Colocação da geomembrana (D) Execução do ensaio de MR.

O valor de MR adotado na análise foi o MR médio em cada ciclo de carregamento, conforme os pares de tensão constante na norma DNIT 134/2018-ME, ou seja, foram analisados os MR médios dos 18 pares de tensão (ciclos), tensões confinantes (σ_3) e 3 tensões desvio (σ_d).

2.2.2 Análise Multifatorial

Conforme Motgomery (2014) análise fatorial (AF) é um tipo de esquema, ou seja, uma das maneiras de organizar os tratamentos e não um tipo de delineamento, além disto, nos experimentos fatoriais, os tratamentos são obtidos pelas combinações dos níveis dos fatores.

Para fins de procedimento estatístico na engenharia o experimento fatorial juntamente com a análise de variância, torna possível estudar dois ou mais fatores num único experimento (no caso deste estudo) como também verificar se as interações, entre os fatores, são independentes ou dependentes dos demais fatores analisados. Desta maneira, as observações podem ser descritas através de modelo estatístico linear. Assim, a AF foi utilizado para corroborar os dados obtidos, conforme 3 diferentes variáveis (fatores):

- Fator (1)A: pares de tensão (ciclos);

- **Fator (2)B: teores de estabilizante (0,25% de fibra de buriti e 2% de emulsão RL-1C);**
- **Fator (3)C: umidade de compactação, -2% da hot, umidade ótima (hot) e +2% da hot.**

O programa RStudio foi utilizado para automatizar o cálculo fatorial de três etapas, considerando estes 3 fatores a fim de verificar as interações relativas a cada um destes, diz-se que ocorre interação entre os fatores quando os efeitos dos níveis de um fator são modificados pelos níveis do outro fator (Shimizu e Marubayashi, 2021).

3 RESULTADOS E DISCURSÕES

3.1 Módulo de Resiliência

A análise do MR seguiu o direcionamento do estudo de Svenson (1980) que analisou o efeito da massa específica e umidade de compactação de solos argilosos. A Figura 3 apresenta os gráficos de MR do solo 1 por umidade de compactação, com e sem emulsão, em cada ciclo (par de tensão) analisado. Sendo SOLO1_SE o solo 1 (arenoso), sem emulsão e SOLO1_ERL o mesmo solo com emulsão asfáltica RL-1C.

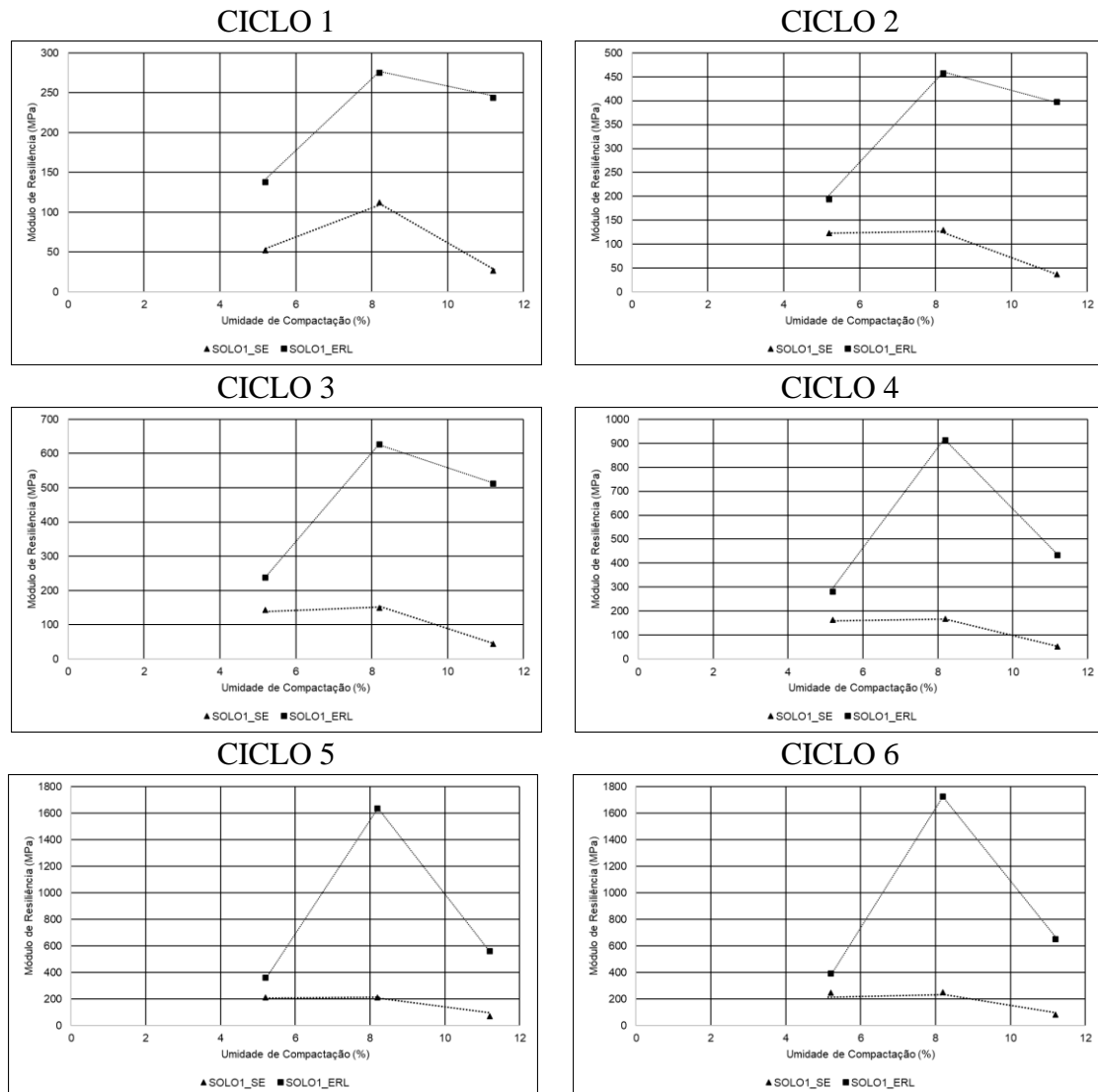


Figura 3. Gráfico de MR médio por umidade de compactação.

Da mesma maneira, a Figura 4 apresenta os gráficos de MR do solo 2 por umidade de compactação, com e sem fibra, em cada ciclo (par de tensão) analisado. A nomenclatura adotada foi SOLO2_SF, para o solo 2 (argiloso) sem fibra e SOLO2_025FB para o solo 02 com adição de 0,25% de fibra.

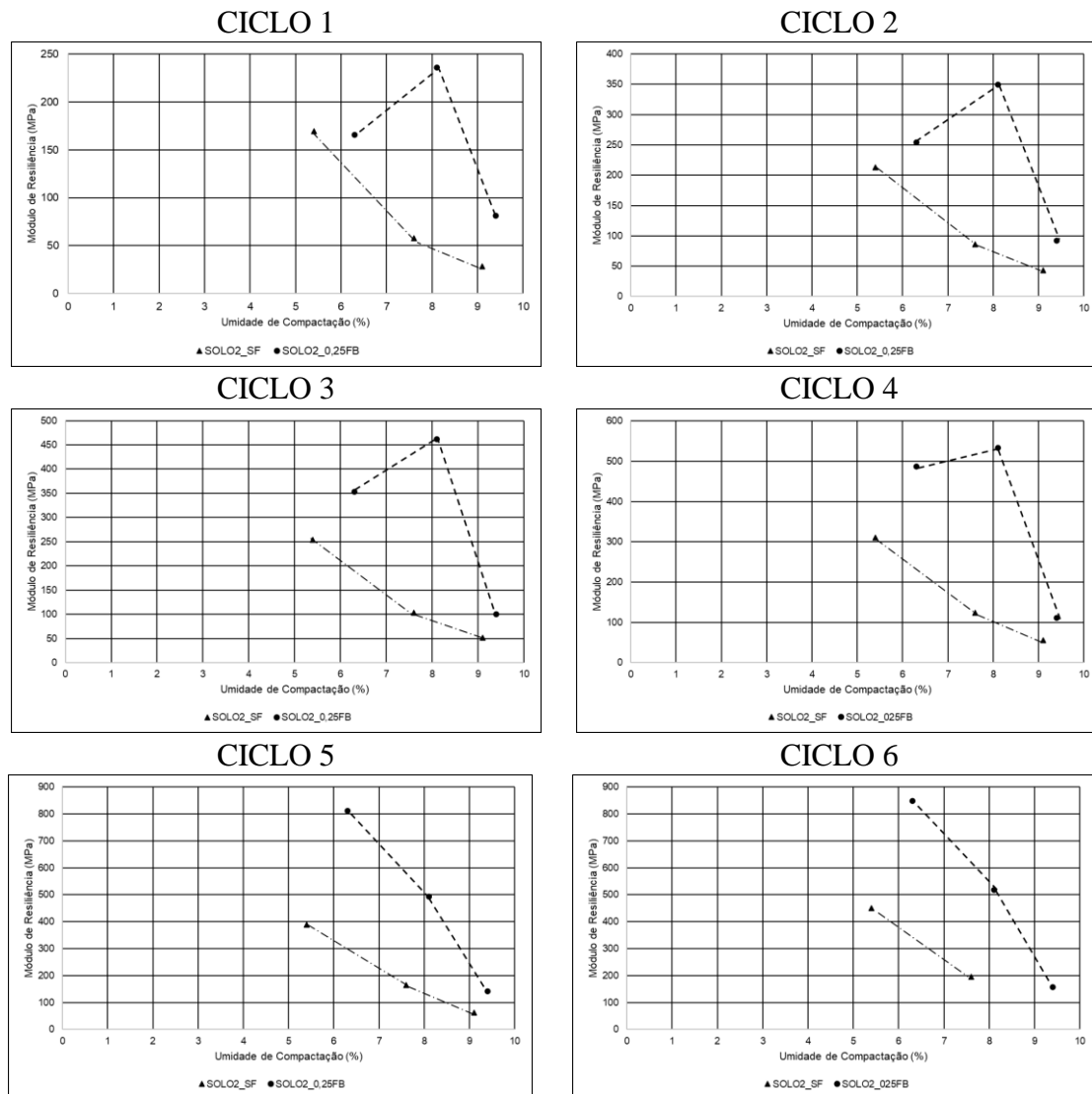


Figura 4. Gráfico de MR médio por umidade de compactação.

Observa-se a partir dos gráficos gerados 3 comportamentos distintos, conforme os ciclos de aplicação dos pares de tensões:

- Comportamento α : referente ao solo que seguiu o desempenho conforme Sveson (1980) constatou para solos argilosos, onde pôde-se observar o comportamento quanto ao efeito da moldagem do longo da curva de compactação: valor superior de MR no ramo seco, valor intermediário de MR próximo da umidade ótima e valores de MR inferiores no ramo úmido. No solo 01 esse comportamento foi constatado nos ciclos 5 e 6 sem emulsão e no solo 2 com fibra 1 a 4 e sem fibra nos ciclos 5 e 6;

- Comportamento β : houve uma mudança de comportamento no desempenho do material, onde os maiores valores de MR resultantes foram próximos da umidade ótima na curva de compactação, MR intermediário no ramo seco e valores inferiores no ramo úmido. No solo 1, ciclos 1 a 4 sem e com emulsão e para o solo 2 nos ciclos de 1 a 4 com fibra.

- Comportamento γ : quando a amostra passa de um comportamento para outro, devido a variação de umidade, tensões de carregamento ou utilização de estabilizante. Por exemplo, no solo 2 com fibra nos ciclos 5 e 6, o composto retornou ao comportamento α . No solo 01 sem emulsão nos ciclos 3 a 6.

Em termos de aplicabilidade do material, em uma camada de pavimento, é possível escolher desta maneira, o ciclo de carregamento que mais se adequa a necessidade de campo, levando em consideração o comportamento desse solo variando a umidade e outros variantes de projeto como o tráfego.

3.2 Análise Multifatorial

Utilizando as premissas de Montgomery (2014) foi possível verificar o efeito do ciclo de tensões no ensaio de MR, quanto ao teor de estabilizante (fibra ou emulsão) e umidade de compactação. Bem como, verificar a influência simultânea destes fatores entre si. Utilizou-se o programa Rstudio para executar a análise multifatorial explicados na metodologia desta pesquisa, apresentando ao final, uma análise de variância (ANOVA) para interpretação destes resultados.

Para o solo 1, estabilizado com emulsão, a Figura 5 apresenta os resultados oriundos da ANOVA, onde os fatores B e C, bem como a interação entre B e C, são significativamente importantes para a variabilidade total dos dados. O fator A e suas interações com os outros fatores não são significativos. Isso sugere que a variação nos dados pode ser atribuída principalmente aos fatores B (estabilização) e C (umidade de compactação), assim como à interação entre eles.

ANOVA - D

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
A	5.54e +8	5	1.11e+8	1.39	0.238
B	5.97e +9	1	5.97e+9	74.83	< .001
C	1.25e+10	2	6.25e+9	78.39	< .001
A * B	4.62e +8	5	9.24e+7	1.16	0.338
A * C	9.70e +8	10	9.70e+7	1.22	0.295
B * C	1.27e+10	2	6.33e+9	79.33	< .001
A * B * C	1.02e +9	10	1.02e+8	1.28	0.258
Residuals	5.74e +9	72	7.98e+7		

Figura 5. ANOVA do solo 1 com e sem emulsão e suas interações

Em suma, a hipótese nula foi rejeitada para os fatores B, C e a interação B * C, indicando que esses têm efeitos significativos na variável dependente. Para o fator A e suas interações com os outros fatores, a hipótese nula não foi rejeitada, indicando que eles não têm efeitos significativos. Podendo-se então, abordar que para a utilização deste material, a umidade e a quantidade de emulsão asfálticas devem ser os principais fatores levados em consideração como parâmetro de decisão.

Similarmente, a Figura 6 destaca os dados gerados após análise multifatorial do solo 2 com e sem fibra, onde destaca-se os resultados da ANOVA para este material.

ANOVA - D

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
A	265587	5	53117	2.112	0.074
B	104823	1	104823	4.167	0.045
C	14408	2	7204	0.286	0.752
A * B	424719	5	84944	3.377	0.009
A * C	2.12e+6	10	211623	8.414	< .001
B * C	254658	2	127329	5.062	0.009
A * B * C	1.77e+6	10	176795	7.029	< .001
Residuals	1.81e+6	72	25153		

Figura 6. ANOVA do solo 2 com e sem fibra e suas interações

Observa-se que enquanto os fatores individuais A e C não apresentam efeitos significativos isoladamente, o fator B (estabilização com fibra) e as várias interações (A * B, A * C, B * C e A * B * C) são estatisticamente significativas. Isso indica que a variabilidade na variável dependente é fortemente influenciada pela interação dos fatores B com os outros fatores.

Este resultado destaca a influência da quantidade de fibras no resultado da estabilização de um solo argiloso com este material, devendo-se identificar a quantidade ideal de fibras para que o efeito de suas interações com os outros fatores sejam relevantes.

Por fim, para os solos estudados com diferentes estabilizantes, mesmo que as amostras sejam independentes uma das outras, a estabilização (fator B), para os dois casos, influencia no comportamento do solo (incremento do MR) bem como a quantidade de água oriunda da curva de compactação. Esta técnica se mostra eficaz, para ser utilizada como critério de escolha do tipo de estabilização e da umidade adequada de compactação para se atingir um desejado desempenho levando em consideração o MR.

4 CONCLUSÃO

A presente pesquisa delimitou o comportamento resiliente de dois solos tropicais, um solo arenoso estabilizado com 2% de emulsão RL-1C e um solo argiloso estabilizado com 0,25% de fibra de buriti, realizando o ensaio de módulo de resiliência e aplicando análise multifatorial para corroborar os resultados.

- No ensaio de MR observou-se 3 comportamentos (α , β , γ) distintos que ocorrem nos solos devido a estabilização, esta pode modificar o valor do MR e ao se verificar o comportamento da curva de compactação com os comportamentos observados é possível utilizá-lo como critério de escolha de solo e de estabilização;
- Os comportamentos plotados, por exemplo, podem orientar asseertivamente quanto a utilização do material estabilizado quando houver a necessidade, em uma camada de infraestrutura em um dimensionamento de pavimentos.
- A análise multifatorial, mostrou-se uma técnica viável para confirmação da intereação dos fatores analisados, tendo em vista a variabilidade do comportamento frente as mudanças que podem ser aplicadas ao material como os pares de tensão do ensaio de MR, o tipo estabilizante (físico ou químico) e a umidade de compactação aplicada;
- Comparativamente como critério de escolha para uma camada de pavimento, a análise multifatorial é capaz de apontar, quais destas variáveis terá maior influência no comportamento deste compósito e desta maneira poderá orientar para a escolha da melhor solução ao caso concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaspour, M.; Narani, S. S.; Aflaki, E. and Nejad, F. M. Behavior of a Subgrade Soil Reinforced by Waste Tire Textile Fibers under Static and Cyclic Loading. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020.
- Andavan, S., Maneesh, B. K. Case study on soil stabilization by using bitumen emulsions - A review. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- Carvalho, L.H. de; Cavalcanti, W.S.; Nóbrega, M.M.S. Tensile properties of hybrid vegetable/glass fiber fabric reinforced unsaturated polyester composites. In: *Natural Polymers and Composites*, 2009.
- Debnath, C.; Pal, Manish; Sarkar, Dipankar. Intelligent Prediction Model on Soil Bamboo Fibre Mix for Road Construction. *Advances in Engineering Software*, 2023.
- Martins, R.C.; Agostini-Costa, T.S.; , P.; Filgueiras, T.S. Mauritia flexuosa.. In: Vieira, R. F.; Camillo, J.; Coradin, L. (Eds.). *Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro - Região Centro-Oeste*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2016.
- Medeiros, A. S. de, Cardoso, H. S., Silva, M. A. V. Evaluation of the Mechanical Behavior of Soil Stabilized with Asphalt Emulsion Using Multi-Stage Loading. *Civil Engineering Journal*. Vol. 10, No. 01, 2024.
- Montgomery, D. C., Runger, G. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 6^o Edition. Wiley. 2014.
- Nogami, J. S.; Villibor, D. F. *Pavimentos de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo. Editora Villibor, 1995.
- Svenson, M. *Ensaio Triaxiais Dinâmicos de Solos Argilosos*. Tese de Doutorado. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1980.
- Tamassoki, S.; Norsyahariati, N.; Daud, N.; Nejabi, M. N.; Roshan, M. J. Fibre Reinforced Soil Mixed Lime/Cement Additives: A Review. *Science & Technology*, 2023.