

Influência da Umidade de Compactação no Comportamento Resiliente de Misturas solo-RAP

Weiner Gustavo Silva Costa

Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, weiner@alunos.utfpr.edu.br

Mario Sergio de Souza Almeida

Professor, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Brasil, mario.almeida@ufrb.edu.br

Ronaldo Luis dos Santos Izzo

Professor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, ronaldozzo.utfpr@gmail.com

Isabela de Jesus Santos

Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECEA), Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Brasil, isabela@aluno.ufrb.edu.br

Raquel Silva Ramos

Estudante de Bacharelado em Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Brasil, raquelsilvaramos855@gmail.com

RESUMO: A fresagem do revestimento asfáltico é uma técnica comumente aplicada, entretanto é considerada como uma grande geradora de resíduos, intitulado também como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). A reutilização desse resíduo pode ocorrer na pavimentação sob as premissas do MeDiNa, o novo método mecanístico-empírico de dimensionamento nacional, baseado em análises de tensões, deformações e deslocamento, a partir de características dos materiais obtidas em ensaios laboratoriais como, por exemplo, o Módulo de Resiliência (MR). Um dos fatores que podem afetar o comportamento resiliente dos solos é a densidade e umidade de compactação. Nessa linha, o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento resiliente de diferentes misturas solo-RAP, para utilização como base reciclada de pavimentos ou como revestimento primário de estradas não pavimentadas, bem como avaliar o efeito da umidade de compactação no módulo de resiliência dessas misturas. As composições testadas foram de 100% de um solo A-1-b, 75% solo e 25% RAP, e 25% solo e 75% RAP, com a realização do ensaio de Módulo de Resiliência. Dos resultados observou-se um aumento do MR das misturas com RAP em relação ao solo puro.

PALAVRAS-CHAVE: Fresagem, Densificação, Ensaio triaxial dinâmico.

ABSTRACT: Milling the asphalt coating is a commonly applied technique; however, it is considered a major generator of asphalt waste, also known as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). The reuse of this waste can occur in paving under the light of MeDiNa, the new Mechanistic-Empirical National Design Method, and stress-strain analysis through laboratory tests, such as the Resilience Module (MR). One of the factors that can affect the resilient behavior of soils is compaction density and moisture. Along these lines, the objective of this work is to analyze the resilient behavior of different soil-RAP mixtures, for use as a recycled pavement base or as a primary coating for unpaved roads, as well as to evaluate the effect of compaction humidity on the resilience modulus of these mixtures. The compositions tested were 100% soil A-1-b, 75% soil and 25% RAP, and 25% soil and 75% RAP with the Resilience Modulus test. The results showed an increase in the MR of mixtures with RAP in relation to pure soil.

KEYWORDS: Milling, Densification, Dynamic triaxial test.

1 INTRODUÇÃO

Com a escassez de materiais adequados para utilização em pavimentos rodoviários, o processo de reutilização dos resíduos oriundos da construção civil contribui positivamente para o meio ambiente na conservação de recursos naturais como também economicamente (KLAMT, 2017).

A fresagem do revestimento asfáltico é uma técnica comumente aplicada, entretanto é considerada como uma grande geradora de resíduos asfálticos, intitulado também como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), formado pela mistura entre o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) envelhecido e agregados de diversos tamanhos. Todos os dias são produzidos centenas de toneladas de material fresado em todo o Brasil, o que resulta na necessidade de destinação adequada deste nobre material (LEITE *et al.*, 2021). Diversos países têm pesquisado a incorporação do RAP em camadas de pavimento asfáltico, como técnica de estabilização de solos, com destaque para os trabalhos desenvolvidos por Khodary (2021), Alhaji e Alhassan (2018), Yi *et al.* (2022), Pradhan e Biswal (2022) e Widyatmoko *et al.* (2022) os quais tratam deste tema.

Recentemente, no Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) apresentou o MeDiNa, o novo Método mecanístico-empírico de Dimensionamento Nacional de pavimentos asfálticos. Esse método foi desenvolvido por meio de uma colaboração entre o DNIT, o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) e a Rede Temática de Asfaltos. Uma sub-rotina de Análises Elásticas de Múltiplas Camadas (AEMC) possibilita a realização de análises de tensões, deformações e deslocamentos, a partir de ensaios laboratoriais de carga dinâmica, tais como, o Módulo de Resiliência (MR) (SILVA, 2021). Os dados gerados neste ensaio podem ser empregados como dados de entrada de duas maneiras distintas de análises, tanto elásticas lineares quanto não-lineares.

Lima, Silva e Rezende (2023) apresentam um levantamento da literatura relacionada aos valores de MR em misturas solo-RAP. Os autores observaram que ocorre aumento deste parâmetro com a adição da proporção RAP na mistura (Figura 1). Os valores médios de MR com adição de 25% de RAP foram 1,4 vezes o valor encontrado para o solo puro. Com 50% foi 2 vezes o valor médio de MR para o solo e 1,4 vezes o valor para a mistura com 25%. Esses resultados da literatura apresentam valores de MR entre 160 MPa e 320 MPa. Quando não há RAP, os valores de MR variaram de 160 MPa a 260 MPa; com a adição de 25% de RAP, os valores de MR aumentaram até 300 MPa, e com 50% de RAP, os valores de MR atingiram 320 MPa. Os autores destacam que cada estudo utilizou solo e RAP com características diferentes, e todos indicaram que essas misturas são adequadas para uso em pavimentos.

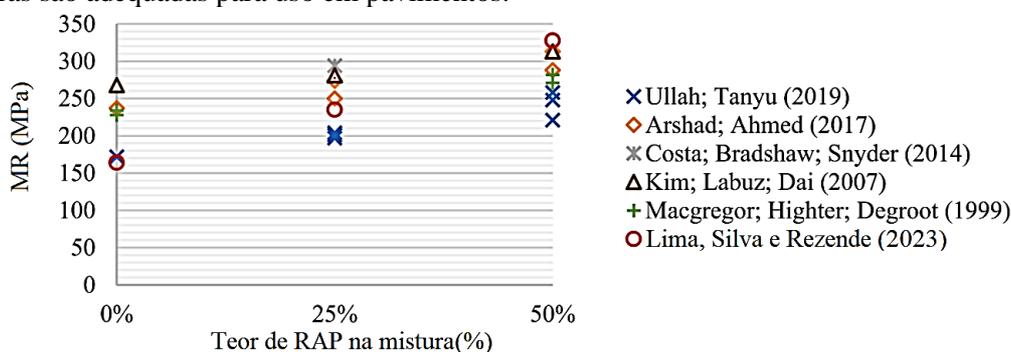


Figura 1. Variação do MR para as misturas solo-RAP na literatura.

A estrutura de pavimento asfáltico, está sujeita às variações cíclicas do tráfego e às condições ambientais, e responde mecanicamente através da geração de deslocamentos e deformações, tanto permanentes quanto resilientes. Estes aspectos devem ser levados em consideração no processo de dimensionamento do pavimento. Entretanto, destaca-se a importância dos materiais granulares como constituintes das camadas de pavimentos rodoviários em geral, ampliando o interesse na análise das respostas resilientes das misturas de estabilização graulométrica. Isso visa compreender o comportamento mecânico desses materiais quando expostos a cargas repetidas e transitórias (SANT'ANNA *et al.*, 2003; PAULA *et al.*, 2022).

De acordo com Li e Selig (1994), um dos fatores que podem afetar o comportamento resiliente dos solos é a densidade e umidade de compactação. Segundo esses autores, o estado físico do solo pode ser alterado pelo efeito do ambiente e pelo efeito da compactação causada pelo tráfego. O teor de umidade e a densidade seca pode variar com o tempo de maneiras diferentes. Isso pode levar a uma alteração significativa do módulo de

resiliência. E, ainda, a consideração do efeito da variação do teor de umidade no módulo resiliente deve ser acompanhada de informações sobre a variação da densidade seca.

Nessa linha, o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento resiliente de diferentes misturas solo-RAP, para utilização como base reciclada de pavimentos ou como revestimento primário de estradas não pavimentadas, bem como avaliar o efeito da umidade de compactação no módulo de resiliência dessas misturas. As composições testadas serão de 100% solo, 75% solo e 25% RAP, e 25% solo e 75% RAP com a realização do ensaio de Módulo de Resiliência.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais

O solo utilizado no estudo foi proveniente de coleta no leito da BR 030, no município de Boa Nova-BA. Foram coletadas amostras do revestimento primário (15 cm superficiais) e encaminhadas, ao Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia em sacos de rafia. O revestimento primário se constitui de um material granular proveniente de horizonte saprolítico de jazidas de exploração da região.

O material fresado utilizado nessa pesquisa foi proveniente da BR 330, no trecho entre a cidade de Jequié e Ipiaú. Foram transportados para o laboratório cerca de 200 kg desse material que foi misturado, homogeneizado e quarteado para os ensaios. O RAP será adicionado por substituição nas misturas, quantificado em termos de massa seca dos materiais.

2.2 Caracterização do solo

A classificação do solo seguiu a ASTM D2487–17 (2017), a distribuição granulométrica foi determinada conforme NBR 7181 (2016), limites de consistência, de acordo com o ME DNER 82 (DNER, 1994c) e ME DNER 122 (DNER, 1994e) e determinação da Massa Específica dos grãos de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 2016). Foi realizada a classificação para solos tropicais de granulação grossa (G-MCT), para finalidades rodoviárias, com base nos grupos “tipo granulométricos” e na metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) segundo a norma DNIT 444/2023 – CLA (DNIT, 2023c). Se a porcentagem retida na peneira de abertura 2,0 mm for maior do que 10 %, prossegue-se com a classificação em um dos grupos de classificação G-MCT e, se for menor, segue-se com a classificação MCT, conforme norma DNIT 259 – CLA (DNIT, 2023a).

2.3 Caracterização do fresado (RAP)

Em função de agregações existentes no material, formadas por concentrações de ligante e agregados presentes no RAP, o material utilizado para o presente estudo foi o passante na peneira de 1” (25,4 mm). A caracterização foi feita por meio do ensaio de granulometria, que seguiu as recomendações do ME DNER 083 (DNER, 1998a), e determinação da Massa Específica dos grãos de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 2016) e segundo a DNIT 427/2020 – ME (DNIT, 2020) para o material maior que 4,8 mm. Por ser um material muito heterogêneo, após sua caracterização, buscou-se reproduzir essa granulometria resultante da caracterização pesando massas de material passante e retido na peneira de 4,75 mm equivalentes ao resultado do ensaio.

2.4 Preparação e Compactação dos materiais

Foram testadas as misturas de solo-RAP nos teores de 100% solo, 75% solo e 25% RAP, e 25% solo e 75% RAP, cujas quantidades foram calculadas em relação à massa seca total da mistura. Os ensaios de compactação foram realizados em amostras não trabalhadas, do solo e das misturas, seguindo as orientações do ME DNIT 443 (DNIT, 2023b), utilizando moldes tripartidos de diâmetro 100 mm e altura 200 mm. Para compactação, utilizaram-se 5 amostras com 4 kg, aproximadamente, de cada material. Foram compactados 5 corpos de prova (CP), na energia Intermediária de Proctor (12,8 kg.cm/cm³), o primeiro CP com umidade próxima da umidade ótima (w_{ot}), identificada por análise tátil e visual, os demais CP com umidade variando em 2%, decrescente para o ramo seco e crescente para o ramo úmido.

2.5 Ensaio de Módulo de Resiliência

Foi avaliado o efeito da umidade de compactação no comportamento resiliente do solo e das misturas. Foram realizados ensaios de Módulo de Resiliência (MR) nos 3 materiais (solo puro e misturas) conforme a norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018). Cada corpo de prova, compactado para determinação da curva de compactação no cilindro tripartido de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, foi ensaiado na sua respectiva umidade de compactação.

Com os parâmetros ótimos de compactação, também foram moldados corpos de prova em triplicata da mesma forma que os anteriores, para realização do ensaio de MR nessa condição. Cada CP compactado foi levado para o equipamento triaxial de carga repetida, onde foi submetido ao ensaio de MR para aplicação de diferentes pares de tensões desvio (σ_d) e confinante (σ_3) ME DNIT 134 (DNIT, 2018).

Os corpos de prova da curva de compactação tiveram o ensaio iniciado pela fase de condicionamento que foi feito apenas com o primeiro par de tensões ($\sigma_3 = 0,07$ MPa e $\sigma_d = 0,07$ MPa), aplicando 500 repetições para materiais de subleito como proposto pela norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018). Em seguida foi determinado o MR aplicando a sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência para materiais de subleito como proposto pela norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018). Os corpos de prova em triplicata moldados nos parâmetros ótimos de compactação foram ensaiados seguindo a sequência do completa da norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018).

O carregamento vertical cíclico foi aplicado na frequência de 1 Hz (60 ciclos de carregamento por minuto). Logo após a finalização do ensaio, cada CP foi pesado e levado à estufa a uma temperatura de aproximadamente 110°C por 48 horas ou até a constância da massa, para determinação do teor de umidade.

A relação entre a tensão (σ_d) e a deformação resiliente (ϵ_r) determina o módulo de resiliência para cada par de tensões aplicado, conforme a Equação 1.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

De posse dos MR calculados, para diferentes pares de tensões testados foi possível determinar as constantes de k_1 , k_2 e k_3 do modelo de variação do módulo de resiliência, de acordo com a Equação 2.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (2)$$

Em que MR: Módulo de resiliência [MPa];

k_1 , k_2 e k_3 : coeficientes de regressão constantes;

σ_3 : Tensão confinante [MPa];

σ_d : Tensão desvio [MPa].

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização dos materiais

Na Figura 2 são apresentadas as curvas de distribuição granulométrica do solo e do RAP utilizados nessa pesquisa. Observa-se que o RAP tem uma graduação mais grossa e uniforme que o solo.

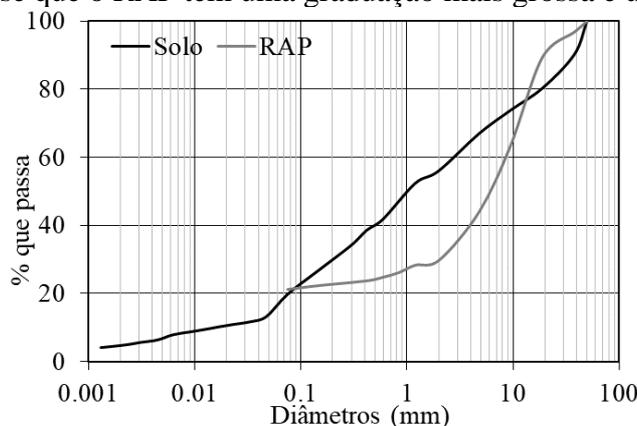


Figura 2. Curva de distribuição granulométrica do solo e do RAP.

Na Tabela 1, são apresentadas características físicas do solo, bem como sua classificação segundo os diferentes sistemas de classificação. Observa-se tratar de uma areia-argilo-siltosa segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Segundo a AASHTO trata-se de um solo A-1-b. Segundo a classificação MCT trata-se de um solo arenoso não laterítico com pedregulho (Sp-NA'). A massa específica dos sólidos do RAP passante na peneira n° 4 foi de 2,50 g/cm³ e do retido de 2,54 g/cm³.

Na Tabela 2, são apresentados os parâmetros ótimos de compactação dos materiais para a energia de Proctor Intermediária. Pode-se observar que, com a adição de material fresado, há uma redução da massa específica seca máxima, possivelmente pela granulometria mais uniforme desse material, bem como pela menor massa específica dos sólidos do RAP. A umidade ótima variou pouco entre as misturas.

Tabela 1. Características físicas e classificação da amostra do solo.

Argila (%)	5,0	
Silte (%)	Fina	13,4
	Média	12,3
	Grossa	14,0
Areia (%)	44,0	
Pedregulho (%)	22	
Limite de liquidez (%)	17	
Limite de plasticidade (%)	5	
Índice de plasticidade (%)	2,634	
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	A-1-b (0)	
AASHTO	Sp-NA'	
G-MCT		

Tabela 2. Parâmetros ótimos de compactação do RP e das misturas com RAP.

	W _{ót}	ρ _{dmáx} (g/cm ³)
RP	7,19%	2,146
75% SOLO + 25% RAP	6,95%	2,110
25% SOLO + 75% RAP	7,05%	2,045

3.2 Módulo de Resiliência

A relação entre a MR e a massa específica seca *versus* a umidade das duas misturas, bem como do solo puro, são mostrados na Figura 3a. Na Figura 3b, a variação do MR em função do desvio da umidade ótima. Nas misturas solo-RAP observa-se um acréscimo e estabilização do MR no ramo seco, enquanto que para o solo no ramo seco há um pico de rigidez seguido de uma redução para o maior desvio da umidade.

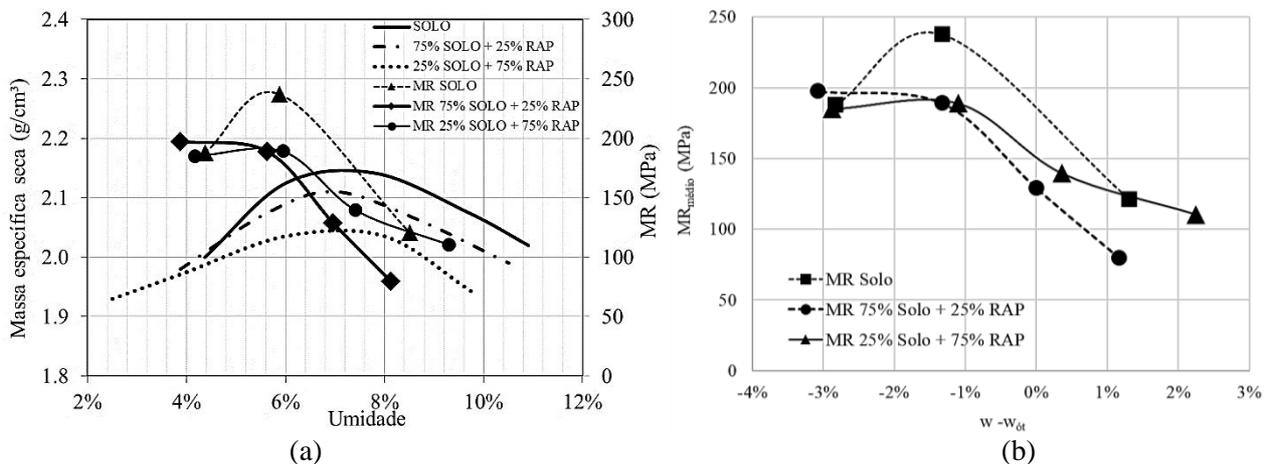


Figura 3. (a) Relação entre a MR e a massa específica seca versus a umidade e curvas de compactação; e (b) Relação entre a MR e o desvio da umidade ótima.

Na Figura 4 são apresentados resultados de MR para diferentes umidades de compactação em função da tensão confinante e tensão desvio. Observa-se que com a elevação da umidade de compactação a dependência do MR em relação às tensões confinantes (σ_3) é maior, havendo uma maior variação. O que também pode ser observado na Tabela 3, onde são apresentados os parâmetros de ajuste ao modelo dos resultados do MR em

função da umidade de compactação. Para a mistura com elevado teor de RAP observa-se uma maior influência da tensão desvio em relação a outra mistura e ao solo.

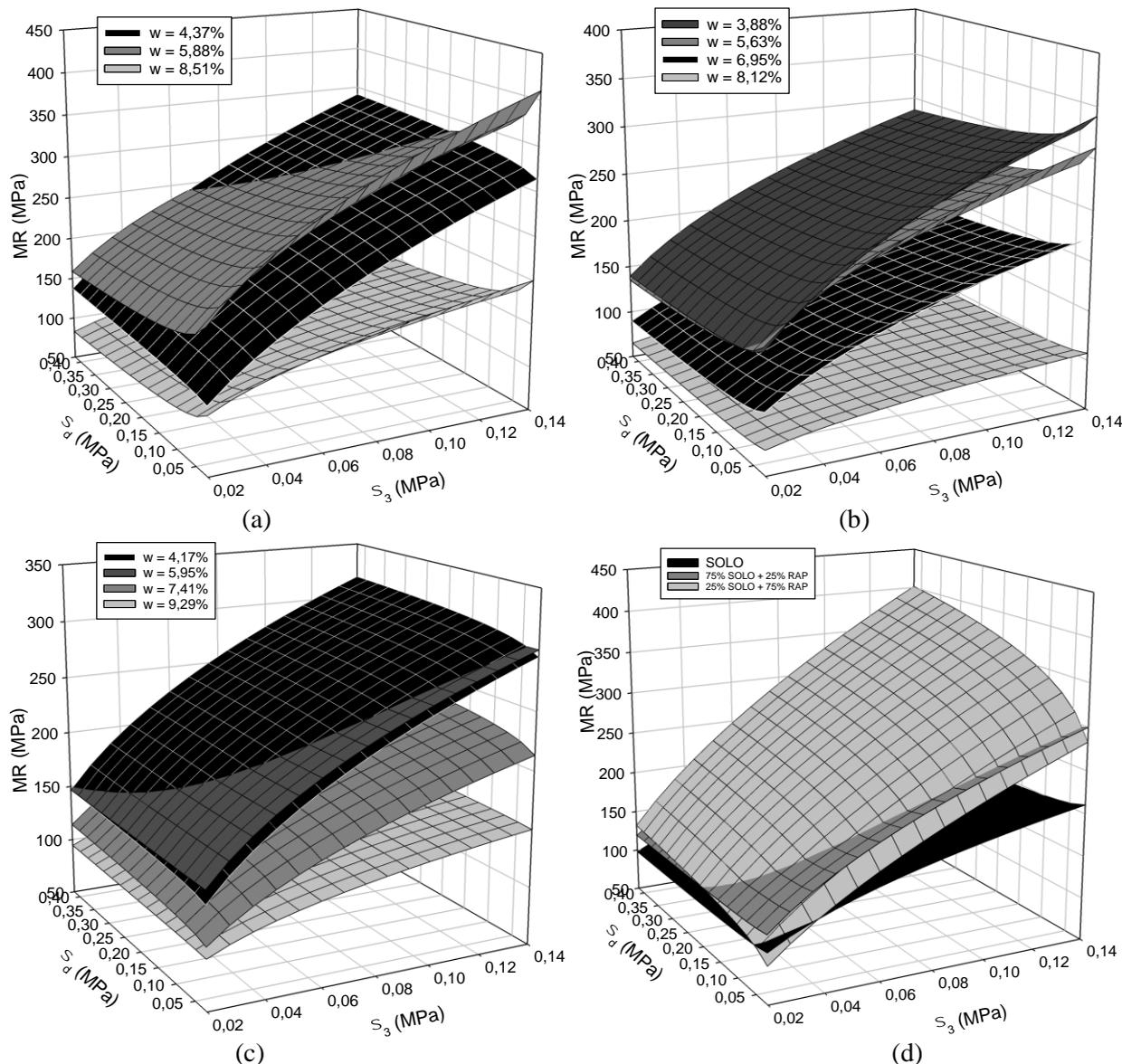


Figura 4. MR x tensões desvio e confinante para diferentes umidades de compactação do (a) Solo; (b) 75% Solo + 25% RAP; e (c) 25% Solo + 75% RAP, e para essas misturas na umidade ótima de compactação.

Tabela 3. Ajuste do modelo combinado de MR para o RP + RAP.

	Umidade	MR _{médio} (MPa)	k ₁	k ₂	k ₃	R ²
Solo	4.37%	187.77	875.81	0.468	0.027	0.99
	5.88%	237.24	570.63	0.347	-0.090	0.98
	8.51%	120.69	223.92	0.280	-0.112	0.93
75% Solo + 25% RAP	3.88%	197.37	564.24	0.370	-0.057	0.98
	5.63%	188.93	424.59	0.310	-0.076	0.98
	6.95%	129.01	353.68	0.366	-0.068	0.98
25% Solo + 75% RAP	8.12%	79.66	129.17	0.186	-0.046	0.78
	4.17%	185.10	714.50	0.399	0.026	0.98
	5.95%	189.06	614.35	0.366	-0.001	0.99
	7.41%	139.48	519.52	0.379	0.037	0.98
	9.29%	110.45	252.71	0.250	0.007	0.95

Tabela 4. Ajuste do modelo combinado de MR para o RP + RAP.

CP	MR Médio (MPa)	Constantes de regressão			R ²
		k ₁	k ₂	k ₃	
100% SOLO					
1	183,28	791,82	0,511	0,025	0,95
2	171,79	727,76	0,494	0,040	0,90
3	206,1	494,43	0,315	0,004	0,79
Média	187,1	366,38	0,344	-0,031	0,87
75% SOLO + 25% RAP					
1	204,3	695,02	0,459	-0,024	0,97
2	198,2	610,21	0,418	-0,019	0,96
3	195,0	714,86	0,406	0,083	0,92
Média	199,2	651,79	0,439	-0,022	0,97
25% SOLO + 75% RAP					
1	218,9	1323,10	0,568	0,120	0,99
2	231,8	1408,67	0,576	0,111	0,99
3	252,9	1029,55	0,426	0,109	0,98
Média	234,6	1365,83	0,572	0,115	0,99

Tabela 5 – Comparação do ajuste do modelo combinado de MR para o RP + RAP de Lima, Silva e Rezende (2023) (A-2-6) com o desse trabalho.

	k ₁	k ₂	k ₃	R ²
Solo A-2-6	476,32	0,465	-0,103	0,77
Solo A-1-b	366,38	0,344	-0,031	0,87
25% RAP A-2-6	612,00	0,322	0,028	0,89
25% RAP A-1-b	651,79	0,439	-0,022	0,97

4 CONCLUSÃO

Foram testadas composições de solo e RAP nas proporções de 100% solo, 75% solo e 25% RAP, e 25% solo e 75% RAP com a realização dos ensaios de Módulo de Resiliência. Quando testadas em diferentes umidades de compactação para as misturas solo-RAP, observa-se um acréscimo de cerca de 110 MPa no MR médio para a mistura com menor teor de RAP e de cerca de 80 MPa para a mistura com maior teor de RAP, seguida da estabilização do MR no ramo seco enquanto que para o solo no ramo seco há um pico de rigidez seguido de uma redução para o maior desvio da umidade. Observou-se que a influência das tensões desvio e confinante varia com o aumento do teor de RAP em que houve uma maior influência da tensão desvio. Observou-se um pequeno aumento do MR médio das misturas com RAP em relação ao solo puro (12 MPa para mistura com menor teor de RAP e 47 MPa para o maior teor de RAP).

AGRADECIMENTOS

Ao PPGEC-UTFPR, a UFRB e ao Laboratório de Pavimentação da UFRB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials. (2017) ASTM D2487–17. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, USA.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017) NBR 6458 - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, p. 10.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro.

- Alhaji, M.M. & Alhassan, M. (2018) *Effect of Reclaimed Asphalt Pavement Stabilization on the Microstructure and Strength of Black Cotton Soil*. International Journal of Technology, 4: p. 727-736.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). (1994c) DNER-ME 082/94. *Solos-Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). (1994b) DNER-ME 122/94. *Solos- Determinação do limite de liquidez- método de referência*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. (2018). DNIT 134/2018 ME – *Pavimentação Solos - Determinação do módulo de resiliência*. Rio de Janeiro, 18 p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2023a). DNIT 259 - Solos - Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura - Classificação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2023b). DNIT 443/2023 ME - *Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos*. Brasília-DF, 12 p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2023c). DNIT 444 - Classificação de solos tropicais de granulação grossa - Classificação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Khodary, F. (2021) *The effects of adding reclaimed asphalt pavement (rap) and cement on the properties of pavement base course*. International journal of innovations in engineering research and technology, v. 8, p. 197-201.
- Klamt, R. A. et al. (2018) *Estudo da utilização da reciclagem de concreto asfáltico como camada de pavimento*. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 7, n. 3, p. 539-553.
- Leite, M. F. et al. *A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas*. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2021/05/2021-ebook-ibp-informacoes-basicas-sobre-materiais-asfalticos.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2024.
- Li, D., Selig, E. T.. Resilient Modulus for Fine-Grained Subgrade Soils. Journal of Geotechnical Engineering, 120(6), 939–957, 1994. doi:10.1061/(asce)0733-9410(1994)120:6(939).
- Lima, L. B. F., silva, j. P. S., rezende, l.r. Investigation of resilient modulus and permanent deformation of tropical soil with reclaimed asphalt pavement. Transportation Geotechnics, v. 43, p. 101103, 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101103>.
- Sant'anna, G. L. et al. (2003) *Módulo de resiliência de um solo arenoso e de suas misturas com alcatrão fracionado e cal*. Revista Árvore, v. 27, p. 527-534.
- Silva, C. C. V. P. da. (2021) *Estudo e proposição de solução para segmento crítico na rodovia BR-230/PB com aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos-MeDiNa*. Dissertação (Mestrado). Universidade federal de Campina Grande, PB.
- Paula, G. F. et al. (2022) *Modelos tensão-deformação e parâmetros de solos tropicais de subleito do Distrito Federal*. 10º Congresso Rodoferroviário Português, Lisboa, Portugal.
- Pradhan, S. K. & Biswal, G. (2022) *Utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) as granular sub-base material in road construction*. Materials Today: Proceedings, v. 60, p. 288-293.
- Widyatmoko, I. et al. (2022) *Characterization of multiple recycled reclaimed asphalt incorporating polymer modified bitumen*. In: Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Volume 3. CRC Press. p. 341-350.
- Yi, X. et al. (2022) *The feasibility of using epoxy asphalt to recycle a mixture containing 100% reclaimed asphalt pavement (RAP)*. Construction and Building Materials, v. 319, p. 126122.