

Uso de resíduo fresado de pavimento asfáltico para melhoria de solo laterítico argiloso em base de rodovias

Use of reclaimed asphalt pavement to improve lateritic clayey soil in road base layer

Gustavo Antezana Fajardo¹, Clara Souza de Oliveira², Rafael Ribeiro Plácido³, Tiago de Jesus Souza⁴, e Fernando Luiz Lavoie⁵

¹Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil, g.antezana@usp.br, 0009-0008-8403-2574

²Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil, clarasouzadeoliveira@usp.br, 0009-0006-5955-7737

³Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, São Paulo, Brasil, rafael.placido@maua.br, 0000-0001-9471-5784

⁴Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil, tiagosouza@ufscar.br, 0000-0003-0127-337X

⁵Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil, fernando.lavoie@usp.br, 0000-0003-1242-3708

Recebido: 29 de agosto de 2025

Revisado: 8 de dezembro de 2025

Aceito: 23 de dezembro de 2025

Publicado: 27 de fevereiro de 2026

Editor Associado:

Jorge Barbosa Soares

Universidade Federal do Ceará, Brasil

Palavras-chave:

Reciclagem,

Ensaio triaxiais dinâmicos,

Módulo de resiliência.

Keywords:

Recycling,

Dynamic triaxial tests,

Resilient modulus.

DOI: 10.58922/transportes.v34.e3174



RESUMO

O aumento da produção de resíduo fresado de pavimento asfáltico tem promovido a necessidade de realizar pesquisas sobre seu reaproveitamento na construção de camadas de suporte em obras rodoviárias, visando ganhos ambientais e econômicos. Este trabalho apresenta uma investigação de compósitos formados por solo laterítico argiloso e resíduo fresado de pavimento asfáltico (RFPA) nas proporções de 100/0, 75/25, 50/50 e 25/75 (solo/RFPA, percentual em massa), realizada por meio de ensaio de compactação de Proctor na energia modificada, cisalhamento direto, e módulo de resiliência. A presença do RFPA nos compósitos conferiu melhorias no comportamento mecânico às misturas 75/25 e 50/50, evidenciada por módulos resilientes, coesões e ângulos de atrito maiores. Ademais, os ensaios demonstraram que as amostras com adição de 50% de RFPA fornece melhor equilíbrio entre a rigidez dinâmica e a resistência ao cisalhamento, recomendando-se seu uso em bases de pavimentos.

ABSTRACT

The increase in the production of reclaimed asphalt pavement has led to a need for research on its reuse in road construction bases and subbases, aiming for environmental and economic benefits. This work analyzes the mechanical behavior of composites of clayey lateritic soil and reclaimed asphalt pavement (RAP) in different proportions of soil and RAP (100/0, 75/25, 50/50, and 25/75, in mass percentage), performed using Proctor compaction tests at modified energy, direct shear, and resilient modulus. The presence of RAP in the composites improved the mechanical behavior of the mixtures, evidenced by higher resilient modulus, cohesion, and friction angles. Furthermore, the tests demonstrated that samples with 50% of RAP provided a better balance between dynamic stiffness and shear strength, recommending their use in road base layers.

1. Introdução

O Brasil possui aproximadamente 111.853 km de extensão de rodovias pavimentadas, sendo 67.835 km de rodovias federais e 44.018 km dos principais trechos estaduais (CNT, 2024). O pavimento rodoviário brasileiro dispõe de um revestimento asfáltico que recebe serviços periódicos de manutenção e, ao final de sua vida útil, passa pelo processo de restauração, por meio da fresagem desse revestimento, a qual tem sido uma das soluções predominantemente aplicadas no sistema rodoviário (DNIT, 2019).

A fresagem do revestimento asfáltico consiste em remover a superfície danificada e, como resultado desse processo, há uma geração significativa de um material denominado resíduo fresado de pavimento asfáltico (RFPA), ou, em inglês, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) (Bonfim, 2011; DNIT, 2019; Costa et al., 2023, 2025). Essa produção considerável de resíduos, por sua vez, promove dificuldades quanto à necessidade de uma destinação final adequada, a fim de reduzir o impacto ambiental do processo de restauração do pavimento. Em países de grande porte como a China, a produção de RFPA atinge até

220 milhões de toneladas por ano (Xiao *et al.*, 2023). A substituição de materiais com uso intensivo de recursos naturais por alternativas mais sustentáveis tem sido uma tendência em diversas áreas, incluindo o projeto e a construção de projetos de infraestrutura (Adhikari, Khattak & Adhikari, 2018; Consoli *et al.*, 2018). Ullah & Tanyu (2019) afirmam que o RFPA tem sido considerado uma das fontes para a produção de material em bases de pavimento há vários anos. De acordo com Dager *et al.* (2023), o interesse em estudar a reutilização de RFPA cresceu nas últimas três décadas. Diversas pesquisas se concentraram em medir e avaliar as propriedades de engenharia deste material. Na Europa, o uso de RFPA como agregado em camadas de base é significativo, representando 17% do uso deste material (Tarsi, Tataranni & Sangiorgi, 2020).

De acordo com Foye (2011), o uso de RFPA em substituição ao material britado é interessante principalmente porque reduz o custo de produção do material, eliminando as operações de extração, britagem e peneiramento, reduz os custos de manuseio e transporte, uma vez que o RFPA é retido no local para reutilização, e, além disto, reduz o consumo de recursos naturais e energia, refletindo na redução de custos nas obras de infraestrutura. Diversos autores (Mahasneh, 2016; Plati & Cliatt, 2018; Consoli *et al.*, 2018; Hasan, Islam & Tarefder, 2018; Alhaji & Alhassan, 2018; Freire *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022; Mariyappan, Palammal & Balu, 2023; Almeida, Sales & Cavalcante, 2024; Santos *et al.*, 2024; Boaventura *et al.*, 2024; Baldovino, Durán & Nuñez de la Rosa, 2025) avaliaram o uso do RFPA para aplicação em pavimentação e estabilização de solos, concluindo que seu uso é viável, seja em camadas de base e sub-base, ou mesmo para melhorar as características do subleito. No entanto, não há uniformidade nos resultados encontrados por esses autores, sugerindo, portanto, que é essencial reunir mais informações sobre as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.

Dager *et al.* (2023) afirmam que existem desafios a serem superados no uso do RFPA devido principalmente à excessiva fluência do material, por isto, os pesquisadores buscam explorar opções para melhorar as características deste material. De acordo com os autores, vários estudos constataram que o RFPA apresenta fluência excessiva. Embora o RFPA frequentemente apresente uma resistência ao cisalhamento relativamente alta e seja categorizado como um agregado graúdo, a presença de ligante asfáltico no agregado aumenta a compressibilidade do material, levando a deformações significativas por fluência ao longo do tempo. Isso prejudica o potencial do RFPA para ser utilizado como material de aterro. Os solos lateríticos, por sua vez, possuem sua granulometria denominada fina, constituída majoritariamente por siltes e argilas, e apresentam um alto teor de ferro e alumínio, o que garante sua intensa coloração roxa-avermelhada. Suas características geológicas fazem com que sua composição não seja adequada para bases de vias de alto volume de tráfego, uma vez que sua capacidade de suporte é inferior à exigida para essas situações (Rocha & Rezende, 2017).

Como exemplo de análise de incorporação do RFPA em solo laterítico, Alhaji *et al.* (2019) realizaram um estudo em campo e em laboratório acerca da adição de RFPA em diversas dosagens com 2% de cimento em um solo laterítico. Os autores destacam que os ensaios *in situ* e em laboratório mostraram valores próximos e que o melhor compósito verificado em termos de comportamento mecânico foi o solo misturado com 120% de RFPA. Outro estudo conduzido por Suebsuk *et al.* (2023) avaliou o comportamento mecânico de um compósito formado por um solo laterítico, RFPA e cimento com variação de temperatura em um clima tropical. Os resultados mostraram que a temperatura afeta significativamente a resistência e a rigidez de amostras contendo RFPA devido à presença de betume cobrindo o agregado. Além disto, a redução de resistência do compósito verificada é função dos teores de cimento e RFPA no solo. Utilizando o ensaio triaxial dinâmico em misturas de solo laterítico e RFPA, Lima, Silva & Rezende (2023) verificaram que a incorporação de RFPA ao solo laterítico pode melhorar o desempenho do material para camadas granulares de pavimentos asfálticos. Além disso, a mistura com 25% de RFPA apresentou o melhor comportamento, em termos de aparecimento de área fissurada e uma piora menos significativa, em termos de deformação, quando comparada ao solo sem adição de RFPA.

A partir deste cenário, este trabalho buscou avaliar o comportamento mecânico de um compósito formado por um solo laterítico argiloso incorporado por teores de RFPA por meio de ensaios mecânicos estáticos e dinâmicos, incluindo o ensaio de Proctor na energia modificada, cisalhamento direto e módulo de resiliência. O ensaio dinâmico é utilizado para análises na camada de base de pavimentos, enquanto o ensaio de cisalhamento direto é aplicável ao estudo de estabilidade de taludes compactados.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais da pesquisa

Para esta pesquisa foram utilizados dois materiais distintos para compor o compósito, sendo eles um solo argiloso laterítico e um resíduo fresado de pavimento asfáltico. O solo foi extraído de uma área no município de Ribeirão Preto (SP) e a amostra de resíduo fresado de pavimento asfáltico (RFPA) foi coletado na Rodovia Washington Luís (SP-310) e resulta de um processo de reciclagem de pavimento asfáltico com fresagem a frio. A Figura 1 apresenta os mapas com as georreferências das regiões onde os materiais foram coletados.

2.2. Caracterização dos materiais

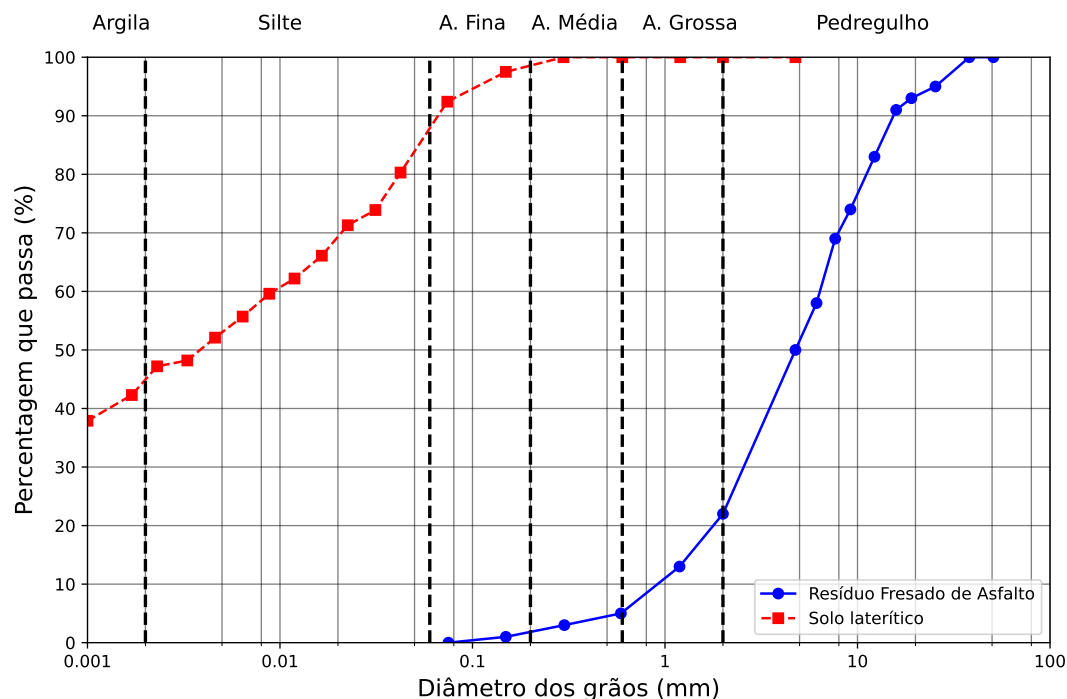
Os resultados dos ensaios de caracterização dos dois materiais, bem como os métodos de ensaios utilizados podem ser vistos na Tabela 1. As curvas granulométricas de ambos os materiais podem ser vistas na Figura 2.



Figura 1 • Mapas com as georreferências das regiões onde os materiais foram coletados: (A) município de Ribeirão Preto, SP (coleta do solo); (B) rodovia Washington Luís – SP 310 (coleta do RFPA).

Tabela 1 • Caracterização do solo de referência e do resíduo fresado de pavimento asfáltico.

Ensaio	Norma	Resultado
Solo de Referência		
Massa específica dos Grãos	ABNT NBR 6458 (ABNT, 2016a)	3,122 g/cm ³
Granulometria Conjunta	ABNT NBR 7181 (ABNT, 2016d)	56% argila, 36% silte e 8% areia
Limite de Liquidez	ABNT NBR 6459 (ABNT, 2016b)	49%
Limite de Plasticidade	ABNT NBR 7180 (ABNT, 2016c)	33%
Mini-MCV – Perda por Imersão	DNIT 258 (DNIT, 2023b)	LG' – Argila Laterítica
Compactação Proctor Modificado	ABNT NBR 7182 (ABNT, 2016e)	
$\rho_{d\max}$: massa específica seca máxima		1,77 g/cm ³
w_{ot} : umidade ótima		23,35%
Resíduo Fresado de Pavimento Asfáltico		
Granulometria por Peneiramento	ABNT NBR 7181 (ABNT, 2016d)	79% pedregulho e 21% areia
Teor de Ligante Asfáltico	DNIT 158 (DNIT, 2011)	5,31%

Figura 2 • Curvas granulométricas do solo e do RFPA.

A partir da curva de distribuição granulométrica do RFPA ilustrada na Figura 2, torna-se perceptível que 50% da amostra passa pela peneira nº. 4 (4,76 mm) e, consequentemente, essa porcentagem foi utilizada neste estudo para os demais ensaios, de forma a garantir a representatividade dos resultados devido às dimensões dos corpos de prova. Ademais, torna-se notório que o RFPA apresenta elevado percentual de partículas com características similares às areias e aos pedregulhos.

2.3. Metodologia da pesquisa

Para a condução da pesquisa, foram moldados corpos de prova, a partir da compactação de solo, RFPA e água destilada com dosagem em massa no ponto ótimo de compactação na energia modificada para condução dos ensaios comparativos entre o solo de referência e as amostras misturadas com o RFPA. Ensaios de compactação Proctor Modificado (ABNT, 2016e), de cisalhamento direto (ASTM, 2004) (com 50, 100 e 200 kPa de tensões normais) e de módulo de resiliência (DNIT, 2023a) foram realizados para o estudo do comportamento mecânico do compósito.

As dosagens realizadas na composição dos compósitos de solo argiloso laterítico e resíduo fresado de pavimento asfáltico foram referenciadas como: compósito referência (100% solo), compósito 1 (75% solo e 25% RFPA), compósito 2 (50% solo e 50% RFPA), e compósito 3 (25% solo e 75% RFPA) (Tabela 2). A Figura 3 mostra a preparação do compósito em laboratório, um cilindro do ensaio de Proctor modificado, uma preparação para o ensaio de cisalhamento direto e a preparação de um ensaio triaxial dinâmico.

Tabela 2 • Dosagens realizadas para a composição dos compósitos de solo e RFPA

Solo (%)	RFPA (%)	Compósito
100	0	Solo de Referência
75	25	1
50	50	2
25	75	3

O ensaio de compactação de Proctor foi realizado na energia modificada para simular essa maior energia de compactação (mais pesada e eficiente) que é comumente alcançada nas obras rodoviárias modernas, especialmente em camadas estruturais de pavimentos onde se requerem maiores densidades e, consequentemente, maior capacidade de suporte. Para a realização deste ensaio, utilizou-se um cilindro metálico de 2.322 g e volume igual a 997,46 cm³, o soquete, por sua vez, possui uma massa de 4.500 g com altura de queda igual a 45 cm. A compactação na energia modificada foi realizada com 27 golpes em cada uma das 5 camadas sobrepostas para cada ponto. Esse conjunto de informações resulta em uma energia de compactação igual a 27,41 J/cm³.

Os ensaios de cisalhamento direto foram iniciados pelo compósito 50/50, uma vez que essa dosagem havia demonstrado um melhor comportamento durante o ensaio de módulo de resiliência. Inicialmente, acreditou-se que uma tensão normal de 200 kPa poderia ser alta demais para as misturas e, por conseguinte, dificultaria o rompimento dos corpos de prova; por isso os ensaios preliminares foram realizados às tensões de 50, 100 e 150 kPa. Entretanto, resolveu-se testar uma tensão maior, igual a 200 kPa, a qual a amostra do compósito 50/50 apresentou um bom comportamento, desse modo, resolveu-se elaborar o ensaio para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. Para o início do ensaio de cisalhamento direto, necessita-se estabelecer previamente a massa dos equipamentos utilizados para a aplicação da força normal, uma vez que, para alcançar a tensão normal pré-determinada para o ensaio, torna-se necessário

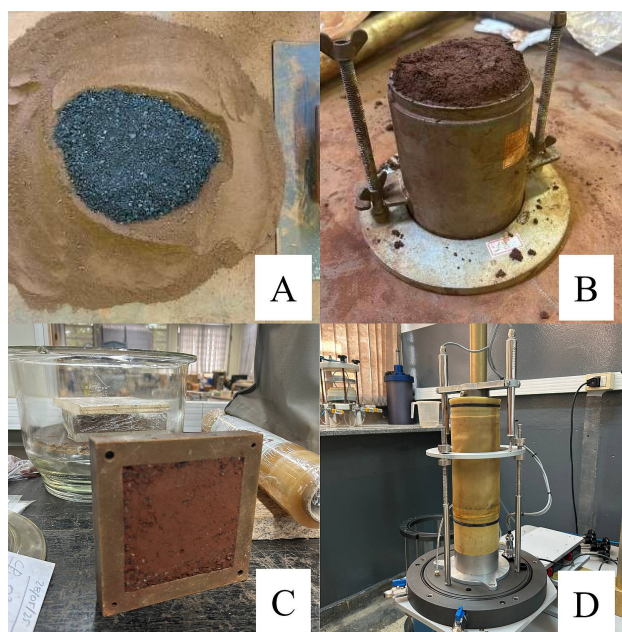


Figura 3 • (A) Preparação do compósito com solo e RFPA; (B) um cilindro do ensaio de Proctor modificado; (C) preparação para o ensaio de cisalhamento direto; (D) preparação de um ensaio triaxial dinâmico.

definir a massa que deverá ser adicionada aos equipamentos. Portanto, para as tensões normais de 50, 100, 200 kPa adicionou-se anilhas que resultaram em massas de aproximadamente 7 kg, 17 kg e 38 kg, respectivamente. A montagem do ensaio de cisalhamento direto consiste em fixar um acessório, o qual se conecta ao transdutor que mede a tensão de cisalhamento, ao anel, esse conjunto deve ser posicionado entre duas placas porosas na caixa de cisalhamento. Em seguida, o corpo de prova deve ser desmoldado do anel e, por fim, todos os aparatos da máquina são posicionados corretamente e as anilhas são colocadas no seu suporte para, então, aplicar-se a força cisalhante ao corpo de prova.

O ensaio de módulo de resiliência é montado colocando-se o corpo de prova sobre uma pedra porosa com papel filtro e envolvendo-se a sua lateral com uma membrana de borracha. Em seguida, posiciona-se corretamente o corpo de prova no equipamento e prende-se a membrana de borracha na base da câmara triaxial por meio de anéis de borracha. Por fim, coloca-se os aparatos responsáveis por medir o deslocamento e o corpo da câmara para a vedação, vale ressaltar que se deve abrir a válvula de drenagem que conecta o corpo de prova à pressão atmosférica para que seja realizado o ensaio na situação drenada.

Foram desenvolvidos diversos modelos de caracterização para a determinação do módulo de resiliência dos solos, tais como o modelo em função da tensão desvio (Equação 1), aplicado a solos coesivos pedregulhosos, o modelo em função da tensão confinante (Equação 2), para materiais granulares, e o modelo composto (Equação 3), indicado para solos ou material não tratado quimicamente (Takeda, 2006):

$$MR_1 = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (1)$$

$$MR_2 = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (2)$$

$$MR_3 = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \cdot \sigma_3^{k_3} \quad (3)$$

em que MR : módulo de resiliência, em MPa; σ_d : tensão de desvio, em MPa; σ_3 : tensão confinante, em MPa; k_1 , k_2 e k_3 : constantes das equações ajustadas.

Dessa forma, o ensaio de módulo de resiliência consiste em duas etapas, sendo que na primeira etapa, chamada de condicionamento, são aplicadas cargas repetidas na tensão desvio igual a 1 Hz com tensão confinante constante e 500 repetições de cada tensão desvio indicadas na Tabela 3; e, na segunda etapa, ocorre a determinação do módulo de resiliência, responsável pela obtenção das leituras das deformações específicas. Nessa etapa aplica-se sequências de 18 pares das tensões indicadas na Tabela 3 com 10 ciclos de carga para cada par de tensões.

3. Resultados e discussões

3.1. Ensaio de compactação

Na Tabela 4 é apresentado um resumo dos resultados obtidos no ensaio de compactação na energia modificada, os quais foram utilizados posteriormente como referência de moldagem dos corpos de prova nos ensaios de análise mecânica dos compósitos.

Após a obtenção das 4 curvas de compactação com as dosagens dos compósitos, tornou-se perceptível que estas respeitam um padrão de aumento da massa específica aparente seca máxima e redução do teor de umidade ótimo semelhante ao que ocorre em curvas de um solo que estão sujeitas a um aumento da energia de compactação. Desse modo, na Figura 4, obteve-se uma curva da linha dos pontos ótimos. Esta tendência está associada a diferença de granulometria entre as amostras e, devido, também, a mineralogia do solo laterítico e sua capacidade de retenção de água. Com o aumento da incorporação de RFPA nos compósitos, pode-se notar um aumento em torno de 20% na massa específica aparente seca máxima e redução em torno de 63% na umidade ótima, comparando-se o compósito 3 (25/75) com o solo de referência.

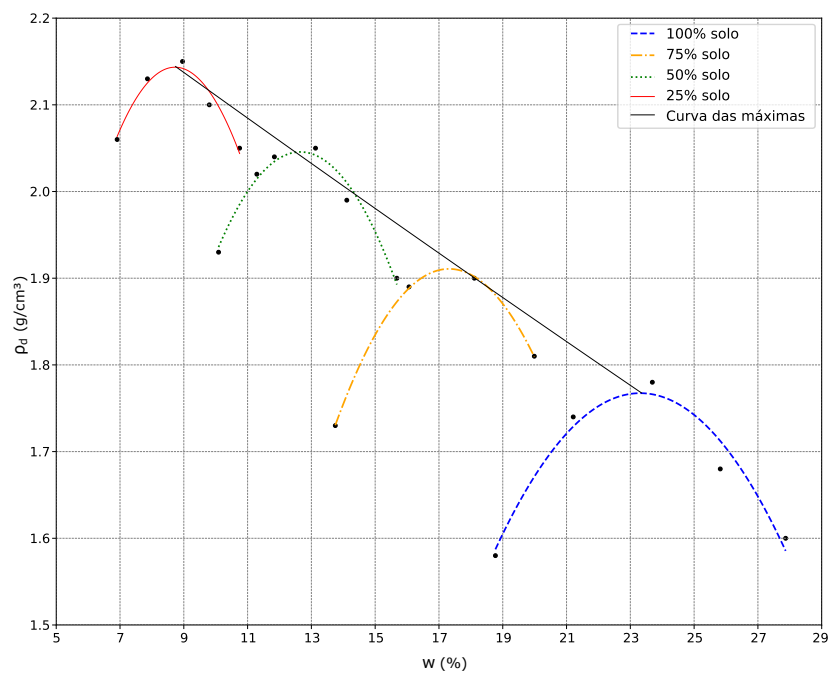
Os valores expostos na Tabela 4, para a dosagem de 100% de solo natural, indicam uma semelhança com os solos estudados por Silveira *et al.* (2021) e Mahasneh (2016), uma vez que estes apresentam valores de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, para a compactação na energia normal, relativamente próximas aos obtidos no ensaio. As variações entre os valores de referência

Tabela 3 • Tensões para as fases de condicionamento e determinação do módulo de resiliência

Fase de Condicionamento			Determinação do módulo de resiliência		
σ_d (MPa)	σ_3 (MPa)	σ_1/σ_3	σ_d (MPa)	σ_3 (MPa)	σ_1/σ_3
0,07	0,07	2	0,02	0,02	2
0,07	0,21	4		0,04	3
0,11	0,32	4		0,06	4
			0,04	0,04	2
				0,07	3
				0,11	4
			0,05	0,05	2
				0,10	3
				0,15	4
			0,07	0,07	2
				0,14	3
				0,21	4
			0,11	0,11	2
				0,21	3
				0,32	4
			0,14	0,14	2
				0,28	3
				0,42	4

Tabela 4 • Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação do solo de referência e dos compósitos

Compósito	ρ_{dmax} (g/cm ³)	w_{ot} (%)
Solo de Referência	1,77	23,35
1	1,91	17,39
2	2,05	12,71
3	2,14	8,74

**Figura 4 •** Curvas de compactação dos compósitos com a linha dos pontos ótimos.

e os obtidos neste estudo são consistentes com as descobertas de Almeida *et al.* (2021) e Suksan & Horpibulsuk (2022). Esses autores demonstram que o aumento da energia de compactação resulta em maior massa específica aparente seca máxima e menor umidade ótima.

Suebsuk *et al.* (2023) não obtiveram esta mesma tendência de comportamento observada no presente trabalho devido, provavelmente, a adição de cimento ao compósito. Porém, os compósitos com 30 e 50% de RFPA apresentaram uma tendência pouco pronunciada de aumento de massa específica seca máxima e redução de umidade ótima, corroborando parcialmente com os resultados obtidos neste trabalho. De toda forma, percebe-se uma mudança de comportamento do compósito de referência (solo) para os compósitos com incorporação de RFPA que pode ser entendido como uma mudança de material fino para um material granular, ou seja, há uma tendência de densificação do compósito com menor necessidade de teor de umidade para esta densificação com a aumento da proporção de RFPA.

3.2. Ensaio de cisalhamento

Na avaliação da resistência ao cisalhamento dos compósitos, foram moldados corpos de prova nas condições de umidade ótima e massa específica seca máxima na energia modificada. Em seguida, foram realizados ensaios de cisalhamento direto sob tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. Os valores de tensão de cisalhamento máxima obtidos foram utilizados para construir a envoltória de resistência ao cisalhamento. Essa envoltória, representada por uma linha reta, permitiu determinar o intercepto de coesão (c) e o ângulo de atrito interno (ϕ). A Tabela 5 resume os resultados desses ensaios.

Os resultados apresentados na Figura 5 apontam para um aumento dos parâmetros analisados em relação ao solo natural, no entanto, com alto teor de RFPA (75%) ocorre uma redução da coesão e aumento do ângulo de atrito, com uma tendência de se aproximar aos valores obtidos no ensaio de cisalhamento direto do RFPA puro. Isso ocorre porque, com um alto teor de RFPA, o compósito tende a se comportar como um material granular, com baixa quantidade de finos.

Tabela 5 • Parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto do solo de referência e dos compósitos

Compósito	c (kPa)	ϕ (°)
Solo de Referência	133,35	35,81
1	135,55	58,4
2	171,05	37,45
3	85,45	46,3

Tabela 6 • Valores obtidos de módulo de resiliência (MR) médio e máximo para cada compósito

Compósito	MR Médio (MPa)	MR Máximo (MPa)
Solo de Referência	172,51	210,60
1	344,26	427,89
2	566,36	694,14
3	400,85	503,13

Ademais, para tensões normais menores que 100 kPa, as amostras com adição de 50% de RFPA possuem resultados maiores de tensão de cisalhamento. Acima desse valor de tensão normal, as amostras de 25% de RFPA se sobressaem devido a mobilização da parcela atritiva da resistência do compósito.

Como indicado no estudo de Mahasneh (2016), a adição em até 10% de RFPA proporcionou um aumento tanto na coesão quanto no ângulo de atrito do compósito, corroborando com os resultados obtidos nesta pesquisa. Torna-se notório também que a coesão resultante do solo de referência é relativamente maior que o indicado nos estudos de Silveira *et al.* (2021), sendo 133,35 kPa para o presente estudo e 69,2 kPa no estudo citado, o que pode ser justificado devido aos corpos de prova do estudo citados serem compactados na energia normal. O estudo desenvolvido por Arulrajah *et al.* (2013) também mostrou uma redução da coesão com a incorporação de RFPA no compósito, de 95 kPa para 15 kPa, apresentando-se assim uma tendência de se aproximar aos valores obtidos no ensaio de cisalhamento direto do RFPA puro.

3.3. Ensaio de módulo de resiliência

A Tabela 6 apresenta os resultados dos módulos de resiliência (MR) médios e máximos obtidos no ensaio, para os pares de tensões indicados na Tabela 3.

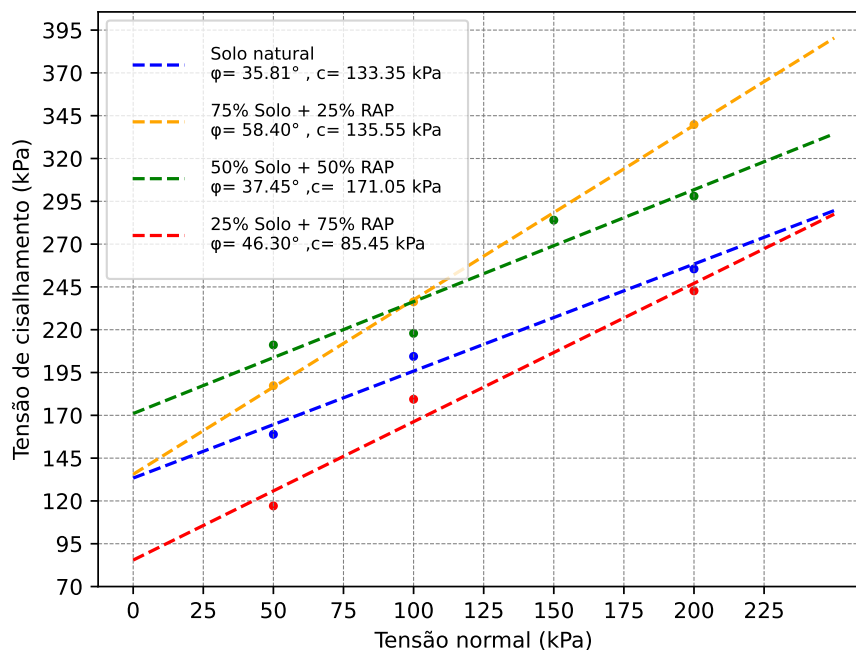


Figura 5 • Envoltórias de resistência ao cisalhamento dos compósitos solo + RFPA.

Os resultados indicados na Tabela 6 mostraram um aumento do módulo de resiliência até a dosagem do compósito 2 (50% de Solo e 50% de RFPA) em torno de 330% comparando-se o compósito 2 com o solo de referência e uma queda desta variável para a dosagem do compósito 3 (25% de Solo e 75% de RFPA).

Desse modo, pode-se concluir que a adição de resíduo fresado de pavimento asfáltico proporciona um aumento da resistência, indicando um comportamento similar ao indicado na pesquisa de [Weiner et al. \(2025\)](#), que obteve sucessivos aumentos no módulo de resiliência com o aumento da proporção de RFPA no compósito. Entretanto, dosagens altas (75% de RFPA) podem promover uma redução na resistência do compósito sob esforços dinâmicos.

Utilizando o suplemento de ferramenta de análise de regressão linear em planilha eletrônica, as constantes para os modelos matemáticos que representam o comportamento das misturas (Equações 1, 2 e 3) foram determinadas e estão apresentadas na Tabela 7.

O solo natural apresentou um comportamento diferente dos demais compósitos para os dois primeiros modelos matemáticos, isto é, o solo natural possui curvas decrescentes, enquanto as misturas com adição de RFPA resultaram em curvas crescentes. Isto pode ser explicado devido à influência das substâncias cimentantes presentes no solo laterítico, as quais contribuem para o bom desempenho mecânico das amostras. O aumento da tensão de confinamento pode promover microfissuração e perda dessas ligações, provocando a redução do módulo de resiliência (MR) ([Arancibia Suárez, 2008](#)). A adição de RFPA nas misturas promove alterações na natureza do material, tornando-o mais granular, o que reduz a contribuição relativa de cimentação e aumenta a dependência do intertravamento entre partículas. Nesse caso, o aumento do confinamento reforça o intertravamento e aumenta a rigidez tangencial efetiva, elevando o MR. Nos estudos realizados por [Carmo \(1998\)](#) e [Arancibia Suárez \(2008\)](#), as amostras de solos lateríticos argilo-siltosos resultaram em comportamentos similares. Para que fosse possível visualizar

Tabela 7 • Regressão linear dos modelos matemáticos dos módulos de resiliência (MR) obtidos nos ensaios

Compósito	$MR_1 = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$		$MR_2 = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$		$MR_3 = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \cdot \sigma_3^{k_3}$		
	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_3
Solo de Referência	123,26	-0,15	132,23	-0,09	151,85	-0,26	0,16
1	506,20	0,11	667,47	0,18	686,47	-0,05	0,23
2	757,57	0,13	984,72	0,20	990,03	-0,01	0,21
3	469,24	0,14	624,20	0,21	628,19	-0,01	0,22

esse efeito, construiu-se o gráfico ilustrado na Figura 6.

Em posse das Equações 1, 2 e 3, tornou-se necessário calcular os coeficientes de determinação (R^2) a fim de identificar qual modelo matemático é mais adequado para representar o comportamento dos compósitos (Tabela 8).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 8, o valor do coeficiente de determinação para o modelo MR1 é maior para o solo natural, uma vez que este solo pode ser considerado coeso devido ao seu alto teor de argila. Para o MR2, é notório um aumento do coeficiente de determinação após a adição do RFPA, posto que esse incremento torna a mistura mais granular. Por fim, o MR3, indicado para solos não tratados quimicamente, resultou em valores de R^2 relativamente altos e, por conseguinte, é o modelo matemático mais adequado para essas dosagens. Desse modo, na Figura 7, pode-se observar graficamente os resultados para o modelo composto MR3, concluindo-se que a melhor dosagem para a solicitação dinâmica é com a adição de 50% de RFPA ao solo de referência (compósito 2).

De acordo com Carmo (1998), é muito comum encontrar na literatura que alguns solos tem módulo de resiliência influenciado de forma predominante ou pela tensão confinante ou pela tensão de desvio. Para o solo de referência, percebe-se que o módulo de resiliência diminuiu com o aumento da tensão de confinamento. Porém, para os compósitos com RFPA, houve um aumento do MR com o aumento da tensão de confinamento, mostrando assim um incremento na rigidez dos compósitos. Por outro lado, tanto o solo de referência quanto os compósitos com RFPA mostraram aumento de MR com o aumento da tensão de desvio, demonstrando bom comportamento acerca das deformações resilientes nas amostras.

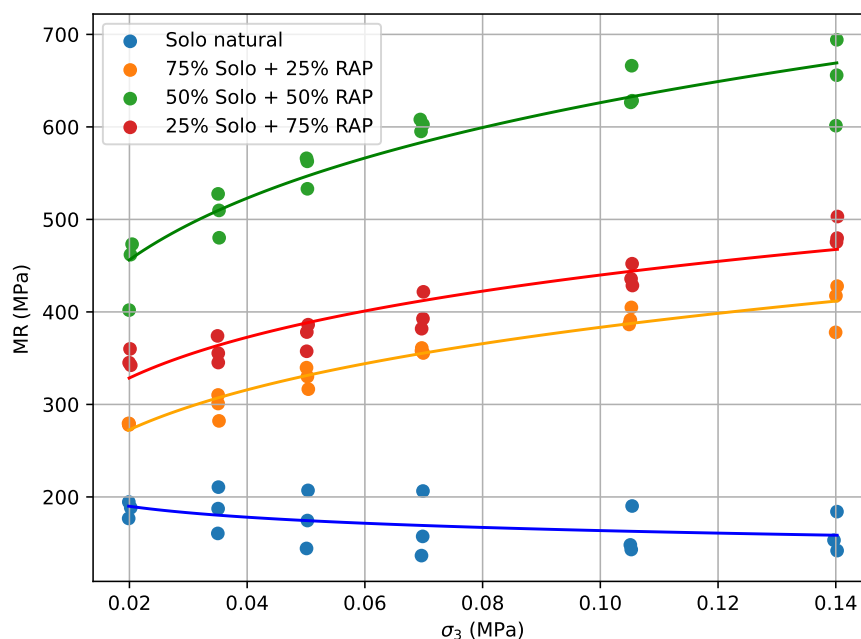


Figura 6 • Módulo de resiliência versus tensão confinante dos compósitos.

Tabela 8 • Coeficiente de determinação (R^2) dos modelos matemáticos do módulo de resiliência

Compósito	Valores de R^2		
	MR1	MR2	MR3
Solo de Referência	0,69	0,19	0,88
1	0,60	0,93	0,93
2	0,58	0,88	0,88
3	0,42	0,86	0,90

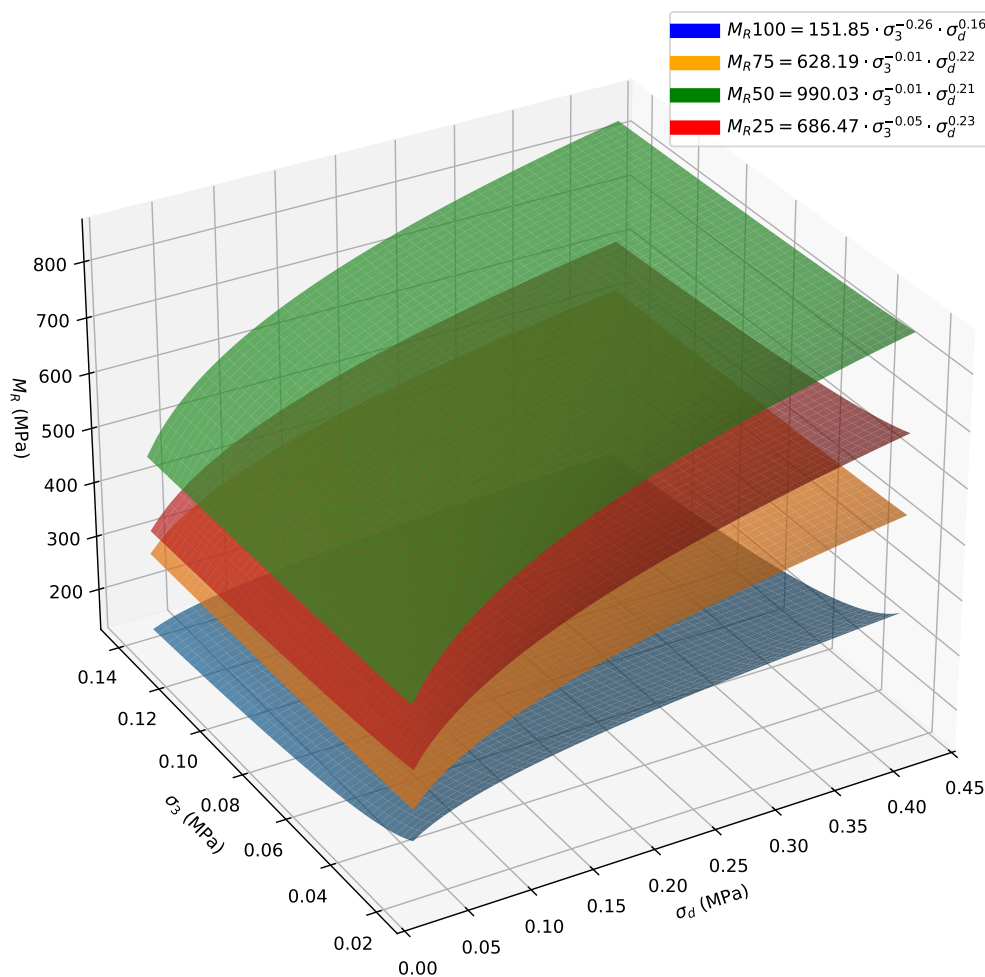


Figura 7 • Superfícies do modelo matemático composto para os compósitos avaliados.

4. Conclusões

Neste estudo foi analisado o comportamento mecânico de um solo laterítico argiloso incorporado com teores de RFPA (25, 50 e 75%). Os resultados revelaram que a incorporação de RFPA ao solo estudado promove uma redução no teor de umidade ótima (faixa de 23,35 a 8,74%) e um aumento na massa específica seca máxima das misturas de solo laterítico, quando compactado. Esse aumento ocorre progressivamente e, por conseguinte, gera uma curva de máximos. Desta forma, é possível entender uma mudança de comportamento do compósito de referência (solo) para os compósitos com incorporação de RFPA de material fino para um material granular com o aumento da dosagem de resíduos.

O ensaio de cisalhamento direto, por sua vez, indicou aumento da coesão de 133,35 kPa no solo natural para 171,05 kPa para o compósito 2 (50% de RFPA). No entanto, altos teores de RFPA, como o compósito 3 (75% de RFPA), reduz a coesão do solo para 85,45 kPa. Em relação ao ângulo de atrito, obteve-se um aumento considerável para o compósito 1 (25% de RFPA) (58,40°) em comparação ao solo natural (35,81°). Portanto, visando a aplicação do compósito para a compactação em base de rodovias e estudo da análise de estabilidade dos taludes, sugere-se, a partir dos dados analisado neste estudo, a adoção das dosagens de 25 e 50% de RFPA, pois ambas apresentaram os melhores resultados.

Nos ensaios de módulo de resiliência constatou-se que os compósitos com incorporação de RFPA apresentaram maior rigidez elástica em comparação ao solo natural, o que indica que a adição do RFPA proporciona menores deformações elásticas sob carregamento repetido. Nessa situação, conclui-se que o compósito 2 (50% de RFPA) garante resultados melhores com módulo de resiliência médio igual a

566,36 MPa e o modelo composto, indicado para solos não tratados quimicamente, proporciona uma equação matemática significativamente representativa.

Por fim, a presença do RFPA conferiu melhorias no comportamento mecânico aos compósitos 75/25 e 50/50, evidenciada por módulos resilientes, coesões e ângulos de atrito maiores. Ademais, os ensaios demonstraram que as amostras com adição de 50% de RFPA fornece melhor equilíbrio entre a rigidez dinâmica e a resistência ao cisalhamento, recomendando-se seu uso em bases de pavimentos.

Para trabalhos futuros, sugere-se a execução do ensaio de Deformação Permanente, voltado para o dimensionamento moderno de pavimentos, especialmente nos métodos mecanístico-empíricos, como o método MeDiNa, no Brasil, além de uma análise do comportamento mecânico dos compósitos com a variação do teor de umidade das amostras e a realização do ensaio CBR (California Bearing Ratio), visando corroborar os resultados dos demais ensaios, visto que se trata de uma técnica bastante tradicional.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio dos recursos financeiros para o projeto “Solo reforçado com resíduos de pneus e fresado de asfalto” (Processo nº. 404631/2023-1). Os autores também agradecem ao Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de São Carlos (LabGeo/UFSCar) pela realização dos ensaios de módulo de resiliência desta pesquisa.

Declaração de contribuição de autoria CRediT

Gustavo Antezana Fajardo: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Supervisão, Validação, Visualização, Redação da versão inicial, Redação - revisão e edição; *Clara S. de Oliveira*: Análise formal, Investigação, Metodologia, Validação, Visualização, Redação da versão inicial; *Rafael R. Plácido*: Conceitualização, Análise formal, Investigação, Validação, Visualização, Redação - revisão e edição; *Tiago J. Souza*: Conceitualização, Análise formal, Investigação, Validação, Visualização, Redação - revisão e edição; *Fernando L. Lavoie*: Conceitualização, Aquisição de financiamento, Administração de projeto, Curadoria de dados, Investigação, Metodologia, Supervisão, Validação, Visualização, Redação da versão inicial, Redação - revisão e edição.

Uso de tecnologia assistida por inteligência artificial

Os autores declaram que nenhuma ferramenta de inteligência artificial foi usada na pesquisa aqui relatada ou na preparação deste artigo.

Declaração de conflitos de interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesses.

Declaração de disponibilidade de dados

Os dados, modelos e códigos que suportam os resultados deste estudo estão disponíveis mediante solicitação ao autor correspondente.

Referências

- ABNT (2016a). *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: ABNT.
- ABNT (2016b). *NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT (2016c). *NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT (2016d). *NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT (2016e). *NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Adhikari, S., M. Khattak, & B. Adhikari (2018). Mechanical characteristics of soil-RAP-geopolymer mixtures for road base and subbase layers. *The International Journal of Pavement Engineering* 21(4), 483–496. DOI: 10.1080/10298436.2018.1492131.

- Alhaji, M. M. & M. Alhassan (2018). Effect of reclaimed asphalt pavement stabilization on the microstructure and strength of black cotton soil. *International Journal of Technology* 9(4), 727–736. DOI:10.14716/ijtech.v9i4.435.
- Alhaji, M. M., M. Alhassan, T. W. Adejumo, & A. T. Umar (2019). Laboratory and field evaluation of A-6 lateritic soil treated with reclaimed asphalt pavement and ordinary Portland cement. *International Journal of GeoMATE* 17(63), 360–370. DOI:10.21660/2019.63.86310.
- Almeida, G., L. C. Sales, & E. Cavalcante (2024). Geotechnical properties analysis in soil, reclaimed asphalt pavement (RAP) and Portland cement mixtures for use as pavement layers. *Geociências* 43(2), 223–235. DOI:10.5016/geociencias.v43i2.18256.
- Almeida, V. G., M. S. Almeida, F. C. Maciel, L. N. Moura, W. G. Costa, & M. S. São Mateus (2021). Diferentes metodologias de dosagem de misturas solo-RAP para uso em pavimentação. *Anuário do Instituto de Geociências* 44, 36210. DOI:10.11137/1982-3908_2021_44_36210.
- Arancibia Suárez, D. A. (2008). Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica. Mestrado (dissertação), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. DOI:10.11606/D.18.2009.tde-23042009-115341.
- Arulrajah, A., M. A. Rahman, J. Piratheepan, M. W. Bo, & M. A. Imteaz (2013). Large scale direct shear testing of recycled construction and demolition materials. *Advances in Civil Engineering Materials* 2(1), 189–200. DOI:10.1520/ACEM20120055.
- ASTM (2004). *D3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. West Conshohocken: ASTM.
- Baldovino, J. A., A. P. Durán, & Y. E. Nuñez de la Rosa (2025). Sustainable stabilization of soil-rap mixtures using xanthan gum biopolymer. *Sustainability* 17(10), 4601. DOI:10.3390/su17104601.
- Boaventura, A. C., M. S. Almeida, W. G. Costa, I. M. Pereira, M. S. São Mateus, J. A. Brito, & R. A. Fiuza Jr. (2024). The influence of residual asphalt material in the mechanical behaviour of soil-RAP mixtures for use in paving. *International Journal of Pavement Engineering* 25(1), 2407901. DOI:10.1080/10298436.2024.2407901.
- Bonfim, V. (2011). *Fresagem de Pavimentos Asfálticos* (3a. ed.). São Paulo: Exceção Editorial.
- Carmo, C. A. (1998). A avaliação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos de dois solos compactados e a sua estimativa a partir de ensaios rotineiros. Mestrado (dissertação), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. DOI:10.11606/D.18.2018.tde-14032018-111408.
- CNT (2024). Pesquisa CNT de Rodovias 2024 aponta a necessidade de reforço contínuo da infraestrutura rodoviária brasileira. URL: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/pesquisa-cnt-de-rodovias-2024-aponta-a-necessidade-de-reforco-continuo-da-infraestrutura-rodoviaria-brasileira> [visitado 24.2.2026].
- Consoli, N. C., H. C. Scheuermann Filho, V. B. Godoy, C. M. Rosenbach, & J. A. Carraro (2018). Durability of rap-industrial waste mixtures under severe climate conditions. *Soils and Rocks* 41(2), 149–156. DOI:10.28927/SR.412149.
- Costa, L. F., A. L. Macedo, L. C. Lucena, & L. F. Lucena (2023). Determinação da ativação relativa do ligante rap e avaliação da interferência de aditivos de reciclagem em misturas asfálticas produzidas com 100% RAP. *Transportes* 31(3), e2085. DOI:10.58922/transportes.v31i3.2805.
- Costa, W. G., R. L. Izzo, M. S. Almeida, A. R. Achy, I. J. Santos, & R. S. Ramos (2025). Investigation of cement and polymer stabilization in gravel soil-RAP mixtures for full-depth reclamation applications. *Construction and Building Materials* 482, 141548. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2025.141548.
- Dager, C. H., R. H. Morro, J. F. Hubler, & K. M. Sample-Lord (2023). Review of geotechnical properties of reclaimed asphalt pavement for reuse in infrastructure. *Geotechnics* 3(1), 2142. DOI:10.3390/geotechnics3010003.
- DNIT (2011). *Norma 158: Mistura Asfáltica – Determinação da Porcentagem de Betume em Mistura Asfáltica Utilizando o Extrator Soxhlet – Método de Ensaio*. Brasília: DNIT.
- DNIT (2019). Manutenção e restauração rodoviária. URL: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/manutencao-e-restauracao-rodoviaria> [visitado 24.2.2026].
- DNIT (2023a). *Norma 134: Pavimentação - Solos - Determinação do Módulo de Resiliência - Método de Ensaio*. Brasília: DNIT.
- DNIT (2023b). *Norma 258: Solos – Compactação em Equipamento Miniatura – Ensaios Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão – Método de Ensaio*. Brasília: DNIT.
- Foye, K. (2011). Use of reclaimed asphalt pavement in conjunction with ground improvement: a case history. *Advances in Civil Engineering* 20(1), 1–7. DOI:10.1155/2011/808561.
- Freire, A. C., J. M. Neves, A. J. Roque, I. M. Martins, & M. L. Antunes (2021). Feasibility study of milled and crushed reclaimed asphalt pavement for application in unbound granular layers. *Road Materials and Pavement Design* 22(7), 1500–1520. DOI:10.1080/14680629.2019.1701539.
- Hasan, M., R. Islam, & R. A. Tarefder (2018). Characterization of subgrade soil mixed with recycled asphalt pavement. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* 5(3), 207–214. DOI:10.1016/j.jtte.2017.03.007.
- Lima, L. B., J. P. Silva, & L. R. Rezende (2023). Investigation of resilient modulus and permanent deformation of tropical soil with reclaimed asphalt pavement. *Transportation Geotechnics* 43, 101103. DOI:10.1016/j.trgeo.2023.101103.
- Mahasneh, B. Z. (2016). Use of aluminum residue and recycled asphalt pavement materials to stabilize silty clay soil. *Journal of Infrastructure Systems* 22(4), A4015001. DOI:10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000250.
- Mariyappan, R., J. S. Palammal, & S. Balu (2023). Sustainable use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in pavement applications: a review. *Environmental Science and Pollution Research International* 30(16), 45587–45606. DOI:10.1007/s11356-023-

25847–3.

- Plati, C. & B. A. Cliatt (2018). A sustainability perspective for unbound reclaimed asphalt pavement (RAP) as a pavement base material. *Sustainability* 11(78), 1–17. DOI:10.3390/su11010078.
- Rocha, M. T. & L. R. Rezende (2017). Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. *Matéria* 22(4), 1–25. DOI:10.1590/s1517-707620170004.0229.
- Santos, E. F., L. P. Specht, M. Baroni, & J. S. Vieira (2024). Avaliação da adição de materiais fresados em camadas granulares para bases de pavimentos asfálticos. *Transportes* 32(3), e2989. DOI:10.58922/transportes.v32i3.2989.
- Silva, A., L. Festugato, J. V. Daronco, & E. S. Menger (2022). Mechanical response of a sand, reclaimed-asphalt pavement, and portland cement mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering* 34(9), 04022213. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004361.
- Silveira, M. R., S. A. Rocha, N. S. Correia, R. A. Rodrigues, H. L. Giacheti, & P. C. Lodi (2021). Effect of polypropylene fibers on the shear strength-dilation behavior of compacted lateritic soils. *Sustainability* 13(22), 12603. DOI:10.3390/su132212603.
- Suebsuk, J., A. Kampala, P. Waiyakorn, C. Suksiripattanapong, & P. Chindaprasirt (2023). Variations in strength and stiffness of cement-stabilized reclaimed asphalt pavement and marginal lateritic soil blends in tropical climate. *Construction and Building Materials* 409, 134062. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.134062.
- Suksan, A. & S. Horpibulsuk (2022). Evaluation of cement stabilized recycled asphalt pavement/lateritic soil blends for soft soil improvement. *Rock and Soil Mechanics* 43(12), 3305–3315. DOI:10.16285/j.rsm.2022.00111.
- Takeda, M. C. (2006). *Influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista*. Doutorado (tese), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. DOI:10.11606/T.18.2006.tde-25112006-225630.
- Tarsi, G., P. Tataranni, & C. Sangiorgi (2020). The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: a review. *Materials* 13(18), 4052. DOI:10.3390/ma13184052.
- Ullah, S. & B. F. Tanyu (2019). Methodology to develop design guidelines to construct unbound base course with reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials* 223, 463–476. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.196.
- Weiner, G. S., R. L. Izzo, M. S. Almeida, A. R. Achy, I. J. Santos, & R. S. Ramos (2025). Investigation of cement and polymer stabilization in gravel soil-rap mixtures for full-depth reclamation applications. *Construction and Building Materials* 482, 141548. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2025.141548.
- Xiao, F., L. Xu, Z. Zhao, & X. Hou (2023). Recent applications and developments of reclaimed asphalt pavement in China, 2010–2021. *Sustainable Materials and Technologies* 37, e00697. DOI:10.1016/j.susmat.2023.e00697.