

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/646

Propriedades Geotécnicas de uma Areia Reciclada de RAP

Ana Laura Gianello dos Santos

Mestranda, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, anagianello@estudante.ufscar.br

Fernando Henrique Martins Portelinha

Professor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, fportelinha@ufscar.br

Natália de Souza Correia

Professora, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, ncorreia@ufscar.br

RESUMO: Com a necessidade da redução da utilização de recursos naturais esgotáveis, o uso de materiais reciclados tem sido uma importante alternativa para a construção sustentável. O RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) tem sido utilizado em obras de pavimentação, mas raramente em obras geotécnicas como material de aterro. Uma das razões para o baixo volume de reuso do RAP está, principalmente, no desconhecimento de suas propriedades mecânicas a curto e longo prazo. Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo a caracterização de algumas propriedades de uma areia reciclada de RAP, visando sua aplicação em obras geotécnicas. A areia de RAP foi produzida em laboratório pela separação dos grãos passantes em peneira com abertura de malha de 2,00 mm (peneira nº 10). Os resultados obtidos pelos ensaios do RAP foram comparados aos de uma areia natural de mesma fração granulométrica, como uma forma de se obter um comportamento de referência. Dentre as propriedades apresentadas na presente pesquisa estão a massa específica dos sólidos, a distribuição do tamanho e formato dos grãos, a densidade seca máxima e o teor de umidade ótimo na energia Proctor normal, bem como os índices de vazios máximos e mínimos. A condutividade hidráulica da areia de RAP também foi caracterizada na presente pesquisa. Quanto as características mecânicas, a resistência ao cisalhamento do RAP nas tensões confinantes variando de 25 kPa à 400 kPa, na condição de compactidade relativa de 95%. Os resultados mostraram que a areia de RAP usada nesta pesquisa pode ser definida como uma areia de grãos angulares com densidade inferior a uma areia natural, aspecto que influencia as propriedades de compactação em comparação à areia natural. Embora sejam areias de mesma composição granulométrica, o alto valor de índice de vazios mínimo do RAP gerou uma divergência de comportamento frente a areia natural, resultando em uma menor parcela atritiva no RAP. Por outro lado, a presença do ligante asfáltico no RAP gerou uma parcela significativa de coesão, resultando em uma resistência ao cisalhamento superior à da areia natural. O valor de condutividade hidráulica do RAP foi da ordem de 10^{-4} m/s, caracterizando-se assim um material de excelente capacidade drenante.

PALAVRAS-CHAVE: Fresado de Asfalto, Caracterização Geotécnica, Resistência ao Cisalhamento, Material Sustentável.

ABSTRACT: With the need to reduce the use of non-renewable resources, the use of recycled materials has been an important alternative for sustainable construction. RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) has been used in paving works, but rarely in geotechnical works as a fill material. One of the main reasons for the low volume of RAP reuse lies in the lack of understanding of its mechanical properties in both short and long terms. Therefore, this article aims to characterize some properties of recycled RAP sand for potential application in geotechnical projects. The RAP sand was laboratory-produced by separating grains passing through a sieve with a mesh opening of 2.00 mm (sieve No. 10). Results from RAP tests were compared with those of natural sand of the same particle size distribution to establish a reference behavior. Properties studied in this research include specific gravity of solids, grain size distribution and shape, maximum dry density, optimal moisture content at normal Proctor compaction energy, and maximum and minimum void ratios. The hydraulic conductivity of RAP sand was also assessed in this study. Regarding mechanical characteristics, the shear strength of RAP was evaluated under confining pressures ranging from 25 kPa to 400 kPa, at a relative compaction of 95%. Results indicated that the RAP sand used in this study can be defined as having angular

grains and lower density compared to natural sand, affecting its compaction properties. Despite having the same particle size distribution, the high minimum void ratio of RAP sand resulted in divergent behavior compared to natural sand, leading to a lower frictional component in RAP. However, the presence of asphalt binder in RAP contributed significantly to its cohesion, resulting in higher shear strength compared to natural sand. The hydraulic conductivity of RAP was approximately 10^{-4} m/s, indicating excellent drainage characteristics.

KEYWORDS: Milled Asphalt, Geotechnical Characterization, Shear Resistance, Sustainable Material.

1 INTRODUÇÃO

Com a necessidade da redução da utilização de recursos naturais esgotáveis, o uso de materiais reciclados tem sido uma importante alternativa para a construção sustentável, com a redução de consumo de energia, recursos naturais, e de emissão de gases poluentes associados à extração, produção e transporte dos materiais convencionais. O RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) ou fresado de asfalto tem se mostrado como um material de reuso com crescente estudo e investigações de novas maneiras de aplicá-los na própria cadeia produtiva das obras de infraestrutura. Segundo Tarsi et al. (2020), o asfalto fresado é constituído por recursos não renováveis, sendo cerca de 95% do seu peso de agregados e cerca de 5% em ligante betuminoso, podendo ser reutilizado em misturas asfálticas ou como agregado reciclado para produção de camadas de pavimento, reduzindo a necessidade de agregados virgens e betume. Segundo a Associação Europeia de Pavimento Asfáltico, em 2022, cerca de 40 milhões de toneladas de RAP estavam disponíveis para reuso pela indústria asfáltica na Europa (EAPA, 2022). No Brasil, a ausência de uma base de dados oficial sobre a quantidade de RAP gerado anualmente representa um desafio significativo para a gestão e planejamento do reuso desse material. Mas apesar dessa lacuna de informação, é amplamente reconhecido que há uma grande quantidade de RAP disponível nas rodovias e aeroportos brasileiros.

O RAP possui um alto potencial de reuso em diversas aplicações de infraestrutura, podendo trazer benefícios ambientais e econômicos substanciais, como diminuição dos resíduos enviados a aterros e a economia de custos associados à produção e transporte de asfalto novo. As obras geotécnicas, tais como aterros, barragens e infraestrutura de transportes, demandam grandes volumes de solos e agregados nobres. Diante desse cenário, a obtenção de material reciclados surge como uma alternativa promissora aos materiais naturais, trazendo benefícios tanto ambientais quanto econômicos para as obras de infraestrutura.

Atualmente, agências como *Federal Highway Administration* (FHWA) permitem o uso de RAP em muros mecanicamente estabilizados, em certas condições (FHWA-NHI-10-024 e FHWA-NHI-10-025). O RAP deve atender a requisitos específicos de propriedades, deve cumprir as regulamentações ambientais e práticas adequadas de construção, como compactação e controle de umidade, bem como testes regulares e inspeção durante a construção. Soleimanbeigi et al. (2021) avaliaram as propriedades mecânicas e hidráulicas do RAP compactado em muros de contenção reforçados com geossintéticos. De acordo com os autores, o RAP se mostrou uma alternativa viável para a utilização em muros de contenção e os resultados sugerem que o RAP utilizado era comparável, em comportamento geotécnico, a uma areia.

Dager et al. (2023) fizeram uma revisão das propriedades geotécnicas de RAP para reuso em infraestrutura e compilaram diversos trabalhos de caracterização geotécnica do RAP. O estudo apresenta trabalhos realizados com RAP, sendo este classificado de duas formas: não processado e processado. O primeiro é obtido ao fim da fresagem do pavimento e apresenta grãos que podem exceder 50 mm. Já o processado pode ser peneirado, triturado ou moído até se obter a granulometria desejada para a aplicação. Neste caso, as partículas são menores que 25 mm. Nas pesquisas de Mijic et al. (2020), Morro (2021) e Arulrajah et al. (2013) o RAP foi classificado, pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), como areia bem graduada (SW). Já nas pesquisas de Cosentino et al. (2003), Titi et al. (2019) e Mousa, et al. (2021), o RAP foi classificado como pedregulho bem graduado (GW). Essas variações nas classificações refletem a diversidade nas metodologias de processamento e caracterização, indicando que o RAP pode ter diferentes propriedades físicas dependendo do seu tratamento e da composição do pavimento original.

Dentre todos estes trabalhos supracitados, nenhum deles caracterizou e avaliou o uso da fração areia do RAP (grãos menores que 2 mm) na expectativa de viabilizar a utilização da fração fina do RAP. Assim, se faz necessário a existência de um processo de reciclagem desse material para ampliar seu reuso, e a fração areia

do RAP pode vir a ser uma das mais nobres e aplicáveis na engenharia. Neste contexto, este estudo tem como objetivo investigar as propriedades geotécnicas da areia de RAP, em comparação a uma areia natural de mesma granulometria, de modo a fornecer informações para potencial reuso do fresado RAP para aplicações alternativas de infraestrutura geotécnica e de transporte.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

Na presente pesquisa, o RAP é oriundo de uma rodovia no distrito Bueno de Andrada, pertencente a cidade de Araraquara-SP. A Figura 1 apresenta o aspecto do fresado no local de coleta, na condição não processada ou bruto. Após a coleta, o material foi processado e separado por meio de peneiramento para se obter apenas a fração areia, no presente caso, o passante na peneira #10 (2,0 mm). Como referência de comportamento de material arenoso, utilizou-se resultados de uma areia fina de construção. A composição granulométrica da areia natural foi alterada para alcançar a mesma distribuição granulométrica da areia de RAP. A Figura 2 apresenta as imagens da areia de RAP e da areia natural e também imagens obtidas por meio do uso de lupa digital. As amostras utilizadas para os ensaios geotécnicos foram homogêneas manualmente, secas ao ar antes de qualquer ensaio e mantidas em ambiente com temperatura controlada.



Figura 1. Local de coleta do RAP.



Figura 2. Materiais utilizados: areia natural à esquerda e areia de RAP à direita.

2.2. Ensaio de Caracterização

Os ensaios de caracterização da areia de RAP foram feitos juntamente com os ensaios da areia, a fim de ter para comparação um material similar (mesma granulometria), cujos resultados são amplamente estudados na literatura. Para a obtenção da curva granulométrica dos materiais, realizou-se o ensaio de peneiramento seguindo a NBR 7181 (ABNT, 2018). Foram avaliadas a curva granulométrica da areia, do RAP antes do processamento e da areia de RAP. Em posse da areia e da areia de RAP, foram realizados os ensaios de massa específica dos sólidos (NBR 6458, ABNT 2016), de determinação do índice de vazios (NBR 16840, ABNT 2020), de compactação (NBR 7182, ABNT 2016), na energia de Proctor Normal, de cisalhamento direto não inundado (ASTM D3080/D3080M, 2011) com tensões normais de 25 kPa à 400 kPa e, por fim, de permeabilidade à carga constante (NBR 13292, ABNT 2021). Com as características obtidas em ensaios anteriores, como massa específica dos sólidos e índice de vazios, calculou-se a massa necessária de cada material considerando a compactidade relativa de 95%. Os corpos-de-prova dos ensaios de cisalhamento direto foram moldados em anéis redondos com 6,31 cm de diâmetro com 2,84 cm de altura e cisalhados com velocidade constante de 0,75 mm/s. Previamente à fase de cisalhamento, os corpos-de-prova foram adensados. Tanto para o RAP não beneficiado como para a areia de RAP, realizou-se o ensaio de teor de ligante pelo método de extração por ignição em forno mufla (ASTM D6307, 2019).

3 RESULTADOS

A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas do RAP, areia de RAP e da areia natural. Verifica-se que os três materiais são bem graduados. A granulometria da areia foi composta de maneira a se aproximar da curva da areia de RAP. Neste caso, nota-se que o objetivo foi atingido e ambas curvas ficaram próximas. Além disso, a partir das curvas, foi possível definir a porcentagem de cada fração granulométrica dos materiais, a classificação granulométrica, bem como Coeficiente de Uniformidade e Coeficiente de Curvatura.

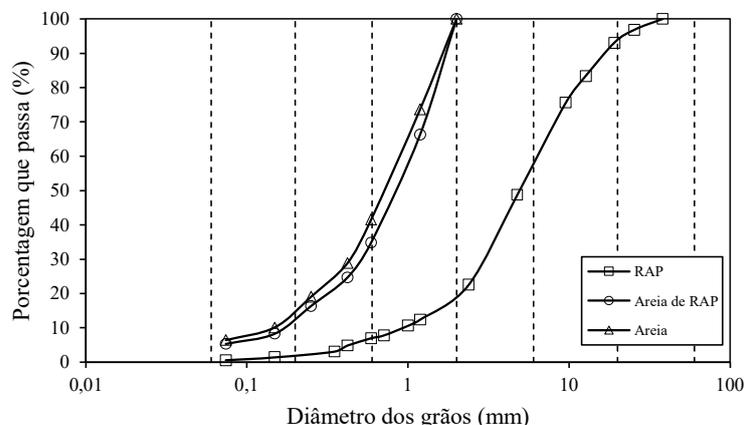


Figura 3. Curvas de distribuição granulométrica dos materiais.

A Tabela 1 apresenta os resultados da classificação granulométrica dos materiais. Embora a areia e a areia de RAP possuam a mesma granulometria e apresentem valores de coeficientes de uniformidade e curvatura próximos, os valores de índices de vazios máximos e mínimos observados foram diferentes. Os resultados dos ensaios demonstraram valores de índice de vazios máximo de 0,64 para a areia e 0,93 para a areia de RAP, enquanto os valores de índice de vazios mínimo foram, respectivamente, de 0,42 e 0,63. Isto pode ser explicado pela diferença no formato, textura dos grãos e densidade. A areia de RAP, por se tratar de um agregado envolto de ligante, apresenta maior textura e irregularidades em sua superfície. Ainda, pode-se notar a o menor peso específico dos sólidos da areia de RAP, o que contribui para a alteração do índice de vazios.

Os resultados de massa específica dos sólidos foram de 2,64 g/cm³ para a areia e 2,57 g/cm³ para a areia de RAP. O valor para a areia de RAP está dentro do intervalo encontrado na literatura por Hubler et al. (2023) para amostras de RAP, que é de 2,25 a 2,77 g/cm³. Este valor é mais baixo quando comparado a agregados

típicos, como é o caso da areia ensaiada nesta pesquisa. Esta diferença pode ser justificada pela presença de ligante no entorno do agregado, uma vez que o ligante é mais leve que o agregado.

Tabela 1. Resumo das propriedades dos materiais avaliados na pesquisa.

Parâmetro	RAP	Areia	Areia de RAP
Classificação SUCS	GW	SW	SW
D ₁₀	0,90	0,15	0,18
D ₃₀	3,00	0,42	0,50
D ₆₀	5,50	0,90	1,00
Coefficiente de Uniformidade (C _u)	6,11	6,00	5,56
Coefficiente de Curvatura (C _c)	1,82	1,31	1,39
Fração areia fina (%)	2,0	14,0	12,0
Fração areia média (%)	5,0	26,0	24,0
Fração areia grossa (%)	12,0	60,0	64,0
Fração pedregulho fino (%)	40,0	-	-
Fração pedregulho médio (%)	35,0	-	-
Fração pedregulho grosso (%)	6,0	-	-
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,57	2,64	2,57
Coefficiente de permeabilidade (m/s)	-	8,15 x 10 ⁻⁴	8,84 x 10 ⁻⁴

Sobre os ensaios para determinação do teor de ligante no RAP não processado e areia de RAP, foram verificados teores de ligante diferentes para o RAP não processado e para a areia de RAP sendo de 4,99% e 9,05%, respectivamente. Essa diferença se dá pois, quanto menor os grãos, maior a superfície específica, ou seja, a proporção de ligante comparado a própria massa do grão é maior, que é o caso da fração areia do RAP. Ainda, espera-se que aglomerados de ligante possa formar grãos de diâmetros de areia, compondo a estrutura da areia de RAP.

O valor de coeficiente de permeabilidade da areia de RAP encontrado foi muito próximo ao da areia natural (valores dispostos na Tabela 1). O valor para a areia de RAP, nas condições de compactação utilizadas neste estudo – compactidade relativa de 95% –, está dentro dos valores reportados por Dager et al. (2023) para amostras de RAP, que variam de 3,5x10⁻⁷ a 1,5x10⁻³ m/s, com média de 4,1x10⁻⁴ m/s. A amplitude do intervalo de valores encontrados se dá pelas diferenças nos métodos laboratoriais utilizados e também a variabilidade nas granulometrias das amostras de RAP.

Com a realização do ensaio de compactação, realizado sem reuso de material, obteve-se a curva de compactação disposta na Figura 4. Ambos os materiais apresentaram similar valor de teor ótimo de umidade de 7,0%. A areia apresentou maior valor de massa específica aparente seca máxima (1,87 g/cm³), quando comparada à areia de RAP (1,60 g/cm³). Isto porquê os valores de índice de vazios mínimos são inversamente proporcionais ao valor da massa específica aparente seca máxima. Neste caso, o índice de vazios mínimo da areia é menor do que o valor para a areia de RAP. O valor de massa específica aparente seca máxima da areia é maior que da areia de RAP como esperado, já que sua massa específica dos sólidos também é maior.

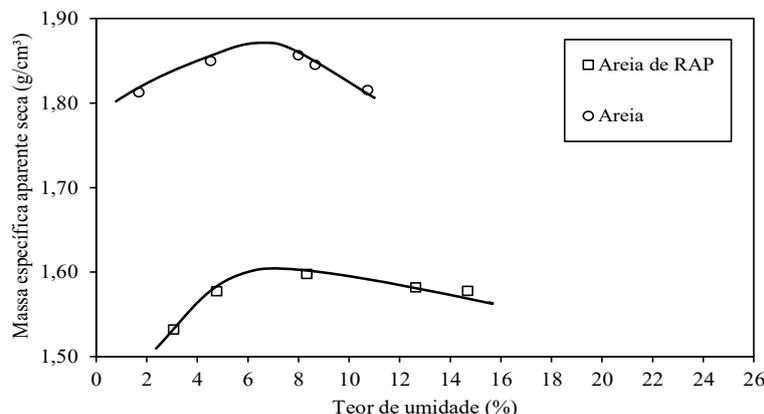


Figura 4. Comparação entre as curvas de compactação de areia de RAP e areia natural.

É também importante salientar que a massa específica dos grãos de areia de RAP se mostraram inferiores à da areia natural. Embora tenha ocorrido a alteração na massa específica seca máxima, não foi notada nenhuma alteração significativa com relação a umidade ótima da areia de RAP em relação a areia natural. Os valores de massa específica aparente seca máxima e teor de umidade obtidos estão dentro do intervalo reportado na literatura por Soleimanbeigi et al. (2021) para amostras de RAP, sendo de 1,39-1,96 g/cm³ para a massa específica aparente seca máxima e 5,2-8,8 % de teor de umidade ótimo. Ressalta-se que estes valores são para RAPs com maiores granulometrias, com intervalo de D₆₀ de 4,5-7,8 mm, sendo superiores ao D₆₀ da areia de RAP usada nesta pesquisa.

A Figura 5 resume, comparativamente, os resultados dos ensaios de cisalhamento direto das areias. Especificamente, as Figuras 5a e 5b apresentam as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal. Nota-se nas figuras que, para a areia natural, as curvas apresentam um pico evidente (Figura 5a), comportamento já esperado para uma areia altamente compacta. Isso foi observado para todos os níveis de tensões aplicados no confinamento. A areia de RAP, no entanto, apresentou curvas do tipo residual, porém com uma tensão cisalhante de pico não muito evidente, demonstrando um comportamento de uma areia pouco compacta. O conjunto de resultados apresentados até o momento traz evidências quanto a dificuldade do material de RAP de se compactar em relação a areia natural. No entanto, avaliando os resultados de variação volumétrica durante o cisalhamento (Figuras 5c e 5d), nota-se que ambos os materiais apresentam comportamento dilatante para maiores deslocamentos. A diferença está no fato de que a areia do RAP apresenta comportamento compressivo para baixos deslocamentos, resultante da dificuldade que os grãos de RAP apresentam de se rearranjar, o que não foi observado para a areia natural. Mas é importante observar que, mesmo com índice de vazios superior ao da areia natural, os valores máximos de variação volumétrica positiva (ou seja, expansão), foram superiores aos da areia natural o que pode ser atribuído à maior angularidade dos grãos de RAP.

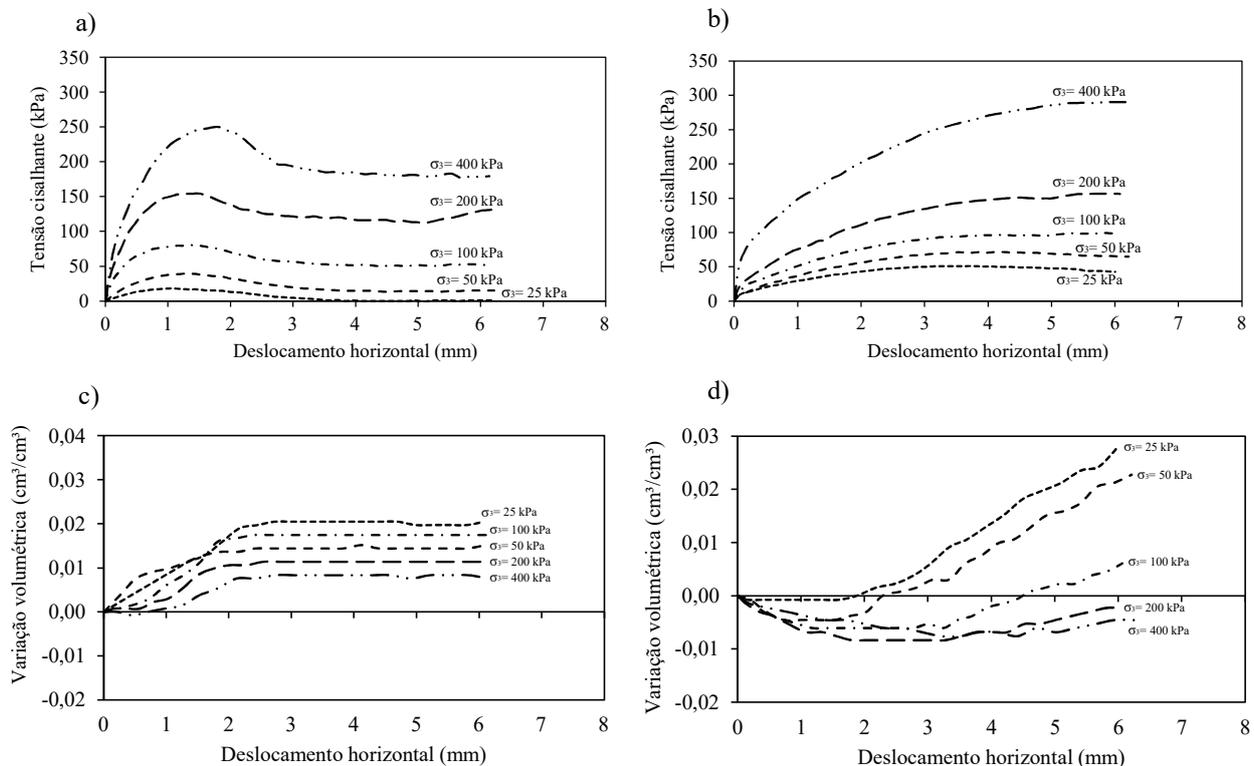


Figura 5. Resultados do ensaio de cisalhamento direto: (a) tensão cisalhante vs. deslocamento da areia; (b) tensão cisalhante vs. deslocamento da areia de RAP; (c) variação volumétrica vs. deslocamento da areia e (d) variação volumétrica vs. deslocamento da areia de RAP.

Na Figura 6, a partir das envoltórias de resistência da areia natural (Figura 6a) e da areia de RAP (Figura 6b), foi possível obter o ângulo de atrito e a coesão dos materiais. De acordo com os resultados de envoltória de resistência, a principal diferença entre ambos os materiais está na presença de coesão. Enquanto a areia

apresentou coesão nula e ângulo de atrito de $33,6^\circ$, o RAP apresentou coesão de 37 kPa e ângulo de atrito de $32,3^\circ$. No caso da areia de RAP, a presença de coesão em um material granular (com a mesma granulometria de uma areia) pode ser justificada pela presença de ligante. Isto também faz com que, para maiores tensões normais, o RAP atinja maiores valores de resistência ao cisalhamento, devido à cimentação e melhor arranjo dos grãos com a presença do ligante. A areia de RAP apresentou melhores resistências ao cisalhamento, demonstrando-se um potencial material geotécnico. No entanto, ainda carece de estudos para complementar a caracterização da areia de RAP, como ensaios para medir os parâmetros hidráulicos, mecânicos e avaliar se pode haver quebra de grãos e perda de finos.

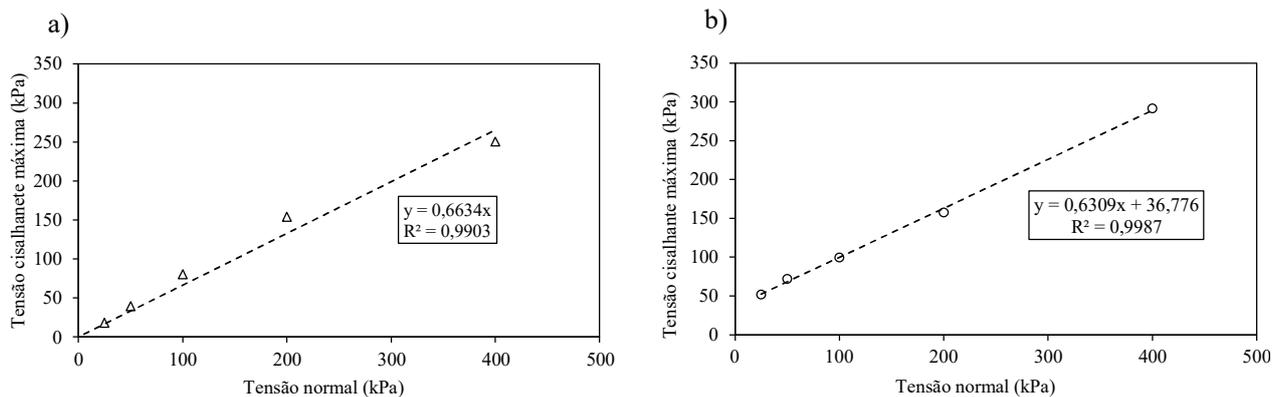


Figura 6. Envolvória de resistência: (a) areia, (b) areia de RAP.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho caracterizou, por meio de ensaios tradicionais da mecânica dos solos, uma fração do resíduo reciclado, a fração areia do asfalto fresado (areia de RAP). Para fins comparativos, os resultados dos ensaios geotécnicos realizados da areia reciclada de RAP foram comparados a uma areia natural quartzosa com idêntica distribuição granulométrica.

Os resultados dos ensaios mostraram que a areia reciclada de RAP, embora tenha a mesma granulometria de uma areia convencional natural, apresentou comportamento diferente. O fato do peso específico dos grãos da areia de RAP ser mais leve que da areia natural, associado a maior angularidade da areia de RAP, resultou em um prejuízo no arranjo das partículas quando compactado, aumentando o índice de vazios mínimo. Isso resultou em um comportamento distinto de resistência ao cisalhamento em que a areia de RAP se comportou como uma areia pouco compacta, enquanto que a areia natural se mostrou com comportamento semelhante a uma areia muito compacta. No entanto, apesar dessas diferenças, ambos materiais apresentam semelhante comportamento de mobilização de resistência atritiva com ângulos de atrito de 32° e 33° , para a areia de RAP e natural respectivamente. Por outro lado, a areia de RAP apresentou uma parcela coesiva que coloca o RAP como um material mais resistente que a areia natural. Tal parcela coesiva é atribuída à presença de ligante, o que não é encontrado em materiais granulares. Atrelado ao comportamento mecânico está a condutividade hidráulica medida de $8,84 \times 10^{-4}$ m/s para a areia de RAP e $8,15 \times 10^{-4}$ para a areia natural, demonstrando o excelente comportamento de drenagem desse material alternativo.

Esta pesquisa indica que a areia de RAP é um material com grande potencial para ser reutilizada em obras geotécnicas se devidamente caracterizada. No entanto, ressalta-se a necessidade de investigação mais aprofundada com relação ao comportamento a longo prazo. Essa é uma primeira etapa de um grande projeto de pesquisa em execução pelo grupo de geotecnia da Universidade Federal de São Carlos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecimentos a Universidade Federal de São Carlos e ao LABGEO/UFSCar. Os autores agradecem ao DR4 - Araraquara do DER-SP por ceder o RAP para este estudo e à Usina de Asfalto Bandeirantes pelos ensaios de caracterização do ligante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arulrajah, A.; Piratheepan, J.; Disfani, M. M.; Bo, M.W. (2013) Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. *J. Mater. Civ. Eng.* 25, 1077–1088.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). 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 águas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. *Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 13292. *Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16840. *Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2011). ASTM D3080/D3080M: *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*.
- ASTM International (2019). ASTM D6307: *Standard test method for asphalt content of asphalt mixture by ignition method*.
- Cosentino, P.J.; Kalajian, E.H.; Shieh, C.S.; Mathurin, W.J.K.; Gomez, F.A.; Cleary, E.D.; Treeratrakoon, A. (2003) *Developing specifications for using recycled asphalt pavement as base, subbase or general fill materials, Phase II, Final Report*. Florida Department of Transportation: Tallahassee, FL, USA.
- Dager, C. H.; Morro, R. H.; Hubler, J. F.; Sample-Lord, K. M. (2023) Review of geotechnical properties of reclaimed asphalt pavement for reuse in infrastructure. *Geotechnics*, 3, 21-42.
- European Asphalt Pavement Association – EAPA. (2022) *Asphalt in figures*. Disponível em: <<https://eapa.org/asphalt-in-figures/>>. Acesso em: 03 mar. 2023.
- Federal Highway Administration (2009). *GEC 11 - Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes: Volume I and II*. Reports no. FHWA-NHI-10-024, FHWA-NHI-10-025. U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- Hubler, J.; Sample-Lord, K.; Dager, C. (2023) *Beneficial Reuse of Reclaimed Asphalt Pavement in Geotechnical Infrastructure*. Final Technical Report. Pennsylvania Department of Transportation: Harrisburg, PA USA
- Mijic, Z.; Dayioglu, A.Y.; Hatipoglu, M.; Aydilek, A.H. (2020) Hydraulic and environmental impacts of using recycled asphalt pavement on highway shoulders. *Constr. Build. Mater.* 234.
- Morro, R.H. (2021) *Characterization of reclaimed asphalt pavement in Pennsylvania and evaluation of its use in geotechnical infrastructure applications*. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Villanova University, PA, USA.
- Mousa, E.; El-Badawy, S.; Azam, A. (2021) Evaluation of reclaimed asphalt pavement as base/subbase material in Egypt. *Transp. Geotech.* 26.
- Soleimanbeigi, A., Ozocak, A., Li, B., Akmaz, E., Dayioglu, A. Y., Tanyu, B. F., Aydilek, A. H. and Likos, W. J. (2021). Mechanical and hydraulic compatibility of RAP with geosynthetics used in MSE walls. *Geosynthetics International*. [<https://doi.org/10.1680/jgein.21.00016>]
- Tarsi, G.; Tataranni, P.; Sangiorgi, C. (2020) The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: a review. *Materials*, 13.
- Titi, H. H.; Tabatabai, H.; Ramirez, J.; Sooman, M. (2019) *Evaluation of recycled base aggregates*. Wisconsin Department of Transportation, Madison, WI, USA.
- Ungureanu, D.; Taranu, N.; Hoha, D.; Zghibarcea, S.; Isopescu, D. N.; Boboc, V.; Oprisan, G.; Scutaru, M. C.; Boboc, A.; Hudisteanu, I. (2020). Accelerated testing of a recycled road structure made with reclaimed asphalt pavement material. *Construction and Building Materials*, 262.