

USO DE RESÍDUOS NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO: ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

Amanda Mendes Arruda ¹

Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça ²

RESUMO

A eficiência econômica na execução de pavimentos está diretamente associada ao uso de materiais locais, principalmente na construção das camadas de suporte, como a camada de base. Para melhorar as propriedades desses solos e garantir o atendimento às especificações técnicas, a estabilização surge como uma solução amplamente empregada. O estudo de materiais residuais tais como a cinza volante, escória de alto forno, borracha de pneus usados e o produto obtido a partir da fresagem dos revestimentos asfálticos, denominado pavimento asfáltico recuperado ou RAP (sigla em inglês para *Reclaimed Asphalt Pavement*), como estabilizantes de solos tem se mostrado de relevante interesse, dado que a destinação final destes materiais representa um desafio socioambiental na sociedade moderna. Lima *et al.* (2023) estudaram o comportamento mecânico de um solo laterítico granular estabilizado com RAP e observaram que sua adição proporcionou melhorias de módulo de resiliência e deformação permanente. Silva (2018) analisou o comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso com adição de resíduo de pneus e resíduo de construção e demolição (RCD), e observou que este tipo de resíduo permite absorver a energia de deformação aplicada aos solos, além de aumento da resistência ao cisalhamento, coesão, ângulo de atrito. Portanto, a estabilização de solos com materiais residuais, como RAP, borracha de pneus e RCD, apresenta-se como uma estratégia viável tanto técnica quanto economicamente, promovendo melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos solos. Além disso, essa abordagem contribui para a sustentabilidade ambiental ao reduzir o descarte inadequado de resíduos, alinhando-se às demandas socioambientais contemporâneas. Dessa forma, a utilização desses materiais não apenas otimiza o desempenho dos pavimentos, mas também reforça a importância de práticas mais sustentáveis na engenharia geotécnica.

Palavras-chave: Resíduos, Estabilização, Solos, Pavimentação.

INTRODUÇÃO

Os pavimentos asfálticos são formados por quatro camadas principais: o revestimento asfáltico, a base, a sub-base e o reforço do subleito (BERNUCCI, 2022). As três últimas camadas desempenham uma função estrutural, pois ajudam a dissipar as tensões a que o revestimento está sujeito. A mecânica dos pavimentos é responsável por projetar adequadamente a espessura dessas camadas e a combinação dos materiais que as

¹ Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, amandamarruda@outlook.com;

² Doutora pelo Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG ana.duartemendonca@gmail.com;



compõem, com o objetivo de garantir um pavimento que suporte tensões e deformações dentro dos limites adequados.

A execução econômica dos pavimentos depende do uso de materiais locais para a construção das camadas de suporte, especialmente a camada de base. Dado que o Brasil é um país com grande diversidade, frequentemente são encontrados solos com desempenho limitado, em função da baixa capacidade de suporte. Assim, no intuito de incrementar as propriedades destes solos e garantir que eles atendam às especificações de projeto, a estabilização é uma técnica amplamente utilizada (BISWAL *et al.*, 2018; FARIAS, 2023; PORTELINHA *et al.*, 2012).

A cal hidratada e o cimento Portland são considerados excelentes estabilizantes químicos de diversos tipos de solo. De forma geral, a cal proporciona ganhos de resistência, além da redução do índice de plasticidade, do potencial de expansão e da densidade dos solos estabilizados. O cimento, por sua vez, promove ganho de resistência e melhoria das características plásticas do material, além do enquadramento do solo em faixas granulométricas específicas. O estudo de materiais residuais, tais como a cinza volante, escória de alto forno, borracha de pneus usados, *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), entre outros, como estabilizantes de solos tem se mostrado de relevante interesse, dado que a destinação final destes materiais representa um desafio socioambiental na sociedade moderna (CENTOFANTE, 2016; FARIAS, 2023; JIMÉNEZ *et al.*, 2022).

Lima *et al.* (2023) estudaram o comportamento mecânico de um solo laterítico granular com teores de 0%, 25% e 50% de RAP, através dos ensaios de deformação permanente e módulo de resiliência e observaram que a adição do RAP ao solo proporcionou melhorias nestas propriedades.

Silva (2018) analisou o comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso com adição de resíduo de pneus e resíduo de construção e demolição (RCD), e observou que este tipo de resíduo permite a capacidade de absorver a energia de deformação aplicada aos solos, além de aumento da resistência ao cisalhamento, coesão, ângulo de atrito.

O resíduo de pneus e o RAP têm como origem compostos de hidrocarbonetos, provenientes da destilação fracionada do petróleo. A dificuldade de degradação desses materiais no meio ambiente está ligada à natureza de sua composição química, que os tornam mais duráveis e resistentes à biodegradabilidade, ensejando muitas vezes no acúmulo na natureza proveniente da má destinação final destes resíduos. Sendo assim, é



latente necessidade de utilização técnicas especiais de reciclagem ou destinação adequada para mitigar os impactos ambientais.

Este trabalho objetiva identificar, por meio de revisão bibliográfica, resíduos industriais recentemente estudados para estabilização de solos, avaliando o desempenho mecânico das misturas e os benefícios ambientais inerentes à sua aplicação.

METODOLOGIA

O presente artigo foi elaborado com base em uma revisão bibliográfica acerca do uso de resíduos na estabilização de solos destinados à pavimentação. A pesquisa teve caráter qualitativo, exploratório e descritivo, e foi possível analisar as principais contribuições científicas sobre o tema, identificando tendências e potencialidades relacionadas à aplicação de resíduos na pavimentação.

O levantamento bibliográfico foi realizado em bases de dados científicas nacionais e internacionais, complementado por dissertações, teses e normas relacionadas à pavimentação e à estabilização de solos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estabilização de solos é uma técnica de engenharia que visa modificar e melhorar as propriedades físicas e mecânicas de um solo – como reduzir sua expansibilidade e compressibilidade, aumentar sua durabilidade ou controlar sua permeabilidade – para torná-lo adequado às exigências de um projeto. Esse processo geralmente consiste na aplicação de um agente estabilizante, que pode ser um aditivo químico (como cimento, cal hidratada ou polímeros), materiais granulares, resíduos industriais ou mesmo energia dinâmica (GONDIM, 2008; FARIAS, 2023).

A escolha da técnica ideal vai além do desempenho técnico do solo. O sucesso de um projeto de estabilização depende de uma análise integrada que considere também a logística de aplicação, a disponibilidade local dos materiais estabilizantes, os custos envolvidos e, não menos importante, os impactos ambientais da técnica escolhida. Além disso, é comum que um processo de estabilização priorize algumas propriedades em detrimento de outras, uma vez que é muito difícil melhorar todas as características do solo simultaneamente.



A estabilização econômica de solos com cimento é condicionada pela textura do material, exigindo a presença de uma fração arenosa significativa. Solos com elevado teor de argila, por sua vez, demandam dosagens de cimento substancialmente maiores, o que eleva os custos e pode acentuar fenômenos indesejados, como a fissuração por retração (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Segundo Portelinha *et al.* (2012), a estabilização de solos lateríticos com cal e cimento constitui uma alternativa econômica e eficiente para a melhoria de solos empregados em pavimentação. O estudo avaliou propriedades físicas e mecânicas de um solo laterítico estabilizado convencionalmente com baixos teores de estabilizante. Os resultados mostraram que teores de 2% a 4% de cal ou cimento foram suficientes para promover significativa redução na plasticidade e na expansão, além de elevar a resistência à compressão simples e o módulo de resiliência. A ação conjunta da cal e do cimento favoreceu a formação de produtos cimentantes duráveis, conferindo maior estabilidade volumétrica e comportamento mecânico adequado às solicitações de tráfego.

Em investigação complementar sobre alternativas para solos finos, Tan *et al.* (2020) estudaram a estabilização de um solo laterítico com cal e caulim, constatando que a adição de 5% de cal foi suficiente para reduzir a retração e elevar a resistência do material.

Biswal *et al.* (2018) analisaram o comportamento mecânico de solos lateríticos estabilizados com cimento, verificando que a adição de pequenas quantidades desse ligante foi suficiente para transformar um solo granular em um material apto para uso em camadas estruturais de pavimentos. O estudo destacou ganhos expressivos em resistência à compressão simples e módulo de elasticidade, evidenciando que o desempenho das misturas está diretamente relacionado à proporção de cimento e ao grau de compactação. Além disso, os autores ressaltaram a relevância da microestrutura resultante das reações de hidratação, que proporcionam melhor coesão entre as partículas do solo e os produtos cimentantes.

A estabilização de solos com o uso de resíduos tem sido amplamente estudada como uma alternativa técnica e ambientalmente sustentável para a construção de pavimentos. Essa prática busca não apenas melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos solos, mas também reduzir a demanda por materiais convencionais e mitigar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos industriais e urbanos. Diversos estudos recentes exploram diferentes tipos de resíduos, desde ligantes hidráulicos e materiais fresados até resíduos de pneus e de construção, demonstrando



resultados promissores quanto à viabilidade de sua aplicação em camadas estruturais de pavimentos.

Lima *et al.* (2023) estudaram o comportamento mecânico de um solo laterítico misturado com RAP, visando avaliar o desempenho do compósito para possível aplicação em camadas granulares de pavimentos asfálticos, com foco para as análises de módulo de resiliência e deformação permanente. O estudo analisou três proporções de RAP (0%, 25% e 50%) e observou que a adição de 25% resultou no melhor comportamento tanto em termos de deformação, quanto na formação de fissuras. As misturas com RAP apresentaram maior módulo de resiliência e menor tendência à deformação plástica, o que indica melhor desempenho estrutural sob tráfego repetitivo. Além disso, o estudo aplicou o método mecanístico-empírico MeDiNa para simulação da resposta do pavimento para validar o uso de RAP nas camadas granulares do pavimento. Essa melhoria é atribuída à presença de agregados mais rígidos e partículas betuminosas que atuam como ligantes secundários, aumentando a rigidez e a durabilidade das camadas tratadas.

Jiménez *et al.* (2022), por sua vez, avaliaram o comportamento mecânico de um compósito formado por fibras de borracha provenientes de pneus inservíveis, melaço de cana-de-açúcar e argila caulinítica. O estudo teve como objetivo explorar alternativas ecológicas e de baixo custo para estabilização de solos, utilizando resíduos e subprodutos industriais. Os resultados experimentais revelaram que a adição de pequenas frações de fibra de borracha (0,1%) e melaço (2%) aumentou significativamente a resistência à compressão simples, de 1,42 MPa para até 2,04 MPa, além de melhorar a ductilidade e reduzir a absorção de água. O melaço atuou como agente aglutinante natural, promovendo ligações entre as partículas de solo e as fibras, enquanto a borracha contribuiu para maior flexibilidade e resistência ao impacto.

De forma semelhante, Silva (2018) investigou o comportamento hidromecânico de um solo arenoso-argiloso estabilizado com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição (RCD), com o objetivo de avaliar os efeitos dessas adições nas propriedades geotécnicas do material. O estudo mostrou que a incorporação de resíduos reduziu a densidade seca máxima e o potencial de expansão, ao mesmo tempo em que aumentou a resistência ao cisalhamento e a ductilidade do solo. Os resíduos de pneus proporcionaram maior flexibilidade e absorção de energia, enquanto o RCD contribuiu para o preenchimento dos vazios e a melhora da estabilidade estrutural.

CONSIDERAÇÕES FINAIS



A partir da revisão realizada, observou-se que a estabilização de solos destinados à pavimentação configura-se como uma prática essencial na engenharia rodoviária, especialmente em países como o Brasil, onde a variabilidade geotécnica e a disponibilidade de materiais adequados são fatores determinantes para a viabilidade técnica e econômica das obras.

A análise dos estudos revisados evidencia que o emprego de estabilizantes tradicionais, como o cimento Portland e a cal hidratada, continua sendo uma alternativa eficaz para a melhoria do comportamento mecânico e da durabilidade dos solos, promovendo o aumento da resistência, a redução da plasticidade e o controle da expansibilidade, no entanto, a crescente preocupação com os impactos ambientais e o elevado custo dos insumos convencionais têm impulsionado a busca por alternativas sustentáveis, destacando-se o uso de materiais residuais como agentes estabilizantes.

Resíduos industriais e urbanos, tais como o *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição (RCD), apresentam potencial significativo para substituição parcial de materiais convencionais, contribuindo não apenas para o desempenho técnico dos solos, mas também para a mitigação de passivos ambientais e a promoção da economia circular no setor da construção civil.

Os estudos analisados demonstram que a incorporação de RAP e resíduos de pneus pode resultar em melhorias relevantes nas propriedades geotécnicas dos solos, como aumento do módulo de resiliência, da resistência ao cisalhamento e da durabilidade, além de reduzir a suscetibilidade à deformação permanente. Tais resultados reforçam a viabilidade do reaproveitamento de resíduos como estratégia de estabilização de solos, desde que observadas as características físico-químicas dos materiais e as condições específicas de aplicação.

REFERÊNCIAS

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: FORMAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHEIROS**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2022. 750 p.

BISWAL, D. R.; SAHOO, U. C.; DASH, S. R. **MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CEMENT STABILISED GRANULAR LATERITIC**



SOILS FOR USE AS STRUCTURAL LAYER OF PAVEMENT. Road Materials and Pavement Design, v. 21, n. 5, p. 1201-1223. Informa UK Limited. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2018.1545687>.

CENTOFANTE, R. ESTUDO LABORATORIAL DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAL FRESADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE. 2016. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

FARIAS, M. L. A. ESTUDO E CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS FINOS, ARENOSOS E PEDREGULHOSOS NATURAIS E MELHORADOS COM LIGANTES HIDRÁULICOS PARA UTILIZAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS. 2023. 372 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2023.

GONDIM, L. M. ESTUDO EXPERIMENTAL DE MISTURAS SOLO-EMULSÃO APLICADO ÀS RODOVIAS DO AGROPÓLO DO BAIXO JAGUARIBE/ESTADO DO CEARÁ. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2008.

JIMÉNEZ, J.E.; VIEIRA, C.M. F.; COLORADO, H.A. COMPOSITE SOIL MADE OF RUBBER FIBERS FROM WASTE TIRES, BLENDED SUGAR CANE MOLASSES, AND KAOLIN CLAY. Sustainability 2022, 14, 2239. <https://doi.org/10.3390/su14042239>.

LIMA, L. B. F. de; SILVA, J. P. S.; REZENDE, L. R. de. INVESTIGATION OF RESILIENT MODULUS AND PERMANENT DEFORMATION OF TROPICAL SOIL WITH RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT. Transportation Geotechnics, [S.L.], v. 43, p. 101103, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101103>.



PORTELINHA, F. H. M.; LIMA, D. C.; FONTES, M. P. F.; CARVALHO, C. A. B. **MODIFICATION OF A LATERITIC SOIL WITH LIME AND CEMENT: AN ECONOMICAL ALTERNATIVE FOR FLEXIBLE PAVEMENT LAYERS**, 35(1), p. 51-63. Soils and Rocks, 2012, São Paulo. DOI: <http://dx.doi.org/10.28927/sr.351051>.

SILVA, A. C. da. **COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO DE UM SOLO ARENO-ARGILOSO ADICIONADO COM RESÍDUOS DE PNEUS E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**. 2018. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.

TAN, Y.; HU, Y.; CHEN, R.; SUN, W. (2020) **SHRINKAGE MECHANISM OF LATERITE MODIFIED BY LIME AND METAKAOLIN**. Advances In Civil Engineering, v. 2020, p. 1-9. Hindawi Limited. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2020/6347597>.

