



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Natanael Andrade De Sousa

Uso de materiais alternativos na estabilização de solos para fins de pavimentação: Uma
revisão sistemática da literatura

PAU DOS FERROS

2025

Natanael Andrade de Sousa

Uso de materiais alternativos na estabilização de solos para fins de pavimentação: Uma
revisão sistemática da literatura

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador Prof. Dr. Jose Daniel Jales Silva

Co-orientadora: Marília Cavalcanti Santiago,
Ma. Eng^a Civil.

PAU DOS FERROS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S725u Sousa, Natanael Andrade .
Uso de materiais alternativos na estabilização
de solos para fins de pavimentação: Uma revisão
sistemática da literatura / Natanael Andrade
Sousa. - 2025.
44 f. : il.

Orientador: José Daniel Jales Silva.
Coorientadora: Marília Cavalcanti Santiago.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2025.

1. Melhoramento de solo. 2. Resíduos. 3.
Estabilizantes. 4. Resistência mecânica. I. Silva,
José Daniel Jales , orient. II. Santiago, Marília
Cavalcanti , co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Natanael Andrade de Sousa

Uso de materiais alternativos na estabilização de solos para fins de pavimentação: Uma
revisão sistemática da literatura

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Defendida em: 31 / 07 / 2025

BANCA EXAMINADORA

José Daniel Jales Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Marília Cavalcante Santiago, Profa. Ma (EXTERNO)
Membro Examinador

Fabíola Luana Maia Rocha, Profa. Ma (UFERSA)
Membro Examinador

Vinícios Da Vince Ferreira, Eng (EXTERNO)
Membro Examinador

“É justo que muito custe o que muito vale”
Santa Tereza D’Ávila.

AGRADECIMENTOS

Começo esses agradecimentos falando de mim mesmo, se hoje estou aqui foi porque nunca faltou coragem e dedicação neste caminho percorrido, sei que não foi fácil, mas sei de tudo que abdiquei para chegar até aqui. Em muitos momentos a dúvida prevaleceu, porém, a minha força de vontade e perseverança não me fizeram desistir.

À Deus, por ser meu protetor em cada segundo vivido até aqui, e a proteção do meu Divino Espírito Santo para todas as minhas decisões.

Não posso deixar de agradecer a minha família que me apoiou desde o início a ir em busca dos meus sonhos e se fizeram fortes para ajudar, mesmo de longe, sei que cada um depositou a esperança em mim e com isso retribuirei da melhor forma possível.

Agradecer a minha Mãe (Sandra Maria de Sousa) que em todos os dias da minha vida foi guerreira em manter-se de pé na esperança desse momento. Ao meu Pai (Romério José de Andrade) que se fez presente em todos os momentos, apoiando em cada decisão. Ao meu Irmão (Bruno Andrade de Sousa) que foi protetor e ajudou em cada passo trilhado, ajudando em cada momento, até porque só nós sabemos o que já passamos até aqui.

A minha querida Avó (Maria de Lourdes Ferreira) que foi meu porto seguro e com certeza minha maior inspiração para tudo isso. A todos os meus Tios que ajudaram de diversas formas para que eu pudesse atingir essa conquista. Queria agradecer a minha namorada (Maria Izabela) por todo apoio dado até aqui, só você sabe o que passei e tive que abdicar para alcançar essa conquista.

Também queria deixar registrado meus agradecimentos a todos os meus amigos que se fazem presente diariamente comigo, que sempre apoiaram e não me deixaram fraquejar em muitos momentos, mostrando quem eu era e o profissional que estou me tornando.

Por fim ao meu orientador José Daniel por ter aceitado essa missão e ter me ajudado nesta última etapa, como também a professora Marília Cavalcante por pegar em minha mão e mostrar que mesmo na dificuldade podemos encontrar a melhor solução.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sistemática sobre o uso de materiais alternativos no melhoramento de solos aplicados à pavimentação. A pesquisa foi desenvolvida a partir de análises e resultados de trabalhos usando resíduos industriais, agrícolas e químicos, bem como estabilizantes tradicionais, com o intuito de avaliar suas influências nas propriedades geotécnicas do solo, como resistência à compressão simples, Índice de Suporte Califórnia e compactação. Foram selecionados treze estudos publicados nos últimos cinco anos (2020-2025), seguindo a metodologia de revisão sistemática da literatura, priorizando publicações em bases e bibliotecas científicas confiáveis. Os resultados mostraram que resíduos industriais, químicos e agrícolas podem melhorar a resistência do solo. Resíduos industriais como cinza de carvão e cal aumentaram a resistência à compressão simples (RCS) de 0,012 MPa para 0,036 MPa e o Índice de Suporte Califórnia (CBR) de 27% para 90%, enquanto a escória de aciaria aumentou o CBR de 32% para 127%. Resíduos químicos como pó de vidro aumentaram a resistência à compressão simples em até 100% e a resistência à tração em mais de 1000%, e a borracha aumentou o CBR de 1,53% para 2,5% e a RCS de 0,00293 MPa para 0,00372 MPa. Já os resíduos agrícolas, como casca de arroz com cimento, aumentaram a RCS de 0,242 MPa para acima de 1,3 MPa, e a cinza de bagaço de cana com cal aumentou o CBR de 40% para 83% e a RCS de 0,30 para 0,56 MPa. Os estabilizantes tradicionais, como cal e cimento, também apresentaram resultados consistentes, com aumentos significativos na resistência do solo. Além disso, foi possível comparar o desempenho dos resíduos alternativos com estabilizantes tradicionais, apontando vantagens técnicas relevantes. O estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre soluções mais sustentáveis e eficientes na engenharia de pavimentos, destacando o potencial do reaproveitamento de resíduos sólidos na infraestrutura viária.

Palavras-chave: melhoramento de solo; resíduos; estabilizantes; resistência mecânica.

ABSTRACT

This paper presents a systematic literature review on the use of alternative materials in soil improvement for paving. The research was developed based on analyses and results of studies using industrial, agricultural, and chemical wastes, as well as traditional stabilizers, to evaluate their influence on soil geotechnical properties, such as simple compressive strength, California Bearing Index, and compaction. Thirteen studies published in the last five years (2020-2025) were selected, following the systematic literature review methodology, prioritizing publications in reliable scientific databases and libraries. The results showed that industrial, chemical, and agricultural wastes can improve soil strength. Industrial wastes such as coal ash and lime increased simple compressive strength (SCR) from 0.012 MPa to 0.036 MPa and the California Bearing Index (CBR) from 27% to 90%, while steel slag increased CBR from 32% to 127%. Chemical residues such as glass powder increased compressive strength by up to 100% and tensile strength by over 1000%, while rubber increased CBR from 1.53% to 2.5% and RCS from 0.00293 MPa to 0.00372 MPa. Agricultural residues, such as rice husks with cement, increased RCS from 0.242 MPa to over 1.3 MPa, and sugarcane bagasse ash with lime increased CBR from 40% to 83% and RCS from 0.30 to 0.56 MPa. Traditional stabilizers, such as lime and cement, also showed consistent results, with significant increases in soil strength. Furthermore, it was possible to compare the performance of alternative residues with traditional stabilizers, highlighting significant technical advantages. The study contributes to the advancement of knowledge about more sustainable and efficient solutions in pavement engineering, highlighting the potential for reusing solid waste in road infrastructure.

Keywords: soil improvement; residues; stabilizers; mechanical strength.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RCC - Resíduos de construção civil

CBR - Índice de suporte Califórnia

UCS - Resistência à compressão simples

RCCr - Resíduos de construção civil reciclados

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

RCS - Resistência à compressão simples

RS - Revisão sistemática

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Camadas do pavimento flexível	16
Figura 2 - Fibras de coco (A), escória aciaria (B) e pó de vidro (C)	19
Figura 3 - Quantidade de artigos encontrados por biblioteca	30
Figura 4 - Processo da primeira triagem	31
Figura 5 - Processo da 2 triagem	32

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Etapas a serem seguidas na metodologia	24
Quadro 2 - Trabalhos usadas para o estudo	26
Quadro 3 - Bibliotecas usadas como base de pesquisa	29
Quadro 4 - Palavras chaves usada para formalizar busca	29
Quadro 5 - Características dos Trabalhos selecionados	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3	REFERÊNCIAL TEÓRICO	16
3.1	Pavimentação e suas camadas.....	16
3.2	Solos utilizados em pavimentação	16
3.3	Melhoramento e estabilização de solos	17
3.4	Melhoramento com estabilizantes tradicionais	17
3.5	Parâmetros de compactação do solo melhorado após adição de materiais	18
3.6	Resíduos como alternativa sustentável	18
3.7	Aditivos e resíduos aplicados no solo	19
3.8	Sustentabilidade na engenharia de pavimentos	20
3.9	Desafios técnicos no uso de resíduos	21
4	METODOLOGIA	22
4.1	Bases de dados e bibliotecas utilizadas	22
4.2	Palavras-chave utilizadas	22
4.3	Critérios de inclusão	23
4.4	Critérios de exclusão	23
4.5	Seleção e organização dos trabalhos	23
4.6	Etapas da revisão.....	23
4.7	Resumir e Explicar os Resultados	28
4.7.1	Análise Estatística dos Documentos Encontrados.....	28

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	Análise Estatística dos Trabalhos Selecionados	29
5.2	Síntese dos trabalhos encontrados	32
5.2.1	Resíduos Industriais.....	33
5.2.2	Resíduos Químicos.....	33
5.2.3	Resíduos Agrícolas	34
5.2.4	Estabilizantes tradicionais.....	35
6	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço das cidades e a crescente demanda por infraestrutura viária, torna-se cada vez mais necessário adotar práticas sustentáveis na engenharia civil. A construção e manutenção de pavimentos, tradicionalmente construídas por materiais como brita, cimento e cal, enfrenta hoje desafios relacionados tanto ao custo elevado quanto aos impactos ambientais provocados pela extração e processamento desses recursos (Bardini et al., 2023).

Nesse cenário, o uso de materiais alternativos, especialmente aqueles provenientes de resíduos industriais, agrícolas e urbanos, surge como uma alternativa viável e promissora. Além disso, essa prática contribui para a gestão adequada de resíduos, evitando sua disposição inadequada em aterros e promovendo o reaproveitamento de subprodutos (Lima; Silva; Moura, 2020).

Pesquisas recentes indicam que resíduos como cinzas volantes, escórias de alto-forno, resíduos de construção civil (RCC) e até borracha de pneus moída têm demonstrado bons resultados na estabilização e melhoria do comportamento de solos utilizados em obras de pavimentação (Camelo, 2018). Esses materiais, além de promoverem benefícios técnicos, também se alinham às diretrizes do desenvolvimento sustentável e da economia circular (Camelo, 2018).

A utilização de resíduos como materiais alternativos na pavimentação não apenas reduz a extração de recursos naturais, mas também oferece uma solução para o problema do descarte inadequado de resíduos sólidos. Camelo (2018) demonstrou que a incorporação de resíduos de construção civil melhora significativamente as características dos solos, tornando-os mais adequados para aplicações em pavimentação.

Além disso, a adoção de práticas sustentáveis na pavimentação contribui também para a mitigação dos impactos ambientais no que se refere à redução das emissões de gases de efeito estufa e a conservação dos recursos naturais.

Portanto, este estudo se propõe a realizar de uma revisão sistemática sobre o uso de materiais alternativos na pavimentação, permitindo consolidar o conhecimento existente, identificar lacunas na pesquisa e orientar futuras investigações e práticas na área.

Assim sendo, este trabalho se justifica pela importância técnica, ambiental e social do tema, além da necessidade de reunir, comparar e interpretar os conhecimentos já existentes. A intenção é tornar essas informações mais acessíveis e úteis, contribuindo tanto para o avanço das pesquisas acadêmicas quanto para a aplicação prática no setor produtivo.

Nesse contexto, esta revisão sistemática da literatura tem como objetivo reunir, analisar e discutir os principais estudos relacionados ao uso de materiais alternativos no melhoramento de solos para pavimentação. Busca-se, com isso, compreender quais resíduos têm se mostrado mais relevantes, os efeitos provocados nas propriedades do solo, bem como as principais vantagens e limitações associadas a essa prática.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma revisão sistemática da literatura sobre o uso de materiais alternativos no melhoramento de solos para pavimentação, com ênfase nos tipos de resíduos empregados, nos efeitos provocados nas propriedades do solo, na viabilidade técnica das soluções adotadas e em seu potencial de contribuição para a preservação ambiental.

2.2 Objetivos específicos

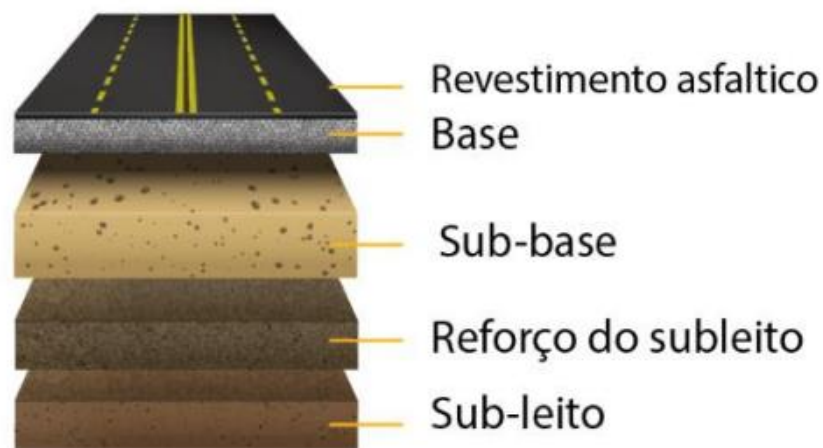
- Identificar os principais materiais alternativos utilizados na estabilização de solos para fins de pavimentação.
- Classificar os materiais alternativos quanto a sua origem (industrial, agrícola ou química).
- Analisar os efeitos de adição de resíduos sólidos nas propriedades geotécnicas dos solos, com ênfase na resistência compressão simples (RCS), Índice de Suporte Califórnia (CBR) e parâmetros de compactação.
- Destacar os principais benefícios técnicos, econômicos e ambientais da aplicação de resíduos como estabilizantes em obras de pavimentação.

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 Pavimentação e suas camadas

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), a pavimentação é definida como a superestrutura composta por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentadas sobre o terreno de fundação (subleito), visando proporcionar conforto e segurança aos usuários e garantir a durabilidade da via. Cada camada possui funções específicas de suporte, drenagem e resistência ao carregamento repetido.

Figura 1 - Camadas do asfalto



Fonte: Silva e Pinheiro (2025).

Segundo Bernucci et al. (2022), o desempenho do pavimento está diretamente associado à qualidade e ao preparo das suas camadas, em especial o subleito, que é a fundação sobre a qual todas as demais estruturas se apoiam.

3.2 Solos utilizados em pavimentação

Os solos utilizados em obras de pavimentação devem apresentar propriedades geotécnicas adequadas, tais como um CBR satisfatório, grau de compactação ideal, plasticidade controlada e distribuição granulométrica compatível com as exigências do projeto. De acordo com a ABNT NBR 7180 (2016), os ensaios de caracterização do solo são

essenciais para avaliar sua aptidão para aplicação nas diferentes camadas estruturais do pavimento.

A classificação dos solos pode ser realizada por meio de sistemas como o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) ou o HRB (Highway Research Board). De acordo com Mascarenhas (2016), os solos granulares apresentam melhor desempenho para camadas de suporte, enquanto os solos finos, como os argilosos, tendem a ser mais suscetíveis à ação da umidade e à deformação.

3.3 Melhoramento e estabilização de solos

O melhoramento ou estabilização de solos visa alterar as propriedades físicas e químicas dos solos naturais para que estes atendam aos requisitos técnicos de resistência, durabilidade e estabilidade do solo a ser trabalhado. As técnicas tradicionais de estabilização envolvem o uso de agentes ligantes como cal, cimento Portland, cimento asfáltico, entre outros.

De acordo com Sampaio (2019), a escassez de solos com características adequadas para pavimentação impulsionou a busca por processos de estabilização, permitindo o uso de solos com características desfavoráveis. Nesse contexto, a estabilização de solos em estradas visa conferir resistência às ações erosivas naturais e aos esforços causados pelo tráfego intenso de veículos, podendo ser definida como qualquer modificação artificial do solo para possibilitar seu uso em pavimentos rodoviários. Existem quatro modalidades de estabilização de solos, classificadas de acordo com a energia aplicada no processo: mecânica, elétrica, térmica e química, sendo as estabilizações mecânica e química as mais comumente empregadas em estradas devido à sua eficácia em melhorar a capacidade de suporte e resistência do solo.

3.4 Melhoramento com estabilizantes tradicionais

O uso de estabilizantes tradicionais, como a cal e o cimento Portland, constitui uma prática amplamente consolidada na engenharia geotécnica, especialmente em obras de infraestrutura voltadas à pavimentação. Esses materiais vêm sendo amplamente empregados devido à sua comprovada eficácia na modificação das propriedades físicas e mecânicas dos solos, promovendo maior resistência, estabilidade e durabilidade às camadas do pavimento (Campolina et al., 2023).

A estabilização com cal é recomendada principalmente para solos argilosos, pois promove reações químicas como a floculação e a Pozolânica, que reduzem a plasticidade do solo, aumentam sua resistência à compressão e melhoram significativamente o desempenho frente à umidade. A partir disso, observa-se uma menor suscetibilidade à deformação (Azevedo, 2025).

Já o cimento Portland é frequentemente utilizado em solos arenosos ou pouco coesivos, por sua capacidade de formar ligações rígidas entre as partículas do solo, criando uma estrutura mais compacta e resistente. Segundo Aragão et al. (2022), a hidratação do cimento promove a formação de compostos cimentantes que elevam significativamente a resistência à compressão simples (UCS) e o Índice de Suporte Califórnia (CBR), tornando o solo mais apto ao tráfego e às cargas cíclicas impostas pela operação viária.

3.5 Parâmetros de compactação do solo melhorado após adição de materiais

A compactação do solo com uso de resíduos é uma técnica usada na engenharia geotécnica, principalmente quando se busca melhorar a densidade e a capacidade de suporte de camadas de solo destinadas à pavimentação. Um estudo realizado por Tonial e Bezerra (2024) avaliou a influência da adição de resíduos de construção civil (RCD) em amostras de solo compactado. Os resultados indicaram que a incorporação de 25 % a 50 % de RCD aumentou significativamente a densidade seca máxima do solo, especialmente em condições de umidade elevada. Essa melhoria demonstrou impactos positivos na resistência à penetração e no CBR, sugerindo sua aplicabilidade em projetos de baixo custo e impacto ambiental reduzido.

3.6 Resíduos como alternativa sustentável

Com o crescente foco em questões ambientais e da busca por soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis, o uso de materiais alternativos — como resíduos industriais, agrícolas e químicos — tem se destacado como uma estratégia promissora para o melhoramento de solos em obras de pavimentação.

A aplicação desses resíduos contribui não apenas para a redução do impacto ambiental, mas também para o aproveitamento de materiais que, de outra forma, seriam descartados inadequadamente. Segundo Teixeira, Cardoso e Neto (2018), resíduos como cinzas, escórias siderúrgicas, fibras vegetais e efluentes químicos têm mostrado bom

desempenho em testes laboratoriais para estabilização de solos, melhorando propriedades como CBR e resistência à compressão simples.

- Resíduos agrícolas: casca de arroz, bagaço de cana, fibras de coco (figura 2A);
- Resíduos industriais: escória de aciaria, cinzas de carvão, pó de siderurgia (figura 2B);
- Resíduos químicos: pó de vidro, lodos de estação de tratamento, cinzas de incineração química (figura 2C).

Figura 2 - Fibras de coco (A), escória aciaria (B) e pó de vidro (C)



Fonte: Rocha (2025); Galindo (2022); Dornelles e Correa (2024).

3.7 Aditivos e resíduos aplicados no solo

Nos últimos anos, a estabilização de solos com materiais alternativos tem ganhado destaque na engenharia de pavimentos, não apenas pelo seu potencial técnico, mas também pelos benefícios econômicos e ambientais que proporciona. A utilização de resíduos industriais, agrícolas e químicos na melhoria das propriedades do solo e trouxe um cenário diferente quanto ao uso de estabilizantes tradicionais.

A adição de aditivos e resíduos aplicados ao solo tem como principal característica modificar as propriedades físico-químicas com o propósito de melhorar seu desempenho estrutural, especialmente quando aplicado em camadas de pavimentação. Esses materiais podem atuar tanto por mecanismos químicos, como ocorre em reações pozolânicas e de hidratação, quanto por mecanismos físicos, como no caso dos reforços fibrosos ou materiais granulares.

Além dos estudos selecionados nesta pesquisa, outros autores também têm obtido resultados relevantes sobre a temática, um exemplo é o a cinza de cavaco de eucalipto, resíduo da indústria de celulose, apresentou resultados expressivos quando incorporada a solos lateríticos colapsáveis. Segundo Vicente et al. (2021) a adição de apenas 10% desse

material foi capaz de elevar o CBR em mais de 200%, além de reduzir significativamente a expansibilidade do solo. A melhora na performance técnica foi acompanhada de uma proposta economicamente viável, considerando-se a disponibilidade do resíduo e seu baixo custo.

Outro estudo relevante é o de Lima et al. (2020), que investigou a aplicação de resíduos cerâmicos em misturas com solo arenoso laterítico. Os resultados indicaram um aumento de até 50% no CBR em amostras com adição superior a 50% de resíduo. Além do ganho em desempenho mecânico, o aproveitamento desses materiais — frequentemente descartados de forma inadequada — mostrou-se uma alternativa promissora para a execução de camadas de sub-base em vias urbanas de baixo volume de tráfego.

O uso de agregados reciclados da construção civil misturados com cimento também tem sido amplamente estudado. Orioli, Santos e Cordeiro (2024) demonstrou que a adição de até 30% de resíduos de concreto moído, combinada com 5% de cimento, resultou em ganhos significativos na resistência à compressão simples (UCS) e no módulo de resiliência do solo tratado, alcançando valores de até 627 MPa. Os resultados comprovam que a substituição parcial de materiais convencionais por reciclados não compromete a qualidade técnica e ainda contribui para a sustentabilidade da obra.

Galindo (2022) reforça essa perspectiva ao investigar a incorporação de resíduos de construção civil reciclados (RCCr) e finos de escória de aciaria elétrica (FEAE). A combinação desses materiais levou ao aumento expressivo do CBR (até 212%) e do módulo de resiliência (em 120%), evidenciando que é possível desenvolver misturas com desempenho compatível com as exigências do DNIT (2010) para camadas de base e sub-base.

3.8 Sustentabilidade na engenharia de pavimentos

A preocupação com o meio ambiente e o uso racional dos recursos naturais tem proporcionado a engenharia civil a busca por alternativas mais sustentáveis. O aproveitamento de resíduos sólidos na pavimentação se alinha diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela ONU, especialmente o ODS 9, que visa promover a infraestrutura sustentável, e o ODS 12, que trata da redução na geração de resíduos por meio de reciclagem e reuso.

Além de reduzir o descarte inadequado de resíduos, essas práticas também contribuem para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa, principalmente quando há substituição parcial de aglomerantes tradicionais como o cimento. De acordo com Velten et

al. (2006), o uso de escória de alto-forno em solos argilosos reduziu em até 30% a demanda por cimento Portland, refletindo diretamente na redução da pegada de carbono do projeto.

Segundo estudo de Silva e Pimentel (2021) o reaproveitamento de resíduos sólidos – sejam industriais, urbanos ou agrícolas – na composição de camadas de solo ou misturas asfálticas reduz significativamente a demanda por recursos naturais, contribuindo para a economia circular e a minimização de emissões de CO₂.

Estudos sobre rejeitos de mineração por exemplo, demonstram que sua incorporação ao solo-cimento não apenas melhora o comportamento mecânico dos pavimentos, mas também diminui o descarte de resíduos em barragens – um problema ambiental relevante no Brasil (Oda et al., 2024).

Além disso, os pavimentos permeáveis, com uso de materiais reciclados como resíduos de concreto, mostram bom desempenho hidráulico e suporte adequado, servindo como solução de drenagem urbana e mitigação de enchentes (Carvalho et al., 2022).

3.9 Desafios técnicos no uso de resíduos

Apesar das vantagens ambientais e econômicas, o uso de resíduos como aditivos para solos apresenta desafios técnicos significativos. A variabilidade na composição dos resíduos, a falta de padronização em sua granulometria e a necessidade de tratamentos prévios são fatores que podem comprometer a eficácia da aplicação, caso não sejam devidamente controlados.

Além disso, a disponibilidade local dos resíduos e a logística de transporte também influenciam na viabilidade técnica e econômica do processo.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se em uma revisão sistemática da literatura existente sobre o tema empregado, a fim de atingir os objetivos mencionados acima. Essa revisão foi realizada no período de fevereiro de 2025 até julho de 2025, tendo como foco principal do uso dos Materiais alternativos para fins de pavimentação observando os impactos ambientais positivos de seu uso como também uma solução para o avanço das obras de pavimentação.

Este trabalho foi desenvolvido por meio de uma revisão sistemática, com o objetivo de identificar e analisar estudos (últimos 5 anos) que abordam trabalhos relacionados ao tema proposto. A metodologia da revisão sistemática empregada seguiu etapas de buscar por outros estudos de forma clara e organizada, a fim de garantir a confiabilidade das informações e a relevância dos dados analisados.

4.1 Bases de dados e bibliotecas utilizadas

As buscas foram realizadas em repositórios acadêmicos e bibliotecas digitais confiáveis, com ênfase em publicações científicas nas áreas de engenharia civil, geotecnia e materiais sustentáveis. As fontes consultadas incluíram:

- Google Acadêmico;
- Periódicos CAPES;
- SciELO (Scientific Electronic Library Online);
- Repositórios Institucionais de universidades como UNESP, UFPE, UFBA, UFRN, UFERSA entre outras.

4.2 Palavras-chave utilizadas

Para a seleção dos estudos, foram utilizados os seguintes descritores:

- Melhoramento de solo;
- Pavimentação;
- Resistência;
- Resíduos agrícolas;
- Resíduos industriais;
- Resíduos químicos;

- Estabilização de solos.

Também foram feitas buscas equivalentes em inglês (*soil improvement, resistance, pavement, waste materials*) quando necessário.

4.3 Critérios de inclusão

Foram incluídos na revisão os seguintes tipos de trabalhos:

- Publicações dos últimos 5 anos (2020 a 2024);
- Artigos científicos, dissertações ou TCCs completos;
- Trabalhos com abordagem experimental ou técnica;
- Estudos que apresentam o uso de resíduos aplicados ao melhoramento de solos especificamente para fins de pavimentação.

4.4 Critérios de exclusão

Foram excluídos:

- Trabalhos sem acesso ao conteúdo completo;
- Publicações feitas antes do período de 5 anos (anteriores a 2020);
- Artigos que tratem do uso de resíduos apenas em concreto ou outros materiais, sem aplicação direta no solo;
- Estudos sem metodologia clara ou que não apresentem resultados técnicos sobre o desempenho do solo.

4.5 Seleção e organização dos trabalhos

Com base nos critérios estabelecidos, foram selecionados treze trabalhos acadêmicos, sendo 3 de cada categoria de resíduo, 2 sobre cal e 2 sobre cimento para comparativo:

- Resíduos industriais: escória de aciaria, cinzas de carvão, pó de siderurgia;
- Resíduos químicos: pó de vidro, borracha de pneu, lodos de estação de tratamento, cinzas de incineração;
- Resíduos agrícolas: casca de arroz, bagaço de cana, fibras de coco.

4.6 Etapas da revisão

A revisão bibliográfica foi realizada com o intuito de apresentar as investigações sobre o tema, aplicando algumas ferramentas na análise dos dados obtidos. Para tanto seguiu-se as orientações para a produção da revisão sistemática as seguintes etapas importantes: definição do tema, escolha de bases de dados adequadas, formulação de estratégias de busca, e delimitação da questão de pesquisa (seguindo o modelo PICO: população, intervenção, comparação e resultados). Segundo o protocolo de Cronin, Ryan e Coughlan (2008) foram rigorosamente seguidos o seguinte procedimento:

A revisão foi realizada conforme as seguintes etapas:

- Levantamento dos trabalhos com base nas palavras-chave e critérios definidos;
- Leitura exploratória dos resumos e palavras-chave para seleção preliminar;
- Classificação dos estudos conforme o tipo de resíduo utilizado e o tipo de solo avaliado;
- Organização dos dados em quadros comparativos, incluindo as propriedades analisadas (como CBR, resistência à compressão, compactação).

O quadro 1 mostra as etapas que foram seguidas para a seleção dos trabalhos estudados, onde o mesmo visa mostrar como se deu o passo a passo para a escolha dos 13 trabalhos.

Quadro 1 - Etapas a serem seguidas na metodologia

Etapas	Desenvolvimento	Ferramentas / Base de dados	Nº de trabalhos
Definição de Protocolos	-Período;2020-2025. -Tipos de estudo: Artigos, dissertações e TCCs completos. -Tema-Alvo: Melhoramento de solos para pavimentação (resíduos ou estabilizantes).	-	68 trabalhos identificados
Estratégia de busca	-Palavras-Chaves principais e combinações em português/inglês: “Melhoramento de solo” “Estabilizantes”, “Pavimentação” “Resíduos industriais/químicos/ agrícolas” “cal”, “cimento”, “CBR”, “UCS”, “compaction”.	Google Acadêmico, SciELO, Periódicos CAPES, ResearchGate, repositórios institucionais (UFPE, UTFPR, UFSC, UFRSA)	68 trabalhos identificados

Seleção dos trabalhos identificados	-Leitura de título, resumo de palavra-chave. -Exclusão de duplicatas e publicações sem texto completo.	Mendeley/Planilha Excel	41 trabalhos permanecem
Aplicação dos critérios	-Inclusão: Publicações entre 2020-2025. Foco em solo para pavimentação. Dados encontrados e relatados. - Exclusão: Uso apenas com concreto. Resíduos de construção civil (RCC). Carência de dados.	Leitura dos trabalhos completos	19 trabalhos elegíveis
Avaliação de elegibilidade	Verificação aprofundada de métodos, tipo de solo, ensaios, (CBR, UCS, compactação, Atterberg), clareza nos resultados.	Checklist em planilha	13 estudos aprovados
Organização dos trabalhos	Agrupamento por categoria de material: Resíduos industriais (3) Resíduos químicos (3) Resíduos agrícolas (3) Cal (2) Cimento (2)	Planilha com (Colunas, Autor/Ano, Solo, Material Ensaio, Resultados)	Planilha final pronta contendo (19 trabalhos)

Fonte: Autoria Própria (2025).

O quadro 2 a seguir apresenta os trabalhos selecionados após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão definidos na metodologia. Nela, são detalhados os principais aspectos de cada estudo, incluindo o tipo de resíduo utilizado, o solo analisado, as propriedades avaliadas e as melhorias observadas. Esse levantamento sistemático permitiu compreender os efeitos reais da incorporação de diferentes resíduos no desempenho geotécnico de solos para pavimentação.

Quadro 2 - Trabalhos usados para o estudo

Tipo de Resíduo	Autor / Ano	Resíduo Utilizado	Tipo de Solo	Propriedades Avaliadas	Melhorias Observadas
Industrial	Silva (2022)	Cinzas de carvão mineral e cal	Solo arenoso	RCS e CBR	Os corpos de prova moldados com a mistura M1 (contendo 50% de solo e 50% de cinza) foram rompidos sem imersão e, como resultado, obteve-se um valor de RCS de 0,028 MPa. Já os corpos de prova contendo a mistura M2, (49% de solo, 49% de cinza e 2% cal), também rompidos sem imersão, apresentaram um valor de RCS de 0,036 MPa.
Industrial	Schneider et al. (2024)	Escória de Aciaria	Solo argiloso	CBR	Os 100% de escoria resultou em CBR de 127%, muito superior ao solo natural (32%).
Industrial	Campolina et al. (2023)	Pó de alto-forno e escória de aciaria	Solo argiloso	Absorção de água e resistência à compressão	Cerca de 8% de resíduo teve aumento de 15% na resistência à compressão. Já os teores acima de 10% não são adequados para o solo testado.
Químico	Muchinski (2021)	Pó de vidro moído	Solo argiloso	Plasticidade, resistência à compressão e tração	A análise dos corpos de prova com 90 dias de cura úmida mostrou um comportamento semelhante aos demais, com pouco ganho de resistência com 3% de cal, mas um ganho superior a 1000% com 10% de cal, e a adição de pó de vidro resultou em um ganho de resistência médio de 75% em relação às misturas de solo e cal.
Químico	Rocha, Anjos e Sobral (2021)	Borracha de pneu	Solo arenoso	RCS, CBR e Teor	Com isso foi possível verificar que a quantidade de teor de borracha influenciou na resistência do solo, a amostra A85, com teor de 15% de borracha, em que obteve maior resistência a compressão comparada às demais e CBR de 2,5%. Logo, A85 variou em relação ao solo natural em 26,93 %.

Químico	Coelho et al. (2015)	Lodo de ETA	Solo argiloso e argiloso	Compactação, resistência à compressão, CBR	O lodo reduziu o CBR (argiloso: 18,6% → 10,7%; arenoso: 10,9% → 4,6%) e aumentou a expansão. Com 10% de cimento, o argiloso atingiu RCS de 0,53 MPa e o arenoso 2,70 MPa.
Agrícola	Menezes (2020)	Casca de arroz e cimento portland	Argila arenosa	Resistência à compressão e ao cisalhamento	A adição de 5% de casca de arroz diminuiu a resistência à compressão simples, Já a adição de 5% de cimento Portland resultou em grande ganho de resistência (de 242 kPa para mais de 1300 kPa em 14 dias).
Agrícola	Lima et al. (2023)	Cinza de Bagaço de cana-de-açúcar	Solo laterítico	CBR, Resistência à compressão simples, Compactação	Observou-se aumento de 51,8% no CBR (de 40% para 83%) e de 46,4% na resistência à compressão simples (de 0,30 para 0,56 MPa) com a adição de 5% de cinza + 2% de cal.
Agrícola	Almeida et al (2024)	Fibras de coco tratadas	Areno-siltoso	Resistência, impermeabilização, cisalhamento	A menor tensão principal em um estado de tensão triaxial $\sigma_3=50\text{kPa}$ o solo puro rompeu a 188,8 kPa, enquanto a mistura sem tratamento 314,2 kPa. Para a tensão triaxial $\sigma_3=200\text{ kPa}$, os valores de ruptura foram de 494,9 kPa e 751,3 kPa.
Cal	Telino (2023)	Cal	Argiloso	pH, compactação, RCS	Para corpos de prova rompidos com 28 dias a RCS passou de 76,9 kPa para 166,5 kPa.
Cal	Melo Filho (2023)	Cal e cinza volante	Solos finos	Limites de Atterberg, compactação, CBR	Solo fino com cal + cinza volante: CBR subiu de 20% (solo natural) para 215–256% (5–10% cal), e a expansão caiu de 0,53% para 0,03–0,05%.
Cimento	Santos e Caldeira (2021)	Cimento	Solo laterítico	Compactação, (RCS), (CBR)	A incorporação de 5% e 7% de cimento argiloso elevou o CBR de 12,3% para valores entre 90,5% e 106,8%, A resistência à compressão simples alcançou 1,52 MPa (5%) e 1,74 MPa (7%).
Cimento	Oliveira e Araújo (2023)	Cimento	Silto-argiloso	Compactação, RCS e CBR	Com a adição de 8%, a resistência atingiu 2,1 MPa, tornando viável o uso em vias de baixo volume de tráfego.

Fonte: Autoria Própria (2025).

4.7 Resumir e Explicar os Resultados

Essa etapa consistiu em uma análise detalhada e abrangente de cada estudo, por meio de uma leitura crítica e interpretação cuidadosa das publicações selecionadas. O objetivo foi identificar os principais modelos e abordagens referentes ao uso de resíduos para o melhoramento do solo em pavimentação, considerando como essa prática é abordada em diferentes contextos de pesquisa ao redor do mundo. Além disso, foi dedicada uma seção específica para a discussão dos resultados obtidos na revisão sistemática (RS), com ênfase nas principais tendências, desafios e oportunidades relacionadas à aplicação desses resíduos na pavimentação.

4.7.1 Análise Estatística dos Documentos Encontrados

A análise estatística e discursiva é realizada com os artigos selecionados durante a Revisão sistemática (RS), logo após a conclusão do procedimento da RB descrito anteriormente. Para a análise estatística, os artigos são organizados em um quadro contendo informações essenciais, como título, ano de publicação, tipo de pesquisa, metodologia utilizada. A partir dessa organização, foram elaborados gráficos que representam visualmente essas categorias, acompanhados de observações e comentários críticos sobre os dados categorizados.

Na análise discursiva, adota-se uma abordagem qualitativa, na qual cada artigo é lido integralmente. Os principais argumentos e contribuições qualitativas são extraídos e destacados para uma análise mais aprofundada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Estatística dos Trabalhos Selecionados

A revisão analisou uma série de trabalhos acadêmicos relacionados à aplicação de Resíduos aplicados no solo para fins de pavimentação. Os resultados e análises dos dados obtidos com as ferramentas metodológicas descritas no capítulo anterior são apresentados neste capítulo.

Sendo assim, conforme o quadro 3, os estudos foram realizados nos bancos de dados:

Quadro 3 - Bibliotecas usadas como base de pesquisa

Nº	Base / Biblioteca
1	Google Acadêmico
2	SciELO
3	Periódicos CAPES
4	Research Gate
5	Science Direct
6	Repositórios institucionais (UFPE, UTFPR, UFSC, UFERSA.)

Fonte: Autoria Própria (2025).

Visto isso, conforme mencionado anteriormente, em cada banco de dados, foram usadas palavra-chave que facilitam a busca, com isso, apresento a seguir o quadro 4 que mostram as palavras chaves usadas em português como também em inglês, a fim de delimitar o tema em questão e trazer consigo um melhor resultado.

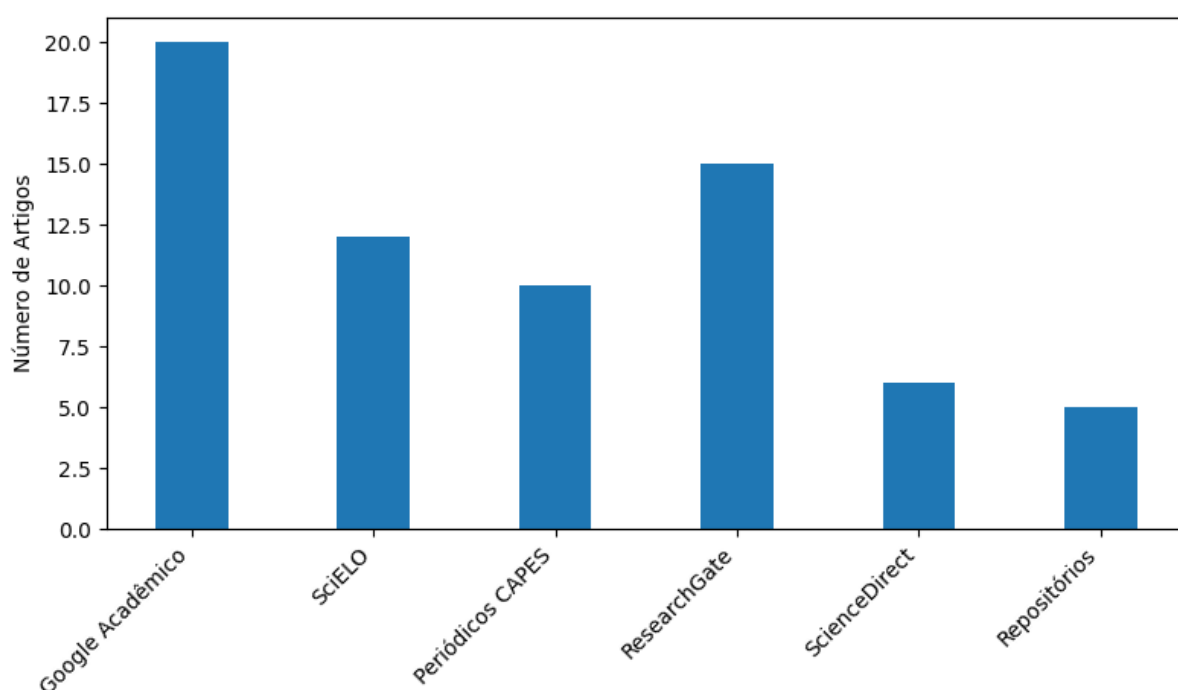
Quadro 4 - Palavras chaves usada para formalizar busca

Palavras-Chave (PT)	Palavras-Chave (EN)
melhoramento de solo	soil improvement
estabilização	stabilization
pavimentação	pavement
resistência	strength
resíduos industriais	industrial waste
resíduos agrícolas	agricultural waste
resíduos químicos	chemical waste
cal	lime
cimento	cement

Fonte: Autoria Própria (2025).

Conforme mencionado, o primeiro passo da revisão sistemática consiste em um levantamento geral da literatura disponível sobre a temática proposta, utilizando as bases de dados listadas no quadro 3 e aplicando as palavras-chave definidas, conforme demonstrado no quadro 4. O retorno inicial desse levantamento é um quantitativo geral de estudos, de forma que não considera de forma qualitativa, já que a seleção inicial é baseada apenas na correlação com os termos de busca, caracterizando-se como uma primeira triagem, conforme pode ser observado na figura 3.

Figura 3 - Quantidade de artigos encontrados por biblioteca

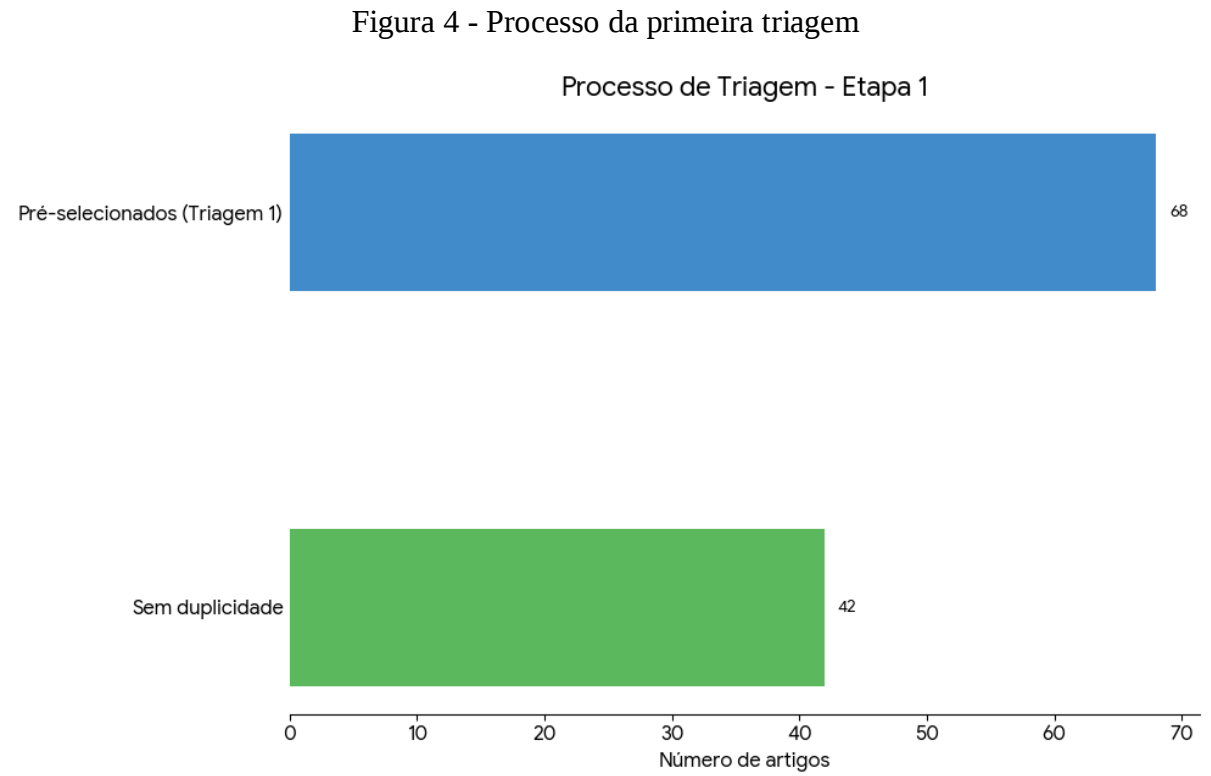


Fonte: Autoria Própria (2025).

Como resultado da aplicação dos meios de pesquisa, foram obtidos 68 experimentos. Desses, 39,7% no caso 27 trabalhos, com isso eram artigos repetidos, ou seja, estavam presentes na mesma base de dados várias vezes.

Esse processo resultou em um total de 41 trabalhos únicos. Esse índice de repetição é comum em cada base, o que justifica a necessidade de realizar verificações para eliminar duplicidades e garantir a exclusividade dos artigos analisados em cada base respectiva. Portanto, é necessário realizar uma segunda triagem. Esta etapa tem como objetivo identificar a duplicidade, mas não na mesma base de dados.

Em vez disso, buscamos verificar a repetição dos trabalhos selecionados na primeira triagem entre as diferentes bases pesquisadas, sendo assim, a figura 4, traz consigo uma síntese dos resultados obtidos.



Fonte: Autoria Própria (2025).

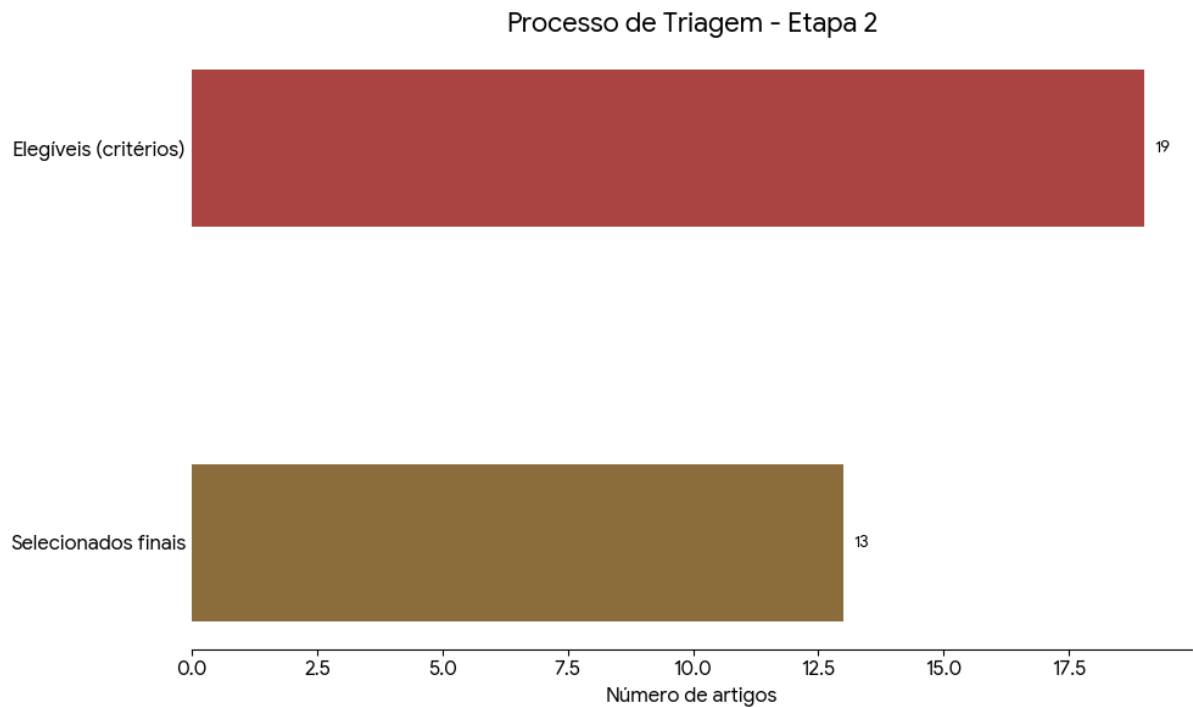
Os dados acima mostram o total de trabalhos selecionados inicialmente e a partir da primeira triagem teve uma redução para 41 trabalhos para ser feito análise e que atendessem aos critérios propostos.

Com isso, a primeira triagem devolveu um total de 41 trabalhos e após a segunda análise criteriosa, foi retirado 53,7%, no caso 22 desses foram removidos, onde os mesmos não atendiam aos critérios de inclusão e exclusão selecionados na metodologia e que ainda existiam duplicidade entre as bases de dados.

Sendo assim, foram feitas as devidas remoções dos mesmos, resultando-se em um total de 19 trabalhos selecionados para próxima análise.

Após o processo de triagem, restaram 19 trabalhos que atendiam aos critérios propostos até o momento como mostra a figura 5.

Figura 5 - Processo da 2 triagem



Fonte: Autoria Própria (2025).

Contudo, após uma leitura criteriosa dos mesmos, foi identificado que 6 desses estudos correspondendo a 31,6% do total selecionado apresentavam metodologias incoerentes e resultados que não atendiam aos critérios estabelecidos para a pesquisa. Essa análise resultou em uma nova redução, deixando um total final de 13 trabalhos para um estudo aprofundado.

Pode-se afirmar que, após a aplicação dos critérios estabelecidos, a pesquisa resultou em um total final de 13 trabalhos, os quais foram lidos integralmente e analisados conforme os parâmetros definidos, considerando também sua relevância para a temática proposta. Vale destacar que esta pesquisa é do tipo qualitativa, cujo objetivo principal é destacar a importância e relevância dos estudos selecionados.

5.2 Síntese dos trabalhos encontrados

A utilização de resíduos como alternativa para a estabilização de solos em pavimentação tem se consolidado nas últimas décadas, especialmente diante da crescente demanda por soluções mais sustentáveis na engenharia civil. No entanto, apesar do potencial observado, muitos estudos ainda precisam de validações em campo e apresentam limitações quanto à utilização dos ensaios, à variabilidade dos materiais e ao tempo de análise, dessa

forma, a busca do resíduo ideal e a sua potencialidade vai da busca pela aplicação correta e mais necessitada.

Os treze trabalhos selecionados representam diferentes abordagens no uso de resíduos industriais, químicos e agrícolas no melhoramento de solos para pavimentação. Cada estudo contribui com resultados relevantes, mas também evidencia desafios e limitações que precisam ser considerados.

5.2.1 Resíduos Industriais

No estudo de Silva (2022), observa-se que as amostras de teste foram moldadas com uma mistura M1 (50% solo e 50% cinza) e uma mistura M2 (49% solo, 49% cinza, 2% cal), resultando em um valor de RCS de 0,028 MPa. O estudo mostrou que o solo natural pode ser usado como sub-base de camadas de pavimento, enquanto as misturas M1 e M2 podem ser usadas para bases de pavimentos rodoviários de baixa, média e alta densidade. O uso de cinzas de carvão mineral na construção de pavimentos é viável tanto técnica quanto ambientalmente, pois estabilizam o solo e proporcionam uma destinação final adequada e sustentável.

Schneider et al. (2024) investigaram o uso da escória de aciaria e constataram melhorias em resistência mecânica e estabilidade volumétrica dos solos. Com 100% de adição, promoveu um aumento de 127% no CBR, demonstrando seu potencial como material.

Já Campolina et al. (2023) analisaram o reaproveitamento de resíduos siderúrgicos na produção de blocos de solo-cimento, com resultados promissores quanto à resistência à compressão com adição de 8% de pó de alto-forno e escória de aciaria elevou a resistência à compressão em 15%, onde ajuda na compactação do solo.

5.2.2 Resíduos Químicos

Resíduos químicos como a borracha de pneu, segundo Rocha, Anjos e Sobral (2021) O estudo constatou que a adição de borracha à mistura aumentou sua compressibilidade e resistência, com um aumento de 26,93% na resistência em comparação ao solo natural. A mistura com 10% de borracha foi a mais adequada para uso subleito. A quantidade de borracha utilizada, especificamente A85, apresentou a maior resistência, com uma variação de 26,93% em relação ao solo natural.

Já o pó de vidro moído Muchinski (2021), Finalizando as análises com os cp's de 90 dias de cura úmida, observa-se um comportamento semelhante aos demais: não há um ganho expressivo de resistência entre o solo puro e a adição de 3% de cal, o ganho de resistência entre o solo puro e o solo + 10% agora ultrapassa os 1000% e a adição de pó de vidro começa a resultar em um ganho de resistência mais expressivo do que observado anteriormente, sendo a média de 75% de ganho em relação as misturas de apenas solo e cal.

De acordo com Coelho et al. (2015), no qual, mostraram que o lodo reduziu o CBR tanto em solo argiloso (de 18,6% para 10,7%) quanto arenoso (de 10,9% para 4,6%), aumentando a expansão. No entanto, com adição de 10% de cimento, o solo argiloso atingiu resistência à compressão simples (RCS) de 0,53 MPa, enquanto o solo arenoso alcançou 2,70 MPa. Onde, tais resultados sugerem que o lodo pode ser utilizado na estabilização de solos de baixa coesão.

5.2.3 Resíduos Agrícolas

A pesquisa de Menezes (2020) investigou o uso da cinza da casca de arroz e de cimento Portland. Esse estudo constatou que a combinação proporciona bons índices de resistência e durabilidade, sendo uma alternativa sustentável ao uso exclusivo de cimento. com adição de 5% de casca de arroz diminuiu a resistência à compressão simples, Já a adição de 5% de cimento Portland resultou em grande ganho de resistência (de 242 kPa para mais de 1300 kPa).

De acordo com Lima et al. (2023), a combinação de 5% de cinza de bagaço de cana com 2% de cal melhorou significativamente as propriedades do solo laterítico, aumentando o CBR em 51,8% e a resistência à compressão simples em 46,4%. Esses resultados demonstram o potencial da utilização conjunta de cinza e cal para estabilização de solos.

Por fim, o estudo de Almeida (2024) sobre a aplicação de fibras de coco tratadas aponta vantagens importantes, No tempo zero, imediatamente após a moldagem, todos os compósitos com 1% de fibra apresentaram desempenho superior ao solo puro, apresentando ganhos expressivos, variando entre 40% e 90%, o que confirma o efeito inicial positivo da adição de fibras. Assim, observa-se que, logo após a compactação, todos os tratamentos promoveram aumento significativo da tensão desviadora, sempre superior a 40% em comparação ao solo puro. A utilização de fibras de coco tratadas apresentou ganhos significativos, como maior resistência à tração e melhor desempenho frente às deformações.

Com 1,0% de fibras, observou-se aumento da resistência ao cisalhamento, maior ductilidade e melhor absorção de tensões, sobretudo em solos areno-siltosos.

5.2.4 Estabilizantes tradicionais

A partir disso, Telino et al (2023) avaliou a incorporação da cal elevou a RCS de 76,9 kPa para 166,5 kPa em 28 dias, além de aumentar a umidade ótima, reduzir o peso específico seco máximo, elevar o pH e favorecer a agregação do solo. Após esse período, a resistência manteve-se estável, indicando que a estabilização pode ser alcançada com 8% de cal.

Já Melo Filho (2023) investigou a estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão com a adição de cal. Foram realizados ensaios de limites de Atterberg, compactação, expansão, CBR. A adição de 7% de cal reduziu significativamente a expansão do solo e aumentou de até 232% na CBR.

Entretanto, Santos e Caldeira (2021) avaliou a estabilização de um solo laterítico com a adição de 5% e 7% de cimento. Os ensaios realizados incluíram compactação, resistência à compressão simples (RCS) e Índice de Suporte Califórnia (CBR). Os resultados mostraram que a adição de cimento resultou em altos valores de RCS e CBR, tornando o solo adequado para uso como base de pavimento.

E por fim, Oliveira e Araujo (2023), investigou a estabilização de um solo com a adição de cimento para fins de pavimentação. Os ensaios realizados incluíram compactação e RCS com solo melhorado com cimento, melhorando sua capacidade de suporte para vias que precisem de resistir a uma capacidade maior, então o uso do cimento e cal ajuda a melhorar o solo em questão. A seguir no quadro 5 veremos como se classificou cada trabalho.

Quadro 5- Características dos Trabalhos selecionados

Material	Compactação	CBR (%)	RCS	Teor (%)	CBR (%) com adição	RCS com adição	Energia de Compactação	Limites de Atterberg
Cinzas de carvão	Redução de umidade ótima	27%	0,012 MPa	50%	90%	0,028 MPa	Intermediária	Redução da plasticidade
Escoria de Aciaria	Aumento Densidade seca	32%	-	100%	127%		Modificado	Redução da plasticidade
Pó de alto-forno e escória de aciaria	Aumento Densidade	-	0%	08%	-	Ganho de 15%	Normal	Redução da plasticidade
Pó de vidro	Aumento umidade ótima	-	0%	08%		75 a 100%	Normal	Redução da plasticidade
Borracha	Aumento umidade ótima	1,53%	0,00293 MPa	15%	2,5%	0,00372 MPa	Normal	Baixa influência
Lodo da ETA	Aumento umidade ótima	18,6%	0%	4,6%/10%	10,7%	2,7Mpa	Normal	Redução da plasticidade
Cinza casca de arroz	Redução Densidade seca	-	189,04 kPa	05%	-	192,79 kPa	Normal	Redução da plasticidade
Bagaço da cana	Redução Densidade seca	40%	0,3MPa	05%	83%	0,56MPa	Modificado	Redução da plasticidade
Fibras de coco	Neutro	-	188,8KPa	1.0%	-	314.2KPa	Modificado	Baixa influência
Cal	Neutro	40%	0,3MPa	05%	83%	0,56MPa	Normal	Redução da plasticidade
Cal	Neutro	20%	-	05%	215%	-	Normal	Redução da plasticidade
Cimento	Densidade seca	12,3%	1,52MPa	7%	106,8%	1,77MPa	Normal	Redução da plasticidade
Cimento	Densidade seca	6%	1,58MPa	8%	12,6%	2.1MPa	Normal	Redução da plasticidade

Fonte: Autoria Própria (2025)

Conforme apresentado no Quadro 5, os estudos analisados mostraram resultados distintos de acordo com cada tipo de resíduo e a metodologia empregada. Observa-se que os resíduos industriais (como a escória de aciaria e o pó de siderurgia) e os estabilizantes tradicionais (cal e cimento) apresentam os maiores ganhos em termos de CBR e RCS, embora alguns trabalhos tenham se limitado a apenas uma das análises.

Nos resíduos industriais, Silva (2022) enfatizou sobre a adição de cinza ao solo que aumentou significativamente a RCS, passando de 0,012 MPa para 0,028 MPa na mistura M1. Já na adição de 2% de cal na mistura M2 resultou em um aumento ainda maior na RCS, alcançando 0,036 MPa. Além disso, o CBR passou de 27% para 90%. Esses resultados sugerem que a combinação de cinza de carvão e cal pode ser uma opção eficaz para melhorar a resistência do solo. Já Schneider et al. (2024) destacam a escória de aciaria, que apresentou incremento expressivo do CBR (32% para 127%), enquanto Campolina et al. (2023) avaliaram apenas a resistência à compressão de blocos com adição de pó de alto-forno e escória de aciaria, constatando ganhos da ordem de 15%, sem ensaios de CBR.

Entre os resíduos químicos, Muchinski (2021) observou que o pó de vidro melhorou significativamente a resistência à compressão simples (aumento de até 100%) e, sobretudo, a resistência à tração, com elevações superiores a 1000%, sem análise de CBR. Já Coelho et al. (2015) verificaram que o uso isolado do lodo de ETA reduziu o CBR, mas, quando combinado com 10% de cimento, houve elevação significativa da resistência à compressão. Além disso, Rocha, Anjos e Sobral (2021) revelaram que a amostra A85, contendo 15% de borracha, exibiu os melhores resultados, com resistência à compressão superior às outras amostras e um CBR de 2,5%, indicando uma variação de 26,93% em comparação ao solo natural. Além disso, notou-se que a compactação exigiu um aumento na umidade ótima, ao passo que os valores de referência variaram de 1,53% para 2,5% no CBR e de 0,00293 MPa para 0,00372 MPa na RCS após a incorporação do resíduo, evidenciando a contribuição da borracha para o desempenho do solo.

Nos resíduos agrícolas, os resultados mostraram ganhos mais modestos, mas relevantes. Menezes (2020) observou que a adição de 5% de casca de arroz reduziu inicialmente a resistência, mas a incorporação de 5% de cimento elevou a RCS de 0,242 MPa para valores acima de 1,3 MPa. Lima et al. (2023) identificaram que a combinação de cinza de bagaço de cana (5%) com cal (2%) elevou o CBR de 40% para 83% e a RCS de 0,30 para 0,56 MPa. Almeida et al. (2024) verificaram que a adição de 1% de fibra de coco, Sob a aplicação de 50 kPa, o solo natural rompeu a 188,8 kPa, enquanto a mistura sem tratamento

314,2 kPa. Já com 200 kPa, os valores de ruptura foram de 494,9 kPa e 751,3 kPa, respectivamente, embora não tenham sido realizados ensaios de CBR ou RCS.

Quanto aos estabilizantes tradicionais, os resultados foram consistentes com a literatura. Telino et al. (2023) reportou para corpos de prova rompidos com 28 dias da RCS a RCS passou de 76,9 kPa para 166,5 kPa com 8% de cal. Melo Filho (2023) observou elevação expressiva da RCS (0,092 para 0,306 MPa, aumento de 232%) e redução da expansibilidade em até 65%. Santos e Caldeira (2021) mostraram que a adição de 5% a 7% de cimento promoveu forte aumento no CBR (12,3% para valores entre 90,5% e 106,8%) e RCS (1,52 a 1,74 MPa). Oliveira e Araújo (2023) também confirmaram a eficácia do cimento, alcançando 2,10 MPa de resistência à compressão simples com 8% de adição, embora não tenham reportado valores de CBR.

De maneira geral, verifica-se que os estabilizantes tradicionais ainda apresentam os resultados mais consistentes, mas os resíduos industriais, químicos e agrícolas se mostram alternativas promissoras, especialmente quando associados a aditivos complementares, podendo contribuir para práticas mais sustentáveis em pavimentação.

6 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo avaliar, por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, a influência da adição de resíduos industriais, químicos, agrícolas e estabilizantes tradicionais sobre as propriedades geotécnicas de solos aplicados à pavimentação. A análise dos treze trabalhos selecionados permitiu identificar tendências claras quanto ao desempenho técnico dessas adições, principalmente nos parâmetros de compactação, resistência à compressão simples (RCS), Índice de Suporte Califórnia (CBR), plasticidade e estabilidade.

De modo geral, verificou-se que os resíduos industriais, químicos e agrícolas apresentam potencial para melhorar a resistência do solo quando aplicados de forma adequada. Resíduos industriais como cinza de carvão e cal aumentaram a resistência à compressão simples (RCS) de 0,012 MPa para 0,036 MPa e o Índice de Suporte Califórnia (CBR) de 27% para 90%, enquanto a escória de aciaria aumentou o CBR de 32% para 127%. Resíduos químicos como pó de vidro aumentaram a resistência à compressão simples em até 100% e a resistência à tração em mais de 1000%, e a borracha aumentou o CBR de 1,53% para 2,5% e a RCS de 0,00293 MPa para 0,00372 MPa. Já os resíduos agrícolas, como casca de arroz com cimento, aumentaram a RCS de 0,242 MPa para acima de 1,3 MPa, e a cinza de bagaço de cana com cal aumentou o CBR de 40% para 83% e a RCS de 0,30 para 0,56 MPa. Os estabilizantes tradicionais, como cal e cimento, também apresentaram resultados consistentes, com aumentos significativos na resistência do solo. Assim, embora os estabilizantes tradicionais mantenham maior confiabilidade, os resíduos analisados configuram alternativas promissoras, especialmente quando utilizados em combinação com aditivos complementares.

Os resíduos industriais, como cinza de carvão e escória de aciaria, destacaram-se por promover ganhos expressivos na resistência, enquanto os resíduos agrícolas e químicos também apresentaram resultados promissores, embora mais variáveis. Já os estabilizantes tradicionais, como o cimento e a cal, continuaram demonstrando alto desempenho técnico e previsibilidade nos resultados, o que reforça sua importância como referência para comparação.

Com base na análise, conclui-se que os objetivos da pesquisa foram plenamente atendidos. Foi possível identificar quais tipos de resíduos oferecem melhor desempenho técnico e compreender como atuam nos diferentes tipos de solos utilizados para pavimentação. A contribuição científica do trabalho reside na sistematização de dados recentes sobre o uso de materiais alternativos para o melhoramento do solo, fornecendo

subsídios relevantes para futuras pesquisas e aplicações práticas em obras de infraestrutura rodoviária.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. de J. et al. Estudo da Influência do Envelhecimento e Tratamento de Fibras de Coco no Comportamento Tensão-Deformação de Solo Reforçado. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 21., 2024, Balneário Camboriú. **Anais [...]** Santa Catarina: ABMS, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/387242433_Estudo_da_Influencia_do_Envelhecimento_e_Tratamento_de_Fibras_de_Coco_no_Comportamento_Tensao-Deformacao_de_Solo_Reforcado. Acesso em: 12 jun. 2025.

ARAGÃO, J. C. *et al.* Estudo de um solo estabilizado com cimento Portland a partir do método de dosagem físico-química. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG*, 20., 2022, Campinas. **Anais [...]** São Paulo: ABMS, 2022. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/110010545/cobramseg.2022-libre.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180: solo – determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

AZEVEDO, V. B. de. **Influência da umidade de compactação na dosagem de solo expansivo estabilizado com cal**. 2025. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2025. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/41291>. Acesso em: 07 jun. 2025.

BARDINI, V. *et al.* Impactos ambientais da utilização de agregados reciclados de resíduo de construção civil em camadas de pavimento. *In: 25º ENACOR / 48ª RAPv*, 2023, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** 2023. Disponível em: <https://enacorrappv.com.br/anais/2023/TT481.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2025.

BERNUCCI, L. L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2nd edição. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022. 750 p.

CAMELO, G. G. A. **Melhoramento de solo com resíduos sólidos da construção civil para pavimentação**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2018.

CAMPOLINA, V. F. *et al.* Avaliação da incorporação de resíduos siderúrgicos em blocos de solo-cimento. **Mix Sustentável**, v. 9, n. 3, p. 83–100, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2023.v9.n3.83-100>. Acesso em: 13 jun. 2025.

CARVALHO, A. R. de; *et al.* Avaliação do uso de resíduos de concreto como agregado graúdo em pavimentação urbana permeável: análise de composição, resistência e condutividade hidráulica. **ENARC**, v. 8, 2022. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/2891/4488>. Acesso em: 30 jun. 2025.

COELHO, R. V. *et al.* Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 10, n. 2, p. 1–12, 2015. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/33134>. Acesso em: 02 jun. 2025.

CRONIN, P.; RYAN, F.; COUGHLAN, M. Undertaking a literature review: a step-by-step approach. **British Journal of Nursing**, v. 17, n. 1, p. 38–43, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.12968/bjon.2008.17.1.28059>. Acesso em: 12 jun. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Norma 143/2010 – ME**. Brasília: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de pavimentação. Publicação IPR-719**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. Versão corrigida com a incorporação da errata 1, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/...> Acesso em: 28 mai. 2025.

DORNELLES, L. E.; CORREA, B. M. Produção de pó de vidro moído a partir de resíduos para aplicação em obras de infraestrutura. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 26, 2024. Aracaju. **Anais [...]** Sergipe: ENACOR, 2022. Disponível em: <https://enacorrappv.com.br/anais/2024/TT356.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2025.

GALINDO, J. R. F. **Estabilização de solos tropicais com resíduos da construção civil e escória de aciaria para uso em pavimentação**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.264>. Acesso em: 26 mai. 2025.

LIMA, J. S. P. de; SILVA, R. G.; MOURA, T. H. Estabilização física de solo laterítico arenoso utilizando resíduos cerâmicos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, p. e-12876, 2020.

LIMA, R. P. de; et al. Estabilização de solo laterítico utilizando cinza do bagaço da cana de açúcar e cal hidratada. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e13143, 2023.

MASCARENHAS, I. M. N. **Caracterização geotécnica de solos na região metropolitana do Cariri/CE para uso em pavimentação**. 2016. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/49825>. Acesso em: 26 mai. 2025.

MELO FILHO, R. R. M. **Estabilização de solo fino com cal e cinza volante para uso em pavimento**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/75357>. Acesso em: 09 jul. 2025.

MENEZES, L. A. de. **Estudo do melhoramento do solo através da adição de cinza da casca de arroz e de cimento Portland em comparação com outros materiais**. 2020. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/48015>. Acesso em: 12 jul. 2025.

MUCHINSKI, N. G. F. **Melhoramento de solos com pó de vidro e cal: comparação entre o comportamento mecânico do solo vermelho e do solo rosa da formação Guabirotuba**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/30703>. Acesso em: 12 jul. 2025.

ODA, S. *et al.* Utilização de rejeitos de mineração na construção de pavimentos rodoviários. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 29, n. 2, p. e20240142, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0142>. Acesso em: 12 jul. 2025.

OLIVEIRA, A. L.; ARAÚJO, R. da C. Estabilização do solo com adição de cimento para fins de pavimentação em vias de baixo volume de tráfego. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 15, n. 1, 2023. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/21120/209209217354>. Acesso em: 12 jul. 2025.

ORIOLO, M. A.; SANTOS, F.; CORDEIRO, L. **Uso de agregado reciclado de resíduos de construção e demolição na estabilização de um solo siltoso melhorado com cimento para aplicação em base de pavimentos urbanos**. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/34606>. Acesso em: 18 jun. 2025.

ROCHA, L.; ANJOS, R. O. dos; SOBRAL, A. D. C. S. Análise do resíduo de borracha como reforço de solo. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE**, v. 7, n. 1, p. 11-30, 2021. Disponível em: <https://periodicosgrupotiradentes.emnuvens.com.br/cadernoexatas/article/view/10327/4696>. Acesso em: 12 jun. 2025.

ROCHA, E. A. da. **Modelo de negócio inovador para blocos intertravados agregados com resíduos agrícolas de coco verde: uma abordagem sustentável**. 2025. 110 f. Dissertação de Mestrado (Ciência, Tecnologia e Inovação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/63435>. Acesso em: 12 jun. 2025.

SAMPAIO, I. S. **Estabilização enzimática de solo para pavimento de estradas florestais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019. Disponível em: https://poscienciaflorestal.ufv.br/wp-content/uploads/2023/05/Iara-Silva-Sampaio_Mestrado.pdf. Acesso em: 12 jun. 2025.

SANTOS, D. S. C. dos; CALDEIRA, P. C. Estabilização de Solo–Cimento para Base de Pavimento de Rodovia em São Luís–MA. **Revista De Engenharia e Tecnologia**, v. 13, n. 1, 2021. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/17065/209209214185>. Acesso em: 12 jun. 2025.

SCHNEIDER, D. S. G. *et al.* Estudo da viabilidade técnica da escória de aciaria LD para camada de revestimento primário em estradas: um caso em Mangaraí – ES. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 12, n. 12, p. 120–145, dez. 2024. Disponível em: <https://engemausp.submissao.com.br/26/anais/arquivos/417.pdf?v=1755331243>. Acesso em: 15 jun. 2025.

SILVA, A. M.; PINHEIRO, É. C. N. Desempenho mecânico de misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico, com incorporação do RAP – “Reclaimed Asphalt Pavement”- Na Avenida Coronel Teixeira, Ponta Negra na Cidade de Manaus – AM. **Revista ft**, v. 29, 2025. Disponível em: <https://revistaft.com.br/desempenho-mecanico-de-misturas-asfalticas-do-tipo->

concreto-asfaltico-com-incorporacao-do-rap-reclaimed-asphalt-pavement-na-avenida-coronel-teixeira-ponta-negra-na-cidade-de-man/. Acesso em: 30 jun. 2025.

SILVA, J. S. da; PIMENTEL, M. G. R. F. Uso de resíduos na pavimentação rodoviária. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.22179>. Acesso em: 04 jun. 2025.

SILVA, A. C. de A. **Estabilização de um solo regional de Mossoró/RN a partir do uso de cinzas de carvão mineral para aplicação em camadas granulares de pavimentos flexíveis**. 2022. 86 f. Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/c3536eb0-50d0-4b50-8d03-cc0d7ed0316b/content>. Acesso em: 30 jun. 2025.

TEIXEIRA, W.; CARDOSO, A.; NETO, A. I. Análise bibliométrica sobre a utilização de resíduos no melhoramento do solo para pavimentação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENTAC, 17., 2018, Porto Alegre. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 2826–2831. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1695>. Acesso em: 12 jun. 2025.

TELINO, L. V. da S. **Estudo da estabilização de solo argiloso com cal**. 2023. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2023. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/33644/1/estabilizacaosolocal.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2025.

TONIAL, T. M.; BEZERRA, M. X. Estudo da resistência do solo compactado contendo agregados provenientes dos resíduos sólidos da construção civil na cidade de Sinop–MT. **Revista Arq Engenharia de Mato Grosso**, v. 1, n. 2, p. 94–111, 2024. Disponível em: <https://revistas.fasipe.com.br/index.php/rae-mt/article/view/288/259>. Acesso em: 12 jun. 2025.

VELTEN, R. Z. *et al.* Caracterização mecânica de misturas solo-escória de alto-forno granulada moída para aplicações em estradas florestais. **Revista Árvore**, v. 30, p. 235-240, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000200010>. Acesso em: 12 jun. 2025.

VICENTE, W. A. **Avaliação do uso de cinza de cavaco de eucalipto na estabilização de solo laterítico colapsível**. 2021. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/f6ee79f2-abb7-48c8-8d1e-e1bec075635c/content>. Acesso em: 30 jun. 2025.