



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DÁDNA JORDANA BARROS AQUINO**  
**THAYNARA SOUSA CASTRO DIAS**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM PAVIMENTOS**  
**ASFÁLTICOS: uma revisão**

**SÃO LUÍS**

**2025**

**DÁDNA JORDANA BARROS AQUINO**  
**THAYNARA SOUSA CASTRO DIAS**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM PAVIMENTOS**  
**ASFÁLTICOS: uma revisão**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar de Oliveira Queiroz

Coorientador: Prof. Dr. Lyneker Souza de Moura

**SÃO LUÍS**

**2025**

**DÁDNA JORDANA BARROS AQUINO**  
**THAYNARA SOUSA CASTRO DIAS**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM PAVIMENTOS**  
**ASFÁLTICOS: uma revisão**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

São Luís, 26 de Fevereiro de 2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Paulo Cesar de Oliveira Queiroz (Orientador)  
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

---

Prof. Dr. Lyneker Souza de Moura (Coorientador externo)  
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz  
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

---

Prof. Dr. George Fernandes Azevedo  
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus que me deu a oportunidade de chegar onde eu cheguei, sempre me dando muita força de vontade, coragem e fé para enfrentar todos os meus desafios. A Nossa Senhora por me proteger com seu manto sagrado e me livrar de tudo aquilo que me afetaria negativamente.

Aos meus pais que sempre lutaram muito para me dar o melhor e me ajudaram nessa caminhada. Sou grata por tudo que fizeram por mim e feliz por saber aonde eu cheguei e quem me tornei.

Aos meus avós que sempre foram muito atenciosos e cuidadosos, sempre me dizendo palavras lindas que acalmavam meu coração e sempre orando por mim.

A minha companheira de trabalho, Thaynara Sousa, que no decorrer deste processo foi responsável, paciente, compreensiva e comprometida durante toda nossa caminhada

Por fim, mas não menos importante, agradecer ao nosso orientador, Prof. Dr. Paulo Cesar de Oliveira Queiroz, e coorientador, Prof. Dr. Lyneker Souza de Moura, que foi um pilar para conseguirmos concluir este trabalho. Expresso minha tremenda admiração e gratidão pelos grandes profissionais que são e sempre tiveram muita paciência e nos ajudaram a conduzir da melhor forma possível este trabalho.

**Dádna Jordana Barros Aquino**

Gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus por ter me concedido saúde, força e disposição para a realização deste trabalho.

À minha família, em especial a minha mãe, Elizângela, por todo o apoio e por estar sempre ao meu lado todos esses anos de faculdade, e ao meu pai, Alberico, que mesmo distante, também sempre me apoiou e me deu suporte durante esses anos.

Ao meu noivo, Paulo Roberto, por todo apoio, companheirismo e, principalmente, por me ajudar nas horas mais difíceis.

Agradeço ao nosso orientador, Prof. Dr. Paulo Cesar de Oliveira Queiroz, e coorientador, Prof. Dr. Lyneker Souza de Moura, que aceitaram o convite e nos conduziram da melhor forma possível para elaboração deste trabalho. Deixo aqui expressa toda a minha admiração e gratidão. E, por fim, à minha companheira de trabalho, Dádna Jordana, por termos concluído mais esse desafio com êxito e por seguirmos juntas em mais uma trajetória acadêmica que virá no novo ciclo.

**Thaynara Sousa Castro Dias**

## RESUMO

Devido ao grande volume gerado de resíduos da construção civil, diversas cidades no Brasil e no mundo vêm despertando interesse e impulsionando cada vez mais estudos sobre a utilização desses materiais, devido sua relevância ambiental e econômica. A gestão desses resíduos tem sido foco de estudos em decorrência do seu impacto ambiental e econômico, destacando a importância de artigos de revisão para consolidar e disseminar o conhecimento sobre o uso de resíduos da construção civil em pavimentos asfálticos. Este estudo utilizou uma abordagem qualitativa com revisão sistemática, empregando a metodologia PRISMA para identificar os resíduos provenientes da indústria da construção civil que já foram objeto de investigação para sua incorporação na pavimentação. Por meio do estudo realizado, verificou-se que os resíduos cerâmicos e de concreto apresentaram um desempenho competitivo em comparação com materiais tradicionais, mas a variabilidade dos resultados destaca a necessidade de avaliar as condições de aplicação e propriedades.

**Palavras-chaves:** Pavimento Asfáltico; Agregado de Concreto Reciclado; Cerâmica Vermelha.

## **ABSTRACT**

Due to the large volume of construction waste generated, several cities in Brazil and around the world have been attracting interest and increasingly promoting studies on the use of these materials, due to their environmental and economic relevance. The management of these wastes has been the focus of studies due to their environmental and economic impact, highlighting the importance of review articles to consolidate and disseminate knowledge on the use of construction waste in asphalt pavements. This study used a qualitative approach with a systematic review, employing the PRISMA methodology to identify waste from the construction industry that has already been the subject of investigation for its incorporation in paving. Through the study carried out, it was found that ceramic and concrete waste presented a competitive performance compared to traditional materials, but the variability of the results highlights the need to evaluate the application conditions and properties.

**Keywords:** Asphalt Pavement, Recycled Concrete Aggregate, Red Ceramics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxo da informação com as diferentes fases de uma revisão sistemática .....	17
Figura 2: Fluxograma da metodologia adotada .....	18
Figura 3: Metodologia de seleção dos artigos analisados.....	18
Figura 4: Trabalhos por ano de publicação .....	19

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Dados extraídos dos artigos selecionados .....	20
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Checklist do Método PRISMA 2020.....	14
Tabela 2: Critérios de inclusão e exclusão .....	17
Tabela 3: Influência dos resíduos de concreto e cerâmica nas propriedades mecânicas das camadas de pavimento.....	21
Tabela 4: Desempenho dos materiais no ensaio do módulo de resiliência .....	23
Tabela 5: Desempenho dos materiais no ensaio de deformação permanente.....	25
Tabela 6: Desempenho dos materiais para o ISC .....	28
Tabela 7: Desempenho dos materiais para o ensaio de Abrasão Los Angeles.....	29

## LISTA DE SIGLAS

ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
CB	Tijolo Triturado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNIT	Departamento Nacional De Infraestrutura De Transporte
DP	Deformação Permanente
DUI	Dano por Umidade Induzida
FA	Cinza Volante
F-T	Ciclo de Gelo-Degelo
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LA	Abrasão Los Angeles
MDD	Densidade Máxima de Secagem
MoRTH	Ministério de Transportes e Rodovias da Índia
MR	Módulo de Resiliência
NA	Agregado Natural
NBR	Norma Brasileira
OMC	Condições de Umidade Ótima
PP	Polipropileno
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
RAP	Pavimento Asfáltico Recuperado
RBA	Agregado de Tijolo Reciclado
RCA	Agregado de Concreto Reciclado
RCV	Resíduo de Cerâmica Vermelha
RCC	Resíduo da Construção Civil
RLT	Teste Triaxial de Carga Repetida
S	Escória
UCS	Resistência à Compressão Não Confinada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
<b>3 MÉTODO .....</b>	<b>14</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1 Dados catalográficos.....</b>	<b>19</b>
<b>4.2 Ensaios de Caracterização Mecânica.....</b>	<b>20</b>
4.2.1 Módulo de Resiliência .....	22
4.2.2 Deformação Permanente .....	25
4.2.3 Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	28
4.2.4 Abrasão Los Angeles.....	29
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>30</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>31</b>

# 1 Utilização de resíduos da construção civil em pavimentos asfálticos: uma 2 revisão

## 3 Use of construction waste in asphalt pavements: a review

### 4 RESUMO

5 Devido ao grande volume gerado de resíduos da construção civil, diversas cidades no Brasil e  
6 no mundo vêm despertando interesse e impulsionando cada vez mais estudos sobre a utilização  
7 desses materiais, devido sua relevância ambiental e econômica. A gestão desses resíduos tem  
8 sido foco de estudos em decorrência do seu impacto ambiental e econômico, destacando a  
9 importância de artigos de revisão para consolidar e disseminar o conhecimento sobre o uso de  
10 resíduos da construção civil em pavimentos asfálticos. Este estudo utilizou uma abordagem  
11 qualitativa com revisão sistemática, empregando a metodologia PRISMA para identificar os  
12 resíduos provenientes da indústria da construção civil que já foram objeto de investigação para  
13 sua incorporação na pavimentação. Por meio do estudo realizado, verificou-se que os resíduos  
14 cerâmicos e de concreto apresentaram um desempenho competitivo em comparação com  
15 materiais tradicionais, mas a variabilidade dos resultados destaca a necessidade de avaliar as  
16 condições de aplicação e propriedades.

17 Palavras-chave: Pavimento Asfáltico, Agregado de Concreto Reciclado, Cerâmica Vermelha.

### 18 ABSTRACT

19 Due to the large volume of construction waste generated, several cities in Brazil and around the  
20 world have been attracting interest and increasingly promoting studies on the use of these  
21 materials, due to their environmental and economic relevance. The management of these wastes  
22 has been the focus of studies due to their environmental and economic impact, highlighting the  
23 importance of review articles to consolidate and disseminate knowledge on the use of  
24 construction waste in asphalt pavements. This study used a qualitative approach with a  
25 systematic review, employing the PRISMA methodology to identify waste from the  
26 construction industry that has already been the subject of investigation for its incorporation in  
27 paving. Through the study carried out, it was found that ceramic and concrete waste presented  
28 a competitive performance compared to traditional materials, but the variability of the results  
29 highlights the need to evaluate the application conditions and properties.

30 Keywords: Asphalt Pavement, Recycled Concrete Aggregate, Red Ceramics.

### 31 1 INTRODUÇÃO

32 A indústria da construção civil é uma das principais responsáveis pelos impactos ambientais,  
33 desde a extração intensiva de matérias-primas até a geração de resíduos ao longo das etapas de  
34 construção, operação e demolição (CONCEIÇÃO *et al.*, 2021). De acordo com o Panorama dos  
35 Resíduos Sólidos no Brasil 2024, estudo realizado pela Associação Brasileira de Resíduos e  
36 Meio Ambiente (ABREMA, 2024) estima-se que aproximadamente 44 milhões de toneladas de  
37 resíduos de construção civil tenham sido gerados no Brasil no ano de 2023. Esse volume  
38 expressivo reforça a necessidade de práticas mais sustentáveis na gestão desses resíduos, como  
39 a reutilização, reciclagem e incorporação em novos materiais, minimizando os impactos  
40 ambientais e promovendo a economia circular no setor.

41 Além do cenário nacional, a geração de resíduos da construção civil também é um desafio  
42 global. Segundo estudo de Saez e Osmani (2019), China, União Europeia e Estados Unidos  
43 produzem valores significativamente maiores, atingindo quase 3 bilhões, 850 milhões e 600  
44 milhões de toneladas anuais, respectivamente. No contexto de um projeto de construção  
45 pública, os principais componentes dos resíduos incluem entulho de solo, concreto, metais e

46 tijolos, totalizando milhares de toneladas geradas ao longo das etapas construtivas (WU *et al.*,  
47 2025).

48 Devido ao grande volume gerado de resíduos da construção civil, Hortegal *et al.* (2009)  
49 afirmaram que o uso desses materiais em pavimentos asfálticos é considerado viável. Diante  
50 disso, tanto cidades brasileiras quanto internacionais têm feito uso de agregados reciclados na  
51 pavimentação, uma vez que seus resultados têm sido satisfatórios. De acordo com Mota (2014),  
52 uma das práticas mais comuns no Brasil é o reaproveitamento de resíduos classe A (CONAMA,  
53 2002) em pavimentos, consistindo no uso de brita corrida ou da mistura entre o resíduo e solo  
54 como material para base, sub-base e revestimento.

55 Moura (2017) considera que a camada de revestimento em concreto betuminoso usinado a  
56 quente é uma alternativa para a destinação de resíduos, contudo deve-se observar as proporções.  
57 Em algumas situações, a utilização de resíduos como adições de enchimento pode ser benéfica  
58 ao pavimento.

59 De acordo com a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA,  
60 2002), os resíduos da construção civil são os provenientes de construções, reformas, reparos e  
61 demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de  
62 terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas,  
63 colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico,  
64 vidros, plásticos, entre outros.

65 Nos últimos anos, a gestão dos Resíduos da Construção Civil (RCC) tem recebido cada vez  
66 mais atenção tanto pelo seu impacto econômico quanto ambiental. Com isso, muitos estudos  
67 estão sendo realizados sobre a utilização desses resíduos na construção de pavimentos  
68 asfálticos, sendo uma alternativa sustentável e viável. Entretanto, esses estudos se encontram  
69 espalhados, comprometendo a compreensão geral do tema e retardando a disseminação do  
70 conhecimento.

71 O cenário atual da construção civil ainda apresenta uma certa insegurança quanto ao uso desses  
72 materiais em obras. Essa resistência pode estar relacionada à baixa adoção desses materiais no  
73 mercado, à confiança nos agregados convencionais já amplamente testados e à falta de  
74 conhecimento sobre os benefícios e o potencial desses resíduos como alternativa sustentável  
75 (PENHA, 2018). Além disso, a escassez de artigos de revisão sobre o tema dificulta a  
76 disseminação do conhecimento, limitando o acesso a informações consolidadas que poderiam  
77 embasar e incentivar a aplicação desses materiais na construção de pavimentos.

78 Silva e Lima (2021) também enfatizaram sobre a importância de difundir informações concretas  
79 sobre a viabilidade e os benefícios do uso de resíduos da construção civil em pavimentos  
80 asfálticos, destacando que a escassez de publicações na área reforça a necessidade de estudos  
81 que comprovem sua eficácia.

82 Diante do exposto, é possível perceber que a importância da produção de artigos de revisão  
83 acadêmica vai muito além de ser apenas um compilado de informações, pois oferece uma  
84 consolidação de conhecimentos existentes, proporcionando uma rede de aprendizado e  
85 impulsionando avanços no campo. Além disso, permite uma visão geral e atualizada de um  
86 determinado campo de conhecimento, somando informações importantes de estudos e  
87 pesquisas anteriores e apresentando um resumo do conhecimento adquirido na área.

88 Em campos como o da engenharia, onde as inovações e tecnologia caminham juntas e estão em  
89 constante evolução, a existência de um artigo de revisão bem estruturado é fundamental para  
90 garantir que tanto os pesquisadores quanto os profissionais da área tenham acesso a um  
91 panorama abrangente sobre os avanços e dificuldades do campo e possibilita uma melhor  
92 tomada de decisão dos materiais para planejamento de projetos.

## 93 2 REFERENCIAL TEÓRICO

94 A utilização de resíduos da construção civil vem despertando interesse e impulsionando cada  
95 vez mais estudos, tanto pelo seu impacto econômico quanto pelo seu impacto ambiental. Uma  
96 alternativa promissora é sua incorporação em projetos rodoviários, contribuindo para a  
97 construção de pavimentos mais sustentáveis. Além de reduzir a exploração de recursos naturais  
98 extraídos de jazidas, essa prática minimiza a deposição inadequada de resíduos, promovendo  
99 benefícios ambientais significativos (SOUZA *et al.*, 2019).

100 Rios e Mol (2020) estudaram e avaliaram um conjunto de artigos científicos publicados em um  
101 intervalo de 2002 a 2019. Foram abordados temas relacionados a pavimentação sustentável,  
102 reciclagem de resíduos da construção civil, resíduos da construção civil, pavimentos rígidos e  
103 flexíveis e gestão de resíduos da construção civil. No contexto específico, o RCC reciclado foi  
104 identificado como um agregado viável para diversas aplicações como fabricação de concreto,  
105 camadas de drenagem, estruturas pré-moldadas, camadas de pavimentação, entre outros. O uso  
106 de RCC na pavimentação surge como uma alternativa viável e sustentável, com custo-benefício  
107 satisfatório no quesito operacional. Considerando que a questão financeira desempenha um  
108 papel preponderante nas decisões relativas a empreendimentos, a incorporação do RCC  
109 reciclado na pavimentação se mostra uma solução econômica e atrativa, cujo potencial de  
110 adoção merece ser mais explorado.

111 Melo *et al.* (2021) realizaram uma avaliação abrangente, analisando 10 artigos publicados entre  
112 2015 e 2020 e os resultados foram divididos quanto a aplicação dos resíduos em camadas de  
113 base, sub-base, reforço do subleito, misturas asfálticas e em pavimentos intertravados. Dentro  
114 dessas análises, alguns desses estudos conduziram ensaios de Índice de Suporte Califórnia  
115 (ISC) em amostras com 100% de solo e amostras com misturas de solo e RCC. Com isso, os  
116 resultados laboratoriais confirmaram que é satisfatória a substituição dos agregados naturais  
117 que são usados na pavimentação por Resíduos de Construção e Demolição (RCD),  
118 principalmente na base de pavimentos.

119 Dentre os artigos avaliados por Melo *et al.* (2021), também foi observado que os agregados  
120 provenientes de RCD demonstraram um bom potencial para sua utilização em revestimentos  
121 asfálticos à quente, baseado nas análises dos corpos de prova, em que foram apresentadas boas  
122 propriedades referentes a Abrasão Los Angeles e índice de forma. Esses estudos destacam a  
123 utilização dos agregados de RCD como uma alternativa sustentável em revestimentos  
124 asfálticos, ressaltando seu potencial não apenas para fornecer reforço eficiente, mas também  
125 para contribuir para economia de custos em comparação com os materiais naturais  
126 convencionais.

127 Moura (2021) avaliou 40 trabalhos que discorrem sobre resíduos utilizados como finos  
128 alternativos em misturas asfálticas. Foram empregados como parâmetros de avaliação:  
129 resistência à tração, módulo de resistência, resistência à fadiga e dano por umidade induzida  
130 (DUI). De acordo com esses parâmetros foi possível observar que a maioria dos trabalhos  
131 avaliados obtiveram aumento na resistência à tração e no módulo de resistência. Porém, no que  
132 diz respeito ao dano por umidade induzida e resistência à fadiga, a maioria dos estudos não  
133 informaram sobre ambas as propriedades mecânicas.

134 Melo *et al.* (2021) através da análise de 35 artigos selecionados, foram obtidos resultados  
135 importantes que puderam fundamentar discussões relevantes ao tema em questão. Na pesquisa,  
136 destacou-se a possibilidade de reutilização dos diversos tipos RCD bem como os diferentes  
137 níveis de desenvolvimento e técnicas de reciclagem adotados. Comprovando a aplicabilidade  
138 dos RCD em vias rurais ou vias de baixo tráfego. Além disso, foram apresentadas aplicações  
139 reais, especialmente no uso de agregados reciclados, em quatro categorias: pavimentos rígidos  
140 e construções, camadas não ligadas, camadas ligadas com betume.

141 Além disso, o estudo valida um método viável de aplicação do RCD em cidades em  
142 desenvolvimento, de forma que todo o processo de reutilização possa ser efetivamente aplicado  
143 na maior parte do mundo. Constatou-se que, atualmente, o RCD é utilizado de forma paliativa

144 em aterros sanitários e estradas rurais no Brasil, e que a execução desse processo muitas vezes  
 145 carece de qualidade e métodos adequados, resultando em desperdício de tempo e mão de obra.  
 146 Pereira *et al.* (2022) realizaram o estudo de 23 artigos científicos publicados entre os anos de  
 147 2015 e 2019. A maioria dos trabalhos realizou ensaios para analisar os resíduos da construção  
 148 civil e comparar as propriedades com os agregados naturais. Além disso, também investigaram  
 149 o desempenho de misturas de solos e resíduos através de ensaios como módulo de resiliência,  
 150 resistência à compressão e Índice de Suporte Califórnia (ISC). Os resultados demonstraram o  
 151 bom desempenho das misturas produzidas com RCC para as diferentes camadas de  
 152 pavimentação. Os estudos mostraram alguns aspectos negativos, porém não foram  
 153 significativos o suficiente para inviabilizar sua utilização em pavimentos asfálticos.

154 Lima *et al.* (2022) avaliaram estudos desenvolvidos durante um período de 10 anos (2012-  
 155 2022). Em uma das pesquisas, foi realizado o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) em  
 156 três tipos de amostras em que o RCC foi utilizado como agregado miúdo. As amostras eram  
 157 compostas por 100% solo, 70% solo + 30% de RCC e 50% solo + 50% de RCC, em que as  
 158 amostras 2 e 3 poderiam ser reaproveitadas em camada de subleito e sub-base, respectivamente.  
 159 Outra pesquisa analisou duas amostras envolvendo RCC, 44% solo + 56% agregado reciclado  
 160 e 17% solo + 83% agregado reciclado, e concluíram que ambas as misturas poderiam ser  
 161 utilizadas em sub-base de pavimentos.

162 Ainda dentre os estudos avaliados por Lima *et. al.* (2022), foram apresentados dois estudos de  
 163 caso que confirmaram a vantagem econômica em obras de pavimentação ao se utilizar RCC.  
 164 No primeiro estudo, levou-se em consideração a distância entre o local da obra e o local onde  
 165 se encontrava o material e houve uma diferença considerável de 53,59% de economia quando  
 166 utilizado o RCC. No segundo estudo, houve uma comparação entre o agregado natural e o  
 167 reciclado e constatou-se uma economia de 43,70% nos gastos da empresa.

168 Peixoto (2023) avaliou 23 trabalhos, cujo período de coleta estabelecido se estende de 2012 a  
 169 2022, os quais comentam sobre a utilização do vidro como agregado miúdo em revestimentos  
 170 asfálticos. Esses trabalhos sugerem melhorias na resistência ao desgaste, durabilidade e  
 171 reduções na resistência à carga dinâmica e desempenho de fadiga com a adição vidro moído,  
 172 porém, é fundamental a realização de estudos adicionais para entender o resultado do seu  
 173 desempenho e durabilidade. Além disso, por meio dos estudos coletados, o autor constatou que  
 174 o uso do vidro como agregado miúdo na pavimentação pode trazer benefícios econômicos, tanto  
 175 para a sociedade quanto para os fabricantes de pavimentos asfálticos.

### 176 3 MÉTODO

177 Os procedimentos metodológicos deste estudo envolveram uma abordagem qualitativa por  
 178 meio de uma revisão sistemática da literatura. Este estudo teve ênfase na identificação dos  
 179 resíduos provenientes da indústria da construção civil que já foram objeto de estudo e  
 180 investigação da sua adição na fabricação de pavimentação asfáltica, permitindo uma melhor  
 181 identificação dos estudos mais relevantes nesse contexto. Para isso, foi aplicada a metodologia  
 182 PRISMA - *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*.

183 De acordo Galvão *et al.* (2015), essa metodologia pode ser apresentada por um checklist com  
 184 27 itens (Tabela 1), com o objetivo de garantir que todos os aspectos essenciais da revisão  
 185 tenham sido considerados pelo autor.

186  
187

Tabela 1 – Checklist do Método PRISMA 2020

Seção/Tópico	Nº	Item do checklist
<b>TÍTULO</b>		
Título	1	Identifique a publicação como uma revisão sistemática.
<b>RESUMO</b>		

<b>Resumo</b>	<b>2</b>	Apresente um resumo estruturado incluindo, se aplicável: referencial teórico; objetivo; fonte de dados; critério de elegibilidade; participantes e intervenções; avaliação do estudo e síntese dos métodos; resultados; limitações; conclusões e implicações dos achados principais; número de registro da revisão sistemática.
<b>INTRODUÇÃO</b>		
<b>Justificativa</b>	<b>3</b>	Descreva a justificativa da revisão no contexto do que já é conhecido
<b>Objetivos</b>	<b>4</b>	Apresente uma afirmação explícita dos objetivos ou questões abordadas pela revisão
<b>MÉTODOS</b>		
<b>Critérios de elegibilidade</b>	<b>5</b>	Especifique critérios de inclusão e exclusão da revisão e como os estudos foram agrupados nas sumarizações.
<b>Fontes de informação</b>	<b>6</b>	Especifique todas as bases de dados, repositórios de registros, sites, organizações, listas de referências e outras fontes pesquisadas ou consultadas para identificar estudos. Especifique a data em que cada fonte foi pesquisada ou consultada pela última vez.
<b>Estratégia de busca</b>	<b>7</b>	Apresente as estratégias de busca completas para todas as bases de dados, repositórios de registros e sites, incluindo filtros ou limites usados.
<b>Processo de seleção</b>	<b>8</b>	Especifique os métodos usados para decidir se um estudo atendeu aos critérios de inclusão da revisão, incluindo quantos revisores selecionaram cada registro e publicação recuperados, se trabalharam de forma independente e, se aplicável, detalhes de ferramentas de automação utilizadas no processo.
<b>Processo de coleta de dados</b>	<b>9</b>	Especifique os métodos usados para coletar dados das publicações, incluindo quantos revisores coletaram dados de cada publicação, se eles trabalharam de forma independente, quaisquer processos para obter ou confirmar dados com os autores do estudo e, se aplicável, detalhes de ferramentas de automação utilizadas no processo.
<b>Lista de dados</b>	<b>10a</b>	Liste e defina todos os desfechos cujos dados foram coletados. Especifique se foram coletados de cada estudo todos os resultados compatíveis com cada domínio de desfecho (ex.: para todas as medidas, ponto de tempo, análises), e se não, quais os métodos usados para decidir quais resultados coletar.
	<b>10b</b>	Liste e defina todas as outras variáveis cujos dados foram coletados (ex.: características dos participantes e da intervenção, fontes de financiamento). Descreva pressupostos adotados para casos de informações faltantes ou pouco claras.
<b>Avaliação do risco de viés dos estudos</b>	<b>11</b>	Especifique os métodos usados para avaliar o risco de viés nos estudos incluídos, incluindo detalhes da(s) ferramenta(s) usada(s), quantos revisores avaliaram cada estudo e se trabalharam de forma independente e, se aplicável, detalhes de ferramentas de automação usadas no processo.
<b>Medidas de efeito</b>	<b>12</b>	Especifique para cada desfecho a(s) medida(s) de efeito (ex.: risco relativo, diferença de médias) usadas na sumarização ou apresentação dos resultados.
<b>Métodos de síntese</b>	<b>13a</b>	Descreva os processos usados para decidir quais estudos foram elegíveis para cada síntese [ex.: tabulação das características da intervenção do estudo e comparação com os grupos planejados para cada sumarização (item 5)].
	<b>13b</b>	Descreva métodos demandados para preparar os dados para apresentação ou síntese, como manejo de dados faltantes nas estatísticas de sumarização ou conversões de dados.
	<b>13c</b>	Descreva métodos usados para tabular ou ilustrar visualmente os resultados de estudos individuais e sínteses.
	<b>13d</b>	Descreva métodos usados para sumarizar os resultados e apresente justificativa para a(s) escolha(s). Se uma meta-análise foi realizada, descreva o(s) modelo(s), método(s) para identificar a presença e extensão da heterogeneidade estatística e o(s) pacote(s) de software utilizado(s).
	<b>13e</b>	Descreva métodos usados para explorar as possíveis causas de heterogeneidade entre os resultados dos estudos (ex.: análise de subgrupo, metarregressão).
	<b>13f</b>	Descreva análises de sensibilidade conduzidas para avaliar a robustez dos resultados sumarizados.
<b>Avaliação de vieses de publicação</b>	<b>14</b>	Descreva métodos usados para avaliar o risco de viés devido a resultados faltantes em uma sumarização (decorrente de vieses de publicação).

<b>Avaliação de certeza</b>	<b>15</b>	Descreva métodos usados para avaliar a certeza (ou confiança) no corpo de evidências de um desfecho.
<b>RESULTADOS</b>		
<b>Análises adicionais</b>	<b>16a</b>	Descreva os resultados do processo de busca e seleção, desde o número de registros identificados na busca até o número de estudos incluídos na revisão, idealmente por meio de um fluxograma.
	<b>16b</b>	Cite estudos que parecem cumprir os critérios de inclusão, mas que foram excluídos e explique por que foram excluídos.
<b>Características dos estudos</b>	<b>17</b>	Cite cada estudo incluído e apresente suas características.
<b>Risco de viés nos estudos</b>	<b>18</b>	Apresente as avaliações do risco de viés de cada estudo incluído.
<b>Resultados de estudos individuais</b>	<b>19</b>	Para todos os desfechos, apresente para cada estudo: (a) estatística sumária para cada grupo (quando apropriado) e (b) estimativa de efeito e sua precisão (ex.: intervalo de confiança/credibilidade), idealmente utilizando tabelas estruturadas ou gráficos.
<b>Resultados das sínteses</b>	<b>20a</b>	Para cada síntese, resuma brevemente as características e o risco de viés entre os estudos contribuintes.
	<b>20b</b>	Apresente os resultados de todas as sumarizações estatísticas realizadas. Se meta-análises foram feitas, apresente para cada uma a estimativa resumida e sua precisão (por exemplo, intervalo de confiança/credibilidade) e medidas de heterogeneidade estatística. Se estiver comparando grupos, descreva a direção do efeito
	<b>20c</b>	Apresente os resultados de todas as investigações das possíveis causas de heterogeneidade entre os resultados do estudo.
	<b>20d</b>	Apresente os resultados de todas as análises de sensibilidade conduzidas para avaliar a robustez dos resultados sumarizados.
<b>Vieses de publicação</b>	<b>21</b>	Apresente avaliações de risco de viés devido a resultados faltantes (decorrentes de vieses de publicação) para cada sumarização avaliada.
<b>Certeza da evidência</b>	<b>22</b>	Apresente avaliações da certeza (ou confiança) no corpo de evidências para cada desfecho avaliado.
<b>DISCUSSÃO</b>		
<b>Discussão</b>	<b>23a</b>	Forneça uma interpretação geral dos resultados no contexto de outras evidências.
	<b>23b</b>	Discuta limitações das evidências incluídas na revisão.
	<b>23c</b>	Discuta limitações dos processos empregados na revisão.
	<b>23d</b>	Discuta as implicações dos resultados para a prática, política e pesquisas futuras
<b>OUTRAS INFORMAÇÕES</b>		
<b>Registro e protocolo</b>	<b>24a</b>	Forneça informações de registro da revisão, incluindo o nome do repositório e o número de registro, ou declare que a revisão não foi registrada.
	<b>24b</b>	Indique onde o protocolo de revisão pode ser acessado ou indique se o protocolo não foi preparado.
	<b>24c</b>	Descreva e explique quaisquer alterações nas informações fornecidas no registro ou no protocolo.
<b>Apoio</b>	<b>25</b>	Descreva as fontes de apoio financeiro ou não financeiro para a revisão e o papel dos financiadores ou patrocinadores na revisão.
<b>Conflito de interesses</b>	<b>26</b>	Declare quaisquer conflitos de interesse dos autores da revisão.
<b>Disponibilidade de dados, código e outros materiais</b>	<b>27</b>	Relate quais dos itens a seguir estão disponíveis publicamente e onde podem ser encontrados: modelos de formulários para coleta de dados; dados extraídos dos estudos incluídos; dados usados para todas as análises; comando analítico; outros materiais usados na revisão.

Fonte: Adaptado de Galvão *et al.* (2022).

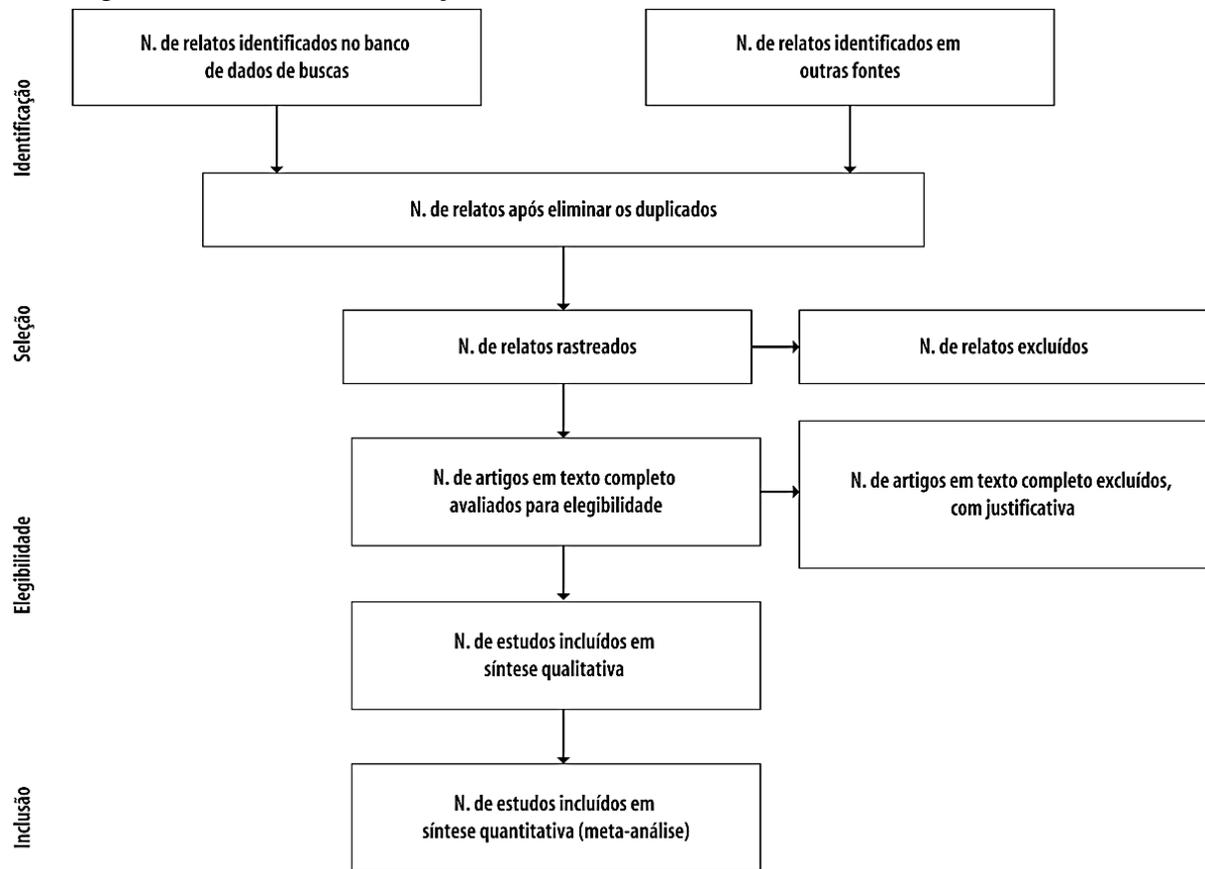
188  
189  
190  
191  
192  
193

Além disso, possui um fluxograma (Figura 1) com quatro etapas, proporcionando uma análise detalhada do processo de revisão, incluindo o número total de referências encontradas, a quantidade de artigos eliminados nas fases de seleção e o número final de artigos que foram escolhidos e inseridos na análise. Sendo assim, o método PRISMA desempenha um papel

194  
195  
196  
197

fundamental ao auxiliar os autores no aprimoramento da apresentação de revisões sistemáticas e meta-análises.

Figura 1 – Fluxo da informação com as diferentes fases de uma revisão sistemática



Fonte: Galvão *et al.* (2015).

198  
199  
200  
201  
202  
203  
204  
205  
206  
207  
208  
209  
210  
211  
212

Foi estrategicamente selecionada uma base de dados eletrônicos de literatura para realizar a pesquisa nesta temática: o *Science Direct*. E, para uma busca de forma mais precisa, foi realizada busca por meio da seguinte sentença: (*Pavement OR Asphalt Pavement*) AND (*Recycled Concrete Aggregate OR Recycled Red Ceramic OR RCA OR RBA*) AND *Base AND Sub-base*. Essa sentença foi utilizada visando encontrar trabalhos publicados nos últimos quinze anos. A seleção inclui artigos científicos publicados entre os anos de 2010 e 2025, priorizando a língua inglesa e a língua portuguesa.

Os critérios de inclusão e exclusão foram definidos de acordo com a Tabela 2. Essa seleção possibilita uma abordagem metodológica viável e mais refinada, assegurando a inclusão somente dos estudos mais adequados e alinhados ao escopo da pesquisa em análise.

Tabela 2 – Critérios de inclusão e exclusão

<b>Base de dados</b>	Science Direct
<b>Tipo de documento</b>	Artigos científicos
<b>Período</b>	2010 - 2025
<b>Idioma</b>	Português e Inglês
<b>Critérios de inclusão</b>	Trabalhos que realizaram a utilização de resíduos da construção civil (concreto e cerâmica) para desenvolvimento de camadas da pavimentação, descrevendo a metodologia e realizando ensaios para avaliação do resíduo utilizado.

**Critérios de exclusão**

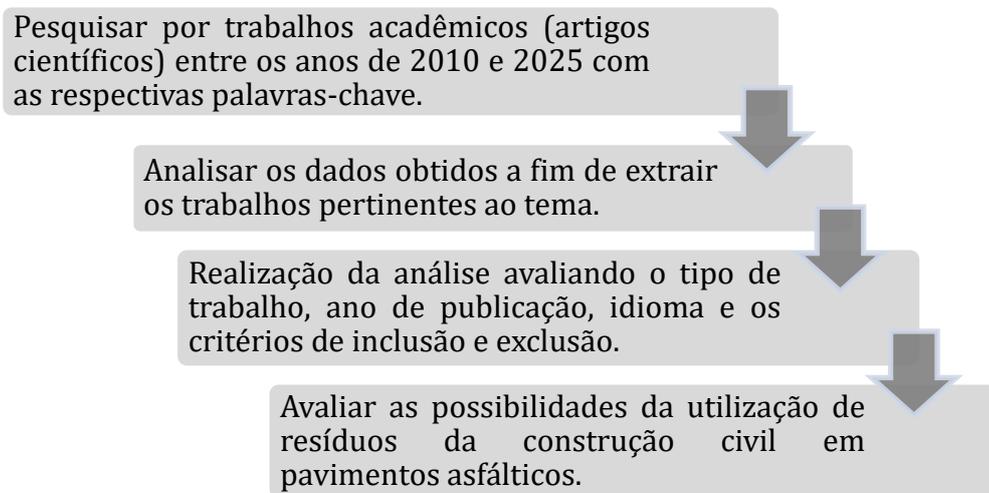
Trabalhos que utilizem resíduos da construção civil para desenvolvimento de camadas da pavimentação que não descrevam a metodologia ou não realizem ensaios para avaliação do resíduo, bem como em idiomas diferentes de inglês e português.

Fonte: Autores (2025).

213  
214  
215  
216  
217  
218

Desse modo, a revisão foi conduzida por meio de um processo que envolve quatro etapas descritas no fluxograma apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia adotada



219  
220

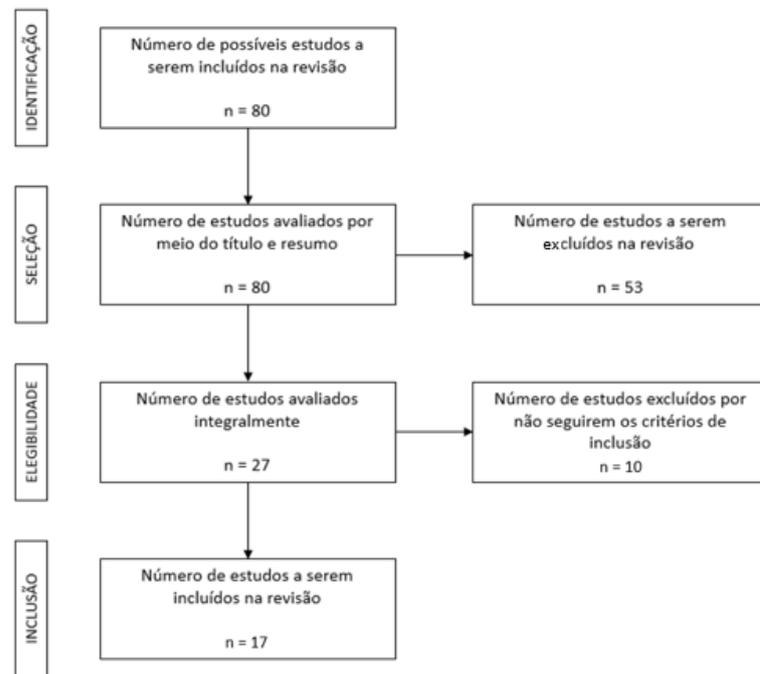
Fonte: Autores (2025).

## 221 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

222 Após a etapa inicial de pesquisa, onde foram selecionados um total de 80 documentos, foi  
223 necessário realizar uma seleção do material, analisando títulos e resumos. Logo após concluir  
224 a seleção dos artigos, foram identificados 27 artigos e submetidos à leitura completa. Na  
225 segunda fase de avaliação, foram selecionados estudos que abordaram o uso de resíduos da  
226 construção civil, especialmente resíduos cerâmicos e de concreto, em pavimentos asfálticos. A  
227 análise também priorizou a metodologia utilizada e o tipo de ensaios realizados para avaliar a  
228 eficácia dos resíduos, sendo estes ensaios comuns entre os artigos selecionados. Como resultado  
229 dessa seleção, atenderam aos critérios de inclusão estabelecidos um total de 17 artigos (Figura  
230 3).

231  
232

Figura 3 – Metodologia de seleção dos artigos analisados



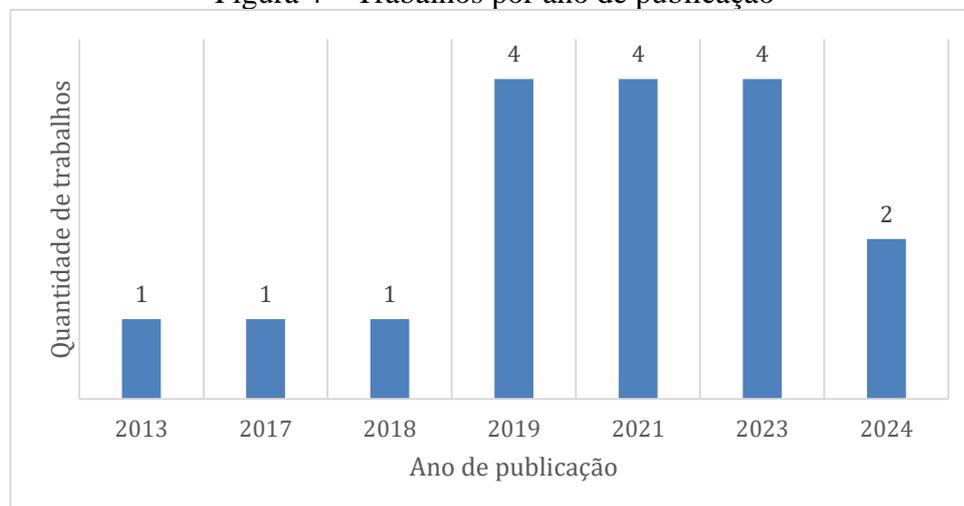
Fonte: Autores (2025).

233  
234  
235  
236  
237  
238  
239  
240

#### 4.1 Dados catalográficos

A Figura 4 exibe de forma gráfica a distribuição temporal das publicações dos artigos encontrados durante o período de análise.

Figura 4 – Trabalhos por ano de publicação



Fonte: Autores (2025).

241  
242  
243  
244  
245  
246  
247  
248  
249  
250  
251

De acordo com a Figura 4, os anos que apontam um maior destaque em termos de produções acadêmicas são 2019, 2021 e 2023, uma vez que ambos possuem quatro publicações cada. Ao verificar a distribuição temporal das produções, é notório que a maior concentração se encontra entre 2019 e 2024, com 14 trabalhos (82,35%), em comparação com o período de 2013 a 2018, que totaliza três produções (17,64%). Essa concentração nos últimos cinco anos indica o aumento da relevância do tema, embora ainda haja uma lacuna na continuidade das discussões sobre o tema ao longo dos anos.

## 252 4.2 Ensaios de Caracterização Mecânica

253 Para uma avaliação da viabilidade de utilização dos materiais, foram analisados ensaios  
 254 laboratoriais de natureza mecânica dos 17 estudos que atenderam aos critérios de inclusão  
 255 estabelecidos na metodologia. O Quadro 1 apresenta um resumo da análise de estudos sobre o  
 256 uso de resíduos de cerâmica e agregados de concreto reciclados em camadas de pavimentos. As  
 257 referências incluem estudos que avaliaram a granulometria, compactação, módulo de  
 258 resiliência, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e deformação permanente, entre outros  
 259 parâmetros.

260  
261

Quadro 1 – Dados extraídos dos artigos selecionados

Ordem	Referência	Resíduo	Camada do pavimento	Ensaios
1	Azam et. al. (2024)	RCA e tijolos reciclados	Base	Testes de sucção mátrica, Ensaios de carga estática e triaxial repetida, Testes para medir propriedades de resistência ao cisalhamento e módulo resiliente, Avaliação do ciclo de vida
2	Doan et. al. (2024)	RCA, RAP, CB	Base	Módulo de resiliência, deformação permanente, Resistência à Compressão (UCS) e Compactação
3	Toka e Olgun (2023)	RCA	Base e sub-base	Módulo de resiliência, deformação permanente, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Ensaio de Permeabilidade
4	Saberian et. al. (2023)	RCA	Base e sub-base	Módulo de resiliência, deformação permanente, Compactação Modificada e Compressão Simples
5	Akbas et. al. (2023)	RCA	Não mencionado	Módulo de resiliência, deformação permanente e ensaios de gelo-degelo
6	Sharma et. al. (2023)	RCA e tijolos reciclados	Não mencionado	Gravidade Específica, Absorção de Água, Abrasão de Los Angeles, Valor de Impacto Agregado, Densidade Seca Máxima, Teor de Umidade Ideal e Condutividade Hidráulica
7	Saberian e Li (2021)	RCA	Base e sub-base	Módulo Resiliente e Resistência à Compressão Simples
8	Akbas et. al. (2021)	RCA	Base e sub-base	Massa específica, peso unitário seco máximo, teor de umidade ótimo, condutividade hidráulica, módulo de resiliência, deformação permanente e ensaios de gelo-degelo
9	Santos et. al. (2021)	Cerâmica vermelha	Sub-base	Limites de liquidez, plasticidade do material, densidade real, compactação Proctor, abrasão Los Angeles, ensaio Treton, ISC.
10	Alnedawi e Rahman (2021)	Cerâmica vermelha	Sub-base	Testes de compactação modificados, distribuição granulométrica, teste de abrasão de Los Angeles, Limites de Atterberg, densidade, Teste de Índice de Suporte da Califórnia (ISC), módulo de resiliência e deformação permanente.
11	Giwangkara et. al. (2019)	RCA	Base	Testes de densidade, absorção de água, valor de britagem do agregado, compactação e penetração (ISC).

12	Souza et. al. (2019)	Cerâmica vermelha	Base e sub-base	Análise Granulométrica, Densidade Específica dos Grãos, Limites de Atterberg, Ensaio de Compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC), Ensaio de Expansibilidade
13	Jayakody et. al. (2019)	RCA	Base e sub-base	Módulo de resiliência, deformação permanente
14	Kox et. al. (2019)	RCA	Não mencionado	Teste de Abrasão Los Angeles, Resistência ao Gelo-Degelo, Resistência à Compressão, Testes de Consistência (Slump).
15	El-Tahan et. al. (2018)	RCA	Não mencionado	Método Marshall, Teste de abrasão Los Angeles, Teste de resistência à tração indireta
16	Silva e Carvalho (2017)	Cerâmica vermelha	Base	Caracterização Granulométrica, Classificação do Solo, Densidade Real, Limites de Consistência, Ensaio de Compactação, Ensaio de Abrasão Los Angeles, Ensaio Treton, Índice de Suporte Califórnia (ISC).
17	Arulrajah et. al. (2013)	RCA e CB	Sub-base	Distribuição de Tamanho de Partícula, Densidade de Partícula, Absorção de Água, Compactação, Abrasão de Los Angeles, Análise de Peneira Pós-Compactação, Índice de Escamação, Condutividade Hidráulica, Ensaio ISC, Testes Triaxiais Drenados Consolidados, Testes Triaxiais de Carga Repetida (RLT), Avaliação Geoambiental

RCA - Agregado de Concreto Reciclado; RAP - Pavimento Asfáltico Recuperado; CB - Tijolo Triturado

Fonte: Autores (2025).

262  
263  
264  
265  
266  
267  
268  
269  
270  
271  
272  
273  
274  
275  
276  
277  
278

Estudos como os de Souza *et al.* (2019) e Silva e Carvalho (2017), focam em cerâmica vermelha em camadas de pavimentos, utilizando ensaios como análise granulométrica e Índice de Suporte Califórnia (ISC). Já Arulrajah *et al.* (2013) e Giwangkara *et al.* (2019) exploram o uso de agregados reciclados e cerâmica em sub-bases e bases, incluindo testes como abrasão de Los Angeles e análise de peneira pós-compactação. A diversidade de ensaios e os resíduos utilizados revela um panorama abrangente sobre a viabilidade e desempenho desses materiais reciclados em pavimentação.

A Tabela 3 resume a influência dos resíduos de concreto e cerâmica nas propriedades mecânicas das camadas de base e sub-base de pavimento, de acordo com a leitura dos artigos selecionados. Ela abrange quatro propriedades principais: módulo de resiliência, deformação permanente, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e abrasão Los Angeles. Cada estudo foi avaliado quanto ao impacto desses resíduos em cada uma dessas propriedades.

Tabela 3 – Influência dos resíduos de concreto e cerâmica nas propriedades mecânicas das camadas de pavimento

Referências	Resíduos	Propriedades			
		Módulo de resiliência (MR)	Deformação Permanente (DP)	Índice de Suporte Califórnia (CBR)	Abrasão Los Angeles (LA)
Alnedawi e Rahman (2021)	Cerâmica vermelha	"+"	"-"	∅	∅
Azam <i>et al.</i> (2024)	RCA e tijolos reciclados	"+"	∅	∅	∅
Doan <i>et al.</i> (2024)	RCA, RAP, CB	"+"	"+"	∅	∅

Toka e Olgun (2023) <sup>4</sup>	RCA	"="	"+"	"+"	∅
Saberian <i>et al.</i> (2023)	RCA	"+"	"-"	∅	∅
Akbas <i>et al.</i> (2023) <sup>2</sup>	RCA	"+"	"-"	∅	∅
Akbas <i>et al.</i> (2021) <sup>3</sup>	RCA	"+"	"+"	∅	∅
Saberian e Li (2021)	RCA	"+"	∅	∅	∅
Sharma <i>et al.</i> (2023)	RCA e tijolos reciclados	∅	∅	∅	"="
Kox <i>et al.</i> (2019)	RCA	∅	∅	∅	"="
Silva e Carvalho (2017)	Cerâmica vermelha	∅	∅	"+"	∅
El-Tahan <i>et al.</i> (2018)	RCA	∅	∅	∅	"+"
Jayakody <i>et al.</i> (2019) <sup>1</sup>	RCA	"-"	"+"	∅	∅
Arulrajah <i>et al.</i> (2013)	RCA e CB	"+"	"+"	"="	"="
Giwangkara <i>et al.</i> (2019)	RCA	∅	∅	"_"	∅
Souza <i>et al.</i> (2019)	Cerâmica vermelha	∅	∅	"+"	"="
Santos <i>et al.</i> (2021)	Cerâmica vermelha	∅	∅	"+"	"="

<sup>1</sup>O MR aumenta rapidamente no início dos ciclos de carga devido à densificação, mas diminui com o aumento do teor de umidade. Após certo ponto, o MR atinge um estado estacionário, indicando estabilidade.

<sup>2</sup>Inicialmente, as amostras de base e sub-base apresentaram redução na deformação permanente até o 5º ciclo de congelamento e descongelamento (F-T). No entanto, após o 10º ciclo, a deformação permanente aumentou, indicando que os materiais reciclados (RCA) sofreram enfraquecimento sob ciclos repetidos de F-T.

<sup>3</sup>As deformações permanentes foram maiores nos primeiros 2500 ciclos de carga. A maior deformação permanente foi registrada em 0,13% após 10.000 ciclos de carga e 20 ciclos F-T.

<sup>4</sup>Misturas incorporando 50% de RCA apresentaram menores valores, enquanto que as misturas com 75% de RCA mantiveram resultados superiores.

"+": aumentou/"-": diminuiu/"∅": não informado/"=": resultado se manteve dentro do limite

Fonte: Autores (2025).

279  
280  
281  
282  
283  
284  
285  
286  
287  
288  
289  
290  
291  
292  
293  
294  
295

Mais adiante, o trabalho irá fornecer uma verificação mais detalhada desses resultados, discutindo as implicações práticas para o uso de resíduos reciclados em pavimentação e como as condições específicas de cada estudo influenciaram no desempenho dos materiais. Permitindo assim, uma compreensão mais aprofundada dos benefícios e limitações dos diferentes tipos de materiais, contribuindo para uma avaliação mais precisa e informada sobre sua aplicabilidade em projetos de engenharia civil.

#### 4.2.1 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência (MR) é um importante parâmetro na avaliação da durabilidade dos pavimentos, pois retrata a habilidade do material em recuperar e absorver e energia após uma deformação elástica. No Brasil, a determinação desse módulo em misturas asfálticas é realizada de acordo com a norma DNIT ME 134/2018, que descreve o “Método de ensaio para a determinação do módulo de resiliência”. Ao obter um valor de MR mais alto, informa que o material possui maior rigidez e é mais capaz de suportar cargas repetidas sem apresentar deformações permanentes significativas.

296 Na Tabela 4, são apresentados os principais resultados do ensaio de avaliação do Módulo de  
 297 Resiliência.  
 298  
 299

Tabela 4 – Desempenho dos materiais no ensaio do módulo de resiliência

Estudo	Material/Condição	Principais Resultados
Azam <i>et al.</i> (2024)	Concreto reciclado e tijolos reciclados	O MR aumentou em condições mais secas e diminuiu em climas úmidos, especialmente para materiais com alto teor de tijolos reciclados.
Doan <i>et al.</i> (2024)	RCA + 10% FA, RCA + 10% S, CB + 10% FA, CB + 10% S, RAP + 10% FA, e RAP + 10% S, com um ativador de NaOH na proporção de 0,1	As misturas com escória (S) apresentaram os maiores aumentos no MR em comparação com aquelas com cinza volante (FA), confirmando um desempenho superior na recuperação de deformações sob condições de carga cíclica.
Toka e Olgun (2023)	Misturas criadas pela adição de RCAs a NA nas proporções de 25%, 50% e 75%	MR do NA foi superior a 300 MPa; misturas com RCA apresentaram valores adequados, com o melhor desempenho para 50% RCA1 (concreto de alta de resistência).
Saberian <i>et al.</i> (2023)	RCA com diferentes proporções de fibras de Polipropileno	O MR aumentou em 7,2% com 0,1% de Polipropileno (PP), mas diminuiu com 0,3% de PP devido à formação de aglomerações de fibras.
Akbas <i>et al.</i> (2023)	RCA	O módulo de resiliência (MR) aumentou com o número de ciclos de congelamento e descongelamento (F-T) até o ciclo 5, seguido de uma queda gradual. O valor máximo de MR para a amostra de base foi de 331,92 MPa (35% de aumento).
Akbas <i>et al.</i> (2021)	RCA	O módulo resiliente (MR) para as amostras padrão variou de 60 a 410 MPa para a sub-base e de 65 a 430 MPa para a base. Amostras submetidas a ciclos F-T mostraram aumento de até 40% no MR para as amostras de base após 5 ciclos F-T. Após 20 ciclos, houve uma redução no MR.
Alnedawi e Rahman (2021)	RCA reforçado com geogrelhas triaxiais	MR: 256 MPa; aumenta com tensão desviadora; diminui com aumento da umidade
Saberian e Li (2021)	RCA puro e RCA + borracha	As amostras submetidas a ciclos de gelo-degelo tiveram um aumento no MR em relação às amostras de controle, com destaque para as amostras T-F, que apresentaram os maiores valores de módulo resiliente devido ao endurecimento estrutural causado pelo ciclo térmico.
Jayakody (2019)	RCA compactado	Aumento inicial rápido no MR; diminuição com aumento do teor de umidade
Arulrajah <i>et al.</i> (2013)	RCA	Boa performance com 70% umidade do teor ótimo de compactação (OMC)

RCA - Agregado de Concreto Reciclado; CB - Tijolo Triturado; RAP - Pavimento Asfáltico Recuperado; FA - Cinza Volante; S - escória; NA - Agregado Natural

Fonte: Autores (2025).

300  
 301  
 302  
 303  
 304  
 305  
 306  
 307  
 308  
 309  
 310  
 311  
 312  
 313

Arulrajah *et al.* (2013) apresentaram que, além da densidade e da umidade, a coesão e o ângulo de atrito dos materiais podem influenciar no desempenho resiliente. Para materiais de agregados de concreto reciclado, o MR apresentou um bom desempenho, mesmo com 70% de umidade do teor ótimo de compactação.

Jayakody *et al.* (2019) avaliaram o MR de corpos de prova de agregado de concreto reciclado que foram compactados, observando um rápido aumento inicial no MR ao longo dos primeiros ciclos de carga devido à densidade do material. Porém, com o aumento de teor de umidade o valor MR apresentou uma diminuição. Em baixos níveis de umidade, o agregado apresentou maior rigidez e um desempenho mais estável em termos de MR, com menor sensibilidade a variações de umidade entre 60% e 80%.

Alnedawi e Rahman (2021) investigaram a adaptação do uso de agregado de concreto reciclado reforçado com geogrelhas como material de sub-base. A análise realizada mostrou que houve

314 um aumento do módulo de resiliência com a elevação da tensão desviadora, ou seja, o maior  
315 valor de MR foi obtido com uma tensão desviadora de 350 kPa. Entretanto, o MR reduziu à  
316 medida que a umidade aumentou, indicando uma sensibilidade relevante à presença de água.  
317 Além disso, ao final do teste, o valor do MR para o agregado reforçado com geogrelhas triaxiais  
318 foi superior ao não reforçado, com valores de 256 MPa e 232 MPa, respectivamente.  
319 Saberian e Li (2021) realizaram testes por meio do ensaio triaxial de carga repetida (RLT),  
320 avaliando os resultados obtidos a partir dos agregados reciclados de concreto (RCA), com e  
321 sem adição de borracha triturada, sob cargas cíclicas simulando o tráfego rodoviário. Os  
322 resultados mostraram que o MR mudou de acordo com o arranjo das amostras e as  
323 circunstâncias térmicas a que foram submetidas. As amostras de controle (RCA), sem adição  
324 de borracha, apresentaram valores entre 57 e 238 MPa, enquanto as misturas com borracha  
325 tiveram reduções, apresentando valores RCA + 0,5% borracha: 37–161 MPa; RCA + 1%  
326 borracha: 17–174 MPa; RCA + 2% borracha: 7–86 MPa. Direcionando atenção a última mistura  
327 que apresenta valores abaixo do recomendado.  
328 Saberian e Li (2021) submeteram as amostras a ciclos de congelamento e descongelamento,  
329 apresentando um crescimento relevante, com as amostras F-T (um dia de congelamento a -10°C  
330 seguido de um dia de descongelamento a 45°C) atingindo até 336 MPa, e as amostras T-F (um  
331 dia de descongelamento a 45°C seguido de um dia de congelamento a -10°C) como maiores  
332 valores, chegando a 612 MPa com 1% de borracha. Esse aumento foi atribuído à reorganização  
333 estrutural do RCA e à compactação causada pelos ciclos térmicos, deixando o material mais  
334 resistente.  
335 Em regiões mais frias, o ciclo de gelo e degelo são comumente observados e afetam o  
336 desempenho dos pavimentos asfálticos. Diante disso, Akbas *et al.* (2021) buscaram  
337 compreender os efeitos causados nas propriedades de rigidez do agregado de concreto  
338 reciclado, ao comparar com amostras não expostas, através da aplicação de um número variado  
339 de ciclos de gelo e degelo (1-3-5-10-20) e condução de testes como o módulo de resiliência. Os  
340 resultados dos ensaios do MR mostraram que até 5 ciclos, as amostras de base e sub-base  
341 apresentaram um aumento de 40% e 25%, respectivamente, atribuída à reação residual do  
342 cimento com água. Após os 5 ciclos, os resultados diminuíram gradualmente em torno da  
343 mesma taxa, podendo ser ocasionado por uma estrutura mais fraca e frágil em decorrência do  
344 aumento de ciclos, mas ainda assim os valores de MR para cada F-T se mantiveram acima dos  
345 valores das amostras padrão.  
346 Akbas *et al.* (2023) conduziram outra análise para explorar a viabilidade do uso de RCA para  
347 construir pavimentos flexíveis com alto desempenho e durabilidade. Inicialmente, observou um  
348 aumento na rigidez do material, que atingiu um pico no 5º ciclo F-T, onde o MR da base  
349 alcançou 331,92 MPa e o da sub-base 272,34 MPa. Porém, a partir do 10º ciclo F-T, o MR  
350 diminuiu para 237,11 MPa nas amostras da base e 247,64 MPa nas de sub-base. Esta queda  
351 continuou gradativamente, caindo cerca de 5% na base e 3% na sub-base após 20 ciclos F-T, e  
352 chegando a 232,54 MPa para a base e 212,61 MPa para a sub-base, informando uma degradação  
353 estrutural do material por meio da expansão e contração provenientes da ação repetitiva do  
354 congelamento da água presente nos agregados. Mesmo após o 20º ciclo F-T, o MR dos  
355 agregados reciclados permaneceu superior ou comparável ao dos agregados virgens, conforme  
356 indicado na literatura.  
357 Toka e Olgun (2023) avaliaram o desempenho de agregados de concreto reciclado (RCA) em  
358 camadas de base e sub-base de pavimentos comparando-os com agregados naturais (NA). Os  
359 ensaios de módulo de resiliência indicaram que o agregado natural apresentou os maiores  
360 valores de MR (acima de 300 MPa), enquanto os agregados de concretos reciclados puros  
361 tiveram valores entre 55 e 266 MPa, com destaque para o RCA2 que atingiu uma média de 200  
362 MPa. Para as misturas, a melhor performance foi observada na composição com 50% de RCA1  
363 (concreto de alta de resistência), que alcançou um MR médio de 250 MPa.

364 Saberian *et al.* (2023) avaliaram o desempenho das propriedades mecânicas de agregados de  
 365 concreto reciclado reforçados com fibras de polipropileno (PP) para aplicações sustentáveis em  
 366 bases e sub-bases de estradas e, para isso, realizou testes triaxiais de carga repetida, onde os  
 367 valores do módulo de resiliência foram obtidos por meio da média dos valores de MR de 15  
 368 estágios de testes. Os ensaios demonstraram que o valor mais alto foi obtido para a mistura com  
 369 0,1% de fibras de polipropileno, atingindo 117,34 MPa. Esse aumento foi atribuído à melhoria  
 370 da resistência à tração entre as partículas de RCA proporcionadas pelas fibras, reduzindo  
 371 deslocamentos internos e aprimorando a rigidez do material. Entretanto, com o aumento do teor  
 372 de PP para 0,2% e 0,3%, o módulo de resiliência caiu para 87,38 MPa e 70,82 MPa,  
 373 respectivamente. Todos os valores se encaixam dentro das faixas recomendadas para aplicação  
 374 em sub-base, mas para a aplicação em base, somente a mistura com 0,3% de PP não se encaixa  
 375 nos critérios.

376 Doan *et al.* (2023) estudaram a viabilidade do uso de geopolímeros à base de cinza volante (FA)  
 377 e escória (S) de um componente para estabilizar agregados de construção e demolição. Para  
 378 isso, conduziu ensaios de módulo de resiliência, onde evidenciaram que as misturas contendo  
 379 escória apresentaram os maiores valores devido ao melhor desenvolvimento da matriz  
 380 geopolimérica, enquanto as misturas com cinza volante tiveram valores menores.

381 Azam *et al.* (2024) realizaram teste de MR em amostras de materiais reciclados de materiais de  
 382 RCD sob condições de umidade ótima (OMC) e densidade de 98% da Densidade Máxima  
 383 Secagem (MDD), onde ocorreram testes sob pressões confinantes distintas (25, 50 e 75 kPa)  
 384 para simular estresses típicos em aplicações de engenharia, incluindo ciclos de carga repetidos.  
 385 Os resultados demonstraram que a sucção matricial teve um impacto relevante no desempenho  
 386 do pavimento por demonstrar ser mais porosos em comparação aos agregados naturais,  
 387 principalmente em relação ao rutting e às trincas por fadiga. Além disso, neste estudo foi  
 388 possível verificar o impacto da espessura do pavimento e das variações climáticas em seu  
 389 desempenho. Em climas frios e úmidos, as camadas de base mais finas, compostas por materiais  
 390 de RCD, demonstraram seu potencial para a construção de pavimentos com menor impacto  
 391 ambiental.

392 Em contrapartida, os estudos de Sharma *et al.* (2023), Kox *et al.* (2019), Giwangkara *et al.*  
 393 (2019), Santos *et al.* (2021), Souza *et al.* (2019), El-Tahan *et al.* (2018) e Silva e Carvalho  
 394 (2017) não realizaram ensaios de módulo de resiliência e, portanto, não contribuíram com  
 395 informações específicas sobre esse parâmetro para os materiais analisados.

396

#### 397 4.2.2 Deformação Permanente

398 A deformação permanente (DP) é um fator relevante na avaliação do desempenho de materiais  
 399 para pavimentação, indicando a capacidade de um material de resistir a deformações sob cargas  
 400 repetidas. No Brasil, a determinação desse módulo é realizada de acordo com a norma DNIT  
 401 IE 179/2018, que especifica os procedimentos de ensaio para determinação da deformação  
 402 permanente. A seguir, na Tabela 5, são apresentados os principais resultados do ensaio de  
 403 Deformação Permanente.

404

405

Tabela 5 – Desempenho dos materiais no ensaio de deformação permanente

Estudo	Material/Condição	Principais Resultados
Doan <i>et al.</i> (2024)	RCA + 10% S	Alta recuperação de deformação, comportamento resiliente elevado.
	RAP + 10% FA	Maior tendência à deformação permanente.

<b>Akbas <i>et al.</i> (2023)</b>	RCA	Inicialmente, as amostras de base e sub-base apresentaram redução na deformação permanente até o 5º ciclo de congelamento e descongelamento (F-T). No entanto, após o 10º ciclo, a deformação permanente aumentou, indicando que os materiais reciclados (RCA) sofreram enfraquecimento sob ciclos repetidos de F-T.
<b>Saberian <i>et al.</i> (2023)</b>	RCA com diferentes proporções de fibras de Polipropileno	A incorporação de 0,1% de PP reduziu a deformação permanente e transformou o comportamento da mistura de RCA de "colapso incremental" para "fluência plástica".
<b>Toka e Olgun (2023)</b>	Misturas criadas pela adição de RCAs a NA nas proporções de 25, 50 e 75%	O NA apresentou a menor deformação permanente (0,231%), enquanto o RCA puro apresentou valores mais altos (0,349% a 0,380%). As misturas com 50% RCA tiveram menor deformação do que o RCA puro, mas maior que o NA.
<b>Akbas <i>et al.</i> (2021)</b>	RCA	As deformações permanentes foram maiores nos primeiros 2500 ciclos de carga. A maior deformação permanente foi registrada em 0,13% após 10.000 ciclos de carga e 20 ciclos F-T. Os valores de deformação plástica foram aproximadamente 10-20% maiores nas amostras da sub-base.
<b>Alnedawi e Rahman (2021)</b>	RCA com e sem geogrelhas triaxiais	Deformação permanente aumenta com teor de umidade (4.398 µ€ a 60% OMC, 6.840 µ€ a 70% OMC, 8.733 µ€ a 80% OMC); menor deformação no RCA reforçado com geogrelhas triaxiais
<b>Jayakody <i>et al.</i> (2019)</b>	RCA compactado	Deformação plástica aumenta com ciclos de carga e estresse aplicado, mas estabiliza após 10.000 ciclos; impacto limitado da umidade
<b>Arulrajah <i>et al.</i> (2013)</b>	RCA	Desempenho superior com menores deformações permanentes e módulos de resiliência mais altos; sensibilidade à umidade

RCA - Agregado Reciclado de Concreto; RAP - Pavimento Asfáltico Recuperado; S - Escória; FA - Cinza Volante; NA - Agregado Natural

Fonte: Autores (2025).

406  
407  
408  
409  
410  
411  
412  
413  
414  
415  
416  
417  
418  
419  
420  
421  
422  
423  
424  
425  
426  
427  
428

No estudo de Arulrajah *et al.* (2013), observou-se que os testes mostram que os materiais reciclados de construção e demolição indicaram um desempenho satisfatório a uma umidade alvo de 70% da umidade ótima sob compactação modificada, por outro lado, com umidades maiores como 80-90%, mostrando limites mais altos de deformação permanente. O RCA apresentou deformação permanente significativamente menor, indicando um desempenho superior ou equivalente aos materiais típicos de pedra.

Jayakody *et al.* (2019) observaram que a deformação plástica das amostras de RCA compactadas aumentou com o número de ciclos de carga e com acréscimo do estresse aplicado, mas a taxa de aumento da deformação diminuiu à medida que os ciclos continuaram sugerindo uma estabilização. Em baixos valores de estresse aplicado, as curvas de deformação atingiram um estado estável após 10.000 ciclos, mostrando que o RCA atingiu um "limite de shakedown plástico", onde o material alcança um estado estável com pouca deformação permanente adicional. Mesmo com o aumento da umidade, as deformações plásticas não aumentaram drasticamente, ao contrário do que é observado em outros materiais adicionados na pavimentação. O RCA mostrou uma boa resistência à deformação plástica em altos teores de umidade sem colapso tornando-se adequado para uso em pavimentação.

Alnedawi e Rahman (2021) constataram que a deformação permanente do RCA aumentou com o acréscimo do teor de umidade, apresentando valores de 4.398 µ€ a 60% de OMC, 6.840 µ€ a 70% de OMC e 8.733 µ€ a 80% de OMC. Além disso, o RCA reforçado com geogrelhas triaxiais e biaxiais apresentam valores de deformação permanente mais baixos em comparação ao RCA não reforçado, com base em amostras secas a 60% da umidade ótima de compactação.

429 Na análise também foi possível concluir que o RCA manteve uma alta resistência à deformação  
430 plástica mesmo com uma umidade alta, validando como material de pavimentação.

431 Akbas *et al.* (2021) conduziram ensaios para avaliar o comportamento de deformação  
432 permanente em amostras de base e sub-base preparadas com agregado de concreto reciclado  
433 submetidas a 10.000 ciclos de carga repetida e a um número variado de ciclos de gelo e degelo  
434 (1-3-5-10-20). Os resultados dos ensaios mostraram mudanças significativas até 2.500 ciclos  
435 de carga e, após isso, houve uma redução das deformações permanentes. Além disso, nos ciclos  
436 de gelo e degelo, as amostras de sub-base apresentaram deformações plásticas de 10% a 20%  
437 superiores às amostras padrão, alcançando 0,13% de deformação máxima após 10.000 ciclos  
438 de carga e após 20 ciclos de F-T. Esse comportamento foi influenciado pela maior rigidez e  
439 pelo efeito de absorção nas primeiras fases, enquanto o aumento da deformação após 5 ciclos  
440 de F-T foi atribuído à fragilização da estrutura granular pela formação de cristais de gelo. O  
441 estudo também identificou que o número limite de ciclos F-T, onde o módulo de resiliência é  
442 máximo e a deformação permanente mínima foi de 5 ciclos.

443 Akbas *et al.* (2023) apresentaram amostras que foram submetidas a 10.000 ciclos de carga, a  
444 carga aplicada foi de 206,8 kPa de tensão axial e 34,5 kPa de pressão confinante. O resultado  
445 mostrou que, até 5 ciclos de congelamento-descongelamento (F-T), a camada de base teve uma  
446 redução de 22% na deformação, caindo de 0,0875 para 0,0720 e a sub-base teve uma redução  
447 de 11%, de 0,0940 para 0,0845, pela hidratação do cimento residual e ao aumento do  
448 intertravamento entre partículas, tornando a estrutura mais rígida e resistente. No entanto, após  
449 10 e 20 ciclos F-T, a tendência se inverteu, com as amostras sofrendo um aumento contínuo na  
450 deformação residual, chegando a 0,1060 na base e 0,1295 na sub-base. Esse aumento foi  
451 atribuído ao impacto dos ciclos F-T, que geraram microfissuras e perda de resistência estrutural,  
452 tornando mais vulnerável à deformação permanente sob cargas repetitivas.

453 Toka e Olgun (2023) conduziram ensaios de deformação permanente submetendo as amostras  
454 a pressão de confinamento e a tensões desviadoras variáveis ao longo de quinze etapas de  
455 carregamento, cada uma com 100 ciclos, totalizando 12.500 ciclos de carga. Os ensaios  
456 mostraram que o agregado natural puro obteve o menor valor de deformação, enquanto os  
457 agregados de concreto reciclado apresentaram maiores valores. Além disso, observou que as  
458 misturas com 75% de RCA tiveram maior deformação, enquanto que a mistura com 50% de  
459 RCA1 (concreto de alta resistência) apresentou o melhor desempenho com deformação  
460 permanente de 0,273%, inferior à dos RCAs puros.

461 Saberian *et al.* (2023) realizaram ensaios de deformação permanente e os resultados  
462 demonstraram que a incorporação de fibras de polipropileno (PP) no agregado de concreto  
463 reciclado resultou em uma redução significativa da deformação permanente axial e das taxas  
464 de deformação permanente. Especificamente, a adição de 0,1% de PP proporcionou a melhor  
465 resposta, transformando o comportamento do RCA de “Colapso Incremental” para “Fluência  
466 Plástica”, caracterizada por uma deformação inicial substancial seguida de uma diminuição  
467 gradual na taxa de deformação. Esse comportamento é ideal para camadas de base e sub-base  
468 de pavimentos, pois indica uma maior resistência à deformação sob cargas cíclicas.

469 Doan *et al.* (2023) realizaram ensaios de deformação permanente que apresentaram misturas  
470 estabilizadas com geopolímeros à base de cinza volante (FA) e escória (S) que mostraram  
471 diferentes níveis de resistência à deformação plástica sob carregamento cíclico. Os resultados  
472 indicaram que as misturas contendo escória exibiram menor deformação em comparação com  
473 aquelas com cinza volante. A resistência à deformação permanente aumentou com o tempo de  
474 cura e com temperaturas elevadas, refletindo um ganho significativo de resistência estrutural.

475 Em contrapartida, os estudos de Azam *et al.* (2024), Sharma *et al.* (2023), Saberian e Li (2021),  
476 Santos *et al.* (2021), Kox *et al.* (2019), Giwangkara *et al.* (2019), Souza *et al.* (2019); El-Tahan  
477 *et al.* (2018), Silva e Carvalho (2017) não realizaram ensaios de deformação permanente e,

478 portanto, não contribuíram com informações específicas sobre esse parâmetro para os materiais  
479 analisados.

480

#### 481 4.2.3 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

482 O Índice de Suporte Califórnia (ISC), também conhecido como ensaio CBR (California Bearing  
483 Ratio), é um indicador fundamental para avaliar a capacidade do solo de suportar o tráfego,  
484 fornecendo informações sobre a resistência do solo e sua capacidade de suportar cargas sem  
485 deformações excessivas. No Brasil, a norma DNIT ME 172/2016 tem por objetivo fixar as  
486 condições para determinação do ISC de solos, utilizando amostras não trabalhadas. A seguir,  
487 na Tabela 6, são apresentados os principais resultados para o Índice de Suporte Califórnia.

488

489

Tabela 6 – Desempenho dos materiais para o ISC

Estudo	Material/Condição	Principais Resultados
Toka e Olgun (2023)	Misturas criadas pela adição de RCAs a NA nas proporções de 25, 50 e 75%	Os RCAs puros tiveram CBR entre 114% e 133,77%, enquanto o NA obteve 75,14%. As misturas com 50% RCA apresentaram os menores valores de CBR, com média de 40%, indicando uma pior compactação dos grãos.
Santos <i>et al.</i> (2021)	RCV	Valores de CBR de 8% para compactação normal, 42% para compactação intermediária e 30% para compactação modificada.
Giwangkara <i>et al.</i> (2019)	Agregados naturais (NA) e reciclados (RCA)	NA apresentou CBR de 97,0%; RCA obteve 67,3%, abaixo do mínimo de 80%
Souza <i>et al.</i> (2019)	Solo com RCV	CBR aumentou com adição de RCV, máximo para mistura com 50% de RCV; todas as amostras mostraram 0% de expansão
Arulrajah <i>et al.</i> (2013)	RCA	Atendeu aos requisitos de CBR para sub-bases de pavimento

RCA - Agregado Reciclado de Concreto; RCV - Resíduo de Cerâmica Vermelha; NA - Agregado Natural

490

491

Fonte: Autores (2025).

492 Arulrajah *et al.* (2013) observaram que materiais reciclados de concreto tiveram resultados  
493 satisfatórios aos requisitos de ISC para uso em sub-bases de pavimento, apresentando valores  
494 entre 118% e 160%, cujo valor exigido pela norma em que o estudo foi desenvolvido é de 80%.  
495 O estudo de Silva e Carvalho (2017) revelou que uma amostra com 50% de solo e 50% de RCV  
496 mostrou um valor de ISC adequado para uso em camada de base de pavimentos de baixo  
497 tráfego. Além disso, essa mistura apresentou uma expansibilidade de 0,18%, sendo inferior ao  
498 valor exigido pela norma do DNIT (2006) de 0,5%.

499 Giwangkara *et al.* (2019) avaliaram o ISC de agregados naturais e agregados reciclados de  
500 concreto. O agregado natural apresentou um ISC de 97%, enquanto o RCA obteve 67,3%,  
501 ficando abaixo do requisito mínimo de 80%. Os resultados indicaram que o RCA precisa de  
502 melhorias adicionais para ser viável como material de base rodoviária, especialmente quando  
503 comparado ao desempenho superior do agregado natural.

504 Souza *et al.* (2019) estudaram cinco amostras e observaram que o ISC aumentou com a adição  
505 de RCV, atingindo o máximo para a mistura de solo com 50% de RCV. Todas as amostras  
506 mostraram 0% de expansão, atendendo às exigências normativas para diferentes camadas de  
507 pavimentos rodoviários. Isso indica que, embora uma proporção ótima de RCV melhore o ISC,  
508 a quantidade de adição deve ser cuidadosamente controlada para evitar a redução no  
509 desempenho.

510 Santos *et al.* (2021) relataram valores de ISC de 8% para compactação normal, 42% para  
 511 compactação intermediária e 30% para compactação modificada. Comparado às exigências da  
 512 NBR e DNIT, o RCV apresentou uma capacidade de suporte adequada, especialmente para uso  
 513 em subleito e sub-base, com desempenho melhorando nas condições adequadas de  
 514 compactação.  
 515 Toka e Olgun (2023) realizaram ensaios de Índice de Suporte Califórnia compactando as  
 516 amostras na umidade ótima sob compactação modificada e submetendo-as à imersão por quatro  
 517 dias antes da aplicação de carga com um pistão a 1,27 mm/min. Os resultados mostraram que  
 518 os agregados de concreto reciclado puros apresentaram os maiores valores de ISC, atingindo  
 519 uma média de 126%, enquanto que o agregado natural puro teve um ISC inferior a 75,14%.  
 520 Para as misturas, a incorporação de 50% de RCA apresentou os menores valores, enquanto que  
 521 as misturas com 75% de RCA mantiveram um resultado superior ao do agregado natural puro,  
 522 mas inferior aos RCAs puros.  
 523 Estudos de Alnedawi e Rahman (2021), Azam *et al.* (2024), Doan *et al.* (2024), Saberian *et al.*  
 524 (2023), Akbas *et al.* (2023), Sharma *et al.* (2023); Saberian e Li (2021), Akbas *et al.* (2021),  
 525 Jayakody *et al.* (2019), Kox *et al.* (2019), El-Tahan *et al.* (2018), Silva e Carvalho (2017) não  
 526 realizaram ensaios de Índice de Suporte Califórnia e, portanto, não contribuíram com  
 527 informações específicas sobre esse parâmetro para os materiais analisados.

#### 528 4.2.4 Abrasão Los Angeles

529 Com o Ensaio de Abrasão Los Angeles (LA) é possível avaliar a resistência de agregados à  
 530 abrasão e desgaste. Este ensaio é fundamental para garantir que os agregados reciclados,  
 531 resíduos das obras de construção, em pavimentos tenham a durabilidade e a resistência  
 532 necessárias para suportar as condições de uso e tráfego. No Brasil, a Norma DNIT ME 451/2025  
 533 estabelece a metodologia de ensaio que prescreve o método para determinação do valor do  
 534 desgaste do agregado por abrasão e impacto no equipamento “Los Angeles” A seguir, na Tabela  
 535 7 são apresentados os principais resultados do ensaio.

536 Tabela 7 – Desempenho dos materiais para o ensaio de Abrasão Los Angeles

Estudo	Material/Condição	Principais Resultados
Sharma <i>et al.</i> (2023)	RCA e RBA	RCA: 41,23%
		RBA: 42,18%
		75%RCA + 25%RBA: 40,59%
		50%RCA + 50%RBA: 41,89%
		25%RCA + 75%RBA: 42,33%
Santos <i>et al.</i> (2021)	RCV	O valor de abrasão para o agregado reciclado de 44%, inferior ao limite máximo permitido de 50% conforme o DNIT (2006).
Souza <i>et al.</i> (2019)	RCV	Abrasividade média de 41%, considerada adequada para uso em camadas de pavimentação conforme padrões estabelecidos.
Kox <i>et al.</i> (2019)	RCA	Os resultados do ensaio de abrasão Los Angeles (LA) para os agregados de concreto reciclado (RCA) variaram entre $\leq 30\%$ para agregados submetidos a um processo de britagem em três estágios e 31–35% para aqueles com dois estágios de britagem. O limite especificado pela norma S250 era LA $\leq 35\%$ , e a maioria das amostras testadas atendeu a esse requisito.
El-Tahan <i>et al.</i> (2019)	RCA velho e RCA novo	Os resultados da perda por abrasão na máquina de Los Angeles para as misturas asfálticas foram 7,9% para 100% RCA novo, 13,9% para 100% RCA grosso novo com agregado miúdo natural, 13,2% para 100% RCA velho e 14,5% para 100% RCA grosso velho com agregado miúdo natural.
Arulrajah <i>et al.</i> (2013)	RCA	Cumpriu o critério máximo de abrasão de Los Angeles, com maior durabilidade em comparação com outros materiais.

Fonte: Autores (2025).

539

540

541

542

543

544

545

546

547

548

549

550

551

552

553

554

555

556

557

558

559

560

561

562

563

564

565

566

567

568

569

570

571

572

573

574

575

576

577

578

579

580

581

582

583

584

585

586

587

Aralrajah *et al.* (2013) concluíram com sua análise que os resíduos de concreto reciclado cumpriram o limite máximo (40%) de abrasão Los Angeles, atingindo 28%, mostrando maior durabilidade em comparação com outros materiais. Destacando que, os resíduos de concreto são uma boa alternativa com características que indicam resistência adequada nas aplicações de pavimentação.

El-Tahan *et al.* (2018) retrataram a utilização de dois tipos de agregados de concreto reciclado: RCA novo, cubos de concreto de testes de controle de qualidade, e RCA velho, concretos de demolição de edifícios antigos, onde apresentaram menor perda na Abrasão de Los Angeles (19,01%) e um valor mais elevado de Abrasão de Los Angeles (31,80%), próximo do limite máximo de 40%, respectivamente. Nos testes de mistura asfáltica, foram utilizadas quatro diferentes proporções de RCA: 100% RCA novo, 100% RCA velho, 100% RCA grosso novo combinado com 100% de agregado miúdo natural, e 100% RCA grosso velho combinado com 100% de agregado miúdo natural. Os resultados da perda por abrasão na máquina de Los Angeles para as misturas asfálticas foram 7,9% para 100% RCA novo, 13,9% para 100% RCA grosso novo com agregado miúdo natural, 13,2% para 100% RCA velho e 14,5% para 100% RCA grosso velho com agregado miúdo natural. Valores estes que ficaram abaixo do limite máximo de 15% recomendado para misturas asfálticas, mostrando boa resistência ao desgaste.

Souza *et al.* (2019) mostraram que os resíduos mais gerados na construção civil são provenientes da indústria de cerâmica vermelha (RCV) apresentaram uma abrasividade média de 41%. De acordo com padrões estabelecidos pela NBR 11804 (ABNT, 1991) e DNIT (2006) para o teste de abrasão de Los Angeles, este valor obtido é classificado como adequado para uso em camadas de pavimentação.

Kox *et al.* (2019) verificaram que o valor de LA para os lotes de RCA, após um processo de britagem em duas etapas variou entre 31% e 35%, exceto para o lote 15 que continha um conteúdo reduzido de concreto e uma maior presença de vidro, enquanto o valor de LA após um processo de britagem em três etapas, apresentou um valor inferior a 30 %. Este resultado sugere que a britagem em três etapas resulta em agregados reciclados com melhor desempenho em termos de resistência à abrasão.

Santos *et al.* (2021) encontraram em sua análise o valor de abrasão para o agregado reciclado de 44%, inferior ao limite máximo permitido de 50% conforme o DNIT (2006). Este resultado indica uma boa resistência ao desgaste, sugerindo que o material possui um desempenho satisfatório para aplicações de pavimentação.

Sharma *et al.* (2023) realizaram o ensaio de Abrasão Los Angeles para avaliar a resistência à abrasão dos agregados reciclados de concreto (RCA), agregados reciclados de tijolos (RBA) e suas misturas. Os resultados indicaram que o valor do RBA foi relativamente superior ao do RCA, com valores variando entre 40,59%. Para as misturas de RCA-RBA o valor foi de 42,33% e 42,18% para o RBA puro. Esses valores não estão dentro dos limites aceitáveis para aplicações em pavimentação, conforme as especificações do MoRTH (Ministério de Transportes e Rodovias da Índia), que estabelece um limite máximo de 40% para camadas de base e sub-base.

Em contrapartida, os estudos de Azam *et al.* (2024), Doan *et al.* (2024), Toka e Olgun (2023), Saberian *et al.* (2023), Akbas *et al.* (2023), Saberian e Li (2021), Alnedawi e Rahman (2021), Akbas *et al.* (2021), Giwangkara *et al.* (2019), Jayakody *et al.* (2019), Silva e Carvalho (2017) não realizaram ensaios de Abrasão Los Angeles e, portanto, não contribuíram com informações específicas sobre esse parâmetro para os materiais analisados.

## 5 CONCLUSÕES

588 A revisão sistemática sobre a utilização de resíduos da construção civil, em especial de cerâmica  
589 e de concreto, em pavimentos asfálticos apresentou tanto vantagens quanto desafios associados  
590 à utilização e aplicação desses materiais reciclados. A pesquisa, que iniciou com 80 documentos  
591 e resultou em 17 estudos relevantes, evidenciou que, embora os resíduos reciclados possam  
592 oferecer soluções sustentáveis e sejam economicamente viáveis para pavimentação, existe uma  
593 variação significativa em seu desempenho, dependendo das metodologias e condições testadas.  
594 A distribuição temporal das publicações indicou um período de maior atividade acadêmica nos  
595 anos de 2013 e 2024, porém mostrou uma produção limitada na maioria dos anos. Essa lacuna  
596 sugere uma necessidade de se realizar mais pesquisas, discussões contínuas e testes para  
597 potencializar o conhecimento e melhorar as práticas na utilização de resíduos reciclados em  
598 pavimentos.

599 Os estudos selecionados abrangem diversos parâmetros mecânicos, incluindo módulo de  
600 resiliência (MR), deformação permanente, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e abrasão Los  
601 Angeles. Os resultados indicam que os resíduos cerâmicos e de concreto podem melhorar  
602 significativamente certas propriedades mecânicas dos materiais de pavimentação quando  
603 comparadas com materiais tradicionais, porém com algumas ressalvas. Por exemplo, o módulo  
604 de resiliência mostrou melhorias relevantes com a adição de determinados resíduos, em  
605 contrapartida com a adição outros, obtiveram resultados variados dependendo das condições de  
606 umidade e compactação. A deformação permanente foi outro parâmetro crucial, exibindo um  
607 desempenho adequado, ao mesmo tempo mostraram vulnerabilidade sob condições de alta  
608 umidade.

609 Durante o estudo, observou a importância do teste de congelamento-descongelamento, onde  
610 desempenha um papel fundamental ao analisar a durabilidade e resistência dos agregados  
611 reciclados de concreto, principalmente em regiões suscetíveis a maiores variações térmicas.  
612 Este teste permite avaliar rigidez, o módulo resiliente e a resistência mecânica do RCA ao longo  
613 dos ciclos de congelamento e descongelamento, podendo indicar possíveis perdas de  
614 desempenho.

615 Diante o exposto entende-se que os resíduos cerâmicos e de concreto demonstram um bom  
616 potencial para serem incorporados em pavimentos asfálticos, possibilitando uma alternativa  
617 sustentável e econômica. Entretanto, com os diferentes resultados obtidos, percebe-se a  
618 importância na avaliação mais detalhada das condições específicas de uso e das propriedades  
619 dos materiais. A continuidade da pesquisa e o desenvolvimento de metodologias são essenciais  
620 para otimizar a aplicação desses materiais e possivelmente solucionar as limitações  
621 identificadas, garantindo uma melhor aplicabilidade dos resíduos reciclados no setor de  
622 pavimentação. Além disso, prevenindo repetições de estudos anteriores, e promovendo a  
623 identificação de soluções para desafios persistentes.

## 624 REFERÊNCIAS

- 625 AKBAS, Merve et al. Stiffness Properties of Recycled Concrete Aggregates as Unbound Base  
626 and Subbase Materials Under Freeze and Thaw Cycles. **Arabian Journal for Science and**  
627 **Engineering**, [s. l.], v. 46, p. 10569–10584, 2021.
- 628 AKBAS, Merve et al. Utilization of recycled concrete aggregates for developing high-  
629 performance and durable flexible pavements. **Construction and Building Materials**, [S. l.],  
630 p. 18, 20 set. 2023.
- 631 ALNEDAWI, Ali; RAHMAN, M. A. Recycled Concrete Aggregate as Alternative Pavement  
632 Materials: Experimental and Parametric Study. **Journal of Transportation Engineering,**  
633 **Part B: Pavements**, [s. l.], v. 147, 2021.

- 634 ARULRAJAH, A. *et al.* Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled  
635 Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications. **Journal of**  
636 **Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 25, ed. 8, 2013.
- 637 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 11804**: Materiais para sub-  
638 base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente – Especificação. Rio de  
639 Janeiro: ABNT, 1991.
- 640 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos**  
641 **Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. São Paulo, 2024.
- 642 AZAM, Abdelhalim et al. Life cycle assessment and pavement performance of recycled  
643 aggregates in road construction. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], p. 18, 19  
644 mar. 2024.
- 645 CONCEIÇÃO, Mário et al. Diagnóstico dos resíduos de demolição e construção no Brasil.  
646 **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 9, p. 87466-87481, 2021.
- 647 CONRADO, N. M. **Estudo sobre a reutilização e rejuvenescimento de resíduos da**  
648 **fresagem de revestimentos para produção de novos pavimentos asfálticos**. Mossoró,  
649 2021. 127 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) -  
650 Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2021.
- 651 CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução CONAMA N°**  
652 **307**. Brasil, 2002.
- 653 DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-IE**  
654 **179/2018**: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de  
655 Ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- 656 DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-**  
657 **ME 134/2018**: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de  
658 ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- 659 DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-**  
660 **ME 172/2016**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não  
661 trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.
- 662 DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-**  
663 **ME 451/2024**: Agregados – Determinação do desgaste por abrasão e impacto no equipamento  
664 “Los Angeles” – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2024.
- 665 DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de**  
666 **Pavimentação Rodoviária**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.
- 667 DOAN, Tung et al. Chemical stabilization of demolition wastes in pavement bases using one-  
668 part fly ash and slag based geopolymers. **Transportation Geotechnics**, [s. l.], v. 45, 2024.
- 669 EL-TAHAN, D. et al. Evaluation of recycled concrete aggregate in asphalt mixes.  
670 **TECHNICAL PAPER**, [S. l.], p. 13, 2018.
- 671 GALVÃO, T. F. *et al.* A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões  
672 sistemáticas. **Revista do SUS**, Brasília, n. 2, ed. 31, 2022.
- 673 GALVÃO, T. F. *et al.* Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A  
674 recomendação PRISMA. **Revista do SUS**, n. 2, ed. 24, p. 335-342, 2015.
- 675 GIWANGKARA, G.G. *et al.* Recycled concrete aggregate as a road base material. **Materials**  
676 **Science and Engineering**, [s. l.], v. 527, 2019.

- 677 HORTEGAL, M. V.; FERREIRA, T. C.; SANT'ANA, W. C. Utilização de agregados  
678 resíduos sólidos da construção civil para pavimentação em são luís - MA. **Pesquisa em Foco**,  
679 v. 17, n. 2, p. 60-74, 2009.
- 680 JAYAKODY, S. *et al.* Performance characteristics of recycled concrete aggregate as an  
681 unbound pavement material. **Heliyon**, [s. l.], v. 5, 2019.
- 682 KOX, S. *et al.* Experimental evaluation of the high-grade properties of recycled concrete  
683 aggregates and their application in concrete road pavement construction. **Case Studies in**  
684 **Construction Materials**, [S. l.], v. 11, 2019.
- 685 LIMA, J. L. B.; PINHEIRO, E. C. M. N.; OLIVEIRA, R. P. de. Resíduos de construção civil  
686 reaproveitados em obras de pavimentação de vias. **Brazilian Journal of Development**, v. 8,  
687 n. 10, p. 69220-69242, 2022.
- 688 MELO, A. L. R.; FERREIRA, M. L.; RODRIGUES, R. C. Utilização de resíduos da  
689 construção civil na pavimentação: uma revisão sistemática. **Engineering Sciences**, v.9, n.1,  
690 p.102-113, 2021.
- 691 MELO, E. V.; NETO, M. M.; BERNARDO, C. H. C.; BERNARDO, R. Resíduos de  
692 construção e demolição: uma revisão dos usos e aplicabilidades em estradas e rodovias (2015  
693 – 2020). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, 2021.
- 694 MOTA, J. **A destinação dos resíduos sólidos da construção civil em Manaus: do canteiro**  
695 **de obras ao destino final.** Pará, 2014. 62 f. Dissertação (Mestrado em Processos Construtivos  
696 e Saneamento Urbano) - Universidade Federal do Pará, Pará, 2014.
- 697 MOURA, L. S. **Incorporação de cinzas de algaroba geradas no APL de confecções do**  
698 **agreste pernambucano em concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ.** 2017. 97 f.  
699 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em  
700 Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco- Centro Acadêmico do  
701 Agreste, [S. l.], 2017.
- 702 MOURA, L. S. **Utilização de lodo de tratamento têxtil em revestimentos asfálticos:** uma  
703 **análise mecânica, microscópica e ambiental.** Recife, 2021. 193 f. Tese (Doutorado em  
704 Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.
- 705 PEIXOTO, V. Z. **A utilização do vidro moído como agregado miúdo em revestimentos**  
706 **asfálticos:** uma revisão sistemática. Campo Grande, 2023. 75 f. Dissertação (Mestrado em  
707 Ciência dos Materiais) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2023.
- 708 PENHA, André. **Uso de Resíduos da Construção Civil nas Camadas do Pavimento de**  
709 **Vias Urbanas.** 2018. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) -  
710 Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- 711 PEREIRA, L. A. F.; AMORIM, E. F.; NETO, O. F. Resíduos de construção e demolição  
712 aplicados nas camadas de pavimento rodoviário: uma revisão sistemática. **Research, Society**  
713 **and Development**, v. 11, n. 4, 2022.
- 714 RIOS, M. S. A.; MOL, M. P. G. A problemática dos resíduos de construção civil e a  
715 pavimentação como solução: uma revisão da literatura. **Journal of Engineering,**  
716 **Architecture and Tecnology Innovation**, v. 8, p. 409-428, 2020.
- 717 SABERIAN, Mohammad *et al.* Chemical stabilization of demolition wastes in pavement  
718 bases using one–part fly ash and slag based geopolymers. **Construction and Building**  
719 **Materials**, [s. l.], v. 405, 2023.

- 720 SABERIAN, Mohammad; LI, Jie. Effect of freeze–thaw cycles on the resilient moduli and  
721 unconfined compressive strength of rubberized recycled concrete aggregate as pavement  
722 base/subbase. **Transportation Geotechnics**, [S. l.], v. 27, 2021.
- 723 SAEZ, P.V., OSMANI, M., 2019. A diagnosis of construction and demolition waste  
724 generation and recovery practice in the European Union. **J. Clean. Prod.** 241,118400.
- 725 SANTOS, Marianny *et al.* Análise da aplicabilidade do resíduo de cerâmica vermelha na  
726 pavimentação. **7º Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção**,  
727 Porto Alegre, 2021.
- 728 SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. Ed, São Paulo: PINI, 2007.
- 729 SHARMA, Ajay *et al.* Assessment of geotechnical and geo-environmental behaviour of  
730 recycled concrete aggregates, recycled brick aggregates and their blends. **Cleaner Materials**,  
731 [s. l.], v. 7, 2023.
- 732 SILVA, A. B. T. **Reaproveitamento de resíduos da construção civil como material de**  
733 **base e sub-base de pavimentos asfálticos**. Pernambuco, 2016. 64 f. Trabalho de Conclusão  
734 de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco,  
735 Pernambuco, 2016.
- 736 SILVA, J. P. S.; CARVALHO, S. B. Uso de resíduos de cerâmica vermelha para o  
737 melhoramento de camadas de pavimentos de baixo tráfego em Palmas -TO. **Revista**  
738 **Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 41-52, 2017.
- 739 SILVA, Naiane Marinho. LIMA, Livia Ramos. Utilização de resíduos sólidos oriundos da  
740 construção civil em pavimentações de baixo tráfego: uma revisão bibliográfica. **Revista**  
741 **Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ed. 11, Vol. 08, pp. 148-167. 2021.
- 742 SOUZA, Wana *et al.* Resíduos de cerâmica vermelha como um material ambientalmente  
743 sustentável para uso na pavimentação. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias**  
744 **Ambientais (GESTA)**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 202-213, 2019.
- 745 TOKA, E. B.; OLGUN, M. Performance of granular road base and sub-base layers containing  
746 recycled concrete aggregate in different ratios. **International Journal of Pavement**  
747 **Engineering**, [s. l.], v. 23, p. 3729-3742, 2021.
- 748 WU, Huanyu *et al.* Generation characteristics and disposal paths of construction waste in  
749 public building project: A case study. **Cleaner Waste Systems**, [s. l.], v. 10, 2025.
- 750 ZIMMER, A. S. **Avaliação do potencial do uso de resíduos da construção civil como**  
751 **agregado para base e sub-base de pavimento asfáltico**. Dourados, 2019. Trabalho de  
752 Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia,  
753 Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2019.