



Estabilização de Solos Aplicada à Infraestrutura Viária: Impactos Técnicas e Soluções Sustentáveis — Uma Revisão Bibliográfica Sistemática e Estudo de Caso

Flaviane Beltrão Silva

Gestora de Transportes e Obras Públicas, Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, flaviane.beltrao@der.mg.gov.br

Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigolli

Fiscal de Transportes e Obras Públicas, Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, bruna.beleigoli@der.mg.gov.br

Giovanna Monique Alelvan, DSc

Professora Adjunto, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, giovannaalelvan@etg.ufmg.br

Vitor Oliveira Vasconcelos Reis

Mestrando, Universidade Tecnológica Federal do Estado de Minas Gerais, Brasil, vitorovreis@gmail.com

Rodrigo Cesar Pierozan

Professor Adjunto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil, rodrigopierozan@utfpr.edu.br

RESUMO: O crescimento populacional e a intensificação das atividades industriais têm agravado a geração de resíduos sólidos. Sendo a construção civil um dos principais setores responsáveis por esse cenário, devido ao elevado consumo de recursos naturais. Este trabalho apresenta uma análise de soluções sustentáveis por meio da aplicação de materiais alternativos na estabilização de solos para pavimentação, com o objetivo de mitigar impactos ambientais e contribuir para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. A metodologia adotada baseou-se em revisão bibliográfica e na análise de ensaios laboratoriais com misturas solo-resíduo, avaliando suas propriedades físicas e mecânicas, além de considerar experiências práticas no estado de Minas Gerais. Os resultados demonstram o potencial desses materiais para promover a reutilização de resíduos, impulsionar a inovação tecnológica e tornar a infraestrutura viária mais sustentável. Conclui-se que o avanço de pesquisas na área é essencial para ampliar a aplicação dessas soluções no setor da construção civil.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos, Materiais Alternativos, Pavimentação Sustentável, Estabilização do solo

ABSTRACT: Population growth and the intensification of industrial activities have exacerbated the generation. The construction industry is one of the main sectors responsible for this situation, due to its high consumption of natural resources. This study presents an analysis of sustainable solutions through the application of alternative materials in soil stabilization for pavement construction, aiming to mitigate environmental impacts and contribute to the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). The adopted methodology was based on a literature review and the analysis of laboratory tests conducted with soil-waste mixtures, evaluating their physical and mechanical properties, as well as practical case studies in the state of Minas Gerais, Brazil. The results demonstrate the potential of these materials to promote waste reuse, foster technological innovation, and enhance the sustainability of road infrastructure. It is concluded that advancing research in this field is essential to expand the application of these solutions in the construction industry.

1 INTRODUÇÃO



As atividades humanas e industriais geram, continuamente, grandes volumes de resíduos, cujo acúmulo tem se intensificado significativamente ao longo dos anos. De acordo com Ajayi et al. (2024), espera-se que o crescimento populacional e a intensificação da industrialização aumentem a geração anual de resíduos em 73% entre 2020 e 2050, alcançando mais de 3,88 bilhões de toneladas. Dados do Banco Mundial (2022) apontam que, em 2020, foram produzidos cerca de 2,24 bilhões de toneladas de resíduos sólidos no mundo, o que corresponde a uma média diária de 0,79 kg por pessoa. Esse cenário evidencia um grave desafio ambiental e econômico global, exigindo soluções que conciliem desenvolvimento e sustentabilidade.

Nesse contexto, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), estabelecem metas até 2030 que visam transformar padrões de produção e consumo. A construção de rodovias ambientalmente responsáveis está diretamente alinhada com os ODS 9, 11 e 12, que tratam, respectivamente, de indústria, inovação e infraestrutura; cidades e comunidades sustentáveis; e consumo e produção responsáveis.

Diante da necessidade de mitigar os impactos ambientais das obras de infraestrutura e de atender aos compromissos internacionais, como o Acordo de Paris e a Agenda 2030, torna-se urgente investigar soluções que promovam a sustentabilidade na engenharia viária. Uma dessas soluções é o aproveitamento de resíduos na estabilização de solos, visando à construção de pavimentos mais eficientes e com menor pegada ambiental.

Este artigo tem como objetivo analisar o potencial de aplicação de resíduos industriais e da construção civil, como o resíduo de ardósia, o material fresado de pavimentos asfálticos (RAP), na estabilização sustentável de solos utilizados em camadas de pavimentação. A pesquisa baseia-se em uma revisão bibliográfica sistemática e em estudos de caso com aplicação prática, abordando as propriedades técnicas desses materiais, sua viabilidade de uso e os impactos ambientais associados. Por fim, busca-se evidenciar de que forma a pavimentação pode contribuir com as metas globais de sustentabilidade, ao incorporar resíduos sólidos em suas práticas construtivas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, com base nas diretrizes do método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Page et al. 2021), visando identificar, selecionar e analisar criticamente publicações relevantes sobre a estabilização sustentável de solos, com foco no uso de resíduos e materiais alternativos aplicados à pavimentação. Também foram considerados resultados de ensaios laboratoriais disponibilizados por instituições públicas de Minas Gerais.

2.1 Estratégia de busca

Foram previamente definidos os critérios de inclusão e exclusão, bem como as bases de dados e os termos de busca utilizados na revisão. A busca foi realizada entre fevereiro e abril de 2025, empregando palavras-chave como “estabilização sustentável do solo”, “uso de resíduos na pavimentação”, “materiais alternativos para rodovias” e termos relacionados. As fontes consultadas incluíram a base de dados Scopus, o banco de dissertações e relatórios técnicos do DER-MG, a SUDECAP e repositórios digitais de Instituições Federais de Ensino e Pesquisa. Foram priorizados estudos publicados no período de 2010 a 2024, com ênfase na realidade brasileira e em contextos geotécnicos similares ao do estado de Minas Gerais.

2.2 Critérios de inclusão e exclusão

Foram incluídas publicações científicas, dissertações, teses e relatórios sobre materiais sustentáveis na pavimentação, desde que trouxessem dados experimentais, análises de desempenho ou aplicações práticas, redigidos em português, inglês ou espanhol. Excluíram-se trabalhos sem texto completo, sem dados técnicos relevantes ou publicados antes de 2010.

2.3 Seleção e categorização dos estudos

A seleção dos documentos seguiu as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão, conforme orienta o fluxograma PRISMA. Após essa triagem sistemática, os estudos selecionados foram organizados e categorizados de acordo com o tipo de material alternativo empregado, como resíduos de ardósia, escórias siderúrgicas e pavimento asfáltico reciclado (RAP), o método de estabilização utilizado, seja quími-



co, mecânico ou combinado, e os relatos de aplicação prática, com destaque para casos desenvolvidos no estado de Minas Gerais e em contextos internacionais com características semelhantes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conhecimento adequado do solo é essencial para o sucesso de qualquer projeto de infraestrutura, especialmente na pavimentação, uma vez que suas características influenciam diretamente a durabilidade e a resistência das estruturas (Ajayi et al., 2024). Por esse motivo, as camadas do pavimento são normalmente executadas com solo compactado, sendo frequente a necessidade de estabilização de natureza mecânica, granulométrica ou química para garantir o desempenho mecânico esperado. Esse cenário tem impulsionado a busca por alternativas de menor impacto ambiental. Nesse contexto, diversas pesquisas têm explorado o uso de resíduos como estabilizantes sustentáveis, como fresagem asfáltica (RAP), resíduos de ardósia, cinzas volantes, casca de arroz e resíduos de carboneto de cálcio (Oyebisi et al., 2020). Além de oferecerem uma destinação nobre a subprodutos industriais ou da construção civil, essas alternativas contribuem para reduzir a exploração de materiais naturais e os impactos ambientais associados. No estado de Minas Gerais, experiências práticas e estudos técnicos demonstram o potencial de aplicação desses materiais em obras rodoviárias sustentáveis.

3.1 Resíduos de fresagem asfáltica (RAP)

O reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), proveniente da remoção de camadas asfálticas antigas, tem sido amplamente estudado devido aos seus benefícios econômicos e ambientais (Masi et al., 2022). Esse material, obtido na fresagem e demolição de pavimentos, permite o reaproveitamento de agregados e ligantes asfálticos, contribuindo para a mitigação de impactos ambientais e a otimização do uso de energia (Lima; Arrieta-Baldovino; Izzo, 2023). A aplicação do RAP em estudos internacionais e nacionais tem sido diversificada. Nos Estados Unidos, Lewis et al. (2024) investigaram o uso de misturas de ligantes virgens para misturas asfálticas. No Brasil, Lima et al. (2023) estudaram a estabilização de base e sub-base. Na Índia, Nandi et al. (2023) analisaram a aplicação do RAP em blocos de concreto, enquanto Pradhan et al. (2022) pesquisaram seu uso em sub-bases de rodovias. Na Itália, Masi et al. (2022) avaliaram o emprego do RAP como agregado reciclado para concreto. Já na Nigéria, Alhaji et al. (2018) investigaram sua aplicação na estabilização de solos.

Vários estudos demonstraram a eficácia da incorporação de RAP para melhorar a resistência e o desempenho de solos problemáticos (Lima; Arrieta-Baldovino; Izzo, 2023). Autores como Alhaji et al. (2019), Alhaji; Alhassan (2018), Mahasneh (2016), Kamel et al. (2016) e Mishra (2015) avaliaram o uso de RAP na pavimentação e estabilização do solo, concluindo que sua utilização é viável, seja em camadas de base e sub-base, ou para ajuste das propriedades do subleito (Almeida; Sales; Cavalcanti, 2024).

Segundo Almeida (2021), a dosagem de misturas de solo e RAP é determinante para a performance do material resultante, quando empregado como camada de sub-base ou base de pavimentos. Estudos demonstram os benefícios técnicos do RAP, especialmente em misturas estabilizadas com solo e cimento. Lima; Arrieta-Baldovino; Izzo (2023) observaram que a adição de até 80% de RAP em solos problemáticos aumentou significativamente o CBR (Índice de Suporte Califórnia), reduzindo também a expansão volumétrica. Já Almeida et al. (2021) demonstraram que misturas solo-RAP, com baixos teores de cimento, atendem aos critérios técnicos exigidos para sub-bases rodoviárias.

Alhaji; Alhassan (2018), ao testarem RAP em solos argilosos da Nigéria, verificaram aumento da densidade seca e da capacidade de suporte até o teor de 30%, com decréscimo do desempenho mecânico em teores superiores, indicando que a dosagem é fator crítico para o uso eficaz do RAP. Além disso, segundo Mahasneh (2016), misturas com RAP podem alterar os limites de liquidez e plasticidade do solo, influenciando seu comportamento geotécnico.

Nas pesquisas realizadas por Almeida; Sales; Cavalcanti (2024), foram ensaiadas misturas de solo argiloso fino e material asfáltico fresado nos teores de 20, 30 e 50%, com e sem adição de 5% de cimento Portland. O programa experimental envolveu uma bateria de ensaios que constataram que a adição de até 50% do resíduo altera a granulometria, aumenta a massa específica aparente seca máxima, o índice de suporte e a permeabilidade, reduzindo a plasticidade, a umidade ótima e a expansão. Em todas as misturas de solo e fresado, ao adicionar 5% de cimento, foram observadas alterações significativas na granulometria, no aumento do índice de suporte e na redução da expansão e da permeabilidade. Ainda segundo os autores, para todas as misturas de

solo-fresado-cimento, a resistência à compressão ficou abaixo de 2,1 MPa, valor tomado como referência conforme resolução DNIT 142. A mistura que apresentou melhor desempenho foi com 50% de RAP + 5% de cimento, apresentando maior resistência à compressão e tração, expansão inferior a 1% e CBR acima do exigido por norma. As misturas contendo apenas RAP (sem cimento) não apresentaram ganho significativo de resistência, enquanto as misturas com RAP + 5% de cimento tiveram melhora relevante nos resultados de q_u , q_t e CBR.

3.1.1 Estudo experimental com Resíduos de fresagem asfáltica (RAP) em Belo Horizonte-MG

O experimento utilizou resíduo de fresagem (RAP) proveniente de serviços de manutenção em pavimentos flexíveis de Belo Horizonte e região metropolitana, coletado em depósito regional. O solo adotado foi uma argila vermelha típica de subleito, sendo realizados ensaios de laboratório.



Figura 1. Rap utilizado para o experimento no pátio da regional em Belo Horizonte .

Com base nos ensaios de caracterização, foram preparadas misturas de solo, RAP e Brita 0 em diferentes proporções, considerando a massa total das amostras. composições foram preparadas conforme indicados nas Tabelas 1.

Tabela 01. Misturas realizadas para o aplicação em trecho experimental

Amostras EXP.01	Nomenclatura	% de Material Fresado	% de Solo Argiloso	% Brita 0
EXP 01 :AM 01	50F/30S/20B	50	30	20
EXP 01 :AM 02	70F/20S/10B	70	20	10
EXP 01 :AM 03	70F/10S/20B	70	10	20
EXP 01 :AM 04	90F/10S/ 0B	90	10	0

Os resultados com os valores médios das misturas foram apresentados nas Tabelas 02. No ensaio de compactação, utilizou-se energia correspondente a 18 golpes para as amostras individuais de solo (argila) e RAP.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de caracterização do experimento : (Granulometria e limites de Atterberg)

Nomenclatura da mistura	Composição Granulométrica (% que passa nas peneiras)							Limites de Atterberg (%)			IG	HBR
	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200	LL	LP	IP		
RAP Puro	97,6	90,6	67,6	44,8	30,4	13,2	4,47	NL	NP	IP	0	A-1-A
50F/30S/20B	96,6	91,2	73,9	42,7	35,0	27,5	17,1	35	21	14	14	A-2-6
70F/20S/10B	93,3	89,9	76,2	49,3	38,4	29,4	17,9	30	18	13	13	A-2-6
70F/10S/20B	95,3	92,2	80,1	46,1	34,0	19,4	9,9	NL	NP	0	0	A-1-B
90F/10S/ 0B	93,2	87,7	70,7	52,0	40,8	23,2	11,8	NL	NP	0	0	A-2-6
SOLO Puro					99,9	88,9	62,1	47	23	24	12	A-7-6

Tabela 3: Resultados dos ensaios de caracterização do experimento : (Compactação, ISC e Expansão)

Nomenclatura da mistura	compactação , ISC e expansão				
	D.Máxima	U.Ótima	Golpes	CBR	Expansão
RAP					
50F/30S/20B	2,111	9,7	55	67,1	0,12
70F/20S/10B	2,070	7,2	55	75,9	-0,01
70F/10S/20B	2,052	5,8	55	68,4	-0,01
90F/10S/ 0B	2,048	5,5	55	64,6	0,13
SOLO Puro	1,601	14,2	18	8,2	0,17

Com base nos ensaios de granulometria, limites de Atterberg e compactação, apenas a amostra AM 03:70F/10S/20B apresentou características compatíveis com os requisitos das normas técnicas para uso em camadas de base de pavimentos. As demais amostras atenderam apenas aos critérios para aplicação em sub-base, reforço do subleito ou revestimento primário. Em Belo Horizonte, as misturas de solo-RAP são utilizadas em aplicações a frio, sendo empregadas como material de reforço de subleito, sub-base ou base em pavimentos de vias periféricas. Também são aplicadas como material de preenchimento de valas durante o período chuvoso e como revestimento primário em vias não pavimentadas



Figura 2. Rap utilizado para o experimento no pátio da regional em Belo Horizonte .

3.2 Resíduos de ardósia

A ardósia, segundo Duarte Neto, Brasileiro e Neiva (2024) é uma das matérias-primas mais utilizadas no setor da construção civil, em razão de suas excelentes propriedades físicas, como dureza média, baixa porosidade e elevada resistência mecânica, aliadas ao baixo custo. Conforme Rodrigues (2015), o Brasil é considerado o segundo maior exportador mundial de ardósia, ficando atrás apenas da Espanha e no contexto nacional, o estado de Minas Gerais ocupa posição de destaque, respondendo por cerca de 90% da produção dessa rocha. De acordo com Chiodi e Chiodi (2014), a produção anual de ardósia em Minas Gerais gira em torno de 0,6 milhão de toneladas.

Segundo Freitas (2012), a ausência de pesquisa geológica, de estudos técnicos e de adequado planejamento de lavra contribui para a geração de impactos ambientais, como grandes cavas abertas, volumosas pilhas de estéril e resíduos descartados de forma inadequada. Antunes et al. (2020) e Santos et al. (2019) ressaltam que materiais granulares reciclados, como os resíduos de ardósia, apresentam potencial para aplicação em camadas de sub-base e base de pavimentos. Khanna (2016), em suas investigações sobre a estabilização de subleitos, concluiu que a utilização desse resíduo é uma solução viável e sustentável para reduzir desperdícios. Em estudo mais recente, Carrillo Beltrán et al. (2024) avaliaram a aplicação das lamas de ardósia na produção de ligantes geopoliméricos, considerando sua composição química e o desempenho em processos de geopolimerização. Os resultados indicaram que o material pode contribuir para reduzir a dependência do cimento Portland, diminuir as emissões de CO₂ e apresentar boas propriedades mecânicas e de resistência. Complementarmente, Antunes et al. (2020) demonstram que, embora a ardósia possua características lamelares que poderiam, a princípio, representar uma limitação técnica para seu uso em rodovias, tal característica não se configurou como impeditiva. Isso reforça sua viabilidade e contribui para a redução da demanda por materiais de origem virgem. Diversos estudos, no Brasil e em outros países, têm explorado diferentes aplicações para este resíduo na pavimentação, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Estudos sobre aplicação do resíduo de ardósia na pavimentação

Autor	Ano	País	Aplicação do Resíduo de Ardósia
Carrillo Beltrán et al.	2024	Espanha	Produção de Geopolímeros a Partir de Lodos de Corte de Ardósia como Substituto Sustentável ao Cimento Portland
Antunes	2022	Brasil	Camadas Granulares e Revestimento Asfáltico
Araújo et al.	2021	Brasil	Concretos de Baixo Impacto Ambiental
Santos et al.	2019	Brasil	Camadas de Base e Sub base de Pavimentos
Khanna	2016	Índia	Estabilização do Subleito
N,Morova e Terzi	2016	Turquia	Aplicabilidade do Pó de Resíduos de Ardósia como Material de Enchimento em Misturas Asfálticas a Quente.
Santos e Rodrigues	2016	Brasil	Camadas de Base e Sub base de Pavimentos
Rodrigues	2011	Brasil	Pré Misturado a Frio



Oti et al. 2010 Reino Unido Sub-Base e Material de Enchimento

Os estudos realizados por Santos e Rodrigues (2019), com misturas de resíduo de ardósia e solo, nas proporções de 90/10, 80/20 e 70/30 para base, e 75/25, 67/33, 60/40 e 50/50 para sub-base, demonstraram granulometria adequada para aplicação em sub-base em todas as misturas. A expansão permaneceu sempre inferior a 0,08%, dentro dos limites normativos. Verificou-se redução dos limites de liquidez e plasticidade com a adição do resíduo, aumento dos valores de CBR e da densidade, além da diminuição da umidade ótima.

Neste estudo, para base, apenas a mistura 90% ardósia + 10% solo (90/10) atendeu integralmente às normas (faixa C do DNIT). Para melhor visualização, a tabela 5 mostra o comparativo do desempenho de misturas utilizadas com o resíduo de ardósia quando há aumento crescente deste insumo na mistura.

Tabela 5 - Comparativo de desempenho de misturas com resíduo de ardósia

Autor	Materiais Utilizados	Região Estudada	Umidade Ótima	Densidade Máxima	CBR
Santos et al (2015)	Solo argiloso + ardósia (60-80%)	Papagaios (MG)	Reduzida (5,1-8,2%)	Aumentou (2,05-2,25 g/cm ³)	Aumentou
Khanna (2016)	Solo argiloso + ardósia (0-50%)	Região de Hamirpur, Índia	Aumentou (24,98-27,48%)	Aumentou (1,497-1,824 g/cm ³)	Aumentou
Antunes et.al (2020)	Solo argiloso + ardósia (0-20%)	Papagaios (MG)	Reduzida (5,9-5,4%)	Leve redução (2,264-2,224 g/cm ³)	Aumentou
Santos e Rodrigues (2019)	Solo argiloso + resíduo de ardósia (10-90%)	Papagaios (MG)	Reduzida Sub-base: 6,4 – 9,9 Base: 4,6 – 6,6	Aumentou Sub-base: 2,020 – 2,174 Base: 2,188 – 2,250 g/cm ³)	Aumentou

3.2.1 Estudo experimental com Resíduo de Ardósia em Minas Gerais

Na rodovia MG-060, no município de Esmeraldas/Papagaios, em Minas Gerais, foram realizados estudos com a utilização de misturas de materiais para aplicação em pavimentação. Foi elaborada uma composição contendo 70% de bica corrida e rejeito de ardósia (70A) e 30% de argila (S), compactada com energia intermediária (26 golpes). Os ensaios apresentaram os seguintes resultados conforme tabela 6:

Tabela 6 – Resultados dos ensaios da mistura de resíduo de ardósia

Nomeclatura	Composição Granulométrica (% que passa nas peneiras)							Limites de Atterberg (%)		IG
	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200	LL	IP	
70A/30S	99,8	90,9	71,1	60,5	45,9	26,7	18,5	37,4	12,7	0
Dens.(g/cm ³)				H.otima (%)		expansão (%)		ISC %		
2,116				7,6		0,01		46,7		

Os resultados dos ensaios laboratoriais indicaram que a mistura atende aos requisitos básicos da Norma DNIT para emprego como sub-base estabilizada granulometricamente (DNIT 139/2010-ES).

4 CONCLUSÕES

. O uso de resíduos para a estabilização de solos mostra-se uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente benéfica. Esses materiais contribuem para o aumento da resistência e da durabilidade dos solos tratados, além de estarem alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo a redução dos impactos ambientais. Essa prática também apresenta potencial para a geração de emprego e renda em regiões industriais e mineradoras. No entanto, pesquisas de longo prazo ainda são necessárias para avaliar



o desempenho desses materiais em diferentes condições. Além disso, a normatização técnica torna-se essencial para garantir a segurança e a eficácia das aplicações em larga escala. Por fim, é fundamental incentivar novas pesquisas a fim de consolidar o uso de soluções sustentáveis na infraestrutura viária.

Apesar dos avanços, permanece a necessidade de estudos de longa duração que permitam avaliar o desempenho desses materiais ao longo do tempo, em diferentes condições geotécnicas e climáticas. Ressalta-se também a importância da criação e padronização de normas técnicas específicas, de modo a assegurar a segurança, eficiência e confiabilidade das aplicações em larga escala. Dessa forma, recomenda-se o fortalecimento da pesquisa científica e tecnológica voltada para soluções sustentáveis na engenharia geotécnica, de modo a ampliar sua aplicação prática e contribuir efetivamente para uma infraestrutura viária mais resiliente e sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajayi, V.; Epelle, P.; Akinwumi, I. Sustainable soil stabilization of road pavement layers using waste materials: a mini review. *Detritus*, n. 29, p. 120, out. 2024.
- Almeida, G.; Sales, L. C.; Cavalcante, E. Análise de propriedades geotécnicas em misturas de solo, material asfáltico fresado e cimento Portland para utilização como camadas do pavimento. *Geociências* (São Paulo), v. 43, n. 2, [s.p.], 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.5016/geociencias.v43i2.18256>>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- Almeida, V. G. de et al. Diferentes metodologias de dosagem de misturas Solo RAP para uso em pavimentação. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 44, mar. 2021. (Data exata, número de fascículo ou suplemento, páginas: confirmar).
- Antunes, M. A. G. Estudos geotécnicos de resíduos sólidos industriais de ardósia visando seu emprego na pavimentação viária na região central de Minas Gerais. 2022. 250 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.
- Antunes, M. A. G.; Guimarães, A. C. R.; Marques, G. L. O. Uma solução viável para a reciclagem de resíduos industriais de ardósia em pavimentação. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 4, p. 236-254, 2020. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2020.004.0021.
- Araujo, A. F. S. de et al. Comportamento mecânico de concretos de baixo impacto ambiental produzidos com resíduos de ardósia. In: *Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Tecnológica, Artística e Cultural*, 2021, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: UFRJ, 2021. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/jgmictac/316275>>. Acesso em: 31 mar. 2025.
- Banco Mundial. *Relatório sobre o desenvolvimento mundial 2022: Finanças para uma recuperação equitativa*. Washington, DC: World Bank, 2022. Disponível em: <<https://www.worldbank.org/pt/publication/wdr2022>>. Acesso em: 31 mar. 2025.
- Carrillo Beltrán, R.; Picazo Camilo, E.; Perea Toledo, G.; Corpas Iglesias, F. A. Rumo a uma mineração sustentável: reutilização de lamas de corte de pedras de ardósia para novos ligantes geopoliméricos. *Sustentabilidade*, v. 16, n. 8, p. 3322, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16083322>. Acesso em: 30 ago. 2025.
- Chiodi, C. F.; Chiodi, D. K. *Plano de ação para sustentabilidade do setor de rochas ornamentais – ardósia em Papagaios*. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), 2014. Disponível em: <https://feam.br/w/plano-de-acao-para-sustentabilidade-do-setor-de-rochas-ornamentais-ardosia>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- Duarte Neto, P. P.; Brasileiro, M. I.; Neiva, L. S. Rocha ornamental do estado de Minas Gerais: análise microestrutural de diferentes espécies da pedra ardósia. *Cerâmica Industrial*, v. 29, e1229, 2024. DOI: 10.4322/cerind.2024.050.
- Freitas, V. L. O. Restauração de áreas degradadas pela extração de ardósia, utilizando seus rejeitos no município de Papagaio, Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.



- Kamel, M. A.; Al Bustami, N. M.; Alsulami, B. T. Evaluation of the suitability of recycled asphalt pavement (RAP) for subbases. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v. 6, n. 5, p. 212-215, 2016.
- Khanna, E. K. Study of compaction characteristics of soil with the addition of slate mining waste. *Indian Journal of Science and Technology*, v. 9, n. 44, p. 1-5, 11 nov. 2016.
- Lewis, S. et al. Blending of virgin and RAP binder for asphalt mixes with high RAP contents: a pilot study. *International Journal of Pavement Research and Technology*, jan. 2024. (Volume, número, páginas: confirmar).
- Lima, D.; Arrieta Baldovino, J.; Izzo, R. L. S. Sustainable use of recycled asphalt pavement in soil stabilization. *Civil Engineering Journal*, Tehran, v. 9, n. 9, p. 2315-2329, set. 2023. DOI: 10.28991/CEJ-2023-09-09-016.
- Mahasneh, B. Z. Use of aluminum residue and recycled asphalt pavement materials to stabilize silty clay soil. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 22, n. 4, p. A4015001, dez. 2016.
- Masi, G.; Michelacci, A.; Manzi, S.; Bignozzi, M. C. Assessment of reclaimed asphalt pavement (RAP) as recycled aggregate for concrete. *Construction and Building Materials*, v. 341, p. 1-9, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127745.
- Mishra, B. Study on use of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in flexible pavements. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, v. 4, n. 12, p. 12170-12177, 2015. DOI: 10.15680/ijirset.2015.0412088.
- Morova, N.; Terzi, S. Investigação laboratorial da usabilidade do pó de resíduos de ardósia como enchimento em concreto asfáltico misturado a quente. *International Journal of Transportation Science & Technology (IJTS)*, v. 8, n. 3, p. 1-18, 2016.
- Nandi, S.; RansinchuNG, G. D. R. N. Influence of different curing conditions on the transport, durability and microstructural properties of concrete paver block mixes containing RAP aggregates. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 8, n. 10, 2023.
- Oyebisi, S. et al. Geopolymer concrete incorporating agro-industrial wastes: effects on mechanical properties, microstructural behaviour and mineralogical phases. *Construction and Building Materials*, v. 256, p. 119390, set. 2020.
- Page, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n. 1, art. 71, 2021.
- Pradhan, S. K.; Biswal, G. Utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) as granular sub base material in road construction. *Materials Today: Proceedings*, v. 60, p. 288-293, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.054>>. Acesso em: 13 abr. 2025.
- Rodrigues, R. Propostas de aproveitamento de resíduos de ardósia da cidade de Pompéu, Minas Gerais. *Revista Intercâmbio*, v. 6, p. 86-95, 2015.
- Rodrigues, W. C. Estudo sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de resíduo industrial de ardósia em mistura asfáltica do tipo pré-misturado a frio. 2011. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011. (Número de páginas: confirmar).
- Santos, R. L. R. dos et al. Avaliação do efeito da adição de resíduo de ardósia no módulo de resiliência de misturas com solo argiloso. *Transportes*, v. 27, n. 4, p. 145-158, dez. 2019. DOI: 10.14295/transportes.v27i4.1824. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1824>>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- Santos, R.; Rodrigues, C. de S. Aplicação do resíduo proveniente do corte de ardósia em pavimentação rodoviária. In: *Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentável*, 2., 2016, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: [s.n.], 2019.