

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

RUBNE RIETH CATAPAN

**REAPROVEITAMENTO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL EM SUBCAMADAS DE
PAVIMENTOS: UMA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA**

Bagé
2024

RUBNE RIETH CATAPAN

**REAPROVEITAMENTO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL EM SUBCAMADAS DE
PAVIMENTOS: UMA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energia da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia de Energia.

Orientadora: Sabrina Neves da Silva

**Bagé
2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

C357r Catapan, Rubne Rieth

Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral em subcamadas de pavimentos: Uma análise do ciclo de vida / Rubne Rieth Catapan.

60 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2014.

"Orientação: Sabrina Neves da Silva".

1. cinzas de carvão mineral. 2. pavimentação. 3. análise do ciclo de vida (ACV). 4. sustentabilidade. 5. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do
Pampa

RUBNE RIETH CATAPAN

**REAPROVEITAMENTO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL EM SUBCAMADAS DE
PAVIMENTOS: UMA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energia da Universidade Federal do Pampa,
como requisito parcial para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia de
Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 17 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Sabrina Neves da Silva
Orientadora
UNIPAMPA

Profa. Msc. Daniele Ferreira Lopes
UNIPAMPA

Prof. Dr. Luciano Viecei Taveira
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA , PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2024, às 10:10, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANO VIECELI TAVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/12/2024, às 14:28, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DANIELE FERREIRA LOPES, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 17/12/2024, às 14:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1627447** e o código CRC **F042BCC1**.

RESUMO

O Brasil, embora possua uma matriz energética predominantemente renovável, utiliza usinas termelétricas como fonte complementar em períodos de estiagem. Quando a geração termelétrica ocorre a partir da queima de carvão mineral, geram-se grandes volumes de cinzas, resíduos que podem causar impactos ambientais, como a contaminação do solo e da água. O volume de cinzas gerado é superior ao que já é aproveitado pela indústria cimenteira, por isso, novas alternativas de reaproveitamento são necessárias para minimizar o descarte inadequado. Este trabalho busca analisar a viabilidade técnica, ambiental e econômica do uso dessas cinzas em subcamadas de pavimentos rodoviários, utilizando a Análise do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta de avaliação. A caracterização das cinzas revelou propriedades pozolânicas e uma composição química adequada, o que confere a elas potencial para melhorar as características mecânicas dos pavimentos. Além disso, a utilização das cinzas apresenta vantagens ambientais, como a redução das emissões de gases de efeito estufa e a diminuição do consumo de recursos naturais, como a areia e o cimento, materiais tradicionalmente usados em pavimentação. Também foi identificado um custo inferior em comparação aos materiais convencionais, o que torna essa alternativa economicamente atrativa. No entanto, a potencial lixiviação de metais pesados, como o arsênio e o mercúrio, destaca a necessidade de um monitoramento contínuo da qualidade ambiental. O estudo demonstrou que essa aplicação está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9, 12 e 13, promovendo uma construção mais sustentável e a utilização de resíduos industriais de forma mais eficiente. Os resultados indicam que o reaproveitamento das cinzas de carvão mineral é uma alternativa viável para a infraestrutura rodoviária, especialmente em regiões como Candiota-RS, que geram grandes volumes desse resíduo, trazendo benefícios ambientais, econômicos e sociais, ao mesmo tempo em que contribui para a redução do impacto ambiental causado pela disposição inadequada das cinzas.

Palavras-chave: cinzas de carvão mineral; pavimentação, análise do ciclo de vida (ACV); sustentabilidade; Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

ABSTRACT

Brazil, although it has a predominantly renewable energy matrix, relies on thermoelectric plants as a backup during drought periods, generating large volumes of coal ash, a byproduct that can cause significant environmental impacts if not properly managed. This study analyzes the technical, environmental, and economic feasibility of using these ashes in road pavement sublayers based on Life Cycle Assessment (LCA). The characterization of the ashes revealed pozzolanic properties and suitable chemical composition, along with environmental benefits such as reduced greenhouse gas emissions and natural resource consumption. Lower economic costs compared to traditional materials were also identified. However, the potential leaching of heavy metals underscores the need for environmental monitoring. The study demonstrated that this application aligns with Sustainable Development Goals (SDGs) 9, 12, and 13, fostering more sustainable construction practices. The results highlight the potential of coal ash reuse as a viable alternative for road infrastructure, particularly in regions like Candiota-RS, which generates large volumes of this byproduct, integrating environmental, economic, and social benefits.

Keywords: coal ash; pavement; life cycle assessment (LCA); sustainability; Sustainable Development Goals (SDGs).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW).....	17
Figura 2 – Geração elétrica por fonte no Brasil (MV).....	18
Figura 3 – Ciclo do processo de geração e transmissão de energia de uma termelétrica.....	21
Figura 4 – Processo de formação do carvão mineral.....	23
Figura 5 – Consumo global de carvão, 2000-2025.....	25
Figura 6 – Mapa das jazidas de carvão no Mundo.....	26
Figura 7 – Fonte Energética Mundial, 2021.....	27
Figura 8 – Fonte Energética Brasileira, 2022.....	28
Figura 9 – Localização das principais jazidas de carvão - RS e SC.....	29
Figura 10 – Mina de Candiota (Ativa)	30
Figura 11 – Ciclos de vida do pavimento	39
Figura 12 – Vista aérea Unipampa Campus Bagé - RS.....	41
Figura 13 – Trecho de Pavimentação.....	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estado da arte sobre o uso de cinzas de carvão mineral em pavimentação.....	32
Quadro 2 – Normas e regulamentações para o uso de materiais alternativos na pavimentação.....	36
Quadro 3 – Avaliação do Ciclo de Vida	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração elétrica por fonte no Brasil nos últimos 5 anos (MV).....	18
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCM – Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas.

ACV – Análise do ciclo de vida.

ANEEL – Agência nacional de energia elétrica.

CFB – Combustão em leito fluidizado.

CGHs – Centrais Geradoras Hidrelétricas.

CRM – Companhia de Riograndense de Mineração.

EIA – Estudo de impacto ambiental.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética.

GWh – GigaWatt-hora.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IGCC – Gaseificação integrada com ciclo combinado.

MME – Ministério de Minas e Energia.

MMGD – Micro e minigeração distribuída.

MV – Megavolt.

ODS – Objetivos de desenvolvimento sustentável.

ONU – Organização das Nações Unidas.

PC – Combustão pulverizada.

PCHs – Pequenas Centrais Hidrelétricas.

SGB – Serviço geológico do Brasil.

UTE – Usina termoeletrica.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo.....	14
1.2	Objetivo geral	14
1.3	Objetivos específicos.....	14
1.4	Justificativa.....	15
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1	Panorama geral da geração de energia elétrica no Brasil.....	16
2.2	Geração termelétrica.....	19
2.3	Geração Termelétrica de Energia.....	20
2.4	Carvão mineral como recurso energético.....	22
2.5	Cinzas de carvão mineral.....	31
2.5.1	Principais alternativas para reutilização.....	31
2.5.2	Uso de cinzas de carvão mineral na pavimentação - Estado da arte.....	32
2.5.3	Normas e regulamentações.....	35
3	METODOLOGIA	38
3.1	Caracterização das cinzas.....	38
3.2	Avaliação do ciclo de vida.....	38
3.2.1	Definição do objetivo e do escopo.....	40
3.2.1.1	Objetivo.....	40
3.2.1.2	Escopo.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1	Caracterização das cinzas	43
4.2	Avaliação do ciclo de vida.....	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49
	APÊNDICE A - Desenvolvimento metodológico para uso das cinzas de carvão mineral em camadas e subcamadas de pavimentos.....	55

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, com sua matriz energética diversificada, depende em grande parte de fontes renováveis, como a hidrelétrica, que representa a maior parcela da geração de energia do país. Entretanto, as usinas termelétricas desempenham um papel complementar na matriz brasileira, especialmente em períodos de estiagem, quando a geração hidrelétrica é reduzida. As termelétricas, que funcionam a partir da queima de combustíveis fósseis como o carvão mineral, são responsáveis por assegurar a estabilidade do fornecimento energético, garantindo a continuidade do abastecimento em momentos críticos. Apesar de sua importância estratégica, a geração termelétrica acarreta a produção de grandes quantidades de resíduos, em particular, as cinzas de carvão mineral. Estes subprodutos, se não forem geridos adequadamente, podem causar impactos ambientais significativos, como a contaminação do solo e das águas, gerando a necessidade de soluções inovadoras para sua reutilização e valorização (Aneel, 2023).

Nesse viés, nos últimos anos, a busca por soluções sustentáveis e economicamente viáveis na construção civil tem ganhado destaque, impulsionada pelo aumento da conscientização ambiental e pela necessidade de reduzir a pegada de carbono das práticas tradicionais. Um dos focos dessa busca é a reutilização de subprodutos industriais, como as cinzas de carvão mineral, que são geradas em grandes quantidades por usinas termoelétricas. A partir da visão de Liang e Qiu (2022), a reutilização das cinzas representa uma oportunidade para mitigação de impactos ambientais quando adequadamente incorporadas em processos industriais.

A pavimentação, em particular, se apresenta como uma aplicação promissora para a utilização das cinzas de carvão. Esse material pode melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade dos pavimentos, ao mesmo tempo em que reduz a necessidade de materiais convencionais, cujos processos de extração e produção são altamente impactantes do ponto de vista ambiental (Mehta; Rahman, 2021). Além disso, a incorporação de cinzas de carvão em pavimentações pode resultar em

pavimentos com melhor desempenho, especialmente em termos de resistência à compressão e reduzidas deformações, conforme destacado por Raj e Gupta (2020).

O uso de cinzas de carvão em pavimentação não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também proporciona um impacto econômico positivo. Zhang *et al.* (2021) apontam que a integração de resíduos industriais em infraestruturas rodoviárias pode diminuir consideravelmente os custos com matérias-primas e disposição de resíduos, além de prolongar a vida útil dos pavimentos. Dados estes potenciais, a reutilização de cinzas de carvão em pavimentação representa uma abordagem viável e inovadora para a construção de infraestruturas mais sustentáveis.

Acrescenta-se ainda que o uso de cinzas de carvão mineral em pavimentação está intrinsecamente alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU, 2023), particularmente nos objetivos que visam a promoção de cidades e comunidades sustentáveis (ODS 9), a ação contra a mudança global do clima (ODS 13), e a promoção de consumo e produção responsáveis (ODS 12). Ao integrar resíduos industriais como as cinzas de carvão na construção de infraestruturas, este projeto busca reduzir o impacto ambiental dos processos de construção tradicionais, diminuindo a extração de recursos naturais e as emissões de gases de efeito estufa associadas. Além disso, ao prolongar a vida útil dos pavimentos e reduzir a necessidade de manutenção frequente, promove-se um uso mais eficiente dos recursos, contribuindo para a sustentabilidade econômica e ambiental das cidades.

Ademais, a cidade de Candiota, localizada na Campanha gaúcha, destaca-se como um local estratégico para iniciativas de aproveitamento sustentável desse subproduto, devido à significativa disponibilidade de cinzas de carvão mineral geradas pela operação das duas usinas termelétricas instaladas na região.

Sob essa ótica, este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para a análise do ciclo de vida (ACV) para uso de cinzas de carvão mineral em subcamadas de pavimentos rodoviários. Visando abordar desde a caracterização do material até a

avaliação de seus impactos ambientais, econômicos e sociais, demonstrando a viabilidade de sua aplicação em infraestrutura sustentável.

1.1 Objetivo

Para desenvolver este trabalho de conclusão de curso, é essencial definir objetivos claros que orientem a pesquisa e a implementação das soluções propostas. Assim, os objetivos podem ser delineados da seguinte forma:

1.2 Objetivo geral:

Analisar o ciclo de vida do uso de cinzas de carvão mineral em subcamadas de pavimentos rodoviários, avaliando sua viabilidade técnica, ambiental e econômica. A pesquisa busca verificar a sustentabilidade desse reaproveitamento, considerando a resistência mecânica do material, possíveis impactos ambientais e os benefícios na redução de passivos ambientais e emissões ao longo do ciclo de vida do pavimento.

1.3 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- a) avaliar as propriedades físicas e químicas das cinzas.
- b) identificar os possíveis impactos ambientais pela aplicação do material.
- c) analisar o consumo de recursos naturais e de energia.
- d) comparar os custos.
- e) verificar se o uso das cinzas está em consonância com os ODS 's.

1.4 Justificativa

A crescente demanda por obras de infraestrutura viária tem intensificado o consumo de materiais utilizados em pavimentação, como agregados naturais. No entanto, o esgotamento progressivo de jazidas compatíveis com os requisitos técnicos exigidos representa um desafio crescente para o setor (Silva *et al.*, 2020). Essa situação compromete não apenas a logística de fornecimento, mas também o próprio desenvolvimento regional, dada a dependência da economia em relação à malha rodoviária (Ecorodovias, 2023).

Paralelamente, destaca-se o problema ambiental gerado pelo descarte inadequado das cinzas de carvão mineral, subproduto da geração termoelétrica. Estima-se que cerca de 70% dessas cinzas ainda são dispostas em cavas, o que pode acarretar riscos à qualidade do solo e das águas (Souza *et al.*, 2019; Almeida *et al.*, 2021). Apesar do uso parcial na indústria cimenteira, há um evidente potencial de aproveitamento ainda não explorado.

Diante desse cenário, este trabalho justifica-se pela necessidade de investigar alternativas que aliem sustentabilidade ambiental e viabilidade técnica. A proposta de reutilizar cinzas de carvão em subcamadas de pavimentos visa mitigar o impacto da escassez de agregados e, simultaneamente, dar um destino mais nobre a um resíduo de difícil disposição (Martins *et al.*, 2020). Além disso, a análise do ciclo de vida (ACV) será utilizada como ferramenta para quantificar os ganhos ambientais e econômicos dessa alternativa, buscando comprovar seus benefícios em termos de redução da extração de recursos e das emissões de gases de efeito estufa (Castro; Guimarães, 2018).

2 REVISÃO DA LITERATURA

A Revisão da literatura divide-se em tópicos. Inicialmente apresenta um panorama da geração de energia elétrica no Brasil. A seguir é dada ênfase na geração termelétrica a carvão, abordando-se a formação e os principais reaproveitamentos das cinzas de carvão mineral. Por fim, explora as possibilidades de aplicação dessas cinzas na pavimentação, buscando evidenciar os benefícios e os desafios dessa prática.

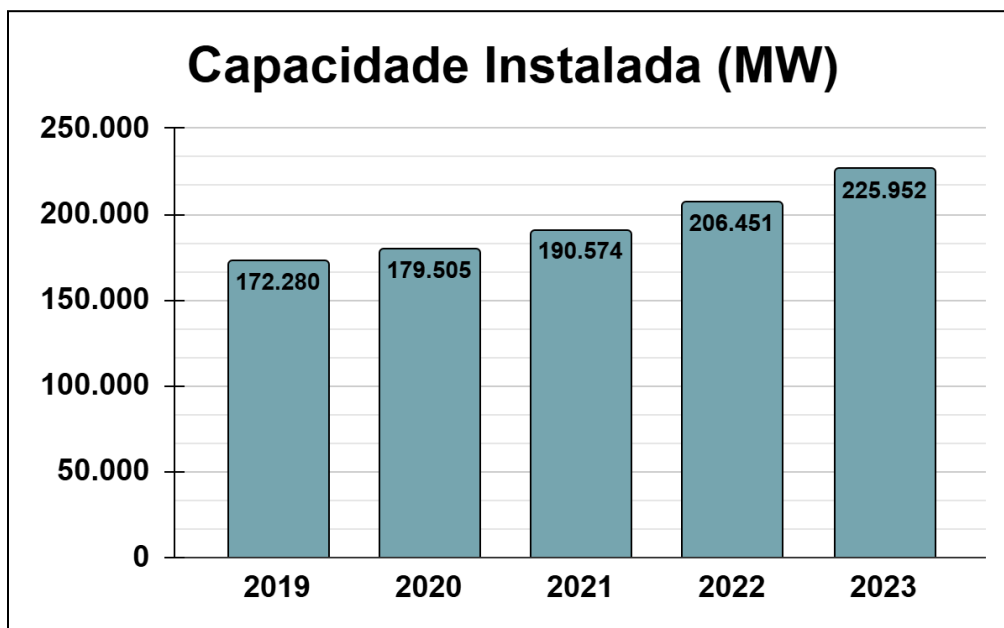
2.1 Panorama geral da geração de energia elétrica no Brasil

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), relativos ao ano de 2023, a população do Brasil é estimada em aproximadamente 203,08 milhões de habitantes, enquanto o Estado do Rio Grande do Sul conta com mais de 10,8 milhões de pessoas. As projeções indicam que o país continuará a crescer até 2047, quando se espera alcançar 233,2 milhões de pessoas (IBGE, 2023).

O crescimento populacional está diretamente relacionado ao aumento da demanda por energia elétrica, uma vez que a expansão populacional impulsiona o consumo residencial, comercial e industrial. Com mais pessoas e atividades econômicas, há uma pressão crescente sobre a infraestrutura de geração e distribuição de energia, exigindo investimentos em novas usinas e modernização das redes. Esse aumento na demanda torna essencial a busca por soluções de eficiência energética para garantir um suprimento sustentável e eficiente de eletricidade para atender às necessidades da população em constante crescimento (Geraldi *et al.*, 2022).

Conforme apresentado no Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2024, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil registrou um incremento de cerca de 53 MW (megawatts) nos últimos cinco anos (2019-2023), o que evidencia um crescimento significativo na infraestrutura energética do país, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW)

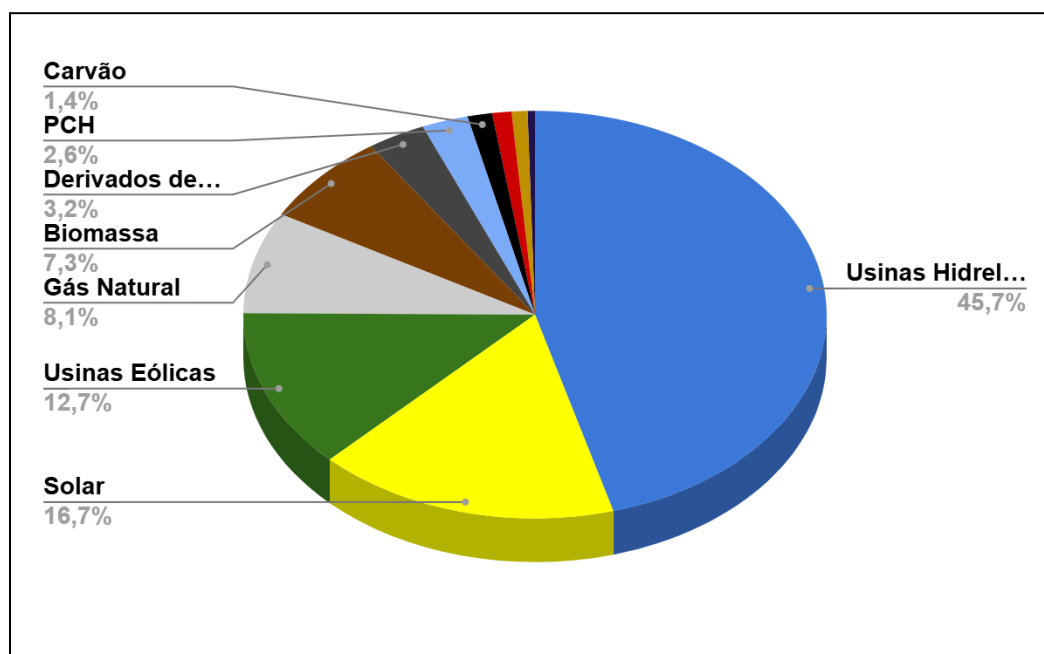


Fonte: Elaboração do autor baseado em Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024

Como pode ser observado na Figura 1, a capacidade de geração vem aumentando a cada ano. Contudo, ainda segundo o anuário supracitado, observou-se uma redução na geração termelétrica a partir de gás natural e derivados de petróleo em 2023, atribuída à estabilidade do regime hídrico e ao aumento da geração solar e eólica. A geração solar fotovoltaica, por exemplo, saltou de 30.126 GWh em 2022 para 50.633 GWh em 2023, representando um crescimento de 68,1%. Deste total, cerca de 59% foi proveniente de micro e minigeração distribuída (MMGD).

As usinas hidrelétricas tiveram um aumento de 9,4% na capacidade de geração de energia elétrica em 2023 em comparação a 2022. No entanto, elas mantiveram a maior participação na geração total de energia, com 45,7% em 2023, conforme mostrado na Figura 2. Outra fonte de energia que também apresentou aumento significativo na capacidade de geração em 2023 em comparação a 2022 foi a solar, com um aumento de 54,8%.

Figura 2 - Geração elétrica por fonte no Brasil (MV)



Fonte: Elaboração do autor baseado em Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024

A seguir, na Tabela 1 é mostrada a variação das fontes de energia elétrica em termos de geração. Sintetiza a variação anual.

Tabela 1 - Geração elétrica por fonte no Brasil nos últimos 5 anos (MV)

Fonte	2019	2020	2021	2022	2023
Usinas Hidrelétricas	102.999	103.027	103.003	103.195	103.198
Solar	4.465	7.922	13.404	24.453	37.843
Usinas Eólicas	15.388	17.146	20.786	23.761	28.682
Gás Natural	13.391	14.932	16.225	17.440	18.260
Biomassa	14.718	15.034	15.610	16.282	16.479
Derivados de Petróleo	7.670	7.696	7.663	7.185	7.271
PCH	5.291	5.429	5.513	5.662	5.802
Carvão	3.228	3.203	3.203	3.203	3.086
Outras	2.275	2.287	2.281	2.230	2.419
Usinas Nucleares	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990
CGH	865	838	897	946	923

Fonte: Elaboração do autor baseado em Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024

A Tabela apresentada mostra a evolução da capacidade instalada de geração de energia elétrica por fonte no Brasil de 2019 a 2023. Observa-se que as usinas hidrelétricas continuam sendo a principal fonte de geração, com uma capacidade estável ao longo dos anos, ligeiramente superior a 103.000 MW, refletindo a predominância da energia hidrelétrica na matriz energética brasileira.

Por outro lado, as fontes renováveis, como a energia solar e eólica, apresentaram um crescimento significativo no período. A capacidade instalada de energia solar aumentou de 4.465 MW em 2019 para 37.843 MW em 2023, o que representa uma expansão de mais de 700%, evidenciando a rápida adoção dessa tecnologia no Brasil. A energia eólica também teve um crescimento, passando de 15.388 MW em 2019 para 28.682 MW em 2023, mostrando um aumento na participação dessas fontes renováveis na matriz elétrica.

Houve crescimento também na geração a partir do gás natural, embora de forma mais moderada, subindo de 13.391 MW em 2019 para 18.260 MW em 2023. A biomassa teve uma leve elevação, atingindo 16.479 MW em 2023.

As fontes fósseis, como derivados de petróleo e carvão, apresentaram pouca variação ao longo do período, com a capacidade de geração decaindo de 3.228 MW em 2019 para 3.086 MW em 2023, refletindo uma tendência de menor dependência de fontes de energia mais poluentes. Já a capacidade das PCHs (Pequenas Centrais Hidrelétricas) e CGHs (Centrais Geradoras Hidrelétricas) tiveram um crescimento gradual, indicando a valorização de soluções energéticas menores e mais distribuídas.

A energia nuclear permaneceu estável ao longo dos anos, com 1.990 MW de capacidade instalada, e outras fontes apresentaram pequenas variações. Esses dados refletem uma mudança significativa na matriz energética brasileira em consonância com as tendências globais de descarbonização e sustentabilidade.

2.2 Geração termelétrica

A geração termelétrica é uma das principais fontes de eletricidade mundial, utilizando combustíveis como carvão mineral, gás natural, petróleo, biomassa e

resíduos sólidos urbanos. O carvão mineral, apesar de ser uma das fontes mais utilizadas devido à sua alta densidade energética e disponibilidade, enfrenta críticas devido aos impactos ambientais, como as emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos (EIA, 2020).

Embora o gás natural seja uma alternativa mais limpa, o carvão ainda é uma opção viável em muitas regiões, com a maioria das usinas termelétricas operando com esse combustível, especialmente em países em desenvolvimento (ABCM, 2019). Além disso, novas tecnologias, como a captura de carbono e sistemas de combustão mais eficientes, estão sendo desenvolvidas para reduzir os impactos ambientais da termelétrica a carvão (IEA, 2020).

Outras fontes renováveis, como biomassa, também têm ganhado espaço, mas ainda enfrentam desafios de custo e eficiência (MME, 2020). O tópico a seguir trata da geração termelétrica de energia, dando ênfase ao carvão mineral.

2.3 Geração Termelétrica de Energia

Uma usina termelétrica é composta por um conjunto de equipamentos projetados para gerar eletricidade a partir da conversão de energia térmica em elétrica. No Brasil, uma das formas mais comuns de geração termoelétrica utiliza o carvão mineral como principal combustível (Brasil Escola, 2024).

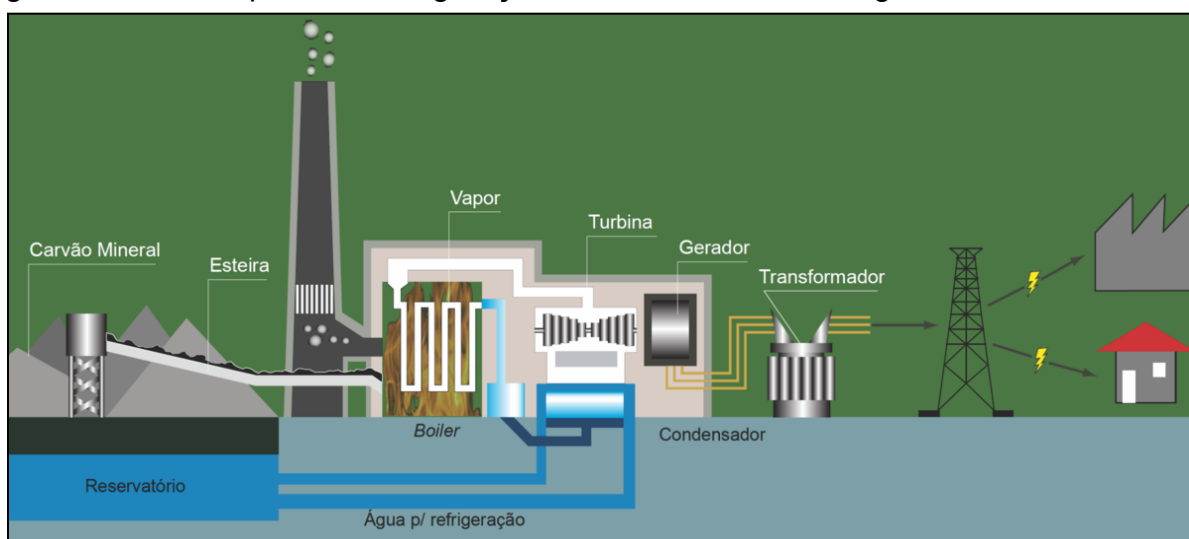
O processo inicia-se com a extração do carvão mineral, geralmente realizada em minas a céu aberto. Após a extração, o carvão é transportado até a usina, onde é armazenado em silos ou depósitos específicos (Kalenborn, 2024).

Na usina, o carvão é triturado em moinhos até atingir uma granulometria fina. Esse material pulverizado é então soprado por ventiladores até os queimadores da caldeira. Dentro da caldeira, o carvão é queimado na câmara de combustão, convertendo a energia química do combustível em energia térmica. O calor gerado aquece a água que circula em tubulações, transformando-a em vapor de alta pressão e temperatura (Mundo Educação, 2024).

O vapor gerado é direcionado para as turbinas, que giram devido à pressão do vapor. Esse movimento rotacional é transferido para um gerador elétrico acoplado, que converte a energia mecânica em energia elétrica (Nextron, 2024).

Após passar pelas turbinas, o vapor é conduzido a um condensador, onde é resfriado por um sistema de troca de calor com água fria, retornando ao estado líquido. A água condensada é então bombeada de volta para a caldeira, reiniciando o ciclo (Mundo Educação, 2024), Como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Ciclo do processo de geração e transmissão de energia de uma termelétrica



Fonte: Aneel (2008)

Resumidamente, o processo de geração e transmissão de energia elétrica em uma termelétrica ocorre em três etapas principais: na primeira, o combustível é queimado na caldeira gerando calor e transformando a água em vapor sob alta pressão; na segunda, o vapor faz girar as pás da turbina, acionando o gerador elétrico e produzindo eletricidade; e, por fim, na terceira etapa, o vapor é condensado, retornando ao estado líquido e reiniciando o ciclo (Brasil Escola, 2024; Mundo Educação, 2024).

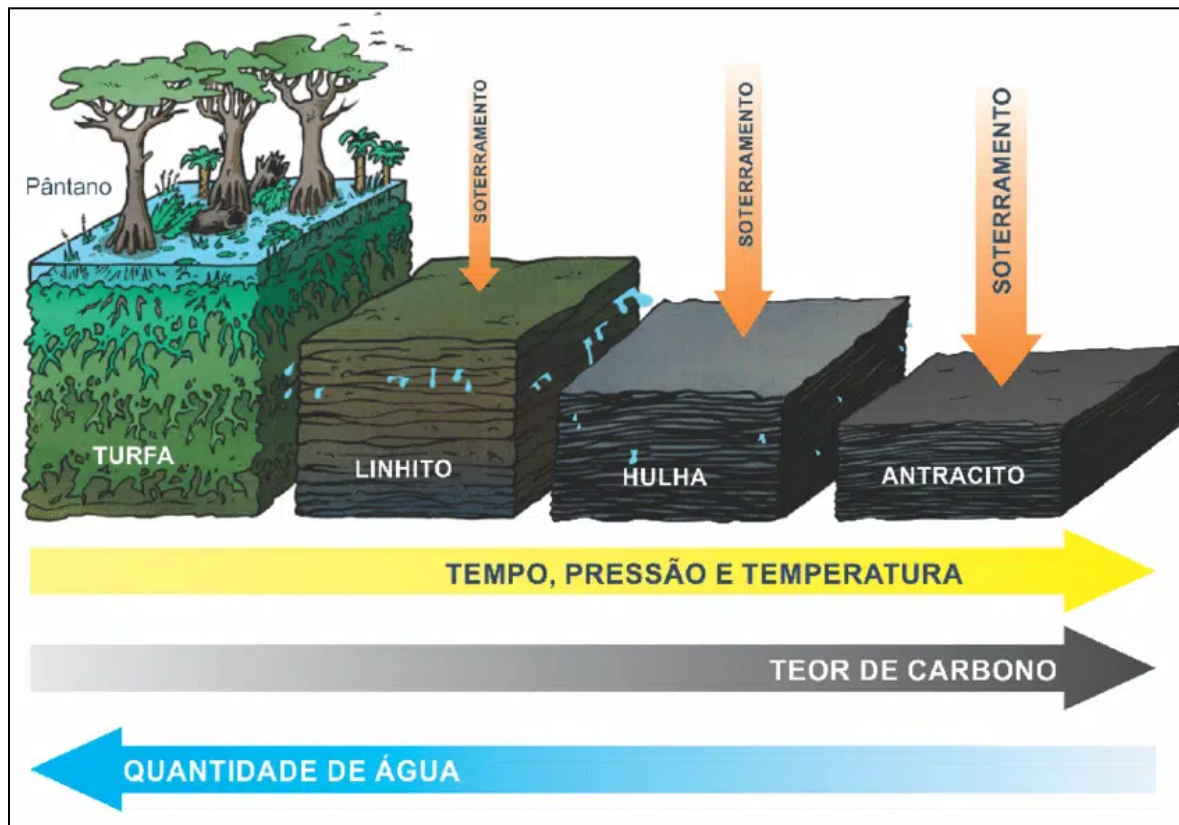
2.4 Carvão mineral como recurso energético

O carvão é um recurso natural com milhares de anos de existência, originado pela transformação de material vegetal. Sua formação ocorre quando a matéria orgânica se decompõe na ausência de oxigênio, com o carbono sendo seu principal componente.

Segundo a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, o carvão mineral apresenta entre 55% e 95% de carbono em sua composição, além de conter enxofre, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio (Dai *et al.*, 2021). A formação do carvão mineral ocorre em diferentes estágios que se distinguem em função da concentração de carbono.

Os quatro principais tipos de carvão, classificados da menor para a maior concentração de carbono, são: Turfa: com teor de carbono entre 55% e 60%, na qual ainda é possível identificar restos vegetais e cujo poder calorífico é inferior a 4.000 kcal; Linhito: uma rocha sedimentar resultante da compressão da turfa, que apresenta teor de carbono entre 67% e 78% e também possui poder calorífico inferior a 4.000 kcal; Carvão betuminoso ou hulha: uma rocha sedimentar rica em betume, com teor de carbono entre 80% e 90% e poder calorífico entre 7.000 e 8.650 kcal; e Antracito, a forma mais pura e compacta do carvão mineral, com cerca de 96% de carbono e pouco ou nenhum betume em sua composição (Serviço Geológico do Brasil, 2024), para facilitar o entendimento, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Processo de formação do carvão mineral



Fonte da Figura: Kuchenbecker, M. Recursos minerais de Minas Gerais (2018, p. 04)

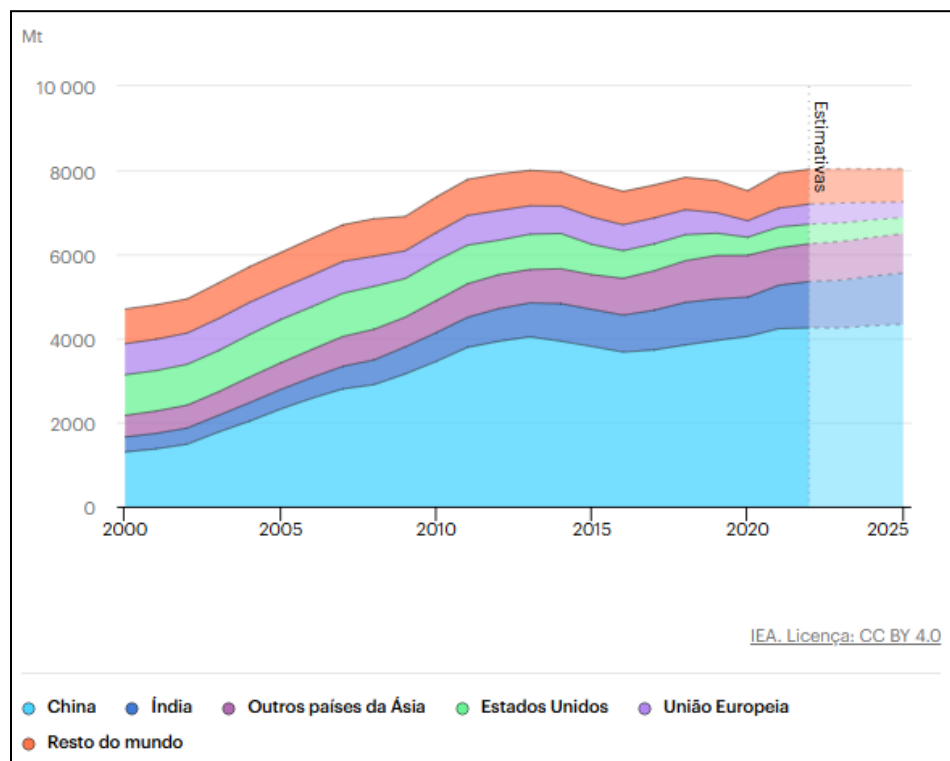
A classificação das reservas de carvão é realizada conforme o nível de certeza e subdividida em três categorias principais: reservas medidas, reservas indicadas e reservas inferidas. As reservas medidas são as mais confiáveis, pois se baseiam em uma quantidade significativa de dados detalhados e precisos, proporcionando alta confiança quanto à localização, quantidade e qualidade do carvão. As reservas indicadas representam uma estimativa mais precisa, fundamentada em dados de perfuração e amostragem com maior detalhamento e frequência, oferecendo maior certeza do que as reservas inferidas. Por último, as reservas inferidas são aquelas cuja quantidade e qualidade do carvão são estimadas a partir de dados geológicos e de exploração preliminares, com menor grau de certeza quanto à sua localização e viabilidade em comparação com as categorias anteriores (Brasil, 2024).

E de acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (Brasil, 2007), as tecnologias de combustão de carvão possuem características distintas em eficiência, emissões e custo. As tecnologias mais comuns para a combustão de carvão são a combustão pulverizada (PC), a combustão em leito fluidizado (CFB) e a gaseificação

integrada com ciclo combinado (IGCC). Entre elas, a tecnologia IGCC se destaca por apresentar a maior eficiência energética, seguida pela combustão pulverizada e, por último, pela combustão em leito fluidizado. Em termos de controle ambiental, o IGCC proporciona as menores emissões de poluentes, enquanto o CFB oferece maior eficácia no controle de emissões específicas, como enxofre e óxidos de nitrogênio, superando o PC, que é menos eficiente nesse aspecto. No quesito flexibilidade, o CFB se mostra o mais adaptável a diferentes tipos de carvão e combustíveis alternativos, enquanto o IGCC tem flexibilidade moderada, e o PC apresenta menor versatilidade. Por fim, considerando os custos, o PC é a tecnologia com os investimentos iniciais mais baixos, seguido pelo CFB, enquanto o IGCC, devido à sua complexidade tecnológica e necessidade de equipamentos especializados, apresenta os maiores custos de implantação (Brasil, 2024).

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel2019), o carvão é o combustível fóssil com maior disponibilidade no mundo, sendo uma das fontes mais utilizadas para a produção de energia elétrica. Em 2022, o consumo global de carvão atingiu um recorde histórico, impulsionado pela crise energética mundial. Segundo a Agência Internacional de Energia, houve um aumento de 4% na demanda em relação ao ano anterior, atingindo 8,42 bilhões de toneladas, com os maiores crescimentos observados na Índia (8%) e na China (5%). A Figura 5 mostra o consumo global de carvão nos últimos anos.

Figura 5 - Consumo global de carvão, 2000-2025



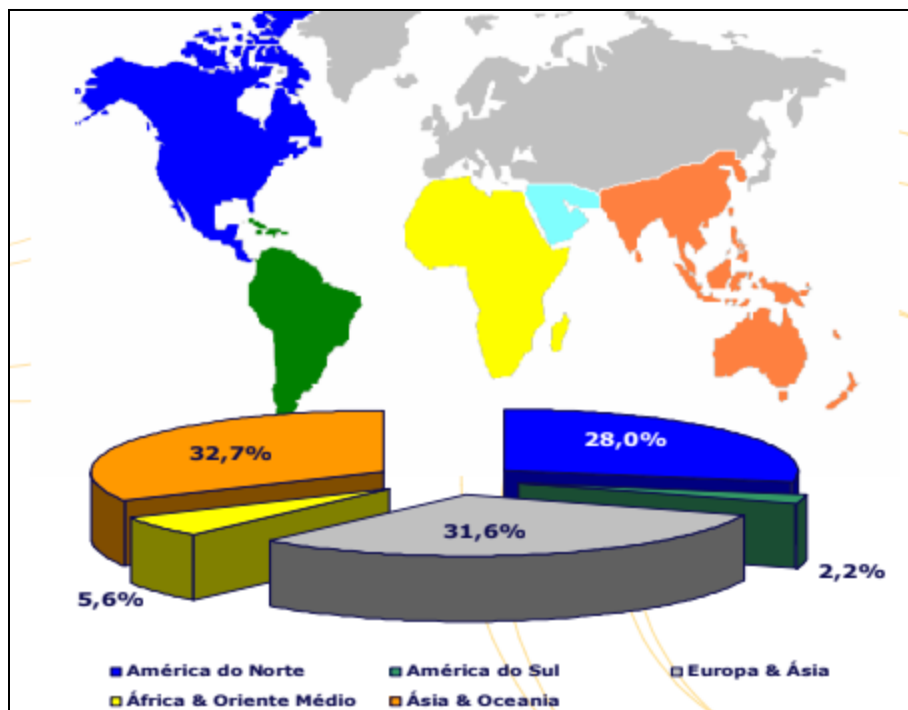
Fonte: Agência Internacional de Energia (IEA, 2022)

Segundo a Aneel, existem cerca de 847,5 bilhões de toneladas de carvão mineral distribuídas em diversas reservas ao redor do mundo, o que seria suficiente para atender à demanda global pelos próximos 130 anos. Aproximadamente 60% dessas reservas estão concentradas nos Estados Unidos, Rússia e China, com os Estados Unidos detendo a maior parte, cerca de 28,6% do total. Apesar de possuir as maiores reservas, os Estados Unidos não são os maiores produtores de carvão. A China lidera a produção e o consumo mundial de carvão mineral.

Ásia, Oceania, Eurásia e América do Norte concentram mais de 90% das reservas mundiais de carvão. Essas regiões possuem grandes depósitos de carvão, o que reflete a significativa presença geológica e econômica desse recurso em suas economias. Ásia e Oceania, por exemplo, incluem países com grandes reservas como China, Índia, Austrália e Indonésia. A Eurásia, com países como Rússia e Cazaquistão, também abriga enormes reservas de carvão. A América do Norte, com os Estados

Unidos e o Canadá, completa o trio de regiões dominantes na posse de reservas globais de carvão. Essa concentração geográfica tem implicações importantes para a segurança energética, o comércio de carvão e as políticas ambientais dessas regiões. A Figura 6 mostra.

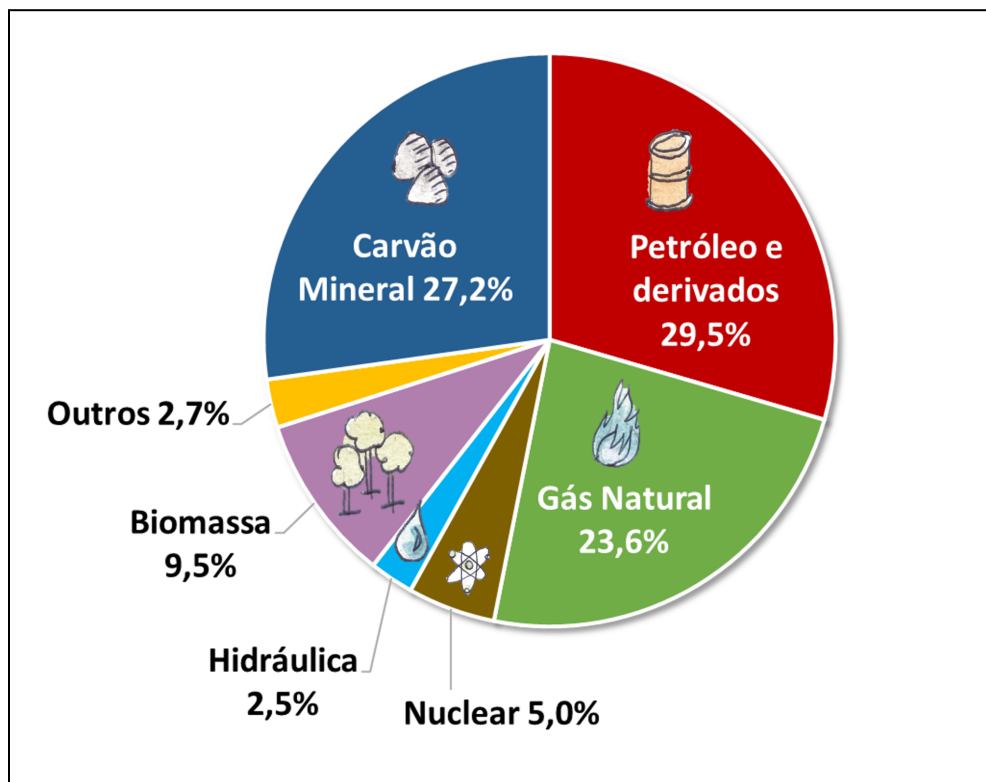
Figura 6 - Mapa das jazidas de carvão no Mundo



Fonte: Plano Nacional de Energia (2030), EPE

No panorama energético mundial, o carvão mineral ocupa uma fatia significativa de 27,2% da matriz global, evidenciando sua importância persistente como fonte de energia. Além disso, o petróleo e seus derivados dominam ainda mais, representando 29,5% da energia consumida globalmente, enquanto o gás natural contribui com 23,6%. Juntas, essas três fontes fósseis somam 80,3% do consumo energético mundial, refletindo a predominância contínua dos combustíveis fósseis na matriz energética global, de acordo com a Figura 7.

Figura 7 - Fonte Energética Mundial, 2021

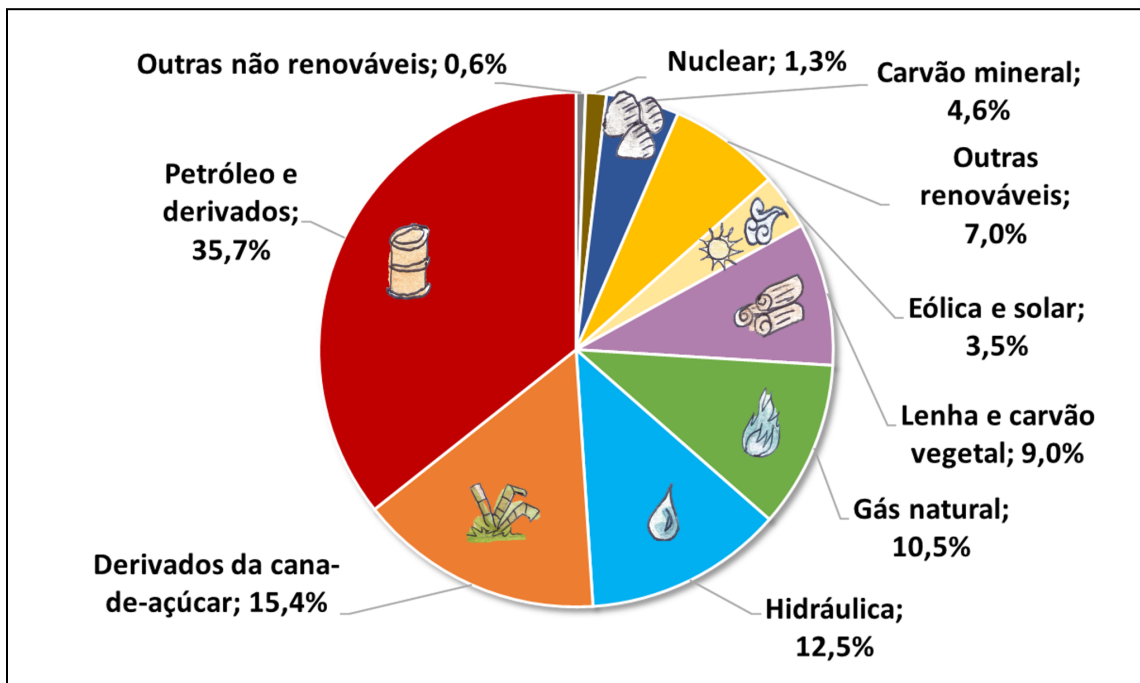


Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE)

Em território brasileiro, a situação é bastante diferente em comparação com muitas outras regiões do mundo, pois as fontes renováveis representam 47,4% da matriz energética nacional. Esse destaque na utilização de energias renováveis reflete a diversificação do país em termos de fontes energéticas, incluindo o uso significativo de lenha, carvão vegetal, energia hidráulica, derivados de cana, eólica, solar e outras fontes renováveis.

Enquanto a matriz energética global ainda depende majoritariamente de fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás, o Brasil se destaca por adotar uma abordagem mais sustentável, com 47,4% de sua matriz energética proveniente de fontes renováveis, como mostra a Figura 8.

Figura 8 : Fonte Energética Brasileira, 2022



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE)

No Brasil, a distribuição das reservas de carvão mineral revela um panorama detalhado de sua potencialidade. Aproximadamente 27% das reservas são classificadas como inferidas, baseadas em dados preliminares e com menor certeza quanto à sua exata localização e quantidade. Já 45% são reservas indicadas, que apresentam maior precisão nas estimativas e maior confiança na viabilidade econômica. Por fim, 28% das reservas são medidas, o que significa um alto nível de certeza e detalhamento, refletindo um conhecimento preciso sobre a quantidade e qualidade do carvão disponível.

As reservas de carvão mineral estão concentradas principalmente em dois estados: o Rio Grande do Sul, que detém a maior parte com aproximadamente 90,6% do total, e Santa Catarina, que possui 9,4%. As reservas restantes estão distribuídas por outros estados, com destaque para São Paulo, Paraná e Maranhão, que, embora em menor quantidade, também contribuem para a oferta nacional de carvão mineral. Essa concentração geográfica reflete a importância do Rio Grande do Sul e de Santa

O Rio Grande do Sul possui 4 minas de carvão (Mina de Candiota, Minas do Leão I e Minas do Leão II e Jazida do Iruí) mas apenas uma está em atividade, sendo ela a Mina de Candiota. A Jazida de Candiota, localizada na Região da Campanha, possui as condições geológicas mais favoráveis do país. Suas reservas são bastante superficiais, de até 50 metros de profundidade, o que facilita a extração do carvão. Localizada no município de Candiota, a 400 quilômetros ao sul de Porto Alegre, está inserida na maior jazida de carvão mineral do Brasil. As reservas de carvão são de 1 bilhão de toneladas, passíveis de serem mineradas a céu aberto, em profundidades de até 50 metros. A CRM vem trabalhando nessa região desde 1961, objetivando em especial a produção de carvão termelétrico. Na Figura 10, observa-se a Mina de Candiota em operação .

Figura 10 - Mina de Candiota (Ativa)



Fonte: Companhia Riograndense de Mineração

A Jazida de Candiota abastece duas Usinas Termelétricas localizadas no município de Candiota, são elas Pampa Sul e Âmbor (antiga CGT Eletrosul). Segundo

dados, a capacidade instalada da usina Pampa Sul é de 345 MW e uma média de 323,5 MW de capacidade comercial, já a usina Âmbar possui 350 MW de capacidade instalada e uma média de 292 MW de capacidade comercial (Pampa Sul, 2024).

2.5 Cinzas de carvão mineral

2.5.1 Principais alternativas para reutilização

As cinzas de carvão mineral têm várias aplicações industriais devido às suas propriedades físicas e químicas. Elas são amplamente utilizadas na indústria cimenteira, atuando como pozolanas que melhoram a resistência e durabilidade dos materiais de construção (Mehta; Rahman, 2021). Além disso, desempenham um papel relevante na fabricação de tijolos e blocos, contribuindo para a redução de custos e impactos ambientais associados à extração de matérias-primas.

Ademais, outra aplicação é na produção de zeólitas, que são materiais microporosos com ampla utilização em processos de filtração, catálise e troca iônica. As cinzas podem ser transformadas em zeólitas através de processos de ativação química e térmica, resultando em produtos de alto valor agregado utilizados para remover poluentes de águas residuais e gases (Liang; Qiu, 2022). Este uso não só aproveita um resíduo industrial abundante como também contribui para a sustentabilidade no tratamento de efluentes e controle da poluição.

Na estabilização de solos, as cinzas são utilizadas para melhorar a resistência mecânica e reduzir a expansividade de solos argilosos, tornando-os mais adequados para servir como subleitos de pavimentos (Jones; Smith, 2023). Este uso não só aproveita um resíduo industrial abundante como também melhora as propriedades geotécnicas dos solos empregados na construção de rodovias.

No contexto da pavimentação, as cinzas de carvão mineral são valorizadas por sua contribuição à sustentabilidade e eficiência econômica. Elas são incorporadas em misturas asfálticas e como material de enchimento em camadas de base e sub-base pavimentos. Estudos demonstram que a incorporação de cinzas de carvão em

pavimentos pode melhorar a resistência à compressão, reduzir deformações permanentes e aumentar a durabilidade da pavimentação (Raj; Gupta, 2020). Além disso, seu uso em pavimentação contribui para diminuir a disposição em aterros e o impacto ambiental associado (Zhang *et al.*, 2021).

2.5.2 Uso de cinzas de carvão mineral na pavimentação - Estado da arte

Mediante o exposto ao longo deste trabalho, a utilização de cinzas de carvão mineral na pavimentação tem emergido como uma alternativa promissora para o reaproveitamento de resíduos industriais, promovendo benefícios econômicos e ambientais. O crescente interesse por soluções sustentáveis na construção civil impulsiona pesquisas sobre o uso eficiente e seguro desses materiais. A seguir, apresenta-se o Quadro 1 que organiza, de forma cronológica, estudos recentes sobre o tema.

Estes artigos exploram desde a formulação de guias práticos até análises de desempenho e impacto ambiental, proporcionando uma visão abrangente sobre o estado da arte desta temática.

Quadro 1: Estado da arte sobre o uso de cinzas de carvão mineral em pavimentação

Título do Trabalho	Resumo	Autores	Ano da Publicação	Link para o Trabalho
Proposição de um manual de utilização de cinzas de carvão mineral para subcamadas de pavimentos	Desenvolvimento de um manual para a incorporação de cinzas de carvão em subcamadas de pavimentos.	Araújo, C.; Silva, J.	2022	Link

(continua)

Construção de bases e sub-bases de pavimento com o uso de cinzas de carvão advindas de termelétricas	Exploração dos benefícios técnicos e econômicos da utilização de cinzas de carvão em bases e sub-bases de pavimentos.	Araújo, C.; Andrade, F.	2022	Link
Environmental benefits of using coal fly ash in road construction	Análise dos benefícios ambientais do uso de cinzas volantes de carvão na construção de estradas, focando na redução de resíduos sólidos.	Kim, S.; Williams, R.	2022	Link
The potential of coal fly ash for eco-friendly road construction	Estudo sobre o potencial das cinzas volantes de carvão em construir estradas ecologicamente corretas, com foco na sustentabilidade.	Ahmed, N.; Lee, C.	2022	Link

(continua)

Construction and demolition waste management: A case study in building materials	Estudo de caso sobre a gestão de resíduos de construção e demolição, avaliando o uso de materiais alternativos na construção civil.	Oliveira, T.; Sousa, R.	2023	Link
Fly ash utilization in concrete: Performance and environmental impacts	Investigação do desempenho e impactos ambientais do uso de cinzas volantes em concreto para pavimentação.	Zhang, Y.; Liu, M.	2023	Link
Sustainability assessment of coal ash usage in road infrastructures	Avaliação da sustentabilidade do uso de cinzas de carvão em infraestruturas viárias, com foco em impactos de longo prazo.	Silva, A.; Pereira, L.	2023	Link

Analisando-se o estado da arte, verifica-se que o uso de cinzas de carvão mineral em pavimentação, contribui para melhorias ambientais e econômicas. Araújo e Silva (2022) desenvolveram um manual para a incorporação de cinzas de carvão em subcamadas de pavimentos, destacando otimização de recursos, enquanto Araújo e Andrade (2022) os benefícios técnicos e econômicos do uso dessas cinzas em bases de pavimentos. Kim e Williams (2022) enfatizaram os benefícios ambientais significativos dessa prática, como a redução de resíduos sólidos.

Ahmed e Lee (2022) avaliaram o potencial das cinzas de carvão para a construção de estradas ecologicamente corretas, destacando sua contribuição para a sustentabilidade. Oliveira e Sousa (2023) discutiram a gestão de resíduos de construção e demolição, incluindo o uso de cinzas como materiais alternativos. Zhang e Liu (2023) exploraram o desempenho das cinzas volantes em concreto, considerando também seus impactos ambientais. Por fim, Silva e Pereira (2023) realizaram uma avaliação de sustentabilidade do uso de cinzas em infraestruturas viárias, ressaltando impactos de longo prazo. Este conjunto de estudos reflete a crescente viabilidade e relevância das cinzas de carvão como uma solução sustentável na engenharia civil.

2.5.3 Normas e regulamentações

Para garantir o uso das cinzas na pavimentação, é essencial seguir normas técnicas e regulamentações pertinentes. O Quadro 2 apresenta um conjunto de normas e regulamentações relevantes no Brasil e no cenário internacional. Estas diretrizes visam assegurar a qualidade, segurança e sustentabilidade das práticas de construção, aliando inovação e responsabilidade ambiental.

Quadro 2: Normas e regulamentações para o uso de materiais alternativos na pavimentação

Tipo	Norma/Regulamentação	Descrição
Normas Brasileiras	NBR 15577 (Partes 1 a 5)	Especificações para agregados de concreto, importantes para a incorporação de cinzas de carvão.
	NBR 16449	Diretrizes para reciclagem de resíduos da construção civil, aplicáveis ao uso de cinzas.
	NBR 15116	Procedimentos para execução de revestimento asfáltico, incluindo materiais alternativos.
Normas Internacionais	ASTM C618	Especificação para cinzas volantes e pozolanas em concreto.

(continua)

	EN 450-1	Requisitos para cinzas volantes em concreto na Europa.
Regulamentações Ambientais	Resolução CONAMA nº 307	Gestão e manejo de resíduos da construção civil no Brasil.
	Lei nº 12.305/2010	Política Nacional de Resíduos Sólidos, promovendo a utilização de resíduos.
	Diretrizes do DNIT	Especificações técnicas para construção e manutenção de rodovias no Brasil, incluindo materiais reciclados.

Fonte: Autor, 2024

3 METODOLOGIA

A metodologia proposta visa guiar o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso e compreende a revisão das pesquisas e das discussões de outros autores sobre a temática proposta.

3.1 Caracterização das cinzas

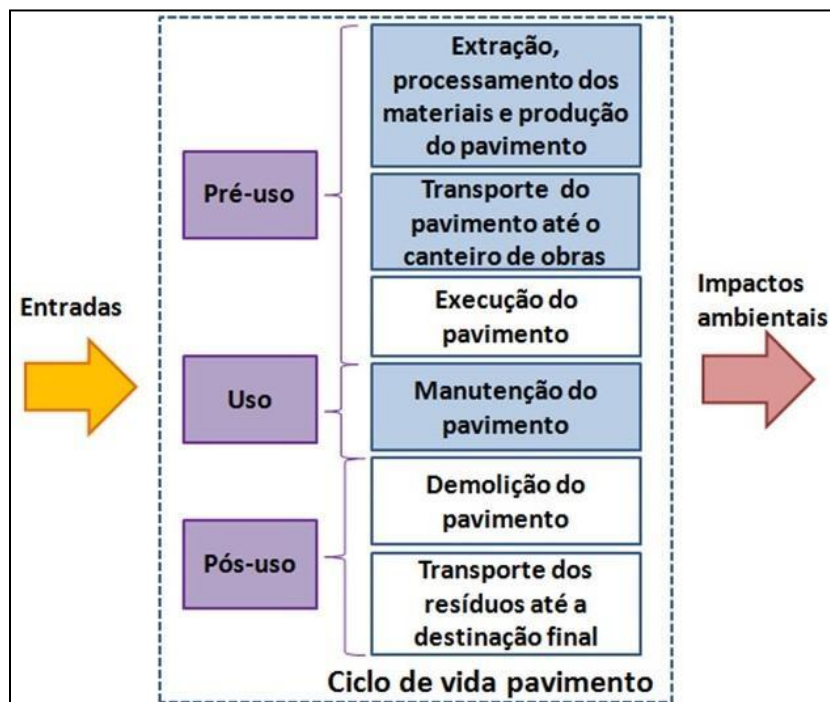
Para que as cinzas de carvão mineral sejam adequadas ao uso em subcamadas de pavimentos, é necessário que apresentem características técnicas específicas que garantam seu desempenho mecânico, ambiental e de durabilidade (Silva, Barroso e Cabral, 2020).

A caracterização será apresentada a partir da pesquisa de Lopes (2021). A autora analisou detalhadamente as cinzas de carvão mineral utilizando as técnicas de análise granulométrica. Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia Raman, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Análise da Estrutura Porosa e da Área Superficial Específica. O detalhamento da metodologia bem como das técnicas está descrito no referido trabalho.

3.2 Avaliação do ciclo de vida

Uma ACV completa de um pavimento deve conter todas as fases de vida, desde aquisição de matéria prima, processamento do material, uso e fim da vida. A Figura 11 apresenta o ciclo de vida completo de um pavimento elaborado por Caldas, Lins e Sposto (2017) onde são demonstradas as ações, interações e os impactos ambientais provocados por cada componente do seu ciclo de vida.

Figura 11 - Ciclos de vida do pavimento



Fonte: Caldas, . R.; Lins, . N.; Spoto, . M. Avaliação do ciclo de vida do pavimento (2017, p. 17)

No entanto, devido às dificuldades em abranger todas as fases do ciclo de vida de um pavimento, é comum que os estudos realizem uma simplificação no escopo, focando na análise de apenas uma parte do ciclo completo (Machado, 2021).

Ainda segundo Machado (2021) para propor uma ACV do uso de cinzas de carvão mineral em subcamadas de pavimentos, é necessário seguir uma abordagem sistemática e bem fundamentada, alinhada às diretrizes da norma **NBR ISO 14040** complementada pela **NBR ISO 14044** (ABNT, 2009).

A seguir, apresenta-se os principais passos utilizados na estruturação na ACV utilizado neste.

3.2.1 Definição do objetivo e do escopo

3.2.1.1 Objetivo: Avaliar os impactos ambientais associados ao uso de cinzas de carvão mineral como material alternativo em subcamadas de pavimentos rodoviários.

3.2.1.2 Escopo:

Sistema analisado

Produção, transporte e aplicação das cinzas de carvão mineral em subcamadas de pavimentos, comparando com materiais convencionais (como solo compactado ou brita).

Fronteiras do sistema

Extração e transporte de recursos (no caso de materiais convencionais).

Coleta, transporte e processamento das cinzas.

Construção e manutenção do pavimento.

Destino ao fim da vida útil do pavimento (reutilização, reciclagem ou descarte).

Unidade funcional

Um trecho de pavimento de 1.632,25 m², com subcamadas de 25 cm de espessura. Localizado no Campus Bagé da Unipampa, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 - Vista aérea Unipampa Campus Bagé - RS



Fonte: Google Earth

A Figura 13 mostra uma imagem ampliada do trecho de pavimentação.

Figura 13 - Trecho de Pavimentação



Fonte: Google Earth

A aplicação de cinzas de carvão mineral em subcamadas de pavimentos foi analisada em diferentes categorias de impacto ambiental e econômico. Comparou-se os cenários utilizando-se as cinzas com o convencional (brita ou solo estabilizado). A seguir estão listadas as categorias analisadas.

- Categoria de impacto: mudanças climáticas (emissões de CO₂ equivalente)
- Consumo de recursos naturais (matéria-prima extraída).
- Energia incorporada (energia gasta na produção e transporte).
- Toxicidade ambiental (potenciais emissões de poluentes ao solo e água).
- Custos totais por unidade de pavimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das cinzas

De acordo com a pesquisa desenvolvida por Lopes (2021), as cinzas de carvão mineral disponíveis para o projeto possuem as características a seguir:

Caracterização química:

- Principais Componentes: As cinzas são constituídas principalmente por mulita ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), quartzo (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3).
- Outros Elementos: Podem conter óxidos de silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, enxofre, e traços de metais pesados.
- Pozolanicidade: As cinzas apresentam características pozolânicas, reagindo com o hidróxido de cálcio para formar compostos cimentantes.

Caracterização física:

- Granulometria: As partículas são finas, com diâmetro médio em torno de 42,19 μm , classificado como material fino.
- Área Superficial Específica: A área é de aproximadamente 28,4 m^2/g , indicando uma alta reatividade.
- Estrutura: As partículas geralmente são esféricas, o que contribui para a trabalhabilidade quando usadas em argamassas e concretos.
- Porosidade: Considerado mesoporoso, com tamanho de poro de cerca de 38 Å, o que influencia na reatividade e na capacidade de absorção de água.

A partir destas características pode-se concluir que as cinzas são indicadas para uso em subcamadas de pavimentos devido às suas propriedades físicas e químicas favoráveis. A granulometria fina contribui para boa compactação e estabilidade, enquanto a presença de minerais como quartzo, mulita e hematita confere resistência mecânica e durabilidade. A área superficial específica e a porosidade melhora a resistência ao desgaste e a absorção de ligantes. A morfologia das partículas favorece a aderência ao material de base.

4.2 Avaliação do Ciclo de Vida

Para elaborar a ACV, conforme já prescrito, foram analisadas pesquisas e discussões de outros autores, que estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3: Avaliação do Ciclo de Vida

Título do Trabalho	Resumo	Autores	Ano da Publicação	Link para o Trabalho
Análise da compatibilidade de mistura de solo argiloso com cinzas volantes de carvão mineral sujeita a percolação por diferentes fluidos	Avalia a compatibilidade entre solo argiloso e cinzas volantes submetidos a diferentes fluidos, visando aplicações geotécnicas.	Bastos, Í. J. F. S.	2023	-
Influência da utilização de resíduos gerados por usina termelétrica em misturas asfálticas sustentáveis.	Estuda a influência de resíduos de usina termelétrica sobre o desempenho de misturas asfálticas sustentáveis.	Clara, E.; Barra, B. S.; Guerrero, Y.; Mikowski, A.; Liz, J. V.; Jargemboski, N. J.	2024	Link

(continua)

Análise do comportamento mecânico de misturas de cinzas de carvão estabilizadas com cal em camadas de base de pavimentos flexíveis	Avaliação mecânica de misturas de cinzas estabilizadas com cal aplicadas em pavimentos flexíveis.	De Aguiar, J. N. et al.	2022	-
Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica na construção de pavimentos	Investiga o uso de cinzas de carvão em pavimentação, com foco em desempenho e viabilidade ambiental.	Vasconcelos, S. D.; Barroso, S. H. A.; Vieira, F. A. F.; Almeida, H. B. F.	2019	Link
Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral como melhorador de adesividade em misturas asfálticas	Estudo da adesividade de misturas asfálticas com incorporação de cinzas de carvão como aditivo.	Xavier, M. F.; Ferreira, W. L. G.; Branco, V. T. F. C.	2020	Link

Fonte: Autor, 2024

- Categoria de Impacto: Mudanças Climáticas (Emissões de CO₂ equivalente)
 - Cenário com cinzas de carvão mineral: 75 kg CO₂e/m³ de subcamada.
 - Cenário convencional (brita ou solo estabilizado): 120 kg CO₂e/m³ de subcamada.

- Redução: O uso de cinzas permite uma diminuição de 37,5% nas emissões de gases de efeito estufa.
-
- Consumo de Recursos Naturais (Matéria-prima extraída)
 - Cenário com cinzas: Zero extração de recursos naturais, pois o material é proveniente de resíduos industriais.
 - Cenário convencional: Aproximadamente 1,8 toneladas de agregados naturais por m³ de subcamada.
 - Benefício: Economia total de matéria-prima, reduzindo a pressão sobre jazidas de agregados.
-
- Energia Incorporada (Energia gasta na produção e transporte)
 - Cenário com cinzas: 500 MJ/m³, considerando transporte e adaptação do material.
 - Cenário convencional: 700 MJ/m³, devido à extração e beneficiamento do agregado.
 - Redução: Diminuição de aproximadamente 28,6% no consumo energético.
-
- Toxicidade Ambiental (Potenciais emissões de poluentes ao solo e água)
 - Cenário com cinzas: Pequeno risco associado à presença de metais pesados, mitigado por encapsulamento no pavimento.
 - Cenário convencional: Nenhum risco significativo.
 - Recomendação: Estudos adicionais para monitorar lixiviação de componentes químicos das cinzas.
-
- Custos Totais por Unidade de Pavimento
 - Cenário com cinzas: R\$40.000,00, incluindo transporte e aplicação.

- Cenário convencional: R\$55.000,00, devido ao custo de extração e transporte de agregados.
- Economia: Redução de 27% nos custos totais do projeto.

Os resultados mostram que o uso de cinzas de carvão mineral em subcamadas de pavimentos apresenta vantagens, como redução de emissões de gases de efeito estufa e consumo de recursos naturais, além de menor custo econômico. No entanto, é crucial considerar possíveis impactos associados, como a lixiviação de metais pesados, o que demanda monitoramento adequado. Essa abordagem reforça a relevância de práticas sustentáveis no setor de infraestrutura, em consonância com os ODS 's 9, 12 e 13.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho avaliou a viabilidade do uso de cinzas de carvão mineral em subcamadas de pavimentos rodoviários, analisando suas propriedades, impactos ambientais e alinhamento com os ODS 's.

As cinzas possuem características pozolânicas, constituídas principalmente por aluminossilicatos na forma de mulita, sílica amorfa e hematita, além de propriedades físico-químicas que favorecem sua aplicação em pavimentação.

A análise do ciclo de vida (ACV) demonstrou vantagens ambientais, como a redução das emissões de gases de efeito estufa e do consumo de recursos naturais, bem como custos econômicos inferiores em comparação aos materiais convencionais.

Contudo, o potencial de lixiviação de metais pesados ressalta a importância de implementar estratégias de monitoramento e controle para minimizar riscos ambientais.

O estudo também confirmou a relevância dessa prática para o cumprimento de metas relacionadas aos ODS 9, 12 e 13 promovendo uma infraestrutura mais sustentável e alinhada às demandas ambientais globais.

Assim, conclui-se que a utilização de cinzas de carvão mineral em subcamadas de pavimentos é uma solução técnica e ambientalmente promissora, desde que acompanhada por uma gestão responsável dos impactos associados. Essa abordagem contribui para a promoção de práticas sustentáveis no setor de infraestrutura, beneficiando tanto o meio ambiente quanto a economia.

REFERÊNCIAS

ABCM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CARVÃO MINERAL. *O carvão mineral no Brasil: perspectivas e desafios*. 2019.

AHMED, N.; LEE, C. The potential of coal fly ash for eco-friendly road construction. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921005784>.

ALMEIDA, J. P. et al. Avaliação ecotoxicológica do resíduo de mineração de carvão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/HqGrhYvDBgPm8F36RJmMtkD>. Acesso em: 15 dez. 2024.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Relatório Anual de Geração de Energia no Brasil. Brasília: Aneel, 2023.

ARAÚJO, C.; ANDRADE, F. Construção de bases e sub-bases de pavimento com o uso de cinzas de carvão advindas de termelétricas. 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/372084232_CONSTRUCAO_DE_BASES_E_SUB-BASES_DE_PAVIMENTO_COM_O_USO_DE_CINZAS_DE_CARVAO_ADVINDAS_DE_TERMELETRICAS.

ARAÚJO, C.; SILVA, J. Proposição de um manual de utilização de cinzas de carvão mineral para subcamadas de pavimentos. 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/372083841_PROPOSICAO_DE_UM_MANUAL_DE_UTILIZACAO_DE_CINZAS_DE_CARVAO_MINERAL_PARA_SUBCAMADAS_D_E_PAVIMENTOS.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: Execução de revestimento asfáltico tipo CBUQ. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16449: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos. Rio de Janeiro, 2016.

BRASIL. Classificação das reservas de carvão. Disponível em: <https://anmlegis.datalegis.net>. Acesso em: 21 nov. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

BRASIL ESCOLA. *Energia termoelétrica: o que é e como funciona?* Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/energia-termoeletrica.htm>. Acesso em: 5 maio 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia 2030 – Geração Termelétrica (Carvão Mineral)*. Brasília: MME, 2007. Disponível em: <URL>. Acesso em: 21 nov. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002.

CASTRO, M. B.; GUIMARÃES, L. M. O uso da avaliação do ciclo de vida e da ecoeficiência para avaliar alternativas de valorização de resíduos. *Revista de Administração Pública*, v. 52, n. 1, p. 138–159, 2018. Disponível em: https://pesquisa-eaesp.fgv.br/sites/gvpesquisa.fgv.br/files/arquivos/o_uso_da_avaliacao

do ciclo de vida e da ecoeficiencia para avaliar alternativas de valorizacao de r esiduos.pdf. Acesso em: 19 dez. 2024.

DAI, Shifeng et al. Modes of occurrence of elements in coal: A critical evaluation. *Earth-Science Reviews*, v. 222, p. 103815, 2021.

ECORODOVIAS. Especificação técnica para estudos de jazidas de solos. 2023. Disponível em: https://www.ecorodovias.com.br/wp-content/uploads/2023/03/ET-ECS.000.000-GEO_03-GEOTECNIA-ESPECIFICACAO-TECNICA-PARA-ESTUDOS-DE-JAZIDAS-DE-SOLOS.pdf. Acesso em: 19 dez. 2024.

EIA – U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Annual Energy Review*. U.S. Energy Information Administration, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024: ano base 2023. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 19 nov. 2024.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 450-1: Fly ash for concrete. Brussels, 2012.

GERALDI, Matheus et al. Análise longitudinal do consumo de energia elétrica do setor residencial no Brasil. *Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, v. 19, p. 1-14, 2022.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2020*. Paris: International Energy Agency, 2020.

JONES, A.; SMITH, P. Stabilization of expansive soils using cement and coal fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 35, n. 2, 2023. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003098](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003098).

KALENBORN DO BRASIL. *Como funciona uma termelétrica de carvão?* Disponível em: <https://kalenborn.com.br/como-funciona-uma-termoeletrica-de-carvao/>. Acesso em: 5 maio 2024.

KIM, S.; WILLIAMS, R. Environmental benefits of using coal fly ash in road construction. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722004996>.

LIANG, H.; QIU, Y. Synthesis of zeolites from coal fly ash for wastewater treatment. *Environmental Advances*, v. 5, p. 100022, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100022>.

LOPES, Daniele Ferreira. Avaliação das propriedades de argamassas armadas com adição de resíduos da geração termelétrica. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2021.

MACHADO, Cosme Neves. Análise do ciclo de vida (ACV) de pavimento asfáltico e rígido na BR-163/364/MT. 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais) – Universidade La Salle, Canoas, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11690/1656>. Acesso em: 21 nov. 2024.

MARTINS, R. A. et al. Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica na pavimentação. *Revista Transportes*, v. 28, n. 1, p. 101–110, 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/download/1592/763/801>. Acesso em: 18 dez. 2024.

MEHTA, P. K.; RAHMAN, A. Coal fly ash in concrete: Performance and environmental benefits. *Construction and Building Materials*, v. 270, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857>.

MUNDO EDUCAÇÃO. Usina termelétrica. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/usina-termeletrica.htm>. Acesso em: 5 maio 2024.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Balanço Energético Nacional 2020*. Brasília, 2020.

NEXTRON. Usina termelétrica: o que é e como funciona? Disponível em: <https://blog.nextronenergia.com.br/usina-termeletrica-como-funciona/>. Acesso em: 5 maio 2024.

OLIVEIRA, T.; SOUSA, R. Construction and demolition waste management: A case study in building materials. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/11/9/192>.

RAJ, R.; GUPTA, N. Utilization of fly ash in pavement construction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 130, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109874>.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Carvão mineral. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/carvao-mineral>. Acesso em: 21 nov. 2024.

SILVA, A.; PEREIRA, L. Sustainability assessment of coal ash usage in road infrastructures. 2023. Disponível em: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/cobramseg.2022.0778.pdf>.

SILVA, J. R. et al. Caracterização geotécnica e classificação de jazidas de solo para pavimentação. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia, 2020. Anais [...]. Disponível em: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/cobramseg.2022.0164.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2024.

SILVA, Webert Brasil Cirilo da; BARROSO, Suelly Helena de Araújo; CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra. Avaliação da aplicação de cinzas pesadas de termelétrica em blocos intertravados de concreto para pavimentos. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, p. e-12570, 2020.

SOUZA, C. A. et al. Cinzas de carvão tratadas: avaliação do potencial de reutilização. Revista Científica GURI, 2019. Disponível em: https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq_trabalhos/17705/seer_17705.pdf. Acesso em: 16 dez. 2024.

UNITED NATIONS. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2023. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org>.

ZHANG, X.; LI, J.; WANG, Y. Environmental impacts of fly ash utilization in road construction. *Journal of Cleaner Production*, v. 287, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125071>.

ZHANG, Y.; LIU, M. Fly ash utilization in concrete: Performance and environmental impacts. 2023. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/971/1/012012/meta>.

APÊNDICE A - Desenvolvimento metodológico para uso das cinzas de carvão mineral em camadas e subcamadas de pavimentos.

DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO PARA USO DAS CINZAS DE CARVÃO MINERAL EM CAMADAS E SUBCAMADAS DE PAVIMENTOS

RUBNE RIETH CATAPAN; DANIELE FERREIRA; SABRINA NEVES DA SILVA

RESUMO

A cinza de carvão mineral, um subproduto da combustão em usinas termelétricas (UTES), tem se destacado como uma alternativa promissora na construção civil, especialmente na pavimentação. Duas das maiores UTES a carvão do país estão localizadas no Rio Grande do Sul (RS), na cidade de Candiota, a 40 km da Universidade Federal do Pampa na cidade de Bagé. Juntas as usinas geram mensalmente, cerca de 600 Megawatt (MW) de potência em regime de operação pleno, isso sem considerar os períodos de escassez, em que há maior acionamento das térmicas para suprir a demanda de energia elétrica. Dados fornecidos pelas empresas geradoras, informam que se formam 350 quilogramas (kg) de cinzas por Megawatt-hora (MWh) de energia gerada. Assim, considerando-se o funcionamento das duas unidades 24h, em 30 dias, estima-se uma produção de 200 toneladas de cinza. As cinzas leves, ou volantes, correspondem a cerca de 80% do total de resíduos gerados na combustão do carvão mineral sendo um resíduo de difícil descarte. Nesse sentido, tanto o setor carbonífero quanto as UTES tem buscado progredir em relação ao seu comprometimento com o meio ambiente, com o uso de tecnologias que visam minimizar esses impactos melhorando assim a aceitação desse tipo de geração de energia perante o mercado consumidor. Com esse viés, o reaproveitamento das cinzas se justifica pela redução do impacto ambiental relacionado ao descarte e, na pavimentação, o uso é significativo uma vez que há uma tendência à carência de recursos naturais convencionais utilizados em pavimentos. O uso de cinzas na pavimentação se difundiu desde a década de 60, sendo objeto de vários estudos nacionais e internacionais. A partir daí diversos estudos demonstraram que as cinzas têm o potencial de melhorar as propriedades geotécnicas dos solos, em misturas

solo/cinza, tornando-os adequados para utilização no setor rodoviário, especialmente como camadas ou subcamadas de pavimentos. Contudo, para a região deste estudo, não foram encontradas abordagens científicas dedicadas a explorar esta temática. A partir dessa visão, antes da execução do projeto estrutural, como etapas preliminares, é importante averiguar se as cinzas e os solos possuem as propriedades adequadas para uso na pavimentação, avaliar os riscos ambientais e testar as proporções de mistura solo/cinza. Tendo em vista as realidades apresentadas, este estudo teve por objetivo desenvolver uma sequência metodológica para o uso das cinzas de carvão mineral em camadas ou subcamadas de pavimentos em misturas solo/cinza com enfoque nas matérias primas (cinzas e solos) disponíveis na Região de Bagé. Foram consultadas bases de dados científicas e normas técnicas. Como resultados, obteve-se que, para que um solo possa ser empregado em camadas da pavimentação alguns requisitos mínimos são exigidos como, por exemplo, adequada capacidade de suporte, baixa expansão e valores controlados dos índices de consistência. Quando algumas dessas condições não forem satisfeitas, técnicas podem ser empregadas para a melhoria das propriedades do solo. Para isso, sugere-se, para os solos, os ensaios de granulometria, massa específica, absorção de água, limites de Atterberg, compactação e índice de suporte Califórnia. Para as cinzas, os ensaios são, além da granulometria e limites de Atterberg, lixiviação, solubilização e caracterização físico-química. Por fim, para as misturas solo/cinza, ensaios mecânicos de resistência à compressão em diferentes tempos de cura. Todos os ensaios seguem prescrições de normas técnicas nacionais e internacionais e, atendidas às normativas, pode-se realizar o projeto estrutural de pavimentação. As pesquisas nesse campo demonstram a versatilidade das cinzas e seu potencial para aplicação em pavimentos, impulsionando a busca por soluções inovadoras e ecoeficientes na construção civil. Como fechamento, este estudo visou a proposição de uma solução para o reaproveitamento dos resíduos que gerados nas UTEs da região de Bagé em camadas e subcamadas de pavimentos. Desenvolveu-se uma sequência metodológica visando viabilizar tal aplicação. Concluiu-se que o uso da cinza de carvão mineral na pavimentação apresenta-se como uma solução sustentável e promissora, contribuindo

para a redução do impacto ambiental, conservação de recursos naturais e melhoria do desempenho do pavimento.

Palavras-chave: sustentabilidade ambiental, pavimentação.

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia por usinas termelétricas a carvão mineral tem um papel importante no suprimento energético, especialmente em períodos de escassez. Entretanto, a combustão do carvão resulta em grandes quantidades de cinzas, que representam um desafio ambiental devido ao difícil descarte e ao impacto potencial no meio ambiente. Dentre os resíduos gerados, as cinzas volantes destacam-se por sua abundância, correspondendo a aproximadamente 80% do total produzido.

No contexto do Rio Grande do Sul, as usinas localizadas em Candiota produzem em torno de 200 toneladas de cinzas mensais. Frente a isso, iniciativas que busquem reaproveitar esses resíduos são essenciais, tanto para mitigar impactos ambientais quanto para promover soluções sustentáveis em setores como a construção civil. Este trabalho propõe a utilização de cinzas de carvão mineral em misturas solo/cinza, visando sua aplicação em camadas ou subcamadas de pavimentos, uma abordagem ainda pouco explorada na região de Bagé.

2 METODOLOGIA

A pesquisa desenvolveu-se com base em levantamento bibliográfico e normativo para avaliar a viabilidade do uso das cinzas volantes em misturas solo/cinza para pavimentação. A metodologia incluiu:

1. Caracterização do solo: Ensaio de granulometria, massa específica, absorção de água, limites de Atterberg, compactação e índice de suporte Califórnia (CBR).
2. Caracterização das cinzas: Ensaio de granulometria, limites de Atterberg, lixiviação, solubilização e análise físico-química.
3. Ensaio das misturas solo/cinza: Testes de resistência à compressão em diferentes tempos de cura para avaliar o desempenho mecânico das misturas.

Os ensaios seguiram normas técnicas nacionais e internacionais para garantir a confiabilidade dos resultados.

3 RESULTADOS

Os ensaios demonstraram que o solo local não atende plenamente os requisitos mínimos para aplicação direta em camadas de pavimentação, como capacidade de suporte e controle de expansão. Entretanto, a adição de cinzas de carvão mineral mostrou-se eficaz na melhoria das propriedades geotécnicas do solo, como aumento da resistência mecânica e redução da expansão.

Para as cinzas, os ensaios de lixiviação e solubilização indicaram que os resíduos apresentam baixos índices de contaminantes, atendendo aos critérios de segurança ambiental. Já nas misturas solo/cinza, os ensaios de resistência à compressão apontaram desempenho satisfatório, especialmente após períodos de cura superiores a 7 dias. Esses resultados validam o potencial de aplicação das misturas em camadas ou subcamadas de pavimentos, alinhando sustentabilidade e desempenho técnico.

4 CONCLUSÃO

Este estudo conclui que a utilização de cinzas de carvão mineral em misturas solo/cinza para pavimentação apresenta-se como uma solução viável e promissora para a região de Bagé. Além de contribuir para a conservação de recursos naturais e redução do impacto ambiental, a aplicação dessas misturas promove melhorias no desempenho geotécnico do solo, ampliando sua utilização em infraestrutura rodoviária. A abordagem proposta reforça a importância de soluções inovadoras e ecoeficientes no setor da construção civil, destacando o reaproveitamento de resíduos como uma estratégia sustentável para o desenvolvimento regional.

REFERÊNCIAS

CLARA, E.; BARRA, B. S.; GUERRERO, Y.; MIKOWSKI, A.; LIZ, J. V. de; JARGEMBOSKI, N. J. Influência da utilização de resíduos gerados por usina termelétrica em misturas asfálticas sustentáveis. *Caderno Pedagógico*, [S. l.], v. 21, n. 10, p. e9625, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n10-293. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/9625>. Acesso em: 22 nov. 2024.

DE AGUIAR, Josimeiry Naiara et al. Análise do comportamento mecânico de misturas de cinzas de carvão estabilizadas com cal em camadas de base de pavimentos flexíveis. 2022.

VASCONCELOS, S. D.; BARROSO, S. H. de A.; VIEIRA, F. de A. F.; ALMEIDA, H. B. F. Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica na construção de pavimentos. *Transportes*, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 73–88, 2019. DOI: 10.14295/transportes.v27i2.1592. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1592>. Acesso em: 22 nov. 2024.

XAVIER, M. de F.; FERREIRA, W. L. G.; BRANCO, V. T. F. C. Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral como melhorador de adesividade em misturas asfálticas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, [S. l.], v. 25, n. 1, e–12566, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200001.0891.