



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS GERADOS POR USINA TERMELÉTRICA PARA APLICAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS SUSTENTÁVEIS

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Estéfani Clara¹; Breno Salgado Barra¹; Alexandre Mikowski² & Yader Guerrero²

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar as propriedades dos resíduos gerados por usina termelétrica visando aplicação em misturas asfálticas sustentáveis. As cinzas denominadas volantes (*Fly ash*) e de fundo (*Bottom ash*) foram obtidas no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado na cidade de Capivari de Baixo/SC. As propriedades das cinzas de carvão foram analisadas em comparação com partículas de rocha maciça gnáissica triturada, visando uma análise no contexto de utilização para materiais de enchimento em misturas asfálticas. As avaliações das cinzas foram realizadas mediante as características físicas, química e mineralógicas, com o auxílio de imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), análise de durabilidade e sanidade das partículas, análises texturais utilizando a técnica de adsorção de nitrogênio (N₂), determinação das composições químicas com o uso de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (FRX), determinação das composições mineralógicas elementares e suas respectivas distribuições de fases por difração de raios-X (DRX), determinação da dureza dos fileres através de uma estimativa teórica e por fim, caracterização da rigidez do mástico com base no ensaio de ponto de amolecimento anel e bola. A utilização dos resíduos em misturas asfálticas demonstrou-se tecnicamente viável, logo sendo uma contribuição direta e segura para a preservação do meio ambiente. Abrindo-se inclusive a possibilidade de um mercado para a utilização em larga escala das cinzas de fundo, atualmente sem destinação notadamente na região sul do Estado de Santa Catarina.

PALAVRAS-CHAVE: Cinzas de carvão mineral; Cinzas volantes; Cinzas de fundo; Sustentabilidade.

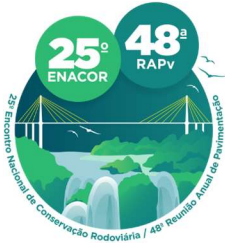
ABSTRACT

The main objective of this work is to evaluate the properties of residues generated by thermoelectric power plants aiming at application in sustainable asphalt mixtures. Fly ash and bottom ash were obtained from the Jorge Lacerda Thermoelectric Complex, located in the city of Capivari de Baixo/SC. The properties of coal ash were analyzed in comparison with crushed gneiss solid rock particles, aiming at an analysis in the context of use for filler materials in asphalt mixtures. The ash evaluations were carried out according to the physical, chemical and mineralogical characteristics, with the aid of Scanning Electron Microscopy (SEM) images, analysis of durability and health of the particles, textural analyzes using the technique of nitrogen adsorption (N₂), determination of chemical compositions using Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry (FRX), determination of elemental mineralogical compositions and their respective phase distributions by X-ray diffraction (DRX), determination of filler hardness through an estimation theoretical and finally, characterization of the stiffness of the mastic based on the ring and ball softening point test. The use of residues in asphalt mixtures proved to be technically feasible, thus being a direct and safe contribution to the preservation of the environment. This also opens up the possibility of a market for the large-scale use of bottom ash, currently without destination, notably in the southern region of the State of Santa Catarina.

KEYWORDS: Coal ash; fly ash; bottom ash; Sustainability.

¹Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC/Florianópolis-SC), estefani.clara@hotmail.com; breno.barra@ufsc.br

²Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC/Joinville-SC), alexandre.mikowski@ufsc.br; yagcivil@gmail.com



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

Atualmente, a construção global de pavimentos enfrenta a contradição entre a sustentabilidade do meio ambiente e dos recursos e o desenvolvimento contínuo do nível econômico local, o que também faz com que os profissionais relacionados à construção de pavimentos considerem o impacto da sustentabilidade em seus trabalhos e procurem ativamente meios e métodos relevantes para promover o desenvolvimento de pavimentos sustentáveis (ZHAO e YANG, 2023; BABASHAMSI *et al.*, 2016). A participação do carvão na matriz energética mundial é atualmente responsável por 36 % de todo o consumo global de energia (BP, 2022). Apesar dos graves impactos sobre o meio ambiente, o carvão ainda é uma fonte importante de energia em escala mundial. As principais razões para isso são a abundância e a distribuição geográfica das reservas, além dos baixos custos e estabilidade nos preços em comparação a outros combustíveis. As reservas mundiais de carvão mineral ultrapassam a ordem de 1 trilhão de toneladas.

Segundo os dados da BP, no final de 2019, as reservas nacionais de carvão giravam em torno de 6 bilhões de toneladas, o que corresponde a mais de 47 % das reservas sul-americanas e 0,6 % das reservas mundiais. Abundância das reservas e o desenvolvimento de tecnologias de limpeza e combustão eficiente, conjugadas à necessidade de expansão dos sistemas elétricos e restrições ao uso de outras fontes, indicam que o carvão mineral continuará sendo uma das principais fontes de geração de energia elétrica no Brasil por muitas décadas.

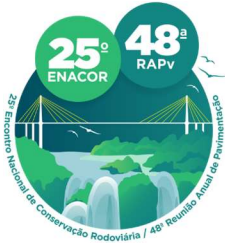
Um grande problema enfrentado na queima do carvão brasileiro é o alto teor de cinzas em comparação com carvões estrangeiros, resultando em uma maior quantidade de cinzas geradas em relação a outros países. Praticamente a totalidade dessas cinzas é encaminhada para as cavas de onde o carvão foi extraído ou então são dispostas em aterros, o que representa um grande impacto potencialmente prejudicial para o meio ambiente (PERON *et al.*, 2017; RHODE, 2006).

Estima-se que a produção das cinzas geradas no complexo termelétrico de Jorge Lacerda, localizado entre os municípios de Capivari de Baixo e Tubarão, estado de Santa Catarina, de acordo com Rhode (2016), oscila entre 42 e 43 %. Devido a questões contratuais, há um valor mínimo de geração equivalente ao consumo de 200.000 t/mês de carvão. Essas 200.000 t/mês originam 84.000 t/mês de cinzas.

Os impactos ambientais causados pela disposição das cinzas a céu aberto são problemáticos. As cinzas ficam expostas a processos de lixiviação, nos quais os componentes pesados presentes nos resíduos contaminam o solo e o lençol freático da região. Além disso, como consequência do descarte, nas áreas próximas às instalações, ocorre a influência de poeira de sílica, gerada pela ação do vento sobre a superfície das bacias de deposição.

A sustentabilidade pode ser promovida em pavimentos através da otimização do projeto da mistura, adotando soluções de pavimentação inovadoras e reduzindo a necessidade de materiais virgens (MOHAMMED *et al.*, 2021; NODEHI E MOHAMAD, 2021). A prática mais comum para alcançar a sustentabilidade do pavimento é diminuir o consumo de agregados virgens, substituindo-os parcial ou totalmente por agregados alternativos (SELVAM *et al.*, 2022).

Portanto, fica evidente a importância do desenvolvimento de novos materiais, que tem sido foco de diversos estudos com o objetivo de encontrar soluções para a destinação em larga escala desses resíduos, geralmente substituindo parcialmente as partículas de agregado triturado extraídas de rochas maciças por cinzas de carvão. Diversos estudos têm caracterizado ocorrências distintas de cinzas de carvão (KHEDMATI *et al.*, 2018; GOLEWSKI, 2017; BRASZCZYŃSKA e KAMIENIAK, 2017; DINAHARAN *et al.*, 2016; MISHRA e DAS, 2010), inclusive para explorar seu uso em projetos de pavimentação (LI *et al.*, 2019; WOSZUK *et al.*, 2019; OMRANI e MODARRES, 2018; LE *et al.*, 2018; DWIVEDI e JAIN, 2014).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é ampliar as discussões científicas e os pontos de vista sobre como as propriedades microestruturais desse material podem contribuir para a mitigação viável de impactos ambientais. Para isso, são avaliadas as características físico-químicas e mineralógicas das cinzas volantes e de fundo, comparando-as com as partículas de rocha maciça gnáissica. Essa avaliação tem como propósito fornecer materiais de construção sustentáveis para o desenvolvimento de serviços de infraestrutura.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

A pesquisa teve início com a seleção de jazidas para coleta de amostras dos materiais estudados. Em seguida, foram realizados ensaios para caracterização desses materiais e definidas as respectivas classificações mineralógicas, químicas e físicas de suas ocorrências.

As cinzas volantes (*Fly ash*) e de fundo (*Bottom ash*) foram obtidas no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado na cidade de Capivari de Baixo/SC. As características das distribuições granulométricas dos dois tipos de cinzas foram detalhadas na Figura 1.

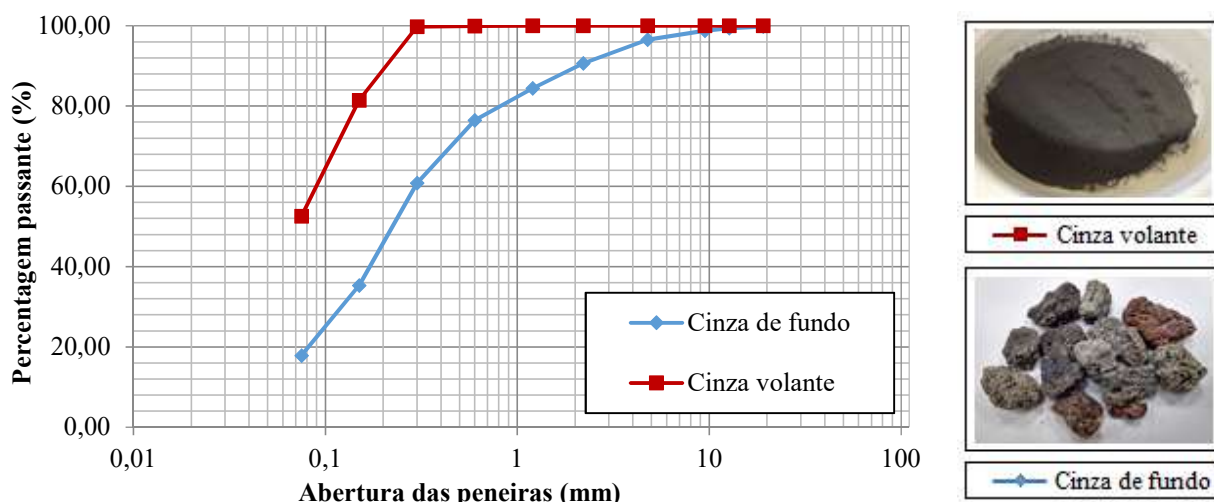
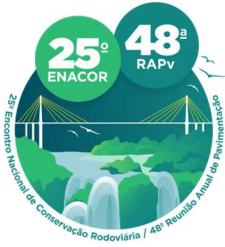


Figura 1. Distribuição granulométrica das cinzas volantes e de fundo (CLARA, 2020).

A curva granulométrica demonstra que as frações representativas das cinzas de fundo são as retidas entre as peneiras de abertura 0,60 mm até o material depositado no fundo. Já as frações mais representativas das cinzas volantes são retidas entre as peneiras de abertura 0,15 mm até o material depositado no fundo.

Os agregados pétreos de rocha gnáissica encontra-se dentro dos limites impostos pelas normativas: Desgaste por abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/1998 e DNER-ME 037/1997); Índice de forma (ABNT NBR 7809/2006); Resistência ao ataque químico (Durabilidade) (DNER-ME 089/1994 e DNER-ME 037/1997); Equivalência de areia (DNER-ME 54/1997); Teor de material pulverulento (DNER-ME 266/1997 e DNER-ME 37/1997) e Absorção, dessa maneira, é passíveis de utilização em mistura asfálticas, exceto o parâmetro de adesividade ao ligante betuminoso (DNER-ME 078/1994).

Em situações práticas de obras, está ocorrência deve ser corrigida com a inserção de aditivos melhoradores de adesividade na dosagem do ligante betuminoso ou pela substituição de adições granulares com natureza eletropositiva, que permitam a formação de um dipolo de atração química com a matriz eletronegativa dos materiais hidrocarbonetos.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



É relevante ressaltar que, neste estudo, não foram empregados aditivos ou melhoradores de adesividade na avaliação do mastique. De fato, essa abordagem foi intencionalmente adotada com o propósito de avaliar o impacto real da utilização das cinzas, visando obter uma análise mais precisa do efeito das cinzas, sem a interferência de outros componentes.

Métodos

Neste estudo, foram utilizados vários métodos de teste para caracterizar as propriedades físico-químicas e mineralógicas das cinzas volantes e de fundo. As normas da *American Standard for Testing Materials* (ASTM) foram utilizadas como referência para o desenvolvimento desses testes.

Caracterização de materiais

As morfologias dos fíleres foram analisadas utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo EVO MA10 da marca Zeiss, seguindo o procedimento descrito na norma ASTM E986-04/2017. Essa análise teve como objetivo avaliar a morfologia das cinzas volantes e de fundo, comparando-as com as partículas de rocha gnáissica, com foco em aspectos de micro e macrotextura. A durabilidade e sanidade das partículas foram avaliadas de acordo com a norma ASTM C88M-18 (2018). Esse método de teste estima a durabilidade do agregado quando submetido à ação das intempéries, pelo ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio.

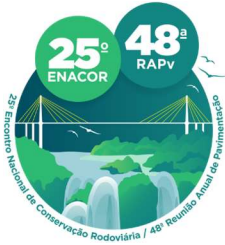
As análises texturais das amostras foram realizadas utilizando a técnica de adsorção de nitrogênio (N_2) com o auxílio de um equipamento da marca Quantachrome Instruments, modelo Quadrasorbevo. Essa técnica foi utilizada para determinar as propriedades físicas das partículas, incluindo a morfologia superficial, o volume poroso e o diâmetro. Essas informações são muito úteis para avaliar uma ancoragem adequada a uma matriz ligante betuminosa.

Para determinação das composições químicas dos elementos majoritários presentes nas amostras, foi realizado o teste de perda ao fogo (PF) de acordo com a norma ASTM D7348-07. Esse teste tem como objetivo eliminar os materiais orgânicos e a água de constituição presentes nas amostras. Após a realização do teste de PF, as amostras foram moídas e prensadas em forma de pastilhas para a análise química. Análise química foi realizada utilizando o equipamento de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (FRX), modelo EDX 7000 da marca Shimadzu.

As composições mineralógicas elementares e suas respectivas distribuições de fases foram determinadas utilizando um difratômetro Philips MP1880. O ângulo de varredura utilizado foi de 2θ , e o método Rietveld foi empregado para quantificação mineralógica de fases presentes. Os testes de Difração de Raios-X (DRX) seguiram as recomendações da norma ASTM C1721-15/2015. Essa técnica permite a análise da estrutura cristalina das amostras, identificando os minerais presentes e suas proporções relativas.

A dureza de um material está diretamente relacionada às forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, assim como a resistência mecânica. Nos sólidos moleculares, como os plásticos, as forças atuantes entre moléculas (forças de Van der Waals) são relativamente fracas, resultando em materiais com baixa dureza. Por outro lado, os sólidos metálicos e iônicos apresentam forças de ligação mais intensas, o que os torna mais duros. Já os materiais de ligação covalente são conhecidos por sua alta dureza (CLARA, 2020).

A dureza é a propriedade mecânica que permite avaliar a resistência de um material à deformação plástica. Segundo Callister (2002), os primeiros ensaios de dureza eram baseados em minerais naturais, nos quais era observada a capacidade de um material riscar outro mais macio. Com base nessa observação, foi desenvolvida a escala de Mohs, que é um sistema qualitativo e relativamente



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



arbitrário de indexação da dureza. Nessa escala, cada mineral é classificado em relação à sua capacidade de riscar outros minerais, estabelecendo uma ordem de dureza relativa.

Caracterização do mastique

O ponto de amolecimento anel e bola (ASTM D 36, 2020) é um ensaio que caracteriza a rigidez relativa dos betumes. O ensaio envolve a medição da temperatura na qual o ligante amolece quando aquecido e atinge uma condição específica de escoamento. Essa propriedade fornece uma indicação importante da rigidez do mastique, podendo verificar a alteração da rigidez quando formulado com diferentes fileres.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os parâmetros medidos das cinzas foram comparados aos de partículas maciças de rocha gnáissica. A realização desses testes determina o nível de compatibilidade que as partículas podem apresentar, avaliando se há ou não uma adesão eficiente, entre sistemas aglomerantes betuminosos granulares.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A partir da análise da Figura 2, é possível observar a morfologia dos fileres. As características morfológicas podem ser facilmente identificadas nas imagens. Na Figura 2a, fica evidente a presença de partículas com uma macrotextura esférica. Já na Figura 2b, é possível observar uma macrotextura irregular, mais próxima de subangular, e uma microtextura áspera. Essas características são perceptíveis tanto nas cinzas em geral, mas se destacam ainda mais nas cinzas de fundo. Além disso, nota-se a morfologia das partículas de rocha gnáissica na Figura 2c. Essas amostras apresentam uma macrotextura subangular e uma microtextura áspera em toda a sua extensão.

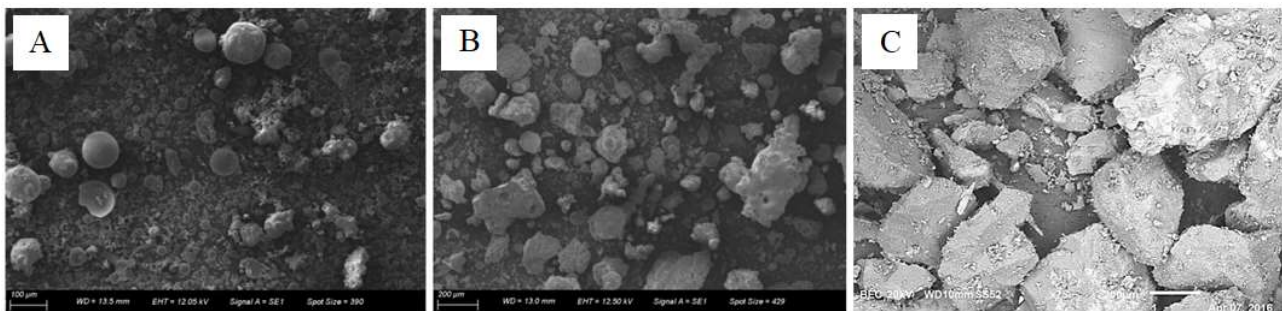
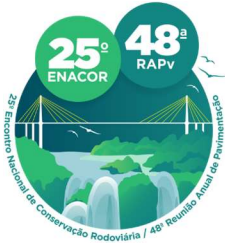


Figura 2. MEV (a) cinzas volantes, (b) cinzas de fundo e (c) partículas de rocha gnáissica ((a) e (b) AQUINO *et al.* (2017) e (c) SIROMA (2016)).

A alta incidência de inclusões gasosas é observada nas imagens das Figuras 3b e 3c, onde os argilominerais fundidos formaram estruturas vesiculares (esponjosas). Na Figura 3a, também são observadas partículas chamadas cenosferas, resultantes das condições de queima.

A estrutura vesicular indica o papel crítico da temperatura no desenvolvimento da morfologia das partículas em relação à zona de aquecimento dentro das caldeiras a vapor. As formações menos esponjosas se devem às temperaturas mais baixas no fundo, enquanto as formas esféricas indicam incidência de temperaturas mais altas na região superior do forno (WATT e THORNE, 1965).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Figura 3. (a) MEV partículas presentes nas cinzas volantes (b) e (c) estruturas vesiculares ((a) IZIDORO (2013) (b) e (c) CLARA (2020)).

Em relação às partículas gnáissicas, devido à sua origem metamórfica, muitos planos sinuosos são formados durante o processo de resfriamento da formação rochosa, produzindo estrutura maciça com microtextura rugosa sobre as faces. A macrotextura subangular predominante deve-se ao processo de britagem nas pedreiras, causando rupturas orientadas ao longo dos ângulos de clivagem (MUKHERJEE, 2015).

Durabilidade e sanidade das partículas

Durante este estudo, também foi observado outro aspecto relevante em relação às cinzas. Foi constatado que as partículas com tamanho superior a 0,075 mm são frágeis (Friáveis), o que significa que se desintegram facilmente, especialmente aquelas provenientes das cinzas de fundo.

Este cenário foi verificado após a avaliação da durabilidade dessas partículas pelo ataque do Sulfato de Sódio, no qual foi observada alta sensibilidade à fragmentação, mesmo sob pressão exercida entre os dedos, resultando na redução do tamanho original, posteriormente verificado por processo de peneiramento. Essas partículas apresentaram uma perda de massa em torno de 25 % a 30 %, em comparação com a faixa de 3 % a 5 % obtida a partir de partículas de rocha gnáissica trituradas.

O aumento da friabilidade provavelmente se deve ao fato de as estruturas vesiculares serem menos resistentes às forças químicas e físicas.

Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX)

Silica, Alumínio e Ferro são elementos predominantes que constituem a composição química tanto das cinzas de carvão quanto das partículas gnáissicas, representando juntos mais de 80 % de cada amostra caracterizada (Tabela 2). A composição elementar observada revela uma forte característica eletronegativa de ambos os materiais.

Tabela 2. Composição química majoritária dos fileres (CLARA, 2020).

Fileres (%Massa)	Componentes														
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	MnO	ZrO ₂	V ₂ O ₅	SrO	ZnO	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O
RG ¹	53,60	14,51	10,93	8,08	3,26	2,58	1,23	0,44	0,25	0,10	0,07	0,06	0,04	0,03	2,31
CV ²	60,26	7,21	19,87	2,87	-	4,60	1,60	0,81	0,04	0,10	0,09	0,03	0,07	0,08	0,67
CF ³	58,91	6,99	19,62	1,79	0,61	4,29	1,54	0,22	0,04	0,13	0,09	0,03	0,04	0,04	0,86

¹ RG: Rocha maciça gnáissica, perda ao fogo (%): 2,519;

³ CV: Cinza volante, perda ao fogo (%): 1,634; e,

⁴ CF: Cinza de fundo, perda ao fogo (%): 4,747.

Os valores percentuais obtidos para perda ao fogo foram 1,634 % (cinzas volantes), 4,747 % (cinzas de fundo) e 2,519 % (partículas gnáissicas). Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados com a mesma cinza de carvão de Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (Oliveira *et al.*, 2012) e com



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



partículas de carga gnáissica (Gonçalves, 2000), ambas classificadas como não perigosas Tipo II, conforme as normas ambientais brasileiras (ABNT NBR 10004, 2004).

Além dos elementos indicados na Tabela 2, foram detectados os elementos Rb_2O , Y_2O_3 e PbO nas cinzas volantes e cinzas de fundo, porém em quantidades inferiores a 0,03%.

Cabe ressaltar que Carnin *et al.*, (2005) realizou testes de lixiviação em formulações de misturas asfálticas com reaproveitamento de areias de fundição contendo composições químicas e mineralógicas semelhantes em relação às cinzas de carvão e cargas gnáissicas desta pesquisa. Como resultado, verificou-se que o revestimento gerado pelo ligante betuminoso, encapsula as partículas do agregado, não permitindo que sejam carreadas pela água ou outros fluidos, evitando assim a infiltração pelas estruturas do solo e o contato direto com as águas subterrâneas.

Analogamente, o uso dos mesmos aglutinantes infere que cinzas de carvão e partículas gnáissicas também se tornariam encapsuladas e impermeáveis à lixiviação de elementos dentro das cargas.

Difratometria de raios-X (DRX)

Os difratogramas ilustrados na Figura 4 demonstram a mineralogia das cinzas volantes e de fundo, bem como para as partículas de rocha maciça gnáissica. Os componentes cristalizados de ambas as cinzas são equivalentes, sendo formados essencialmente por Mulita, Quartzo e possivelmente com uma pequena presença de Hematita. Já nas partículas de rocha maciça gnáissica, as principais formas cristalinas observadas são Anortita, Biotita, Albita e Quartzo.

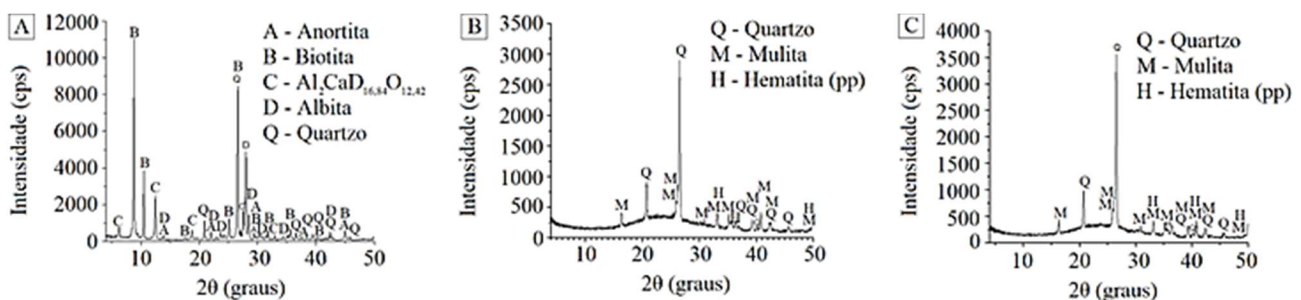
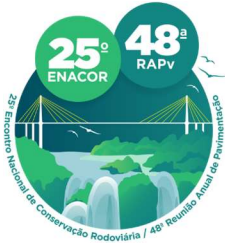


Figura 4. Análise mineralógica DRX (A) partículas de rocha maciça gnáissica, (B) cinza volante e (C) cinza de fundo (CLARA, 2020).

A presença de mulita nas composições das cinzas volantes e de fundo provavelmente resulta de reações térmicas que ocorrem dentro das caldeiras a vapor durante o processo de combustão. Por outro lado, o quartzo é uma característica inerente à formação geológica do carvão e não sofre fusão durante o processo de queima na usina termelétrica.

A presença de hematita e a magnetita ocorre em pequenas porcentagens devido à oxidação do sulfeto de ferro, o qual é normalmente encontrada em amostras queimadas (RHODE *et al.*, 2006). No caso das partículas gnáissicas, a maior concentração de Biotita é resultado da presença significativa de silicatos, como Quartzo e Mica, particularmente do subgrupo ferro-magnesiano, contendo também Feldspato Potássico (Albita – Na; Anortita – Ca; $Al_2CaD_{16,84}O_{12,42}$) (MUKHERJEE, 2015).

Com base nas características mineralógicas observadas, todos os materiais analisados são considerados félsicos, ou seja, com alta acidez, devido à expressiva concentração de silicatos. Os resultados obtidos por difratometria de raios-X (DRX) também são consistentes com as análises de fluorescência de raios-X (FRX) realizadas. Além disso, os silicatos presentes nas cinzas volantes e de fundo são semelhantes à composição mineral de agregados naturais utilizados na construção de pavimentos, como o gnaisse (FORTEZA *et al.*, 2004; XIE *et al.*, 2017).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Em geral, as cinzas de carvão são compostas por minerais de silicato de alumínio, sendo constituídas principalmente por fases amorfas e cristalinas (conforme apresentado na Tabela 1). A fase amorfa é formada por pequenas partículas em pó com propriedades pozolânicas, contendo características vítreas e esféricas. Por outro lado, a fase cristalina é composta por minerais geológicos (QUEROL *et al.*, 2002).

Tabela 1. Composição mineralógica das cinzas volantes e de fundo (AQUINO *et al.* 2017).

Fase	Mineral	Cinza volante % Massa	Cinza de fundo % Massa
Amorfa	-	74	75
Cristalina	Quartzo	9	12
	Hematita	1	-
	Magnetita	-	2
	Mulita	16	11

Os resultados apresentados na Tabela 1 indicam que a fase amorfa representa mais de 70 % das composições de cinzas volantes e de fundo. A presença predominante da fração amorfa sugere um comportamento pozolânico, no entanto, a alta eletronegatividade não resulta em uma afinidade efetiva com materiais que possuam as mesmas características químicas, como os ligantes betuminosos comumente utilizados.

Análise textural

Os resultados apresentados na Tabela 3 indicam que, apesar de ambas as cinzas de carvão terem estrutura vesicular com diâmetros porosos médios semelhantes, as amostras de cinzas de fundo têm maior concentração de volume poroso do que as cinzas volantes, devido principalmente a uma área específica menor e à influência de temperaturas reduzidas nas áreas mais baixas das caldeiras a vapor.

Tabela 3. Composição química majoritária dos fileres (CLARA, 2020).

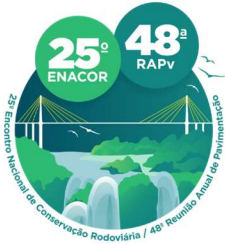
Amostra	Área Superficial (m ² /g)	Volume de poros (cm ³ /g)	Diâmetro médio de poros (Å)
Cinzas de fundo	1,454	0,013950	88,44
Cinzas volantes	6,311	0,003170	87,24
Rocha gnáissica	3,052	0,012850	168,4

Segundo Ward (1984), os dois métodos mais comuns para queimar carvão combustível para produção de eletricidade são a injeção de carvão pulverizado e a combustão de carvão sólido em leito sobre esteira.

No método de injeção de carvão pulverizado, carvão pulverizado e ar são injetados em um forno por meio de queimadores especializados. O carvão precisa estar em uma granulometria em que 70-80 % das partículas passem por uma peneira 200 (diâmetro < 75 µm). Com este tamanho, as partículas apresentam uma grande superfície específica, permitindo uma combustão rápida. As usinas de Candiota, Charqueadas e Jorge Lacerda utilizam esse método (BROWN, 2011).

As partículas gnáissicas apresentam uma concentração de volume poroso semelhante às cinzas de fundo, porém possuem quase o dobro do diâmetro poroso médio e da área específica. Esses aspectos são atribuídos a um severo gradiente térmico enfrentado durante o processo geológico de resfriamento ambiental durante a formação de rochas metamórficas (Mukherjee, 2015) e às obras de britagem, que produzem partículas menores do que aquelas precipitadas no interior das caldeiras a vapor.

As características porosas de todas as partículas ajudam a proporcionar uma boa ancoragem física superficial aos ligantes betuminosos.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Dureza

A determinação da dureza dos fileres foi realizada por meio de uma estimativa teórica, utilizando uma média aritmética ponderada (Equação 1) com base nas durezas dos componentes indicados na literatura. Esse método de determinação foi adotado devido à grande dificuldade de obter a dureza dos fileres por meio dos métodos convencionais, devido à fragilidade dos grãos, como mencionado anteriormente.

$$xp = \frac{n_1.p_1 + n_2.p_2 + \dots + n_n.p_n}{n_1 + n_2 + \dots + n_n} \quad (1)$$

Onde, xp é a média aritmética ponderada; n_1 é a dureza do componente químico; e p_1 é a porcentagem da composição química.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos através da estimativa.

Tabela 4. Estimativa da dureza dos fileres (CLARA, 2020).

Amostra	Dureza estimada
Cinzas de fundo	7,13
Cinzas volantes	7,17
Rocha maciça gnáissica	6,08

Analisando as durezas estimadas, podemos observar que o valor estimado para as partículas de rocha maciça gnáissicas, quando comparado com as durezas das cinzas, apresenta uma pequena variabilidade nos resultados. A maior dureza é encontrada para a cinza volante, o que pode ser justificado pelo fato de sua composição predominante ser Al_2O_3 e SiO_2 , cujas durezas são de aproximadamente 9 e 7 Mohs, respectivamente. Essa dureza é diretamente dependente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas.

Ponto de amolecimento anel e bola

Os ensaios de ponto de amolecimento anel e bola foram realizados utilizando mastiques formulados com os fileres estudados neste trabalho (Figura 5). Em ambos os ensaios, foi considerado um teor de 6,0 % em peso do ligante betuminoso CAP 30/45 (0,1 mm) passante na malha de abertura 0,075 mm, utilizando quantidades equivalentes às presentes na curva granulométrica utilizada por Clara (2020). Cabe ressaltar a importância da realização deste ensaio, pois está relacionado à possibilidade de um comportamento pozolânico das cinzas, o qual foi evidenciado nos ensaios de DRX e FRX devido à presença predominante da fase amorfa e à presença do componente químico CaO.

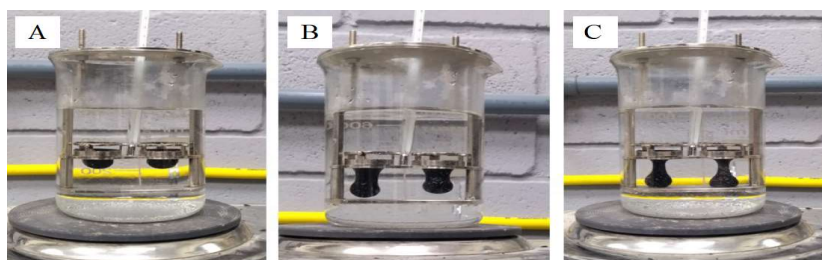
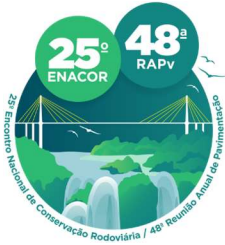


Figura 5. Execução do ensaio de ponto de amolecimento Anel e Bola (CLARA, 2020).

Tabela 5. Ponto de amolecimento, ensaio realizado mesmo dia de moldagem do mástico (CLARA, 2020).

Amostra	CAP 30/45 Sem adição de filer	CAP 30/45 + Cinza de fundo	CAP 30/45 + Cinza volante	CAP 30/45 + Rocha gnáissica
Resultados (°C)	53,5 (Replan 2018)	53,5	54,0	53,5



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 6. Ponto de amolecimento, ensaio realizado 6 dias após moldagem do mástico (CLARA, 2020).

Amostra	CAP 30/45 Sem adição de filer	CAP 30/45 + Cinza de fundo	CAP 30/45 + Cinza volante	CAP 30/45 + Rocha gnáissica
Resultados (°C)	53,5 (Replan 2018)	54,0	54,0	53,5

Ao analisar os resultados obtidos, verifica-se uma forte similaridade entre os valores apresentados pelos mastiques e a amostra de ligante betuminoso em sua forma pura, independentemente das condições de teste executadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As propriedades físico-químicas e mineralógicas das cinzas de carvão foram analisadas em comparação com partículas de rocha maciça gnáissica, com o objetivo de realizar uma análise no contexto de sua utilização como materiais de enchimento para misturas asfálticas usadas em projetos de infraestrutura. As seguintes conclusões podem ser extraídas da campanha experimental:

As características físicas avaliadas por meio das imagens geradas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permitem observar que as partículas gnáissicas britadas possuem uma textura superficial rugosa e macrotextura subangular de forma regular. Por outro lado, as cinzas volantes apresentaram uma variabilidade em suas composições, com a presença parcial de superfícies lisas, elementos cenosféricos e macrotextura arredondada, prejudicando a formação de ângulos de atrito favoráveis ao embricamento global das partículas. As cinzas de fundo apresentaram uma morfologia irregular a subangular, que, em conjunto com uma microtextura rugosa semelhante às partículas gnáissicas, permitem resistir de forma mais efetiva aos esforços de cisalhamento causados pelas cargas aplicadas, ainda que a dureza estimada de ambas as ocorrências tenha sido equivalente.

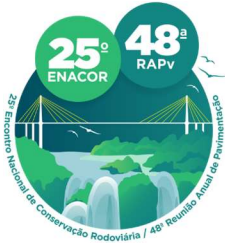
No ensaio de durabilidade e sanidade das partículas, foi constatado que as partículas com tamanho superior a 0,075 mm possuem alta sensibilidade à fragmentação, o que significa que se desintegram facilmente. A friabilidade provavelmente se deve ao fato de as estruturas vesiculares serem menos resistentes às forças químicas e físicas. Por esse motivo, Clara (2020) adotou um teor de material de enchimento (filer) de 6,0 % passante na malha de abertura 0,075 mm, nas curvas granulométricas das misturas asfálticas.

Ao avaliar os elementos majoritários das composições químicas das cinzas e das partículas gnáissicas por meio do Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (FRX), constata-se que esses materiais são considerados não perigosos e estão em conformidade com as normas ambientais brasileiras. Essa conclusão também foi observada em outras referências, como Oliveira *et al.*, (2012) e Carnin *et al.*, (2005). Evidencia-se que mais de 80 % da composição mineral é composta por SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, o que implica em uma forte característica eletronegativa.

A avaliação das propriedades mineralógicas por meio de testes de Difração de raios-X (DRX) revelou que as cinzas volantes e de fundo são predominantemente amorfas, e a fase cristalina típica é formada por SiO₂ nas formas minerais de Quartzo, Mulita, Hematita e Magnetita, sendo o constituinte primário das cinzas de carvão.

A influência característica dos elementos eletronegativos faz com que tanto os fileres gnáissicos quanto os de carvão não sejam receptivos à formação de atrações dipolares com os ligantes betuminosos. Isso, aliado ao comportamento inerte das cinzas devido à fase amorfa predominante, resulta em má ligação química e no fenômeno de *stripping*. No entanto, esses problemas podem ser facilmente corrigidos no projeto de misturas com o uso de aditivos químicos eletropositivos adequados, como derivados de CaO na formulação, como calcário ou cal hidratada.

Com base nos resultados da avaliação do ponto de amolecimento anel e bola, fica evidente o caráter amorfo das cinzas e partículas gnáissicas, o que corrobora as análises de caracterização apresentadas



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



anteriormente. Isso faz com que esses materiais não exerçam influência significativa na rigidez do ligante betuminoso, sendo considerados fileres inertes na composição da mistura asfáltica, ou seja, sem característica pozolânica.

É importante ressaltar que os efeitos das partículas das cinzas aplicadas na mistura asfáltica dependem de vários fatores, como o tamanho, distribuição das partículas e quantidade utilizada. A utilização inadequada pode resultar em uma redução da densidade da mistura asfáltica, o que conseqüentemente leva à redução da capacidade de carga e à propensão a deformações, o que pode afetar a durabilidade do pavimento. Além disso, dificulta a formação de uma ligação adequada entre o ligante betuminoso e os agregados, o que pode levar a problemas de desprendimento e redução da resistência ao cisalhamento. Ainda, o uso excessivo aliado à substituição da fração inadequada, pode criar pontos de concentração de tensão, tornando a mistura mais suscetível a rachaduras por fadiga.

A utilização dos resíduos gerados por usina termelétrica em misturas asfálticas é tecnicamente viável. A viabilidade não se baseia apenas nas propriedades apresentadas pelos resíduos, mas também considera aspectos econômicos, ambientais e sociais. A utilização desses resíduos representa uma contribuição direta e segura para a preservação do meio ambiente, uma vez que ajuda a mitigar o impacto decorrente das atividades das usinas termelétricas. Além disso, fornece materiais de construção sustentáveis para o desenvolvimento serviços de infraestrutura.

Abre-se inclusive a possibilidade de um mercado para a utilização em larga escala das cinzas de fundo (*Bottom Ash*), que atualmente não têm uma destinação específica nos serviços de beneficiamento de insumos, notadamente na região sul do Estado de Santa Catarina. Aonde a mesma pode se beneficiar mais diretamente pela proximidade com a fonte produtora destes insumos, compreendendo acesso fácil e com menores distâncias de transporte.

Outrossim, cabe destacar que, são necessários cuidados quanto à formulação das misturas asfálticas que devem ser tomados em cada caso, analisando minuciosamente a distribuição granulométrica, a morfologia das partículas e, sobretudo, utilizando um percentual moderado do material na composição granulométrica. Do contrário, os riscos assumidos de insucesso são muito grandes devido às características morfológicas de suas ocorrências.

Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades microestruturais dos resíduos gerados por uma usina termelétrica, visando contribuir para a mitigação viável de impactos ambientais. Não foram feitas avaliações mecânicas de misturas asfálticas produzidas com o emprego dos resíduos neste estudo. Diante disso, recomenda-se, para futuros trabalhos, o desenvolvimento de estudos voltados à avaliação mecânica, a fim de contribuir e ampliar as discussões científicas.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária (FAPEU) pela concessão da bolsa de estudos à Estéfani Clara, bem como, à equipe do CTCL (Centro Tecnológico do Carvão Limpo), da SATC pela receptividade e pela parceria técnica realizada, o que possibilitou a execução dos estudos físico químicos deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aquino, T. F.; Estevam S. T.; Corrêa G. R.; Marques C. R. M.; Melo A. R.; Marcelo R. R.; Pires M.; Hammerschmitt M.; Riella H. G. Síntese de zeólitas do tipo X a partir de cinzas volantes e de fundo de carvão mineral. V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. 2017.

Babashamsi, P. Md Yusoff, N.I. Ceylan, H. Md Nor, N.G. Salarzadeh Jenatabadi, H. *Sustainable development factors in pavement life-cycle: highway/airport review, Sustainability*. 2016.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



BP. Statistical Review of World Energy 2022. 71th edition. 2022.

Brown, M. T. Caracterização petrológica e Química dos carvões utilizados em usinas termelétricas brasileiras e as cinzas geradas no processo de combustão. Dissertação, UFRGS, Porto Alegre, 101p. 2011.

Carnin, R. L. P. Matosso Filho, N. P. Momm, L. Reaproveitamento do Resíduo Areia Verde de Fundação em Misturas Asfálticas. 12º Congresso de Fundação. 316-325. São Paulo, Brasil. 2005.

Callister JR, W. D. *Materials Science and Engineering: na introduction*. New York: Jhon Wiley and Sons, 2002.

Clara, E. Avaliação de misturas asfálticas densas com a incorporação de cinza de carvão mineral. Dissertação de Mestrado. Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina. 2020.

Forteza, R. Far, M. Seguí, C. Cerdá, V. *Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerators for its use in road base*. *Journal of Waste Management*. 24 (9), 899-909. 2004.

Gonçalves, J. P. Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 120 p. Porto Alegre, Brazil. 2000.

Izidoro, J. C. Síntese e caracterização de Zeólita pura obtida a partir de cinzas volantes de carvão. Tese. IPEN, São Paulo, 148p. 2013.

Mohammed, M.S. Elkady, H. Abdel- Gawwad, H.A. *Utilization of construction and demolition waste and synthetic aggregates*. *J. Build. Eng.* 43 - 103207. 2021.

Mukherjee, S. *Atlas of Structural Geology*. Ed. Elsevier Ltd. 200 p. 201. 2015.

Nodehi, M. Mohamad Taghvae, V. *Sustainable concrete for circular economy: a review on use of waste glass*. *Glas. Struct. Eng.* 2021.

Oliveira, M. L. S. Ward, C. R. French, D. Hower, J. C. Querol, X. Silva, L. F. O. *Mineralogy and leaching characteristics of beneficiated coal products from Santa Catarina - Brazil*. *International Journal of Coal Geology*, 94 (1), 314-325. 2012.

Peron, D. Souza, M. O. Souza, G. Feris, L. A. Marcilio, N. R. Síntese de zeólita do tipo ZSM-5 a partir de cinzas volantes de carvão mineral de candiota-RS. V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. Criciúma-SC. Brasil. 2017.

Querol, X. Moreno, N. Umanã, J. C. Alastuey, A. Hernández, E. López-Soler, A. Plana F. *Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview*. *International Journal of Coal Geology*. 50 (1-4), 413-423. 2002.

Rhode, E. G. M. Quantificação das cinzas de carvão fóssil produzidas no Brasil. Boletim técnico 36. Porto Alegre: CIENTEC. 2016.

Rhode, G. M.; Zwonok, O.; Chies, F.; Silva, Cinzas de carvão fóssil no Brasil – Aspectos técnicos e ambientais. vol.1 Porto Alegre: CIENTEC. 2006.

Selvam, M. Debbarma, S. Singh, S. Shi, X. *Utilization of alternative aggregates for roller compacted concrete pavements – A state-of-the-art review*. *Construction and Building Materials* 317 -125838. 2022.

Siroma, R. S. Estudo comparativo e aplicado sobre a influência da utilização da areia descartada de fundição (ADF) na formulação e no desempenho mecânico de misturas de concreto asfáltico. 2016. 135 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville/SC, 2016.

Ward, C. R. *Coal Geology and coal technology*, Blackwell Scientific Publications, Inc., Palo Alto, CA. 1984.

Watt, J. D.; Thorne, D. J. *The composition and pozzolanic properties of pulverized fuel ashes. Part 1: Composition of fly ashes from some British power stations and properties of their component particles*, *Journal of Applied Chemistry*. London, UK. 1965.

Xie, R. Xu, Y. Huang, M. Zhu, H. Chu, F. *Assessment of municipal solid waste incineration bottom ash as a potential road material*. *RMPD*. 18 (4). 2017.

Zhao, W. Yang, Q. *Life cycle assessment and multi-index performance evaluation of semi-flexible pavement after composite modification by using fly ash, rubber particles, warm mixing asphalt and recycled asphalt pavement*. *Construction and Building Materials*. 364- 129945. 2023.