



## **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICAS DAS CINZAS DE TERMELÉTRICA APLICADAS EM MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS**

*Estéfani Clara<sup>1</sup>; Breno Salgado Barra<sup>2</sup>; Leto Momm<sup>3</sup>; Alexandre Mikowski<sup>4</sup> e Adriana Goulart dos Santos<sup>5</sup>*

*1,2,3,4 Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM), Joinville/SC/Brasil, e-mail: estefani.clara@hotmail.com/ breno.barra@ufsc.br/ leto.momm@gmail.com/ alexandre.mikowski@ufsc.br.*

*5 Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville/SC/Brasil. e-mail: adriana.santos@udesc.br.*

### **RESUMO**

O principal objetivo deste artigo é avaliar o efeito da incorporação de cinzas oriundas da queima do carvão mineral nas propriedades físico-químicas e mecânicas das misturas asfálticas densas. Para tanto, foram analisadas as matrizes denominadas Fly Ash (cinza volante), Bottom Ash (cinza pesada) e uma composição com 50% de ambas as ocorrências, as quais foram comparadas com frações convencionais de granulares gnáissicos britados, todos utilizados como material de enchimento (fíler) a 6,0% passante na malha de abertura 0,075mm, nas curvas granulométricas das misturas asfálticas, o ligante utilizado é o ligante betuminoso de penetração 30/45 (0,1mm). Os fíleres foram submetidos à análise química, mineralógica, física e morfológica. As misturas asfálticas formuladas foram submetidas à avaliações baseadas na metodologia francesa de formulação, compreendendo os aspectos de habilidade de compactação com a prensa de compactação giratória (PCG), ensaio de Duriez a 18°C e deformação permanente. Diante dos resultados obtidos e das análises efetuadas, é possível concluir que as matrizes estudadas são viáveis tecnicamente para utilização em misturas asfálticas, abrindo-se inclusive a possibilidade de um mercado para a utilização em larga escala da Bottom Ash, atualmente sem destinação alguma aos serviços de beneficiamento de insumos, notadamente na região sul do Estado de Santa Catarina.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cinzas de carvão mineral; Misturas asfálticas densas; Metodologia francesa de formulação.

### **ABSTRACT**

*The main objective of this article is to evaluate the effect of the incorporation of ash from the burning of coal on the physical-chemical and mechanical properties of dense asphalt mixtures. For this purpose, the matrices denominated Fly Ash (fly ash), Bottom Ash (heavy ash) and a composition with 50% of both occurrences were analyzed, which were compared with conventional fractions of crushed gneiss granules, all used as filling material (filler) 6.0% through the 0.075mm aperture mesh, in the granulometric curves of asphalt mixtures, the binder used is the 30/45 bituminous penetration binder (0.1mm). The fillers were submitted to chemical, mineralogical, physical and morphological analysis. The formulated asphalt mixtures were subjected to evaluations based on the French formulation methodology, comprising aspects of compaction ability with the giratory shear compacting press (PCG), Duriez test at 18°C and permanent deformation. In view of the results obtained and the analyzes carried out, it is possible to conclude that the matrices studied are technically feasible for use in asphalt mixtures, even opening up the possibility of a market for the large-scale use of Bottom Ash, currently without any destination for services processing, notably in the southern region of the State of Santa Catarina.*

**KEYWORDS:** Mineral coal ash; Dense asphalt mixtures; French formulation methodology.



## **1. INTRODUÇÃO**

O carvão mineral é o mais abundante dos combustíveis fósseis, com reservas ultrapassando a ordem de 1 trilhão de toneladas, o suficiente para atender à demanda atual por mais de cento e trinta anos de acordo com BP Statistical Review of World Energy (2019). 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, por muitas décadas, uma das principais fontes de geração de energia elétrica no Brasil (ANEEL, 2005).

Além dos aspectos técnicos e funcionais, hoje a sociedade exige não só um bom desempenho dos materiais ou da construção, mas também das interações com o meio ambiente, em busca daqueles cuja obtenção ou realizações se materializam com menor impacto ecológico e menor ônus energético (ISAIA apud POZZOBON, 1999).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica da substituição parcial dos granulares gnáissicos britados pelas cinzas oriundas da queima do carvão mineral para a geração de energia, visando a redução dos problemas ambientais causados pelas mesmas e contribuindo na discussão sobre o assunto, visando um melhor emprego das cinzas supracitadas essa pesquisa destaca a cinza leve (Fly Ash), já bastante explorada pela indústria cimenteira, e a cinza pesada (Bottom Ash), que não possui atualmente aplicações ou mercados conhecidos para utilização em larga escala.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Os métodos de formulação das misturas asfálticas têm evoluído nessas últimas décadas, visando corresponder o constante crescimento do tráfego. Esse cenário resultou na necessidade cada vez maior da obtenção de misturas asfálticas mais complexas, que além de resistir aos carregamentos e aos números de solicitações cada vez maiores durante todo o período previsto de serviço, deve fornecer para seus usuários conforto, segurança e economia (MANUEL LPC, 2007).

Para uma previsão mais precisa do comportamento de misturas asfálticas em campo, é imprescindível que os ensaios laboratoriais sejam capazes de simular, com a maior fidelidade possível, os esforços de solicitações e os fenômenos observados nas estruturas rodoviárias em campo (BARRA, 2009).

A qualidade e a pertinência dos métodos de formulação das misturas asfálticas condicionam, em grande parte, a segurança no uso das infraestruturas, a durabilidade e os custos conservação. São ainda, ferramentas preciosas para a inovação no fornecimento de diretrizes à elaboração e ao melhoramento de materiais experimentais e de meios de avaliação de seus desempenhos. A elaboração de um método de avaliação resulta de um processo longo e complexo, necessitando de uma numerosa quantidade de comparações entre os resultados de campo e laboratório durante a vida útil do material e que esteja amplamente de acordo com o contexto dos métodos de dimensionamento dos pavimentos, bem como de classificação e normalização dos materiais (MANUEL LPC, 2007).

O manual do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, estabelece uma sequência de ensaios para a metodologia Francesa de formulação de misturas asfálticas, divididos em 5 níveis de formulação que, por sua vez, são subdivididos em empíricos (em que não existe uma modelação matemática, sendo compreendido pelos níveis 0, 1 e 2) e fundamentais (compreendido pelos níveis 3 e 4), conforme demonstrado na Figura 1.

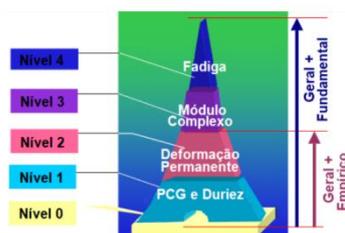


Figura 1 - Níveis de ensaios para a formulação de misturas asfálticas.

Fonte: Manuel LPC (2007).

### 3. METODOLOGIA

Este trabalho encontra-se limitado ao nível empírico da metodologia Francesa para formulações de misturas asfálticas. O desenvolvimento desta pesquisa iniciou-se com a seleção das jazidas para a coleta das amostras dos materiais de estudo e na sequência foram executados os ensaios de caracterização desses materiais e definidas as respectivas classificações geológicas, mineralógicas, químicas e físicas das suas ocorrências.

#### 3.1. Caracterização dos agregados pétreos

A campanha experimental desta pesquisa se iniciou no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Campus de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os agregados pétreos utilizado são oriundo



de britagem de maciço rochoso gnáissico e foram fornecidos pela empresa Rudnick Minérios S.A., localizada no distrito de Pirabeirada, na cidade de Joinville/SC. O ligante betuminoso de penetração 30/45 (0,1mm) é oriundo da distribuidora CBB Asfaltos, localizada na região metropolitana de Curitiba/PR.

Os ensaios de 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 (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, se demonstraram dentro dos limites impostos pelas normativas apresentadas e, dessa maneira, são passíveis de utilização em mistura asfálticas. Já o ensaio de Adesividade ao ligante betuminoso (DNER-ME 078/1994) não demonstrou um parâmetro de adesividade adequado, que em situações práticas de obras, o mesmo deve ser corrigido com a inserção de aditivos melhoradores de adesividade 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. Importante destacar que nesta pesquisa não foram utilizados aditivos melhoradores de adesividade, com o intuito de preservar as características originais dos insumos, para que não tivessem qualquer influência nos resultados da campanha experimental e, portanto, permitindo a verificação do real efeito da utilização das cinzas oriundas da queima do carvão mineral nas misturas asfálticas.

### **3.2. Caracterização das cinzas**

As propriedades físico-químicas das cinzas oriundas da combustão do carvão mineral em usinas termelétricas são influenciadas por diversos fatores, tais como a composição do carvão; grau de beneficiamento e moagem do carvão; tipo, projeto e operação da caldeira; sistema de extração e manuseio das cinzas. Devido a estes fatores, as cinzas apresentarão variação na sua composição e propriedades físico-químicas, não só de usina para usina, mas de caldeira para caldeira na mesma usina e até numa mesma caldeira em tempos diferentes. (GOETHE, 1990 *apud* CAMARA, 2011).

Ao iniciar as caracterizações foi necessário o reconhecimento das frações granulométricas representativas das cinzas para que assim resulta-se em uma reutilização mais eficiente desse resíduo sólido. Em análise a morfologia dos grãos, pode-se observar um

aspecto esponjoso ou estrutura vesicular, isto ocorre devido os argilominerais fundidos gerarem partículas vítreas, ricas em inclusões gasosas que além de gerar um aspecto esponjoso causam fragilidade aos grãos de dimensões maiores, em frações situadas entre as peneiras de abertura 0,60 mm a 0,15 mm. Em análise as frações mais representativas para ambas as cinzas e em consonância ao percentual máximo para a substituição dos finos para que não ocorra risco de perda de resistência, convencionou a limitação da utilização das frações de cinzas em 6,0% em substituição as frações de fundo ( $<0,075\text{mm}$ ), observadas a percentagem desta fração é de 17,8% para as cinzas *Bottom Ash* e 52,6% para as cinzas *Fly Ash*, conforme Figura 2.

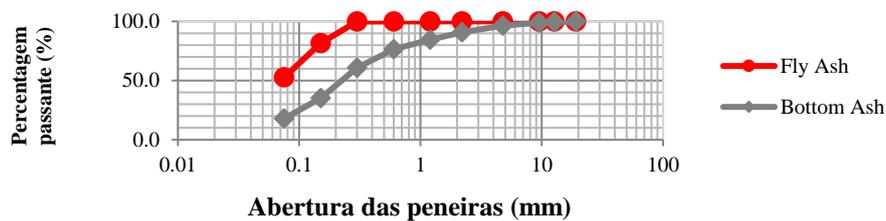


Figura 2 - Distribuição granulométrica das cinzas.

Fonte: Clara (2020).

A análise morfológica dos fíleres em estudo como Pó de brita, cinzas *Bottom ash* e *Fly ash*, foram realizadas a partir da análise das imagens produzidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) conforme demonstrada na Figura 3.

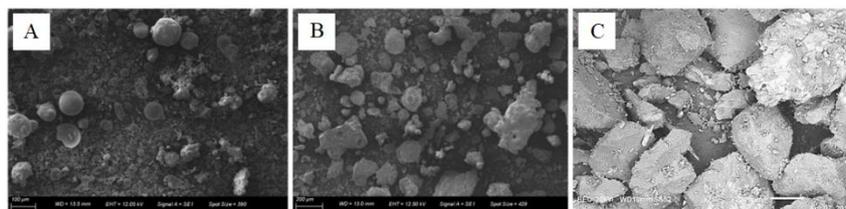


Figura 3 - Microscopia eletrônica de varredura (A) *Fly Ash*, (B) *Bottom Ash*, (C) Agregado granítico.

Fonte: A-B: Aquino *et al.* (2017). C: Siroma (2018).

Nessa análise é possível observar que as cinzas de carvão possuem formas esféricas de diferentes diâmetros e partículas irregulares de tamanhos variados. Isso é possível devido aos diferentes estados físicos da sílica presente em amostras de cinzas de carvão são responsáveis pela forma das partículas de tamanhos irregulares. A morfologia do pó de pedra se demonstra com formato predominante subangular e a textura se mostra bem rugosa. Essas características tendem a favorecer o intertravamento granular, resultando em misturas asfálticas mais estáveis.

Para análise das características físico-químicas dos fíleres utilizados na presente pesquisa foi realizada uma parceria técnica entre o Centro Tecnológico da SATC (CT-SATC), pertencente à Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC), e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), tendo como base, estudos já desenvolvidos pela SATC em relação às aplicações das cinzas.

Os resultados das análises mineralógicas encontra-se demonstrados nas Figuras 4 e 5, observa-se a presença de anortita, biotita, albita e quartzo, no fíler Pó de pedra.

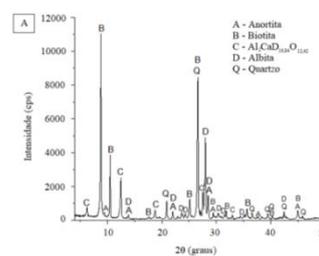


Figura 4 - Análise mineralógica DRX (A) Pó de pedra

Fonte: Clara (2020).

Em ambos os fíleres Fly ash e Bottom ash (Figura 4) se observa a presença de duas fases típicas presentes em diversas cinzas provenientes da queima de carvão mineral, quartzo e mulita. De acordo com Rohde *et al.* (2006), a mulita presente nas cinzas é resultante das reações que ocorrem durante a combustão do carvão. O quartzo, por sua vez, está presente no carvão precursor e não funde nas condições de queima nas usinas termelétricas. A presença de hematita e magnetita nas cinzas é decorrente da oxidação de sulfetos de ferro na forma de pirita, normalmente presente no marcassita e pirrotita presentes no carvão queimado.

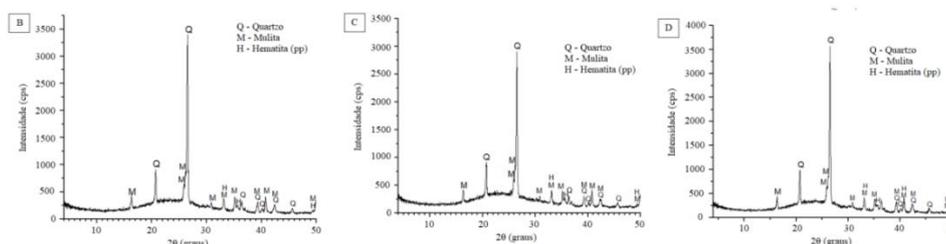


Figura 5 - Análise mineralógica DRX (B) 50% Fly e Bottom, (C) Fly ash e (D) Bottom ash.

Fonte: Clara (2020).



A composição química referente aos elementos majoritários presentes nas amostras foram realizadas por Espectrometria de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (FRX), seguindo a norma ASTM D7348-07. A Tabela 1 apresenta as composições químicas das cinzas e do pó de pedra.

Tabela 1 - Composição química majoritária dos fileres.

Fíleres (%Massa)	Componentes														
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO	ZrO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrO	ZnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
Conv. <sup>1</sup>	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
Fly+Bot. <sup>2</sup>	58,48	7,38	20,13	2,59	0,62	4,24	1,48	0,78	0,03	0,11	0,10	0,03	0,06	0,05	0,64
Fly <sup>3</sup>	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
Bottom <sup>4</sup>	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

<sup>1</sup>Convencional: Pó de Pedra (Perda ao fogo (%): 2,519)

<sup>2</sup>Fly+Bot.: 50% Fly Ash e 50% Bottom Ash (Perda ao fogo (%): 3,213)

<sup>3</sup>Fly: 100% Fly ash (Perda ao fogo (%): 1,634)

<sup>4</sup>Bottom: 100% Bottom Ash (Perda ao fogo (%): 4,747)

Fonte: Clara (2020).

Analisando os resultados obtidos observa-se a presença de alguns elementos em abundancia que são denominados de Sílica (SiO<sub>2</sub>), Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Óxido de Ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Óxido de Cálcio (CaO), ainda observa-se também a presença de elementos que conferem o potencial tóxico da cinza sendo eles, Ácido sulfúrico (Trióxido de enxofre), Zinco, Cromo entre outros.

Além dos elementos indicados na Tabela 1, foram detectados os elementos Rb<sub>2</sub>O, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e PbO nos fileres Fly Ash, Bottom ash e 50% Fly ash + 50% Bottom ash, com quantidades inferiores a 0,03%.

As análises texturais das amostras foram também realizadas no CT-SATC, no Laboratório de Captura de CO<sub>2</sub>. Foi utilizada a técnica de adsorção de nitrogênio (N<sub>2</sub>). As técnicas de adsorção de gases utilizadas para determinação dessas estruturas consistem na determinação da quantidade de adsorbato, necessária para formar uma camada monomolecular (monocamada) sobre a superfície a ser medida. Os resultados obtidos na Tabela 2, demonstram que o pó de pedra apresenta um maior diâmetro de poros e maior volume de poros.

Tabela 2 - Composição química majoritária dos fileres.

Amostra	Bottom ash	Fly ash	50% Bottom + 50% Fly	Pó de pedra
Área Superficial (m <sup>2</sup> /g)	1,454	6,311	3,933	3,052
Volume de poros (cm <sup>3</sup> /g)	0,013950	0,003170	0,009819	0,012850
Diâmetro médio de poros (Å)	88,44	87,24	99,84	168,4



Fonte: Clara (2020).

A porosidade exerce grande efeito nas propriedades mecânicas dos materiais, como resistência, dureza e na quantidade de ligante betuminoso a ser mobilizado o envolvimento do granular, logo fileres que apresentam elevada porosidade possuirão capacidade de adsorver maior quantidade de ligante betuminoso, fator que teoricamente gera uma ancoragem mais firme das partículas e, conseqüentemente, um aumento da rigidez.

A determinação da dureza dos fileres se fez necessário para justificar os comportamentos observados durante a campanha experimental da presente pesquisa, o procedimento para determinação do mesmo, foi realizado através da literatura, visto a grande dificuldade de se obter a dureza através os métodos convencionais devidos seus grãos serem frágeis conforme já mencionado. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos através da estimativa em função dos componentes químicos.

Tabela 3 - Estimativa da dureza dos fileres.

<b>Amostra</b>	<b>Bottom ash</b>	<b>Fly ash</b>	<b>50% Bottom + 50% Fly</b>	<b>Pó de pedra</b>
Dureza (Mohs)	7,13	7,17	7,15	6,08

Fonte: Clara (2020).

Analisando as durezas estimadas, podemos observar que o valor estimado para o pó de pedra quando comparadas com as durezas das cinzas observa-se uma pequena variabilidade nos resultados, sendo a dureza maior encontrada é para a cinza *Fly ash*, essa dureza pode ser justificada visto que sua composição predominante é  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ , tendo suas durezas na ordem de 9 e 7 Mohs, respectivamente, essa dureza é dependente diretamente das forças de ligação entre os átomos, íons ou moléculas.

Outra análise realizada foi o ponto de amolecimento pelo método de anel e bola (ABNT NBR 6560/2016), com o intuito de se verificar o efeito de cada filer sobre o mastique betuminoso, foram executados a partir da formulação de mástiques formulados com os fileres estudados na presente pesquisa, ambos com 6,0% em peso do ligante betuminoso, as Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 4 - Ponto de amolecimento, ensaio realizado mesmo dia de moldagem do mástique.

<b>Amostra</b>	<b>Sem adição de filer</b>	<b>Bottom ash</b>	<b>Fly ash</b>	<b>50% Fly e Bottom</b>	<b>Pó de pedra</b>
Resultados (°C)	53,5 (Replan 2018)	53,5	54,0	53,5	53,5

Fonte: Clara (2020).



Tabela 5 - Ponto de amolecimento, ensaio realizado 6 dias após moldagem do mástique.

Amostra	Sem adição de fíler	Bottom ash	Fly ash	50% Fly e Bottom	Pó de pedra
Resultados (°C)	53,5 (Replan 2018)	54,0	54,0	54,0	53,5

Fonte: Clara (2020).

Analisando os resultados obtidos, verifica-se uma forte similaridade entre os valores apresentados, evidenciando o caráter amorfo das cinzas e do pó de pedra fazendo com que não exerçam influência significativa na rigificação do ligante betuminoso, logo sendo considerados fíleres inertes na composição da mistura asfáltica, isto é, sem característica pozolânica.

#### 4. RESULTADOS

O ensaio de PCG visa verificar a habilidade de compactação das misturas asfálticas, a partir do uso da Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratória (PCG) (AFNOR NF P 98-252, 1999). Os resultados médios obtidos nos ensaios estão apresentados na Figura 6. Conforme demonstrado, nesta pesquisa as misturas convencionais executadas, foram as formuladas somente com teor de ligante de 4,70%, visto que Siroma (2018) executou os mesmos ensaios para o mesmo tipo de mistura com a mesma formulação nos teores de ligantes iguais a 4,22%, 4,54% e 4,86%.

Para as misturas asfálticas do tipo BBSG (*Béton Bitumineux Semi-Grenus*), as prerrogativas normativas estabelecem a aferição do teor de vazios a 80 giros, devendo enquadrar-se no intervalo entre 4,0% e 9,0%. Os resultados obtidos fora dos limites normativos comprovam que as misturas asfálticas demonstrariam em campo uma habilidade de compactação indesejada, ou seja, com uma precoce diminuição excessiva dos vazios, situação que poderia desencadear o potencial surgimento de deformação permanente e até mesmo de exsudação no campo.

Analisando a Figura 6, é possível constatar que a morfologia e a textura dos granulares têm uma forte influência na habilidade de compactação, visto que os materiais graníticos possuem características favorecendo o intertravamento granular, resultando em misturas asfálticas mais estáveis.

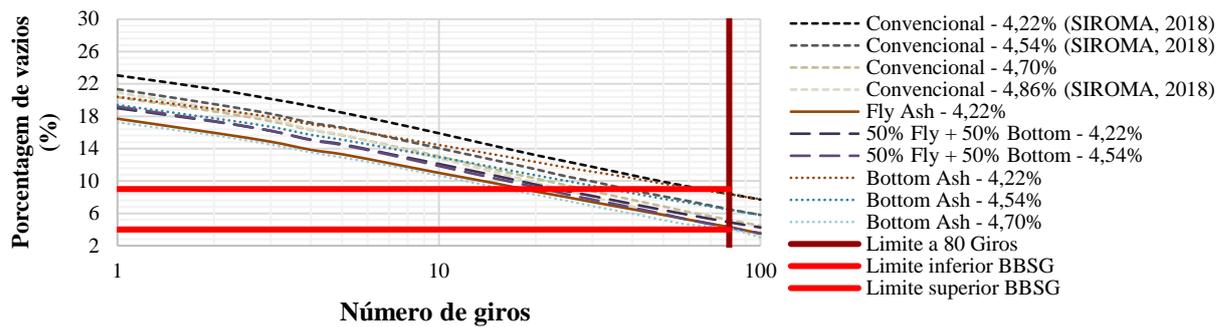


Figura 6 - Resultados dos ensaios de PCG.

Fonte: Clara (2020).

Os resultados dos ensaios da mistura com adição da Fly ash, demonstraram uma maior densificação. Quanto às cinzas Bottom ash, isso ocorreu devido as características morfológicas das cinzas que justificam o comportamento dessas misturas apresentando um melhor embricamento dos granulares, resultando em um maior volume de vazios. Ainda em análise fica evidente que o aumento do teor de ligante ocasiona maior compactação das misturas asfálticas, o que é justificado pelo aumento da lubrificação gerada entre os granulares, resultando em maior acomodação das partículas.

Após a conclusão dos ensaios de PCG, foi avaliada a resistência à sensibilidade à água (NF 98-251-1, 1995). A Figura 7 traz os resultados obtidos nos ensaios.

Analisando os resultados obtidos, tem-se que todos os teores das misturas estudadas foram aprovados, demonstrando uma média superior ao valor mínimo adotado pela norma. Conclui-se, então, que as misturas estudadas não apresentaram uma redução superior a 30% da resistência à compressão simples. Os dados da relação  $r/R$  para a mistura convencional nos teores de 4,22%, 4,54% e 4,86% foram obtidos por Siroma (2018).

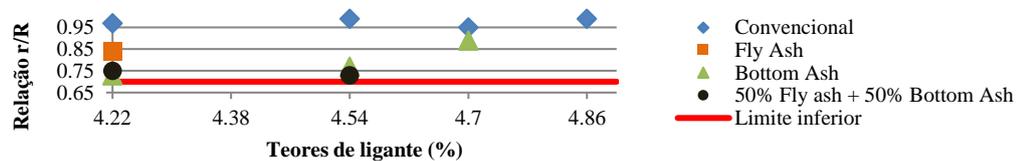


Figura 7 - Resultados dos ensaios de Duriez.

Fonte: Clara (2020).

No entanto, é importante ressaltar que novamente a morfologia das frações granulares foi decisiva nos resultados apresentados, agora na relação do corpo de prova condicionados na água ( $r$ ) e condicionados a seco ( $R$ ), pois quimicamente ambas as matrizes gnáissicas e

das cinzas são eletronegativas, com majoritária presença de sílica, não contribuindo em ambos os casos para uma boa resistência à ação deletéria da água.

O ensaio subsequente realizado foi o ensaio de deformação permanente (AFNOR NF EN 13108-1, 2007), que consiste na avaliação da resistência das misturas asfálticas à formação de trilha de rodas. O resultado deste ensaio está demonstrado na Figura 8.

A mistura BBSG 0/14mm possui três classificações possíveis, determinada em função da percentagem de afundamento após 30.000 ciclos (AFNOR, 2007). As classes 2 e 3 são as que mais se assemelham ao contexto brasileiro.

Analisando as misturas dosadas com o teor de 4,22% de ligante, tem-se que todas se enquadraram na classe 3, o que significa que possuem as melhores condições de resistência ao afundamento na trilha de roda para a categoria BBSG, isto é, abaixo de 5,0%.

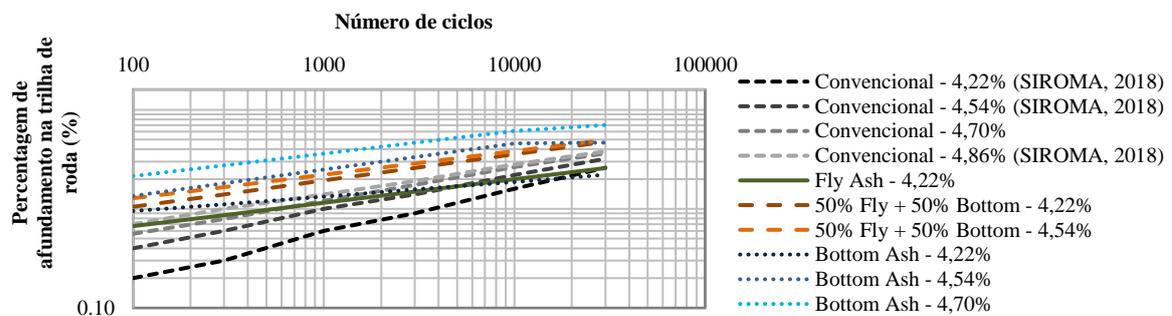


Figura 8 - Resultados dos ensaios de Deformação permanente.

Fonte: Clara (2020).

Todas as misturas se enquadram na classe 3, exceto a mistura com adição de 100% Bottom no teor de ligante de 4,70%, que resultou em um afundamento de 7,01%, logo, estão aptas a serem utilizadas nas condições mais severas de tráfego em situações práticas. A mistura 100% Bottom a enquadra na classe 2, referente à metodologia francesa, ou seja, na faixa situada entre 5,00% e 7,50%, inferior à classe 3, mas apta a ser utilizada em situações de tráfego em ambiente climático com elevado gradiente térmico.

## 5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos e das análises efetuadas, é possível concluir que as matrizes estudadas são viáveis tecnicamente para utilização em misturas asfálticas, assim, é possível inferir que o bom comportamento mecânico de um material, notadamente as



misturas asfálticas, não está diretamente relacionado apenas à resistência física propriamente dita, mas também às variáveis de forma de suas matrizes granulares.

Outrossim cabem destacar que para a obtenção deste êxito, são os cuidados quanto a formulação das misturas asfálticas devem ser tomados em cada caso, analisando minuciosamente a distribuição granulométrica, a morfologia das partículas, e, sobretudo, utilização de 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.

Assim conclui-se a viabilidade da utilização das cinzas oriundas da queima do carvão em misturas asfálticas, logo abrindo-se inclusive a possibilidade de um mercado para a utilização em larga escala da Bottom Ash, atualmente sem destinação alguma aos serviços de beneficiamento de insumos, notadamente na região sul do Estado de Santa Catarina.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL. 2005. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- 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. 2017. **Síntese de zeólitas do tipo X a partir de cinzas volantes e de fundo de carvão mineral**. V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral.
- BARRA, B. S. 2009. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 327 p.
- BP. 2019. **Statistical Review of World Energy 2019** . 68th edition.
- CAMARA, A.L. 2011. **Estudo do comportamento de materiais alternativos e suas aplicações na engenharia geotécnica**. (Aplicação de Cinzas de Carvão como Condicionadores de Solo). Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUCRio).
- CLARA, E. 2020. **Avaliação de misturas asfálticas densas com a incorporação de cinza de carvão mineral**. Dissertação de Mestrado. Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina.
- MANUEL LPC, 2007. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés**. Groupe de Travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France.
- POZZOBON, C.E. 1999. **Aplicações tecnológicas para cinza do carvão mineral produzida no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- RHODE, G. M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, 2006. N.I.W. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil – Aspectos técnicos e ambientais**. vol.1 Porto Alegre: CIENTEC.
- SIROMA, R. S. 2018. **Avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas densas formuladas com areia descartada de fundição (ADF)**. Dissertação.