

AVALIAÇÃO DA HETEROGENEIDADE DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL ADVINDAS DA USINA TERMELÉTRICA ENERGIA PECÉM E SUA APLICAÇÃO EM CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS

Sarah VASCONCELOS¹; Helmer ALMEIDA²; Suelly BARROSO³;

¹UFC, sarah.denise@hotmail.com; ²URCA, boris251075@gmail; ³UFC, suelly@det.ufc.br

RESUMO

Diante de um cenário mundial em que se estimula adoção de sistemas industriais ecologicamente eficientes, a utilização de resíduos para compor novos materiais de construção é imperativa. O aproveitamento de cinzas leves e pesadas em camadas de pavimentos pode se constituir em uma alternativa promissora e sustentável para construção de pavimentos. Tendo em vista o desafio de promover a idealização de técnicas ambientalmente mais corretas, este trabalho buscou propor o emprego de cinzas de carvão mineral provenientes de uma termelétrica em camadas granulares dos pavimentos. Inicialmente, avaliou-se a heterogeneidade das cinzas dispostas em uma bacia de sedimentação. Foram coletadas 21 amostras superficiais e para todas foram realizados ensaios de caracterização física (ensaios de granulometria e limites de liquidez/plasticidade), química (fluorescência de Raio X), ambiental (ensaios de solubilização e lixiviação), bem como ensaios mecânicos (compactação e Índice de Suporte Califórnia). Observou-se periculosidade em 5 amostras, sendo as demais classificadas como Resíduo Classe II-A (Não Inerte). Obtiveram-se valores de umidade ótima entre 22% e 57%, com média de 38%. Os valores do Índice de Suporte Califórnia foram também variados, oscilando entre 1% e 27%, com cerca de 80% das amostras apresentando valores abaixo do mínimo exigido para emprego em camadas de sub-base de pavimentos. Os valores de expansão oscilaram entre 0,3% a 8,2%, de forma que cerca de 50% das amostras coletadas não atenderam ao requisito mínimo para utilização em camada granular. Diante da significativa heterogeneidade observada, procedeu-se a realização de mistura das cinzas dos diversos pontos coletados com solo regional, como alternativa para melhorar o comportamento ambiental e mecânico do material e torná-lo apto a ser empregado na pavimentação. Na mistura proposta, realizaram-se ensaios de compactação, Índice de Suporte Califórnia e Módulo do Resiliência, além de ensaios de Resistência à Compressão Simples e Resistência à Tração por Compressão Diametral. A mistura preparada em laboratório se mostrou viável, do ponto vista técnico e ambiental, a ser utilizada em camadas granulares de pavimentos. Concluiu-se que a utilização das cinzas estabilizadas na pavimentação representa uma importante solução de engenharia, de forma a dar uma finalidade técnica e ambientalmente correta aos rejeitos produzidos em centrais termelétricas.

Palavras-chave: Pavimentação. Termelétrica. Cinza. Estabilização.

ABSTRACT

Faced with a worldwide scenario in which the adoption of ecologically efficient industrial systems is stimulated, the use of waste to compose new construction materials is imperative. The use of fly and bottom ashes in layers of pavements can constitute a promising alternative, as a sustainable trend in the construction of environmentally correct pavements. Considering this challenge, this work proposes the use of mineral coal ash from a thermoelectric plant in granular layers of the pavements. Initially, the heterogeneity of the ashes arranged in a sedimentation basin was evaluated. A total of 21 surface samples were collected and for all, physical characterization tests were performed (granulometry tests and limits of liquidity/plasticity), chemical, environmental (solubilization and leaching tests), and mechanical tests (compaction, California Bearing Ratio). Hazards were observed in 5 samples, the others being classified as Waste Class II-A (Not Inert). Optimal humidity values were obtained between 22% and 57%, with an average of 38%. The California Bearing Ratio values were also varied, ranging from 1% to 27%, with about 80% of the samples presenting values below the minimum required for use in sub-base layers of pavements. Expansion values ranged from 0.3% to 8.2%, so that approximately 50% of the collected samples did not meet the minimum requirement for use in granular layers. Considering the significant heterogeneity observed, the ashes of the various points collected with regional soil were mixed as an alternative to improve the mechanical behavior of the material and make it suitable for use in paving. In the proposed blend were carried out compaction tests, California Bearing Ratio, Resilience Module, and Tests for

Resistance to Single Compression and Tensile Strength by Diametral Compression. The mixture idealized in the laboratory showed to be feasible, from the technical and environmental point of view, to be used in granular layers of pavements. It was concluded that the use of ash in the paving represents an important engineering solution, in order to give a technical and environmentally correct purpose to the tailings produced in thermoelectric plants.

Key-Words: Paving. Thermoelectric. Ash. Stabilization.

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos representa um dos grandes desafios na sociedade contemporânea. Algumas empresas como as refinarias de petróleo, usinas termelétricas e indústrias siderúrgicas geram toneladas de rejeitos, descartados muitas vezes a céu aberto e em bacias de sedimentação. Esses resíduos, se estudadas a sua viabilidade técnica, econômica e ambiental, podem ser matéria prima para aplicação sustentável em obras de engenharia.

Em centrais termelétricas, a geração de energia elétrica utilizando como combustível fóssil o carvão mineral, gera dois importantes resíduos sólidos: cinza leve (*fly ash*) e cinza pesada (*bottom ash*). As propriedades e as características físicas, químicas e mineralógicas dessas cinzas dependem de vários fatores, como a qualidade do carvão e do tipo e da eficiência do sistema de controle de emissões (SABEDOT *et al*, 2011). Os principais impactos ambientais produzidos durante o beneficiamento do carvão mineral decorrem da geração de toneladas diárias de resíduos sólidos, *a priori* sem valor comercial, depositados em áreas inapropriadas, como bacias de sedimentação e aterros de resíduos industriais.

Diante de um cenário mundial em que se estimula a criação de uma ética ambiental e a adoção de sistemas industriais ecologicamente eficientes, a utilização de resíduos para compor novos materiais de construção torna-se imperativa. Na pavimentação o cenário não é diferente. A aplicação de resíduos na construção das diversas camadas dos pavimentos (revestimento, base, sub-base e reforço) se torna uma excelente alternativa, em função da possibilidade de incorporação de grandes volumes desses materiais.

Assim, com o aproveitamento de cinzas leves e pesadas em camadas de pavimentos, é possível diminuir os custos de tratamento e disposição final, reduzir os impactos ambientais, além de oferecer matéria-prima secundária ao mercado rodoviário. Tendo em vista essa realidade, procurou-se neste trabalho desenvolver uma investigação local, no

estado do Ceará, para que esses resíduos fossem melhores estudados e aplicados na área da pavimentação. Para tanto, selecionou-se uma usina termelétrica para se propor uma solução de engenharia mais prática.

Na Usina Termelétrica Energia Pecém, localizada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, ocorre a geração diária de um volume de mais de mil toneladas de cinzas, entre volantes e pesadas (BARROS, 2015). Nesta termelétrica existem duas células de armazenamento, onde são despejadas as cinzas oriundas do processo de queima do carvão mineral. A primeira célula, denominada de Módulo I (ilustrado na Figura 1), já atingiu toda sua capacidade (350 mil m³ de volume), estando atualmente totalmente preenchida com cinzas. A segunda célula, Módulo II, encontra-se parcialmente preenchida, continuando ainda a receber as cinzas provenientes da queima do carvão. Ressalta-se que a construção dessas células geram altos custos para a termelétrica em questão e que seria importante dar um destino ambientalmente correto aos materiais que se encontram já depositados no Módulo I.

Figura 1 – Módulo I de armazenagem.



Fonte: Relatório de Prospecção da Usina Termelétrica Energia Pecém, UFC.

Relatos mostram que as cinzas volantes e pesadas foram armazenadas no Módulo I sem um

planejamento prévio, sendo também depositados diversos outros materiais como pirita, solo, material orgânico, cal e águas servidas das instalações da própria termelétrica. Com o passar do tempo e cada vez com a temática de sustentabilidade mais em foco surgiram preocupações ambientais, dada a heterogeneidade dos resíduos depositados no Módulo I e a necessidade da avaliação ambiental dos mesmos.

A motivação do trabalho aqui apresentado foi então propor uma solução de engenharia para dar uma finalidade sustentável e ambientalmente correta para os resíduos dispostos no Módulo I. Para isso, tornou-se necessário investigar a heterogeneidade das cinzas dispostas neste módulo, de forma a verificar a possibilidade de sua utilização na pavimentação.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dois importantes resíduos sólidos são gerados no processo de geração de energia em usinas termelétricas a carvão mineral: cinza leve e cinza pesada. Conforme Lopes (2011), geralmente cerca de 40% dos resíduos gerados correspondem à fração cinza, sendo desses 60% correspondentes às cinzas leves (também chamadas de volantes e *fly ash*) e 40% às cinzas pesadas (*bottom ash*). A porcentagem de cinzas produzidas é variável e depende, principalmente, da qualidade do carvão utilizado e do sistema de controle de emissões, podendo representar mais de 80% dos resíduos gerados em termelétricas.

A cinza leve é um material que apresenta granulometria fina, com propriedades pozolânicas. Esse subproduto é coletado pelos precipitadores eletrostáticos através do fluxo de gases provenientes da combustão do carvão mineral nas termelétricas. Segundo Farias (2005), quando o carvão pulverizado é queimado, a maior porcentagem de cinzas oriundas do processo de queima são cinzas volantes, recuperadas nas tubulações de exaustão de gás. Depois de recolhidas, essas cinzas vão, em geral, para silos de estocagem.

A cinza pesada constitui um material fisicamente grosseiro, poroso, vítreo, granular e de cor acinzentada, com granulometria predominante de areia. Essas cinzas resultam da queima do

carvão mineral pulverizado, sendo depositadas no fundo da caldeira e transportadas por arraste hidráulico até as bacias de sedimentação (LEANDRO e FABBRI, 2009).

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas de um material existente e disponível no local de execução das obras de engenharia é de fundamental importância para a análise de adequação dos requisitos técnicos. Os resíduos de termelétrica para que possam ser utilizados em camadas granulares de pavimentos necessitam atender requisitos mínimos, exigidos por norma, como baixos valores de expansão, boa resistência mecânica e capacidade de suporte adequada. A estabilização é uma das técnicas utilizadas de forma a conferir uma melhoria dessas propriedades, de modo a enquadrá-las dentro das especificações construtivas vigentes.

Uma das formas de estabilização muito utilizada em resíduos de usinas é a estabilização por correção granulométrica. Essa estabilização promove o melhoramento das propriedades dos materiais através da adição ou retirada de partículas. Ou seja, o método consiste, basicamente, em promover melhorias induzidas no material pela mistura deste com outro(s), de forma que eles obtenham especificações adequadas para seu uso (SANTOS *et al*, 1995).

Em âmbito mundial vários estudos já foram realizados visando verificar a possibilidade de aplicação das cinzas de carvão mineral provenientes de usinas termelétricas em diferentes áreas da engenharia. Farias (2005) afirma que as forças motivadoras desses estudos são, principalmente, os problemas ambientais oriundos da disposição desses resíduos, a importância das cinzas como material de construção, devido a algumas de suas propriedades, especialmente sua pozolanicidade e a escassez de jazidas de materiais convencionais utilizados na pavimentação.

Segundo Rohde *et al.* (2006) a utilização das cinzas de carvão mineral em camadas granulares se difundiu muito desde a década dos anos 60. Os Estados Unidos e alguns países da Europa foram os primeiros países a apresentarem experiência em larga escala de misturas de cinzas com solo e aglomerante. No Distrito Sanitário de Chicago, as cinzas foram utilizadas como substitutas do cimento em pavimento, em um trecho de 800 m numa rodovia local.

Dawson *et al.* (1991) estudaram cinzas pesadas provenientes de usinas termelétricas britânicas. Nos seus estudos foram obtidas umidades ótimas em torno de 18% e massa específica aparente seca variando de 0,99 g/cm³ a 1,37 g/cm³. O valor de CBR variou de 27 a 30%. Os autores observaram que granulometria dessas cinzas é mais grossa quando comparadas as cinzas obtidas de usinas termelétricas brasileiras, comportamento já esperado dado que o carvão brasileiro possui menor poder calorífico, necessitando de um processo de moagem mais intenso e, conseqüentemente, resultando em resíduos de menor granulometria.

Schroeder (1994) relatou a existência de uma pesquisa extensiva acerca da utilização de cinzas volantes de carvão mineral na pavimentação. O autor afirma que na década de 80 foi realizado um estudo para avaliar o uso de cinzas como um componente para estabilização de agregados em camadas granulares de pavimentos. As investigações laboratoriais determinaram que a melhor combinação era uma mistura de 84% de agregados, 11% de cinzas volantes e 5% de cal hidratada, apta a ser empregada em sub-base de pavimentos.

Em âmbito nacional, também foram realizados alguns estudos com utilização de cinzas de carvão mineral na pavimentação. Lopes (2011) caracterizou dois tipos de cinzas (pesada e volante) obtidas da queima de carvão mineral, com objetivo de avaliar sua aplicabilidade em camadas de base de pavimentos rodoviários. A estabilização ocorreu através da mistura dessas cinzas a um solo arenosiltoso não-laterítico, característico do estado do Rio de Janeiro. O autor observou que as misturas com inserção de cinzas apresentaram um comportamento mecânico compatível com as exigências de um pavimento de baixo volume de tráfego. A inserção de cinzas aumentou consideravelmente o valor do módulo de resiliência, o que resultou em uma diminuição da espessura da camada de base, quando comparado à camada utilizando apenas o solo puro.

Farias (2005) também empregou a técnica de estabilização granulométrica em sua pesquisa. O autor estudou a utilização de misturas solo + cinzas pesadas na pavimentação. As cinzas utilizadas apresentaram, naturalmente, CBR (*Califórnia Bearing Ratio*) de 5% e expansão de 0%. Foram estudadas cinco misturas estabilizadas

granulometricamente, com diferentes teores de solo/cinza pesada, observando-se que as misturas, com 50% e 30% de cinzas, poderiam ser empregadas como camadas de sub-base.

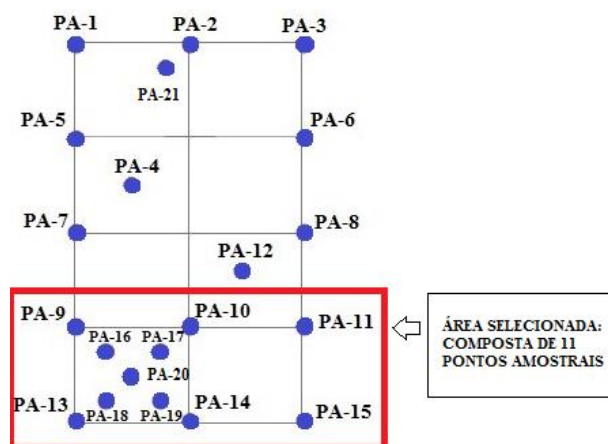
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados dois materiais neste estudo: cinzas e solo regional. As cinzas foram coletadas na Usina Termelétrica Energia Pecém, localizada a cerca de 50 km do município de Fortaleza. Já o solo regional foi coletado numa jazida localizada próxima à termelétrica, apresentando um aspecto visual de uma areia siltosa ou argilosa.

2.2.1 Primeira Etapa do Programa Experimental

A primeira etapa contemplou a avaliação da heterogeneidade das cinzas do Módulo I da termelétrica. Escolheu-se o Módulo I (comprimento de 300 m, largura de 150 m e profundidade de 7 m) devido ao montante de material (315 mil m³) armazenado e a condição já estabelecida de capacidade máxima. Para o planejamento da coleta dos resíduos, se definiu uma malha amostral onde foram distribuídos 21 Pontos de Amostragem (PA) sobre sua superfície. As amostras foram identificadas pela sigla PA, seguidas de uma numeração em ordem crescente, conforme se pode visualizar na Figura 2.

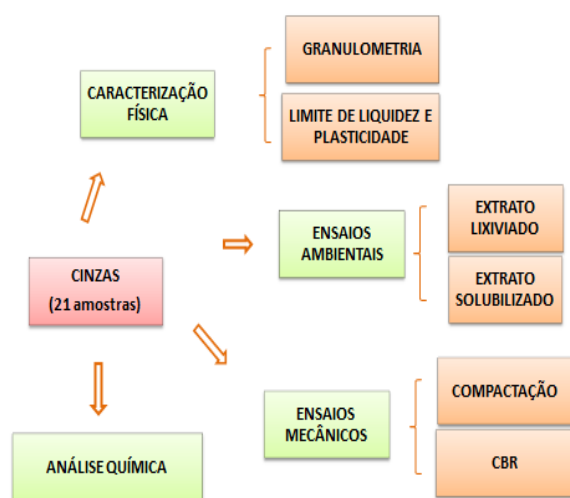
Figura 2 – Malha Amostral.



Para todas as amostras coletadas foram realizados ensaios de caracterização física (ensaios de granulometria, limites de liquidez e de plasticidade), química (fluorescência de Raio X) e ambiental (ensaios de solubilização e lixiviação), bem como ensaios mecânicos (Proctor, CBR e

expansão na energia intermediária). Os ensaios foram realizados conforme metodologia estabelecida em normas do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte) e, para os ensaios ambientais, em normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). A Figura 3 ilustra o procedimento experimental desta primeira etapa metodológica.

Figura 3 – Fluxograma Experimental (1ª Etapa).



Foram selecionados os pontos amostrais da área destacada por apresentarem características de baixa periculosidade (com base nos ensaios ambientais) e com melhores resultados dos ensaios mecânicos de CBR e expansão. A nova área selecionada foi composta de 11 amostras (PA-9 até PA-20, à exceção da PA-12), sendo separados 40 kg de cada uma delas em laboratório. As amostras foram misturadas, quarteadas e colocadas em estufa para secagem. Em seguida, a amostra homogeneizada de cinza (C) foi misturada ao solo (S), na proporção de 1:1, dando origem a mistura que apresenta iguais proporções de solo e cinza (50% solo e 50% cinza) em peso. Essa mistura tem por objetivo promover uma estabilização granulométrica da cinza com o solo regional e, consequentemente melhorar o comportamento mecânico do material, de forma a torná-lo apto a ser empregado na pavimentação.

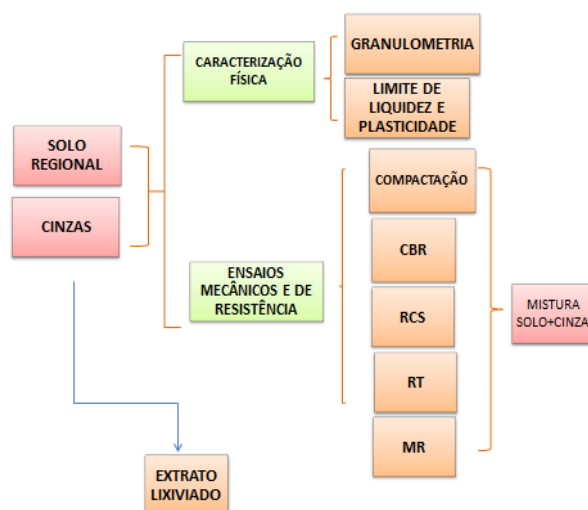
Nesta etapa, o solo regional, a cinza homogeneizada e a mistura granulométrica proposta foram submetidos aos ensaios de Proctor, CBR, expansão, Módulo de Resiliência (MR), Resistência à Compressão Simples (RCS) e Resistência à Tração (RT) na energia intermediária. A Figura 4 ilustra o fluxograma experimental desta segunda etapa metodológica.

De posse dos resultados obtidos por meio dos ensaios foi realizada uma análise estatística de forma a se verificar a heterogeneidade entre as amostras analisadas. Para isso, se utilizou procedimento, sugerido no Manual de Pavimentação do DNIT (2006) para investigação de jazidas, de análise estatística baseada nos seguintes parâmetros: média, desvio padrão, valor mínimo provável e valor máximo provável de cada variável a ser analisada.

2.2.2 Segunda Etapa do Programa Experimental

Na segunda etapa foi realizada uma tentativa de estabilização granulométrica, por meio da mistura homogeneizada da cinza (C) com solo regional (S). Para selecionar uma amostra de cinza mais homogênea, uma vez que foi verificada a heterogeneidade das mesmas na primeira etapa, e que pudesse ser realmente aplicada na área de pavimentação, procedeu-se a mistura de materiais provenientes dos furos a partir da escolha de uma área destacada na Figura 2.

Figura 4 – Fluxograma Experimental (2ª Etapa).

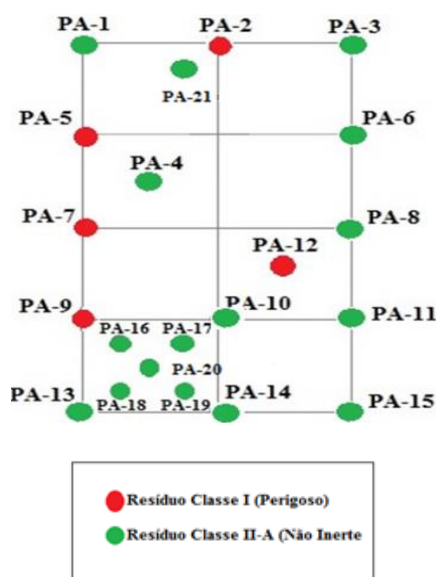


2.3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

2.3.1 Primeira Etapa do Programa Experimental

A ilustração da classificação ambiental das cinzas analisadas está representada na Figura 5.

Figura 5 – Classificação ambiental das cinzas analisadas.



Fonte: Relatório de Prospeção da Usina Termelétrica Energia Pecém, UFC.

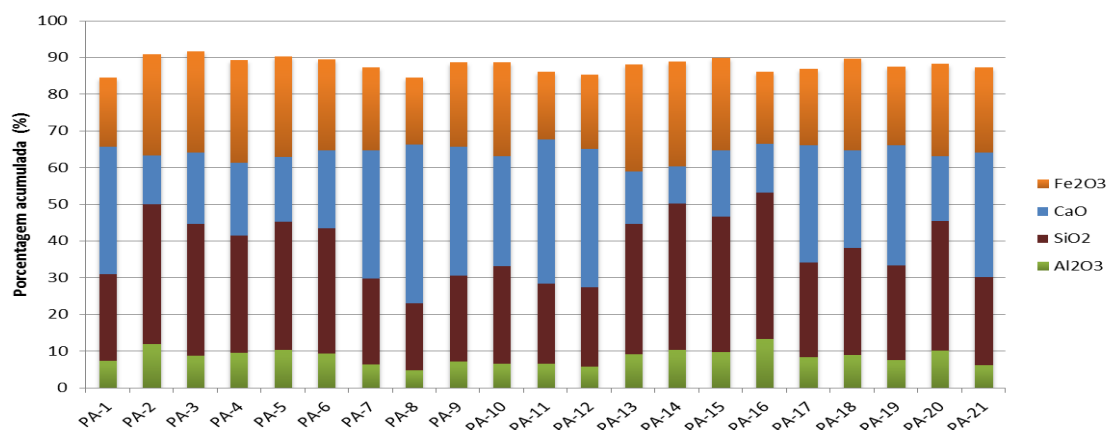
Observa-se que as amostras PA-2, PA-5, PA-7, PA-9 e PA-12 foram classificadas como Resíduos Classe I (Perigosos), por apresentarem resultados

acima dos valores máximos permitidos de fluoreto. Desse modo, em 23,8% das amostras analisadas se observou periculosidade, não sendo, do ponto de vista ambiental, aconselhável o uso das cinzas *in natura* depositadas no Módulo I.

Observa-se que as amostras classificadas como resíduo perigoso estão dispersas ao longo da malha amostral, o que dificulta a definição de alguma subárea, dentro da área do Módulo I, composta de amostras que estejam aptas do ponto de vista ambiental a serem utilizadas na pavimentação.

Ao serem submetidas à análise química, todas as cinzas apresentaram elevadas porcentagens, em peso, dos elementos Si, Fe, Al e Ca, totalizando cerca de 90% da composição molar em todas as amostras analisadas. Os compostos mais presentes em todas as amostras foram: Sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3) e óxido de cálcio (CaO). Esses compostos juntos representaram mais de 80% da composição dos resíduos, conforme se pode verificar na Figura 6.

Figura 6 – Análise química das cinzas.



Fonte: Relatório de Prospeção da Usina Termelétrica Energia Pecém, UFC.

De forma a se verificar a heterogeneidade das amostras coletadas, avaliou-se a variação da composição química das amostras, obtendo-se a média e o desvio padrão da porcentagem, em massa, de cada um dos compostos constituintes das cinzas em análise, conforme se verifica na Tabela 1.

Percebe-se que as cinzas dispostas no

Módulo I são bastante heterogêneas em termos de composição química. Com relação ao CaO, por exemplo, a amostra de cinza que possui o maior percentual deste composto (43,4% em massa) tem um percentual 4 vezes maior de CaO em sua composição se comparada a amostra que apresenta a menor quantidade (10,2% em massa). A variação

observada nos compostos SiO_2 , Fe_2O_3 e SO_3 também é significativa, com altos desvios padrões.

Tabela 1 – Variação da composição química para as cinzas analisadas

COMPOSTOS	VALOR MÁXIMO (% massa)	VALOR MÍNIMO (% massa)	MÉDIA (%)	DESVIO PADRÃO
Al_2O_3	13,22	4,78	8,49	2,12
K_2O	5,06	2,24	3,43	0,77
SO_3	10,85	0,83	4,46	2,89
Cl	0,32	0,02	0,12	0,09
SiO_2	39,87	18,11	29,81	6,84
CaO	43,41	10,22	25,56	10,09
TiO_2	3,74	1,56	2,69	0,47
Fe_2O_3	29,25	18,28	23,83	3,55
Ag_2O	0,44	0	0,22	0,14
MoO_3	1,52	0,06	0,55	0,83

Os resultados da análise granulométrica, densidade real (ρ_s), compactação (umidade ótima e

massa específica seca máxima), CBR e as expansões observadas para as cinzas analisadas estão apresentados na Tabela 2.

As cinzas coletadas resultaram em não plásticas (NP) e foram classificadas pela AASTHO (*American Association of State Highways and Transportation Officials*) como materiais silte-argilosos do tipo A-4. As porcentagens, em peso, de areia e silte foram variadas entre as diferentes amostras, com médias de 9,1% e 73,5%, respectivamente. Não foram identificadas partículas com diâmetro inferior a 0,001 mm (colóides), faixa granulométrica onde está presente a maioria dos argilo-minerais, responsáveis pelo comportamento argiloso do solo.

Foi realizada uma análise estatística, contida no final da Tabela 2, de forma a determinar a média, desvio padrão, valor mínimo provável e valor máximo provável, para as seguintes variáveis: porcentagem passando nas peneiras utilizadas no ensaio de granulometria, umidade ótima ($h_{ót}$), massa específica seca máxima ($\gamma_{smáx}$), CBR e Expansão (E).

Tabela 2 - Caracterização física e mecânica das cinzas amostradas.

AMOSTRAS	Percentual que passa (%)					ρ_s (g/cm ³)	PROCTOR		CBR (%)	Expansão (%)
	Peneiras						$h_{ót}$ (%)	$\Upsilon_{smáx}$ (g/cm ³)		
	2"	3/8"	10	40	200					
PA-1	100	100	100	92	81	2,48	41,1	1,15	24	0,53
PA-2	100	100	100	92	86	2,46	25,1	1,38	8	2,08
PA-3	100	100	100	94	88	2,51	37,8	1,18	8	1,91
PA-4	100	100	100	75	63	2,49	47,2	1,07	12	0,80
PA-5	100	100	100	82	73	2,45	30,4	1,34	3	2,47
PA-6	100	100	100	93	82	2,43	35,6	1,23	8	1,84
PA-7	100	100	100	99	92	2,26	46,1	1,1	22	0,55
PA-8	100	100	100	99	92	2,49	57,1	0,95	3	0,45
PA-9	100	100	100	95	85	2,50	45,6	1,08	20	1,14
PA-10	100	100	100	92	77	2,46	50,9	1,02	2	1,19
PA-11	100	100	100	95	86	2,55	51,0	1,02	3	1,00
PA-12	100	100	100	88	82	2,59	54,8	1,01	12	0,57
PA-13	100	100	100	98	91	2,38	26,3	1,34	1	4,66
PA-14	100	100	100	99	92	2,36	23,8	1,33	1	4,13
PA-15	100	100	100	95	87	2,40	24,2	1,35	2	3,16
PA-16	100	100	100	99	91	2,35	22,1	1,42	1	8,23
PA-17	100	100	100	81	71	2,44	43,0	1,11	22	0,63

PA-18	100	100	100	83	68	2,46	39,1	1,16	4	3,12
PA-19	100	100	100	88	80	2,49	40,3	1,14	27	0,72
PA-20	100	100	100	89	65	2,21	23,3	1,40	4	0,81
PA-21	100	100	100	91	82	2,26	45,0	1,10	12	0,38
Análise Estatística	N	21	21	21	21	21	21	21	21	21
	$\bar{X}$	100	100	100	91,4	91,6	2,44	38,10	1,19	2,00
	σ	0	0	0	6,8	9,2	0,09	11,66	0,15	1,93
	X_{MAX}	100	100	100	98,0	90,6	2,53	49,39	1,34	3,87
	X_{MIN}	100	100	100	94,8	92,6	2,35	26,79	1,04	0,13

Segundo o DNIT (2006), deve-se realizar a análise estatística por meio das Equações 1 a 4. Nestas equações, tem-se que: N = número de amostras; $\bar{X}$ = média aritmética; σ = desvio padrão; X_{MIN} = valor mínimo provável e X_{MAX} = valor máximo provável.

$$X_{MAX} = \bar{X} + \frac{1,29\sigma}{\sqrt{N}} + 0,68 \quad [\text{Eq.01}]$$

$$X_{MIN} = \bar{X} - \frac{1,29\sigma}{\sqrt{N}} - 0,68\sigma \quad [\text{Eq.02}]$$

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} \quad [\text{Eq.03}]$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad [\text{Eq.04}]$$

Observa-se, pela Tabela 2, uma significava heterogeneidade entre as amostras, principalmente no que se referem aos valores dos ensaios mecânicos. A umidade ótima ($h_{ót}$) média foi de 38,09%, com desvio padrão de 11,66%. A amostra PA-16 teve a menor $h_{ót}$ observada (22,1%), enquanto a PA-8 (de maior $h_{ót}$) obteve um valor de 57,1%, uma diferença significativa de 30 pontos percentuais. O desvio padrão dos valores de CBRs também foi bem elevado (9%), variando entre 1% e 27%. No que se refere às expansões, obteve-se

uma média de 2%, com desvio padrão de 1,93%. A heterogeneidade observada neste critério também foi significativa, com valores variando entre 0,53% (PA-1) a 8,23% (PA-16).

Para emprego em camadas de sub-base, o DNIT adota como requisito mínimo valores de $CBR \geq 20\%$ e expansão máxima de 1%. Para bases, o CBR deverá ser maior ou igual a 40%, 60% ou 80% (a depender do número N de operações do eixo simples padrão de 8,2 tf) e a expansão máxima deverá ser 0,5%. O CBR de projeto (valor mínimo provável) para as cinzas, na primeira etapa do estudo, foi de 1%, bem abaixo do exigido pelo DNIT para camadas granulares. A expansão média foi de 2%, com valor máximo provável de 3,87%, bem acima da tolerância admitida. Assim, as cinzas *in natura* do Módulo I, não podem ser utilizadas em camadas granulares dos pavimentos, devendo-se tentar usar técnicas de estabilização granulométrica ou química para melhoria de suas propriedades.

2.3.2 Segunda Etapa do Programa Experimental

Na segunda etapa foram misturadas, proporcionalmente, 11 amostras (PA-9 até PA-20, à exceção da PA-12) de cinzas. Definiu-se essa área por dois motivos principais: representar amostras com resultados mecânicos mais satisfatórios e apresentar resultados aceitáveis do ponto de vista ambiental. Os resultados da análise granulométrica do solo e da mistura das cinzas obtidas da mistura dos 11 pontos amostrais são apresentados na Tabela 3. Observa-se que o solo foi classificado, pela AASTHO, como uma areia fina A-2-4 e a cinza misturada como material silte-argiloso do tipo A-4.

Tabela 3 - Resultados da análise granulométrica do solo e da cinza.

Amostras	Pedregulho (%)	Areia (%)			Silte e Argila (%)	ρ_s (g/cm ³)	LL (%)	IP (%)
		Grossa	Média	Fina				
solo	0	0	4	82	14	2,65	25	7
cinza	10	7	6	7	70	2,40	NL	NP

Pela análise ambiental, as cinzas misturadas apresentaram concentrações de íons de fluoreto dentro dos admissíveis, conforme se pode verificar na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado do ensaio de lixiviação nas cinzas homogeneizadas.

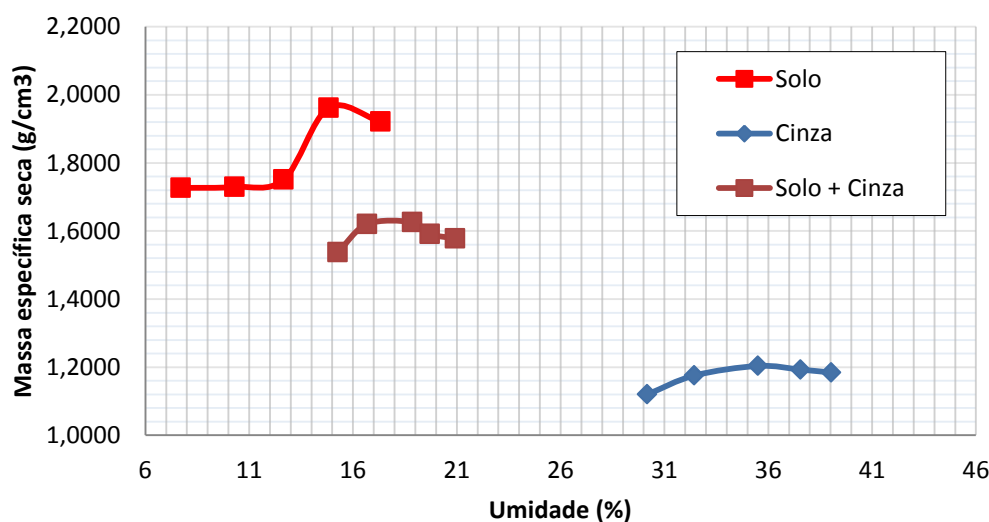
Amostra	PARÂMETROS INORGÂNICOS (mg/l)					
	NO ²⁻	NO ³⁻	Cl ⁻	F ⁻	PO ₄ ⁻³	SO ₄ ⁻²
CINZA	10,69	15,74	8,35	4,95	22,12	2092,05
VMP	-	-	-	150	-	-

Quando todos os parâmetros do extrato lixiviado estiverem abaixo dos valores máximos

permitidos, conforme a NBR 10005/2004, a amostra é classificada como Resíduo como Classe II (não perigoso). Por ser um resíduo não perigoso, as cinzas homogeneizadas estão aptas, do ponto de vista ambiental, a serem utilizadas em camadas granulares de pavimentos.

As curvas de compactação Proctor das misturas estão dispostas na Figura 7. É possível verificar que houve acréscimo da umidade ótima (h_{ot}) e diminuição da massa específica seca máxima das misturas em função do aumento do teor de cinza. A cinza é um material com granulometria mais fina, com maior porcentagem de silte e argila, o que explica as maiores umidades ótimas observadas.

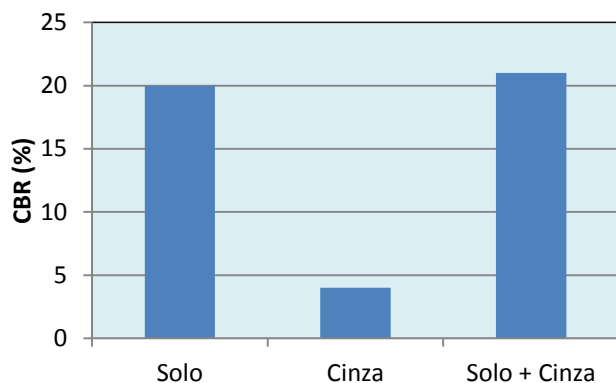
Figura 7 – Curvas de compactação das amostras.



A Figura 8 ilustra os resultados de CBR para o solo natural, a cinza homogeneizada e a mistura solo + cinza. Observa-se que a cinza apresenta um baixo valor de resistência à penetração (4%), bem abaixo do mínimo exigido pelo DNIT para uso em camadas de sub-base (20%). Na mistura solo + cinza ocorreu um acréscimo de resistência em relação à cinza misturada, de forma que o CBR

aumentou para 21%. Já quanto à expansão, o solo natural não apresentou expansão e quando utilizado como estabilizante das cinzas reduziu o valor para 0,95% (abaixo do limite mínimo para sub-base de 1%).

Figura 8 – CBR das amostras.



A mistura solo + cinza apresentou resultados técnicos que a torna apta para ser empregada em camada de sub-base, uma vez que possui CBR e expansão dentro dos limites admissíveis.

Com relação aos ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS), realizado conforme norma DNER-ME 180/1994, e o de Resistência à Tração (RT) por compressão diametral, realizado conforme DNER-ME 181/1994, observou-se que os CPs moldados de solo, cinza e de mistura (solo + cinza) não resistiram à imersão em água determinada por norma, desintegrando poucos minutos após a imersão. Este comportamento já era esperado, uma vez que tanto a cinza, como o solo são materiais de baixa coesão. Requisitos mínimos para valores de RCS e RT só existem quando são empregados aglutinantes químicos, como a cal e o cimento. Little (1995), por exemplo, indica os valores de RCS mínimos exigidos pelo *Illinois Highway Department* para o uso de misturas de solo-cal em camadas de sub-base (0,689 MPa) e base (1,034 MPa) de pavimentos.

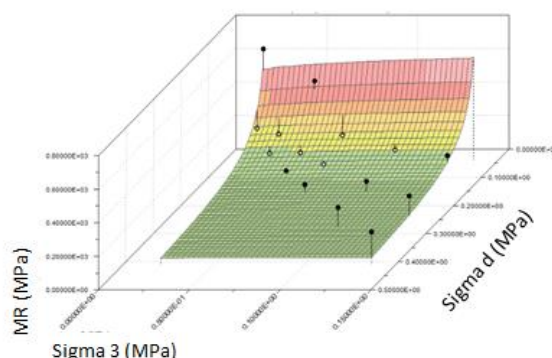
Os resultados do módulo de resiliência das misturas foram tratados no programa Excel, importados no programa LabFit. Foi constatado que o modelo composto ($MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$) foi o que melhor caracterizou esses materiais. Os resultados estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Módulo de Resiliência das misturas idealizadas.

Misturas	Parâmetros do MR			
	K ₁	K ₂	K ₃	R ²
M1	139,3	-0,269	-0,538	0,78
M2	133,5	0,351	-0,343	0,33
M3	16,8	0,062	-1,162	0,68

A Figura 9 mostra o comportamento da mistura (solo + cinza) com relação ao modelo composto testado. É possível perceber que o comportamento da mistura depende mais da tensão desviatória (σ_d) do que da tensão de confinamento (σ_3).

Figura 9 – MR do solo para o modelo composto



Fonte: LabFit.

No método de dimensionamento mecanístico-empírico, que se baseia na resposta estrutural e modelos de desempenho, são necessários para análise os parâmetros de módulo de resiliência. De posse desses parâmetros, pode-se dimensionar (à luz de um método mais mecanístico, e não puramente empírico) um pavimento teórico, com uma sub-base composta da mistura proposta (solo + cinza).

A utilização da mistura (solo + cinza) na composição de pavimentos se constitui numa importante solução de reaproveitamento das cinzas estudadas, uma vez que será possível diminuir os custos de tratamento e disposição final do resíduo, reduzir os impactos ambientais, além de oferecer uma matéria-prima mais econômica ao mercado rodoviário.

3 CONCLUSÕES

A principal contribuição desta pesquisa foi propor uma solução de engenharia para dar uma finalidade sustentável, econômica e ambientalmente correta para os resíduos que estão depositados no Módulo I da Usina Termelétrica Energia Pecém. Um estudo detalhado das cinzas dispostas no Módulo I foi realizado, por meio da coleta e da realização de

ensaios laboratoriais em 21 pontos amostrais e, acrescentando-se a esse estudo técnicas de estabilização granulométrica se conseguiu propor uma solução de reaproveitamento das cinzas leves e pesadas em camadas dos pavimentos.

A utilização da mistura 50% solo + 50% cinza em pavimentos, apresenta-se como uma potencial alternativa à carência de materiais de construção e aos problemas técnicos, ambientais e econômicos muitas vezes advindos com o descarte tradicional dessas cinzas.

Observe-se que o emprego de 50% de cinza deverá resultar na redução dos custos da camada de um pavimento, tendo em vista que a cinza poderá substituir metade do material a ser explorado em uma dada jazida. Outro benefício é a diminuição do volume do material depositado no Módulo I. Por exemplo, para uma rodovia com 10 km de extensão, espessura de camada de sub-base de 20 cm com largura de 9 m, pode-se consumir aproximadamente 29 mil toneladas de cinzas e um volume de resíduo correspondente a 5% do volume total de material armazenado no Módulo I.

Conclui-se que a mistura proposta de cinza, estabilizada granulometricamente, é apta do ponto de vista técnico, econômico e ambiental para ser empregada na construção de pavimentos econômicos e autossustentáveis.

4 REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10005**: Lixiviação de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10006**: Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

BARROS, K. S. **Estudo de Cinzas Volantes de uma Termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos**. UFC. Fortaleza, 2015.

DNIT. **Manual de pavimentação**. 3ª edição. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT**

ME 041: Solos – preparação de amostras para caracterização. 1994.

_____. **DNIT-ME 049**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia para não amostras trabalhadas. 1994.

_____. **DNIT-ME 051**: Solos – Análise granulométrica. 1994.

_____. **DNIT-ME 082**: Solos – Determinação do limite de plasticidade. 1994.

_____. **DNIT-ME 093**: Solo – Densidade Real. 1994.

_____. **DNIT-ME 122**: Solos – Determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito. 1994.

_____. **DNIT 134-ME**: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência. 2010.

_____. **DNIT-ME-162**: Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. 1994.

DAWSON, A. R., BULLEN, F. **Furnace Bottom Ash. Its Engineering Properties and its Use as Sub-base Material**. Proc. Institute of Civil Engineers, 1991, pg. 992 - 1009.

ENERGIA PECÉM. **Projeto de pesquisa sobre a utilização da cinza de carvão mineral na construção civil, pavimentação, e aplicações geotécnicas e ambientais**. Primeiro Relatório Semestral. UFC. Fortaleza, 2016

FARIAS, E. R. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1995.

LEANDRO, R.P.; FABBRI, G.T.P. Aproveitamento da cinza pesada de carvão mineral na construção de bases e sub-bases de pavimentos flexíveis. In: PANORAMA NACIONAL DA PESQUISA EM TRANSPORTES. **Anais do Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes**. Vitória, 2009.

LITTLE, D.N. **Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates**. Vol1: Summary of Findings. Prepared for the National Lime Association, 1999.

LOPES, L.S.E. **Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de bases de**

pavimentos. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

RHODE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N.I.W. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil– Aspectos técnicos e ambientais.** Vol1. Porto Alegre: CIENTEC, 2006.

SABEDOT, S. et al. **Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas.** Unilassalle – UFRGS 2011.

SANTOS, M.; LIMA, D.; BUENO, B. **Estabilização dos solos com cal e betume.** 6ª Reunião de Pavimentação Urbana, p.74-97- Santos, 1995.

SCHROEDER, R. L. **The Use of Recycled Materials in Highway Construction,** U.S. Department of transportation, Federal Highway Administration (FHWA), 1994.

VASCONCELOS, S. D. **Avaliação da Heterogeneidade de Cinzas de Carvão Mineral Advindas da Termelétrica Energia Pecém e sua Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos.** Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.