

AVALIAÇÃO DO USO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL ADVINDAS DE USINA TERMELÉTRICA NO ESTADO DO CEARÁ NA CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS SUSTENTÁVEIS

Sarah Denise Vasconcelos

Universidade Federal do Ceará

Francisco de Assis Franco Vieira

Universidade Federal do Ceará

Suely Helena de Araújo Barroso

Universidade Federal do Ceará

RESUMO

A aplicação de resíduos na pavimentação se torna uma excelente alternativa, haja vista a possibilidade de incorporação de grandes volumes desses materiais, diminuindo os custos de tratamento e disposição do resíduo. Este estudo objetiva avaliar mecânica e ambientalmente a utilização de cinzas de carvão provenientes de uma termelétrica, localizada na Região Metropolitana de Fortaleza, em camadas de base e sub-base de pavimentos. Para isso, foram produzidas em laboratório misturas de cinzas-solo-cal submetidas aos ensaios de compactação, Índice de Suporte Califórnia, módulo de resiliência e resistência à compressão simples. Ademais, foram realizados também ensaios ambientais em amostras no estado solto (lixiviação e solubilização) e no estado compactado (lixiviação em coluna). Posteriormente, foi dimensionado pelo método mecanístico-empírico estruturas de pavimentos com as misturas que apresentaram resultados mecânicos satisfatórios. Concluiu-se que o reaproveitamento dos resíduos da termelétrica na pavimentação representa uma alternativa viável técnica e ambientalmente para a construção de pavimentos autossustentáveis.

ABSTRACT

The application of residues in the paving becomes an excellent alternative, considering the possibility of incorporating large volumes of these materials, reducing the costs of treatment and waste disposal. This study aims to evaluate mechanically and environmentally the use of coal ash from a thermoelectric plant, located in the Metropolitan Region of Fortaleza, in layers of base and sub-base of pavements. For this, blends of ash-soil-lime subjected to compaction tests, California Bearing Ratio, resilience modulus, and simple compressive strength were produced in the laboratory. In addition, environmental tests were carried out on samples in the loose state (leaching and solubilization) and in the compacted state (column leaching). Subsequently, it was designed by the mechanistic-empirical method of pavement structures with the mixtures that presented satisfactory mechanical results. It was concluded that the reuse of the thermoelectric residues in the paving is a technically and environmentally viable alternative for the construction of self-sustainable pavements.

1. INTRODUÇÃO

O contexto global estimula políticas de conscientização sustentável e adoção de sistemas industriais ecologicamente aceitos, tornando-se, no século XXI, um grande desafio a gestão eficiente dos resíduos produzidos em regiões industriais. Os processos industriais geram diferentes tipos de resíduos, que podem apresentar toxicidade e periculosidade ao serem dispostos na natureza, causando danos à saúde humana e ao meio ambiente, poluindo a água e o solo e alterando os ciclos ecológicos.

Em usinas termelétricas, a geração de energia utilizando como combustível o carvão mineral gera importantes resíduos sólidos, como cinzas leves (*fly ash*), cinzas pesadas (*bottom ash*) e resíduos provenientes da dessulfurização do gás da chaminé (FGD). As propriedades e as características físicas, químicas e mineralógicas desses resíduos dependem de vários fatores, como a qualidade do carvão e do tipo e da eficiência do sistema de controle de emissões (ROCHA *et al.*, 1999; MUDGAL *et al.*, 2011; SABEDOT *et al.*, 2011).

A cinza leve é um resíduo de granulometria fina que resulta da combustão do carvão

pulverizado, apresentando em geral propriedades pozolânicas. Algumas pesquisas têm sido desenvolvidas visando um uso mais nobre para esse tipo de cinza, como a proposição de sua utilização em substituição parcial do cimento Portland na forma de fíler (HARDJITO e RANGAN, 2005), como material geopolimérico (LIVI, 2015) ou na pavimentação, como base e sub-base de pavimentos flexíveis (NARDI, 1975; BARROS, 2015; VASCONCELOS, 2016). Já as cinzas pesadas são produzidas a partir da aglomeração de partículas semifundidas que se depositam no fundo das caldeiras. Após processamento, com diminuição do tamanho das partículas, essas cinzas podem se transformar em material pozolânico, podendo ser utilizadas em diversas aplicações, como na produção de blocos de concreto (HOLMES *et al.*, 2016) e como camada de base na construção de estradas (GHAFOORI e BUCHOLC, 1997; LEANDRO, 2005; LOPES, 2011).

A utilização de resíduos na pavimentação é uma tendência mundial. De um modo geral, observa-se uma deficiência, em quantidade e qualidade, de materiais convencionais utilizados em camadas que compõem os pavimentos, de forma que a busca de novas alternativas para compô-los é imperativa. O mercado rodoviário, com seus recursos naturais cada vez mais escassos e sua capacidade de assimilação de grandes volumes de materiais, está em uma posição importante para fornecer soluções seguras e econômicas para emprego de resíduos industriais (GHAFOORI e BUCHOLC, 1996). Rohde *et al.* (2006) reforçam que a aplicação de cinzas na pavimentação se difundiu muito desde a década dos anos 60, sendo objeto de vários estudos nacionais e internacionais realizados (NARDI, 1975; DAWSON *et al.*, 1993; ROHDE *et al.*, 2006; LOPES, 2011; BARROS, 2015; VASCONCELOS, 2016).

Na concepção de novos materiais para pavimentação, torna-se necessária uma avaliação inicial dos seus riscos ambientais. Chies *et al.* (2003) destacam que, apesar de vantagens técnicas e econômicas da utilização de carvão mineral perante as demais alternativas energéticas atualmente disponíveis, a exploração do carvão gera problemas ambientais, decorrentes da geração de significativas quantidades de resíduos inorgânicos que, quando depositados inadequadamente, podem gerar impactos significativos no solo e nas águas subterrâneas, devido à lixiviação de elementos tóxicos presentes em sua composição química. Destaca-se que as cinzas de carvão mineral são resíduos, cujo potencial poluidor é dependente das concentrações dos elementos tóxicos e do grau de solubilização deles no ambiente natural (LOPES, 2011; CAMARA, 2011). A problemática da destinação final de cinzas de carvão assume maiores proporções à medida que se observa o avanço contínuo dos critérios de controle por parte das agências ambientais, dispendo de legislação ambiental cada vez mais austera, que responsabilizam o gerador pela destinação dos resíduos gerados.

A técnica de estabilização química é mundialmente utilizada visando adequar as propriedades físico-químicas e mecânicas dos materiais tradicionais e de resíduos aos requisitos técnicos exigidos para sua aplicação. No entanto, a estabilização química com cimento ou cal também se destaca no âmbito ambiental, tornando-se uma excelente alternativa de tratamento de solos ou resíduos contaminados.

Como a utilização de resíduos sólidos em qualquer área, inclusive na pavimentação, está condicionado ao potencial poluidor do mesmo, o estudo do comportamento mecânico desses materiais não pode estar dissociado de uma análise ambiental dos mesmos. A tecnologia de encapsulamento de contaminantes, também conhecida como método estabilização/solidificação, vem se tornando uma excelente alternativa para tratar resíduos

perigosos e gerenciá-los de forma segura e eficaz, melhorando suas propriedades físicas e suas características toxicológicas (OLIVEIRA *et al.*, 2003). Segundo Wiles (1987) o processo de encapsulamento consiste na adição de um agente cimentante, como o cimento ou cal, objetivando propiciar uma menor solubilização de contaminantes existentes em um solo ou resíduos industriais.

Diante deste contexto, Brito *et al.* (2004) reforçam a necessidade de se avaliar no Brasil a tecnologia de encapsulamento, de forma que possam nortear a disposição de resíduos sólidos industriais, estabilizados e solidificados, em aterros sanitários. Ressalta-se que no contexto rodoviário, os materiais estão dispostos de forma compactada e sujeitos a tensões de confinamento e pouco se encontra na literatura informações quanto à influência da compactação ou quantidade de estabilizante necessário para um correto encapsulamento (ROJAS, 2009).

Tendo-se como desafio motivador contribuir para o estudo do comportamento de solos e misturas estabilizadas à base de cinzas para fins de pavimentação, procurou-se desenvolver neste estudo uma investigação em uma usina termelétrica localizada na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) para que os resíduos de carvão produzidos fossem melhores estudados e aplicados em camadas granulares de pavimentos. Nesta termelétrica, durante anos as cinzas oriundas do processo de queima do carvão foram depositadas em um módulo de armazenagem, denominado de Módulo I, que já atingiu toda sua capacidade (315 mil m³ de volume). Este estudo motiva-se também em avaliar aspectos ambientais dos materiais e das misturas idealizadas, com enfoque no contexto rodoviário, propondo metodologias de análises ambientais em consonância com o estado compactado e confinado dos materiais em camadas de pavimentos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizados três materiais: cinzas de carvão mineral, solo regional e cal hidratada. As cinzas foram provenientes de uma usina termelétrica, localizada no município de São Gonçalo do Amarante, na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), no estado do Ceará. As cinzas utilizadas foram obtidas do Módulo I de armazenagem da termelétrica, em função do montante de material armazenado e da condição de capacidade máxima de armazenamento.

O solo utilizado foi proveniente de uma jazida já parcialmente explorada, localizada no município de Caucaia (RMF), distante cerca de 20 km da termelétrica investigada. O critério de escolha dessa jazida foi a maior proximidade com a termelétrica e o potencial ainda significativo para exploração. O solo é do tipo A-2-4 segundo classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASTHO) de solos. O material é um solo granular, do tipo areia-siltosa, com 35% de material passante na peneira nº 200. A cal utilizada para estabilização química das misturas foi uma cal hidratada calcítica comercial e classificada como do tipo CH-1, obtida de uma empresa localizada no estado do Ceará.

Para uma melhor caracterização dos materiais em estudo e visando-se atingir os objetivos pré-estabelecidos se adotou uma sequência metodológica composta de três etapas.

2.1. Primeira etapa do programa experimental

Na primeira etapa idealizou-se realizar misturas, realizadas em laboratório, das Cinzas (C)

com Solo (S) regional e com adição de cal na proporção de 5%, conforme Tabela 1. As cinzas a serem utilizadas nesta etapa foram provenientes do Módulo 1 de armazenagem. Todas as misturas foram submetidas aos ensaios Proctor, Índice de Suporte Califórnia (ISC), Expansão, Módulo de Resiliência (MR), com base na norma DNER-ME 134/2010 e Resistência à Compressão Simples (RCS), conforme DNER-ME 180/1994.

Todos os ensaios foram realizados na energia de compactação intermediária. Em misturas com presença de cal, os ensaios foram realizados para tempos de cura de 0, 7, 14 e 28 dias. Os corpos de prova (CPs) em cura ficaram em ambiente climatizado, envoltos por filme plástico. Nos ensaios de RCS a ruptura foi realizada 24 h após imersão em água, conforme disposto em norma.

Tabela 1: Misturas idealizadas para o estudo

| MISTURAS | Solo (%) | Cinza (%) | Cal (%) | COMPOSIÇÃO |
|------------------|----------|-----------|---------|----------------------|
| M1 (solo) | 100 | 0 | 0 | 100S + 0C |
| M2 (cinza) | 0 | 100 | 0 | 0S + 100C |
| M3 (solo+ cinza) | 50 | 50 | 0 | 50S + 50C |
| M4 (M2 + 5CAL) | 0 | 95 | 5 | 95C + 5Cal |
| M5 (M3 + 5CAL) | 47,5 | 47,5 | 5 | 47,5S + 47,5C + 5Cal |

2.2. Segunda etapa do programa experimental

A segunda etapa do programa experimental consistiu na realização de análises ambientais nas misturas que continham em sua composição resíduos de termelétrica (M2, M3, M4 e M5). O objetivo principal desta etapa foi classificar ambientalmente as misturas analisadas e verificar como os processos de compactação e de estabilização química atuam no encapsulamento de contaminantes.

Nesta etapa foram realizados nas misturas ensaios tradicionais de lixiviação e solubilização, conforme as normas NBR 10005/2004 e NBR 10006/2004, respectivamente. Além disso, objetivando identificar o processo de compactação como possível encapsulante de resíduos, realizou-se um ensaio de lixiviação em amostras no estado compactado. Como não existe metodologia brasileira normatizada, os procedimentos para esse ensaio foram realizados com base em ASTM (1995). Essa última é uma metodologia de ensaio de Lixiviação em Coluna que busca simular as condições reais de compactação em campo.

Como não se dispunha dos equipamentos recomendados pela norma supracitada, foi utilizado um permeâmetro, usualmente empregado para determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. O permeâmetro é constituído de um cilindro metálico com aproximadamente 15 cm de diâmetro e 13 cm de altura, composto de uma tampa inferior e uma superior. A tampa inferior é dotada de um orifício que permite a saída do extrato lixiviado. A tampa superior possui dois orifícios, um que permite o controle da saída de ar do cilindro e o outro que é acoplado a uma bureta de vidro graduada, possibilitando a entrada de água dentro do sistema.

Nesse ensaio, uma camada da amostra foi compactada dentro do cilindro do permeâmetro,

com cerca de 3 a 5 cm de altura, na energia de compactação intermediária. Uma fina camada de brita foi colocada sobreposta à amostra, de forma a evitar um brusco contato da água com o material ensaiado. O corpo-de-prova foi, então, saturado de água. Após a saturação, adicionava-se água no permeâmetro, por meio da bureta de vidro acoplada ao cilindro. Deixava-se percolar essa água, obtendo-se um extrato lixiviado através do orifício localizado na tampa inferior do cilindro. A Figura 1 ilustra as etapas de realização desse ensaio. O líquido lixiviado obtido foi, então, filtrado, para poder ser analisado em um cromatógrafo iônico.



Figura 1: Ensaio de lixiviação em amostra compactada

2.3. Terceira etapa do programa experimental

Esta etapa metodológica objetivou a elaboração de um projeto estrutural de pavimentos com o uso de cinzas de carvão em camadas granulares. Com base em todo programa experimental supracitado, selecionaram-se as misturas mais adequadas, dentro de critérios técnicos e ambientais, para serem utilizadas em camadas de base e sub-base de um pavimento flexível.

Assim, nesta etapa se realizou o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos teóricos, utilizando-se as melhores misturas investigadas em camadas granulares. O dimensionamento foi realizado pelo método mecanístico empírico, utilizando-se o *software* Medina. O método do DNIT é essencialmente empírico e bastante usado na área rodoviária. Entretanto, tem se verificado nos últimos anos um rompimento prematuro da malha que pode estar associado à questão da repetição das aplicações das cargas, como informado por Medina e Motta (2005).

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Primeira etapa do programa experimental

As cinzas foram classificadas, em relação aos limites de consistência como não plásticas, com densidade real de 2,44. O solo apresentou uma densidade de 2,65 e o índice de plasticidade foi 7%. O solo (M1) foi classificado, pela AASTHO, como uma areia fina A-2-4 e a cinza misturada (M2) como material silte-argiloso do tipo A-4. Os resultados da caracterização

física do solo (M1) e da cinza homogeneizada (M2) estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados da caracterização física do solo e da cinza

| Amostras | Pedregulho (%) | Areia (%) | | | Silte e Argila (%) | ρ_s (g/cm ³) | LL (%) | IP (%) |
|----------|----------------|-----------|-------|------|--------------------|-------------------------------|--------|--------|
| | | Grossa | Média | Fina | | | | |
| M1 | 0 | 0 | 4 | 82 | 14 | 2,65 | 25 | 7 |
| M2 | 10 | 7 | 6 | 7 | 70 | 2,40 | NL | NP |

As curvas de compactação Proctor das misturas estão dispostas na Figura 2. É possível verificar que, em geral, houve acréscimo da umidade ótima ($h_{ót}$) das misturas em função do aumento do teor de cinza. Isso se deve, principalmente, ao fato das cinzas serem mais siltosas e argilosas e também em função da estrutura porosa intrínseca das cinzas, absorvendo maiores quantidades de água. Na mesma figura, percebe-se diminuição da massa específica seca ($\gamma_{smáx}$) com o aumento do teor de cinza, confirmando as diferenças observadas para a densidade real dos grãos entre a cinza homogeneizada e o solo natural. Os resultados estão em consonância com os observados por outros autores (Leandro, 2005; Lopes, 2011; Barros, 2015).

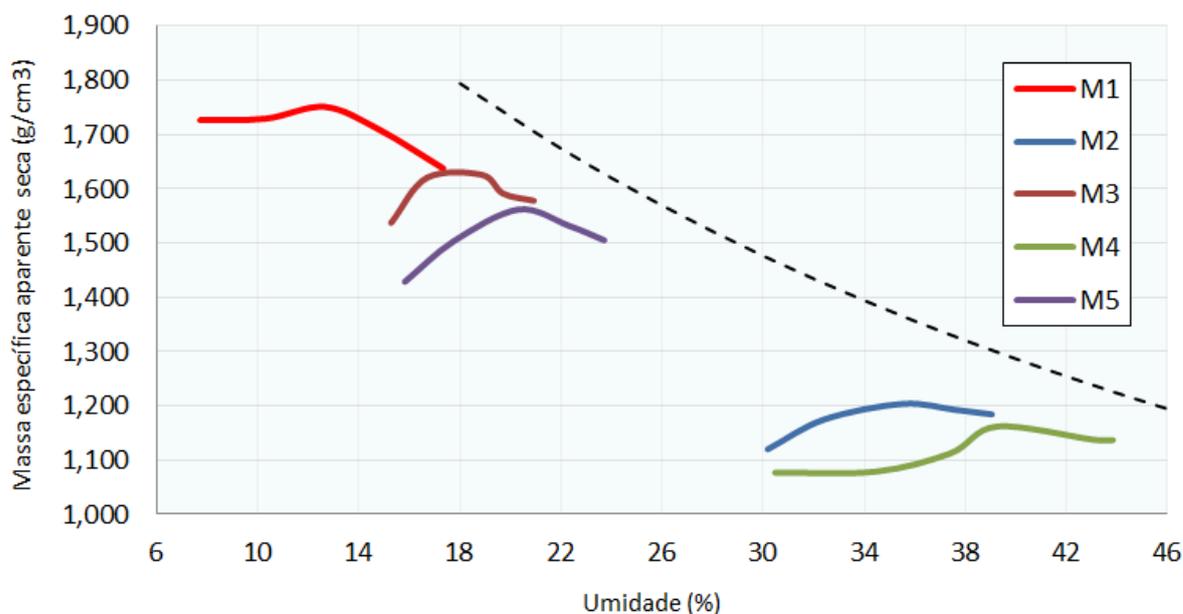


Figura 2: Curva de Proctor das misturas preparadas

Na Tabela 3 é possível visualizar os resultados dos ensaios de ISC, expansão, MR e RCS das misturas idealizadas sem efeito de cura e na presença de cal com cura de 0, 7, 14 e 28 dias.

Com relação ao ensaio de MR, constatou-se 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 valores de MR para a mistura granulométrica M3 foram intermediários entre os das misturas M1 e M2. O efeito da adição de cal também foi benéfica, melhorando o comportamento resiliente dos materiais à medida que se aumentam o teor de cal e os tempos de cura.

Tabela 3: Resultados dos ensaios mecânicos das misturas idealizadas

| Misturas | ISC (%) | E (%) | Parâmetros do MR | | | | MR médio (MPa) | RCS (MPa) |
|--------------|---------|-------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
| | | | K ₁ | K ₂ | K ₃ | R ² | | |
| M1 (solo) | 20 | 0 | 139,3 | -0,269 | -0,538 | 0,78 | 161 | 0 |
| M2 (cinza) | 4 | 1,37 | 133,5 | 0,351 | -0,343 | 0,53 | 111 | 0 |
| M3 (M1+ M2) | 21 | 0,95 | 16,79 | 0,062 | -1,162 | 0,68 | 149 | 0 |
| M4 (0 dias) | 153 | 0,74 | 167,6 | -0,444 | -0,087 | 0,37 | 501 | 0,0 |
| M4 (7 dias) | 246 | 0 | 91,42 | -0,101 | -0,731 | 0,59 | 902 | 2,0 |
| M4 (14dias) | 234 | 0 | 260,7 | 0,106 | 0,089 | 0,52 | 1305 | 2,2 |
| M4 (28 dias) | 250 | 0 | 1430 | 0,456 | -0,405 | 0,47 | 1149 | 3,2 |
| M5 (0 dias) | 258 | 1,5 | 149,2 | -0,065 | -0,513 | 0,75 | 496 | 0,0 |
| M5 (7 dias) | 370 | 0 | 1943,0 | 0,397 | -0,200 | 0,66 | 698 | 2,7 |
| M5 (14 dias) | 370 | 0 | 647,1 | 0,281 | 0,230 | 0,58 | 849 | 4,5 |
| M5 (28 dias) | 370 | 0 | 318,38 | 0,114 | 0,0921 | 0,52 | 1007 | 5,0 |

Observa-se, na Tabela 3, que a cinza (M2) apresentou um ISC baixo (4%). Para a mistura M3, o ISC obtido foi de 21%. As misturas com a cal (M4 e M5) apresentaram altos ISCs, todos acima de 100%. Em tempo de cura imediato, os CPs no ensaio de ISC, após compactados tem que ficar imersos dentro de um cilindro metálico por 4 dias antes de serem rompidos. Durante esse período de imersão as reações ocorreram rapidamente, de forma que altas resistências puderam ser observadas com tempo de cura imediato. Sabe-se que o ensaio ISC não deve ser usado para analisar o comportamento de misturas estabilizadas quimicamente para dimensionamento de pavimentos. Entretanto, a ideia de se realizar o ensaio foi somente para verificar o incremento dessa propriedade quando se emprega um estabilizante e o tempo de cura.

De acordo com Barenberg e Thompson (1976) existem dois tipos diferentes de reações que ocorrem quando a cal e a cinza são misturadas com solo. O primeiro tipo é entre a cal e os argilo-minerais do solo, que por meio da troca catiônica e aglomeração de partículas argilosas do solo ocorre a formação de Ca⁺² livres e posteriormente, a formação de produtos cimentantes. Assim, quanto mais elevado for o teor de cal maior a troca catiônica e maior a resistência do material. O outro tipo de reação é entre a cal e a cinza, mecanismo complexo que estabiliza o material por meio da formação de silicatos de cálcio hidratado e aluminatos hidratados de cálcio. A reação crítica é entre o hidróxido de cálcio e os minerais de alumina e sílica presentes na cinza, produzindo compostos com propriedades cimentícias. Essas reações ocorrem com o tempo, o que justifica o acréscimo de resistência dos materiais com o aumento do tempo de cura. Outros estudos comprovam os acréscimos de resistência com o aumento do teor de cal e do tempo de cura (Nardi, 1975; Leandro, 2005; Lopes, 2011; Barros, 2015).

No ensaio de RCS os CPs tem que ser imersos em contato direto com a água, sem o cilindro metálico, por 24 h. Devido à baixa coesão inicial das misturas, nas primeiras horas de imersão os CPs, com tempo de cura imediato, não resistiram à imersão. Little (1995) indica que os valores de RCS mínimos exigidos pelo *Illinois Highway Department* para o uso de misturas de solo-cal em camadas de base é de 1,034 MPa. Assim, as misturas M4 e M5 estão aptas, por esse critério, para uso em camadas de base.

4.3. Segunda Etapa do Programa Experimental

Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização estão apresentados na Tabela 4, constando as concentrações dos parâmetros inorgânicos nos extratos lixiviados e solubilizados. Conforme a NBR 10005/2004, no ensaio de lixiviação quando um ou mais parâmetros do lixiviado estiverem acima dos valores máximos permitidos (VMP), a amostra é classificada como Resíduo Classe I (Perigoso). Observa-se que nenhuma mistura ultrapassou o valor máximo permitido dos parâmetros analisados. Então, todas são classificadas como amostras não perigosas, aptas para uso na pavimentação do ponto de vista ambiental.

No que se refere aos ensaios de solubilização, conforme a NBR 10006/2004 quando um ou mais parâmetros do extrato solubilizado estiverem acima dos valores máximos permitidos (VMP), a amostra é classificada como Resíduo Classe II-A (não inertes). Foi observado que as amostras foram classificadas como materiais não inertes (Classe II-A), por apresentarem concentrações acima do valor máximo permitido de cromo. Lopes *et al.* (2015) e Barros (2015) também classificaram as cinzas volantes estudadas como materiais Classe II-A. Segundo Lopes *et al.* (2015) a classificação das cinzas em resíduo não inerte não reprova sua utilização na pavimentação, desde que no ensaio de lixiviação, que representa o potencial de percolação e de infiltração das águas das chuvas no solo, todos os parâmetros analisados encontrem-se dentro dos limites permitidos.

Tabela 4: Resultados ambientais de lixiviação e solubilização para as misturas investigadas

| Concentração (ppm) | LIXIVIAÇÃO | | | | | SOLUBILIZAÇÃO | | | | |
|-------------------------------|------------|--------|-------|-------|-----------|---------------|--------|-------|-------|-----------|
| | M2 | M3 | M4 | M5 | VMP (ppm) | M2 | M3 | M4 | M5 | VMP (ppm) |
| F ⁻ | 0,85 | 0,48 | 0,56 | 0,44 | 150,00 | <LD | 2,24 | 0,29 | 2,91 | 1,50 |
| Cl ⁻ | 29,41 | 18,58 | 15,9 | 27,88 | - | 9,44 | 57,30 | 9,57 | 24,65 | 250,00 |
| Br ⁻ | <LD | <LD | 5,30 | 40,50 | - | <LD | 18,28 | <LD | 47,18 | - |
| NO ₃ ⁻ | 1,66 | <LD | 4,52 | 7,69 | - | <LD | 22,70 | 1,24 | 3,82 | 10,00 |
| PO ₄ ³⁻ | 2,89 | 2,67 | 5,83 | 7,72 | - | <LD | 10,59 | 2,43 | <LD | - |
| SO ₄ ²⁻ | 1841 | 1132,9 | 569,9 | | - | 76,26 | 2231,0 | 242,5 | 212,1 | 250,00 |
| Pb ⁺² | 0,41 | <LD | <LD | <LD | 1,00 | 0,29 | 0,32 | <LD | 0,17 | 0,01 |
| Zn ⁺² | <LD | <LD | <LD | <LD | - | <LD | <LD | <LD | <LD | - |
| Cr ⁺² | 0,16 | 0,15 | 0,18 | 0,14 | 5,00 | 0,07 | 0,13 | 0,10 | 0,09 | 0,05 |
| Fe | 0,02 | 0,05 | <LD | <LD | - | <LD | 0,10 | <LD | <LD | 0,30 |
| Cu ⁺² | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | - | 0,12 | 0,13 | <LD | <LD | 2,00 |
| Ni | 0,13 | 0,06 | 0,12 | 0,10 | - | 0,16 | 0,21 | 0,04 | 0,15 | - |
| Cd ⁺² | <LD | <LD | 0,01 | <LD | 0,50 | <LD | <LD | <LD | <LD | 0,01 |
| Co | <LD | <LD | <LD | <LD | - | <LD | <LD | <LD | <LD | - |
| Mn | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | - | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,10 |

Knop (2013) relatou que alguns fatores interferem nas concentrações dos contaminantes, como o tempo de cura e o teor de estabilizante químico. Observou-se, conforme Tabela 4, que a influência da estabilização química na concentração dos estabilizantes não apresentou um

padrão. Em alguns casos a adição de cal promoveu uma diminuição nas concentrações de íons e em outros ocorreu o efeito contrário. A adição de 5% de cal pode ter efeitos consideráveis nas propriedades mecânicas das misturas, mas pode ser um teor baixo para promover o encapsulamento de contaminantes. Ressalte-se aqui que os ensaios foram realizados com cura imediata e acredita-se que talvez seja necessário realizar o ensaio considerando uma cura mínima de 7 dias para que haja tempo para a ocorrência das reações químicas.

Os resultados dos extratos lixiviados em amostras compactadas (simbolizadas pela letra “C”) estão representados na Tabela 5. Nesta tabela também constam, de forma a facilitar a comparação, as concentrações dos mesmos parâmetros obtidos nos ensaios de lixiviação em amostra solta, conforme NBR 10005/2004.

Tabela 5: Comparação do lixiviado das amostras no estado solto e no estado compactado

| Concentração (ppm) | M2 | M2C | M3 | M3C | M4 | M4C | M5 | M5C | VMP (ppm) |
|-------------------------------|----------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|-----------|
| F ⁻ | 0,847 | 2,914 | 0,482 | 0,729 | 0,559 | 1,870 | 1,136 | <LD | 150 |
| Cl ⁻ | 29,406 | 44,64 | 18,58 | 0,097 | 15,18 | 292,46 | 327,878 | 32,640 | - |
| Br ⁻ | <LD | 47,18 | <LD | <LD | 5,295 | 19,940 | 40,496 | 17,770 | - |
| NO ₂ ⁻ | <LD | <LD | <LD | <LD | 10,52 | <LD | <LD | <LD | - |
| NO ₃ ⁻ | 1,655 | 3,82 | <LD | <LD | 4,518 | 17,933 | 7,687 | <LD | - |
| PO ₄ ⁻³ | 2,887 | <LD | 2,671 | <LD | 5,828 | <LD | 7,724 | <LD | - |
| SO ₄ ⁻² | 1841,363 | 212,1 | 1132,9 | 167,23 | 569,96 | 1199,92 | 162,219 | 869,802 | - |
| Pb ⁺² | 0,410 | 0,2 | <LD | 0,54 | <LD | 0,49 | <LD | 0,54 | 1 |
| Zn ⁺² | <LD | <LD | <LD | <LQ | <LD | <LD | <LD | <LD | - |
| Cr ⁺² | 0,161 | 0,175 | 0,146 | 0,208 | 0,176 | 0,192 | 0,141 | 0,208 | 5 |
| Fe | 0,017 | 0,965 | 0,045 | 0,061 | <LD | 0,026 | <LD | 0,061 | - |
| Cu ⁺² | 0,011 | 0,058 | 0,020 | 0,092 | 0,010 | 0,148 | 0,031 | 0,092 | - |
| Ni | 0,127 | 0,119 | 0,063 | 0,126 | 0,117 | 0,109 | 0,104 | 0,126 | - |
| Cd ⁺² | <LD | 0,003 | <LD | 0,031 | 0,014 | 0,034 | <LD | 0,031 | 0,5 |
| Co | <LD | <LQ | <LD | <LQ | <LD | <LD | <LD | <LD | - |
| Mn | 0,077 | 0,082 | 0,069 | 0,069 | 0,069 | 0,066 | 0,070 | 0,069 | - |

Observa-se que a influência do processo de lixiviação em amostras compactadas na concentração dos parâmetros não apresentou um padrão. Em alguns casos, a compactação resultou em uma diminuição nas concentrações de íons e em outros ocorreu o efeito contrário. Na mistura M3 a realização do procedimento em amostras compactadas teve um efeito considerável reduzindo as concentrações de praticamente todos os ânions analisados (à exceção da concentração de fluoreto). As concentrações de sulfato foram reduzidas em cerca de 9 vezes e as concentrações de fosfato e cloreto foram reduzidas para abaixo do limite de detecção do aparelho. Na mistura M2 (cinza) observou-se também uma redução em cerca de 9 vezes nos íons sulfatos. No entanto, nas misturas M4 e M5, os lixiviados obtidos nas amostras compactadas apresentaram um acréscimo na concentração de praticamente todos os parâmetros analisados.

Vários fatores podem interferir na concentração dos parâmetros inorgânicos dos extratos lixiviados. Na metodologia do ensaio de lixiviação normatizada, os procedimentos de ensaio são bem diferentes da metodologia proposta em amostras compactadas, uma vez que se exige o controle do pH, da temperatura e do tempo de obtenção do extrato lixiviado. O ensaio de lixiviação em amostras compactadas busca simular as condições reais de compactação e confinamento em campo, desta forma o pH, a temperatura e o tempo não são controlados. Além da compactação, todos esses fatores podem ter interferido nas concentrações obtidas dos parâmetros inorgânicos.

4.3. Terceira Etapa do Programa Experimental

Nesta etapa utilizou-se o método mecanístico-empírico para dimensionar o pavimento para volume de tráfego de N igual a 10^7 . No dimensionamento adotou-se inicialmente a seguinte estrutura: subleito local (CBR de 14% que caracteriza os solos da região de termelétrica investigada, conforme Vasconcelos, 2018), sub-base (mistura M3) e uma base (mistura M4). A escolha da mistura M3 como sub-base ocorreu por ela atender aos parâmetros mecânicos mínimos de resistência e expansão, apresentar cinzas em sua composição, de forma que pode contribuir para um maior reaproveitamento desses resíduos, além de, do ponto de vista econômico, ser vantajosa em relação às misturas com a cal (devido ao alto custo aquisitivo da cal). A escolha da mistura M4 como base ocorreu por ela atender aos parâmetros mínimos de resistência e apresentar elevado percentual de cinzas em sua composição. Para revestimento, adotou-se Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ).

Como dados de entrada no programa *Medina* se considerou para revestimentos de concreto asfáltico um coeficiente de Poisson de 0,25 e módulo de resiliência constante de 3000 MPa. Para as camadas de base e sub-base, o valor de coeficiente de Poisson foi de 0,35 e o MR foi por base no modelo composto para cada mistura, disposto na Tabela 3. Foi considerada uma vida de projeto de 10 anos.

Os valores das espessuras para cada camada em função dos níveis de solicitação N , conforme o método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos estão dispostos na Figura 3.

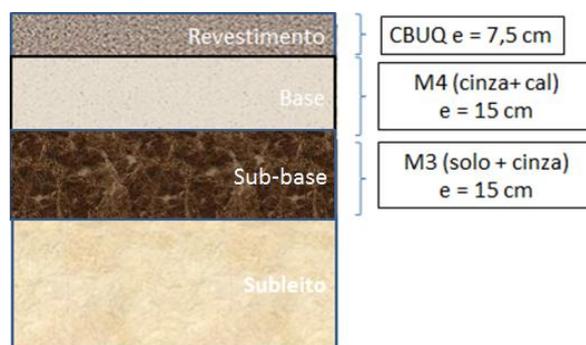


Figura 3: Estrutura de pavimento dimensionada

A estrutura dos teve bons desempenhos quando analisada no programa, para uma vida de projeto de 10 anos, apresentando reduzidos valores de trincamento por fadiga e afundamentos de trilhas de roda.

4. CONCLUSÕES

Este estudo visou a proposição de uma solução para o reaproveitamento dos resíduos que estão depositados no Módulo I da termelétrica investigada. Por meio de análises mecânicas, a partir de parâmetros de MR, foi observado que utilização das misturas M3 (50% solo + 50% cinza) e M4 (95% cinza + 5% CAL) na proposição de projetos estruturais de pavimentos é viável sob viés técnico e ambiental. Observou-se que todas as amostras foram classificadas como resíduo Classe II-A (Não Inerte), sendo aptas para uso na pavimentação do ponto de vista ambiental.

Concluiu-se que a influência da estabilização química na concentração dos parâmetros não apresentou um padrão. Em alguns casos, a adição de cal promoveu uma diminuição nas concentrações de íons e em outros ocorreu o efeito contrário, o que indica que 5% de cal pode ser um teor baixo para promover o encapsulamento de contaminantes.

Foi proposta uma estrutura de pavimento com a utilização de cinzas em camadas de bases e/ou sub-bases. A estrutura apresentou bons desempenhos quando analisadas à luz de análises mecânicas-empíricas, o que viabiliza a utilização das cinzas investigadas como materiais secundários ao mercado rodoviário.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro ao desenvolvimento deste trabalho, por meio de concessão de bolsa de estudo. Agradecem também Aneel (órgão regulador) e a Energia Pecém e Eneva pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2004a) *NBR 10005: Lixiviação de Resíduos – Procedimento*, Rio de Janeiro.
- ABNT (2004b) *NBR 10006: Solubilização de Resíduos – Procedimento*, Rio de Janeiro.
- Barenberg, E. e Thompson, M. R (1976) *Lime - Fly Ash - Stabilized Bases and Sub – Bases*. Transportation Research Board, Washington, n. 37, p. 66.
- Barros, K. S (2015) *Estudo de Cinzas Volantes de uma Termelétrica da RMF para Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos*. Dissertação de Mestrado. UFC. Fortaleza, CE.
- Brito, A. L. F.; Soares, S. R (2004) *Necessidade de normas e critérios para avaliar e dispor resíduos estabilizados por solidificação*. I Congresso Interamericano de Resíduos Sólidos Industriais, Porto Alegre.
- Camara, L.D (2011) *Estudo do comportamento de materiais alternativos e suas aplicações na engenharia geotécnica. Iniciação Científica*. (Graduanda em Engenharia Ambiental) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Chies, F.; Silva, N. I. W. e Zwosnok, O. (2003) Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão. In: Rocha, J.C. & John, U.M. Coleção Habitare, Porto Alegre. v. 4, p. 218-239.
- Dawson, A. R., & Nunes, M. C. M (1993) *Some British Experience of the Behavior of Furnace Bottom Ash and Slate Waste for Pavement Foundations*. Symposium Proceedings - Recovery and Effective Reuse of DCBRarded Materials and Byproducts for Construction of Highway Facilities, United Kingdom .
- Ghafoori, N., Buchol, C. J (1997) *Properties of High-Calcium Dry Bottom Ash Concrete*. ACI Materials Journal, v. 94, n. 2, p. 90-101.
- Hardjito, B., & Rangan, B. V (2005) *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Austrália.

- Holmes, N., O'malley, H., Cribbin, P., Mullen, H., & Keane, G (2006) *Performance of masonry blocks containing different proportions of incinerator bottom ash*. Sustainable Mater Technol, v. 8, p. 14-19.
- Leandro, R. P (2005) *Estudo laboratorial acerca da possibilidade de aproveitamento da cinza pesada de termelétrica em bases e sub-bases de pavimentos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Little, D. N (1999) *Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates*. Prepared for the National Lime Association. Volume 1: Summary of Findings.
- Livi, C. N., & Repette, W. L (2015) *Ligante geopolimérico produzido com cinza volante e hidróxido de sódio*. Ambiente construído, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 7-18.
- Lopes, L.S.E (2011) *Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de bases de pavimentos*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. RJ.
- Lopes, L. S. E. ; Malko, J.A.C.; Casagrande, M. D. T. e Motta, L.M.G (2015) *Análise do Comportamento de um Solo Estabilizado com Cinzas de Carvão Mineral para Aplicação em Camadas de Base de Pavimentos*. Revista Pavimentação, v. 36, p. 63-82.
- Medina, J., & MOTTA, L.M.G (2005) *Mecânica dos Pavimentos*. 2ª Edição. RJ.
- Mudgal, A; Negi, P; Sarkar, R (2013) *Utilization of Fly Ash Mixed With Lime in Pavement Sub-Base*, International Journal of Civil Engineering and Applications (IJCEA), Vol. 3, No. 02, pp. 22-25.
- Nardi, J. V (1975) *Estabilização de areia com cinza volante e cal – Efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- Oliveira, D. M., Castilhos Jr. Meiotello, E (2003) *Avaliação da solidificação/estabilização de borras oleosas utilizando caulinita e vermiculita como materiais adsorventes*. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinville.
- Rohde, G. M.; Zwonok, O.; Chies, F. e Silva, N. I. W (2006) *Cinzas de carvão fóssil no Brasil – Aspectos técnicos e ambientais*. CIENTEC. v.1. Porto Alegre.
- Rocha, J. C.; Malik, C.; Pozzobon, C.; Maia, M. S.; Magri, L. e Xavier, S. M. T (1999). *Reaproveitamento das cinzas pesadas do Complexo Jorge Lacerda na elaboração de materiais de construção: aspectos tecnológicos e ambientais*. In: XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Paraná.
- Sabedot, S.; Sundstron M.G.; Böer SC; Sampaio CH.; Dias RGO (2011) *Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas*. In: *Anais do III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral*; Gramado, Brasil.
- Vasconcelos, S. D (2016) *Avaliação da Heterogeneidade de Cinzas de Carvão Mineral Advindas da Termelétrica Energia Pecém e sua Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos*. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Wiles, C.C (1987) *A review of solidification/stabilization technology*. Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, v. 14. p. 5-21.

Sarah Denise Vasconcelos (sarah.denise@hotmail.com)

Francisco de Assis Franco Vieira (assisfranco@det.ufc.br)

Suely Helena de Araújo Barroso (suely@det.ufc.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Campus do Pici, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.