

Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica na construção de pavimentos

Sarah Denise Vasconcelos¹, Suelly Helena de Araújo Barroso², Francisco de Assis Franco Vieira³
Helmer Boris Fernandes Almeida⁴

¹Universidade Federal do Ceará, Brasil, sarah.denise@hotmail.com

²Universidade Federal do Ceará, Brasil, suelly@det.ufc.br

³Universidade Federal do Ceará, Brasil, assisfranco@det.ufc.br

⁴Universidade Regional do Cariri, Brasil, boris251075@gmail.com

Recebido:

17 de fevereiro de 2018

Aceito para publicação:

18 de fevereiro de 2019

Publicado:

31 de agosto de 2019

Editor de área:

Kamilla Vasconcelos

Palavras-chaves:

Pavimentação;
Cinzas;
Sustentabilidade.

Keywords:

Paving,
Ashes,
Sustainability.

DOI:10.14295/transportes.v27i2.1592

**RESUMO**

O aproveitamento de rejeitos produzidos em centrais termelétricas pode representar uma excelente alternativa para construção de pavimentos sustentáveis. O estudo proposto tem por objetivo avaliar a utilização de cinzas de carvão provenientes de uma termelétrica, localizada na Região Metropolitana de Fortaleza, em camadas dos pavimentos. Inicialmente foram caracterizadas as cinzas que estavam dispostas em um módulo da termelétrica em estudo e foi comprovado que os materiais, além de heterogêneos, não tinham comportamento mecânico satisfatório. Sendo assim, foram produzidas em laboratório misturas de cinza-solo-cal submetidas aos diferentes ensaios (compactação, módulo do resiliência, deformação permanente, resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral) de interesse na pavimentação. Posteriormente, foram dimensionadas pelo método mecanístico-empírico estruturas de pavimentos com as misturas que apresentaram resultados mecânicos mais satisfatórios. Concluiu-se que o reaproveitamento dos resíduos da termelétrica na pavimentação representa uma alternativa viável para a construção de pavimentos econômicos e auto-sustentáveis.

ABSTRACT

The use of residues produced in thermoelectric plants can represent an alternative for the construction of economical and sustainable pavements. The objective of this research was to evaluate the use of coal ashes from a thermoelectric plant, located in the Metropolitan Region of Fortaleza, in layers of pavements. Initially, the ashes that were arranged in a module of the thermoelectric plant were characterized and it was proved that the materials, besides heterogeneous, had no satisfactory mechanical behavior. Thus, it was produced laboratory mixtures of ash-soil-lime and they were subjected to different test (compaction, resilience module, permanent deformation, simple compression resistance and tensile strength by diametral compression) of interest in the paving area. Subsequently, pavement structures were designed using a mechanistic-empirical method with the mixtures that presented more satisfactory mechanical results. It was concluded that the reutilization of thermoelectric residues in paving represents potential alternative for construction of economical and self-sustainable pavements.

1. INTRODUÇÃO

Em centrais termelétricas a geração de energia elétrica utilizando como combustível fóssil o carvão mineral gera importantes resíduos sólidos, como cinzas leves (*fly ash*) e cinzas pesadas (*bottom ash*). Dada a demanda atual por sistemas seguros de disposição final para rejeitos produzidos, é de grande interesse transformar resíduos gerados em centrais termelétricas em produtos aplicáveis em processos construtivos.

As cinzas volantes são materiais sílico-aluminosos, que resultam da combustão do carvão pulverizado. Em geral, essas cinzas são materiais pozolânicos por apresentarem potencial de reação com a cal em presença de água, originando compostos hidratados com propriedades aglomerantes (Pinto, 1971). Ao sofrer a combustão o carvão gera também cinzas pesadas, produzidas a partir da aglomeração de partículas semifundidas que se depositam no fundo das caldeiras.

A utilização de resíduos na composição de novos materiais de construção 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 por novas alternativas para compô-los é imperativa. Em âmbito internacional, vários estudos laboratoriais mostraram que cinzas volantes podem ser utilizadas para melhoria das propriedades geotécnicas de solos, possibilitando seu emprego no setor rodoviário, principalmente como camadas de bases ou sub-bases de pavimentos (Bergeson *et al.*, 1985; Ferguson, 1993; Edil *et al.*, 2002; Arora e Aydilek, 2005; Lav, Lav e Goktepe, 2006; Sahu *et al.*, 2017).

No Brasil, desde a década dos anos 70 estudos comprovam a viabilidade do reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na pavimentação (Nardi, 1975; Leandro, 2005; Farias, 2005; Lopes, 2011; Barros, 2015). Nardi (1975) estudou o comportamento de misturas solo + cinza, quando adicionadas a compostos aglomerantes, como o cimento e a cal. Os estudos desenvolvidos pelo autor foram complementados por Marcon (1977), que comprovou a viabilidade da estabilização de areia com cinza volante, utilizando a cal como aglutinante. Marcon (1977) realizou para três diferentes misturas ensaios de durabilidade, de módulo de elasticidade estático e dinâmico e de resistência à compressão simples, concluindo que os materiais se mostraram aptos para serem empregados em camadas de base e sub-base de pavimentos. Farias (2005) e Leandro (2005) estudaram a aplicação de cinzas pesadas em camadas de pavimentos, observando que algumas misturas solo-cinza poderiam ser empregadas como camadas de sub-base.

Desta forma, há diversos estudos acerca do reaproveitamento de misturas de cinzas estabilizadas quimicamente em camadas de pavimentos. De acordo com Barendse e Thompson (1976) existem dois tipos diferentes de reações que ocorrem quando a cal e a cinza são misturadas ao solo. O primeiro tipo é entre a cal e os argilo-minerais do solo, que resulta na formação de Ca^{+2} livres e, posteriormente, a formação de produtos cimentantes. 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, produzindo compostos com propriedades cimentícias.

O estudo aqui apresentado visa desenvolver uma investigação local, no estado do Ceará, para os resíduos produzidos em uma termelétrica que gera diariamente cerca de 1300 toneladas de cinzas. 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 m^3 de volume). A problemática deste estudo se resume na limitação de áreas para armazenagem das cinzas na termelétrica investigada, nos altos custos para estocagem desses resíduos, na grande heterogeneidade dos resíduos dispostos nessa termelétrica e nos problemas ambientais oriundos da disposição inadequada desses rejeitos. Além disso, há um cenário de escassez de jazidas naturais cujas características se enquadrem nas especificações técnicas tradicionais para o uso em pavimentação.

Diante deste contexto, esta pesquisa se propõe a estudar a viabilidade, técnica e ambiental, do reaproveitamento de cinzas de termelétrica em projetos estruturais de pavimentos, visando-

se propor pavimentos tecnicamente viáveis e ambientalmente adequados. A proposição do reaproveitamento de cinzas em camadas de pavimentos foi por base em um amplo programa experimental, consolidando análises empíricas e mecanístico-empíricas mais modernas, em consonância com as disposições do método de dimensionamento nacional que se encontra na iminência de aprovação. Ademais, dado o avanço contínuo dos critérios de controle por parte das agências ambientais, os estudos foram complementados com avaliações ambientais realizadas em diferentes amostras do resíduo estudado, permitindo uma análise acerca do seu potencial de percolação e, conseqüentemente, da sua periculosidade ao meio ambiente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizados três materiais: cinzas de carvão, solo e cal hidratada. As cinzas utilizadas foram coletadas no Módulo I da termelétrica investigada. O solo foi coletado em uma jazida distante de cerca de 20 km da termelétrica em estudo. A cal utilizada foi a hidratada do tipo CH-I. O programa experimental foi dividido em quatro etapas.

2.1. Primeira etapa do programa experimental

Para avaliar a heterogeneidade das cinzas dispostas no Módulo I da termelétrica investigada foi proposta uma malha sobre a superfície deste módulo, onde foram definidos 21 Pontos Amostrais (PA) superficiais (PA-1 a PA-21) e 11 Pontos em Profundidades (PP). A amostragem em profundidade foi executada utilizando-se 2 pontos de amostragem, PP-1 e PP-2. As localizações desses dois pontos dentro da malha são correspondentes as das amostras superficiais identificadas como PA-20 e PA-21, respectivamente. Para esses dois pontos foram executados furos e coletadas amostras a cada 1 m de profundidade, conforme se visualiza na Figura 1.

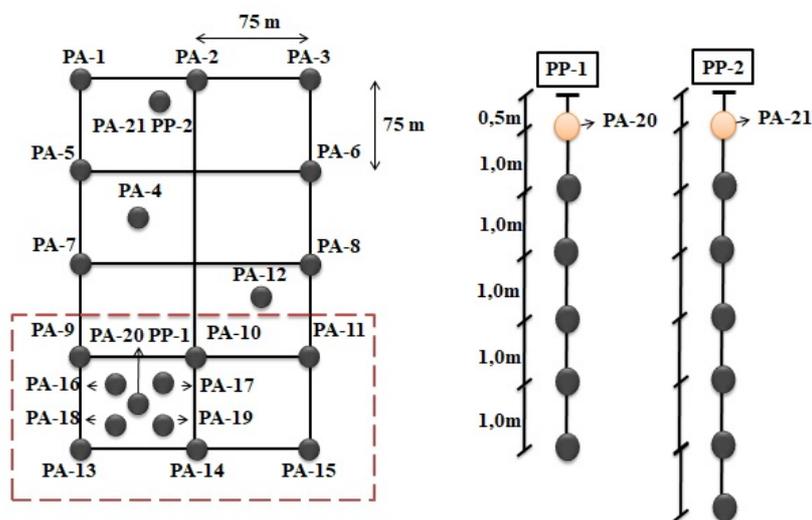


Figura 1: Plano de amostragem das cinzas

Para todas as amostras, realizaram-se ensaios de granulometria (DNER-ME 051/1994), limite de liquidez (DNER- ME 122/1994) e limite de plasticidade (DNER- ME 082/1994), ensaios de fluorescência de Raios-X e ensaios ambientais de solubilização (NBR 10006/2004) e de lixiviação (NBR 10005/2004). Além disso, foram realizados ensaios mecânicos de Proctor (DNER- ME 162/1994), CBR e expansão (DNER- ME 049/1994).

2.2. Segunda etapa do programa experimental

Diante da significativa heterogeneidade observada e dos resultados mecânicos e ambientais insatisfatórios para uso na pavimentação, tornou-se necessário realizar misturas solo-cinza-cal. Na segunda etapa, idealizou-se realizar misturas das Cinzas (C) com Solo (S) e com adição de cal em duas proporções (3% e 5%), conforme informações apresentadas na Tabela 1. Teores de cal entre 3% e 5% foram estudados também por Pinto (1971), Nardi (1975), Trichês *et al.* (2006), Rohde *et al.* (2006), Lopes (2011) e Barros (2015), justificando, assim, a escolha dos teores neste estudo.

Tabela 1: Misturas idealizadas para realização do programa experimental

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
M6 (M2 + 3CAL)	0	97	3	97C + 3Cal
M7 (M3 + 3CAL)	48,5	48,5	3	48,5S + 48,5C + 3Cal

Observa-se que as cinzas utilizadas nesta etapa foram provenientes da mistura de amostras dispostas na área pontilhada apresentada na Figura 1, gerando uma cinza mais homogeneizada. Assim, a cinza homogeneizada foi composta da mistura, realizada de forma manual, de 11 amostras, com igual proporção em massa. Foram selecionados esses pontos amostrais por apresentarem características de baixa periculosidade (com base nos ensaios ambientais) e de melhores resultados mecânicos de CBR e expansão.

Todas as 7 misturas, identificadas na Tabela 1, foram submetidas aos ensaios Proctor, ISC, Expansão, Módulo de Resiliência (MR), com base na norma DNER-ME 134/2010, Resistência à Compressão Simples (RCS), conforme DNER-ME 180/1994, e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), conforme DNER - ME 138/94, 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 e RTCD a ruptura foi realizada 24 h após imersão em água, conforme disposto em norma.

2.3. Terceira etapa do programa experimental

Antes de iniciar a terceira etapa foram selecionadas dentre as misturas estudadas aquelas que apresentavam melhores comportamentos mecânicos para emprego em camadas de base e sub-base de pavimentos. A terceira etapa do programa experimental objetivou estudar a deformação permanente nas misturas selecionadas, com base no método de ensaio triaxial de carga cíclica, normatizado pela norma europeia BS EN 13286-7: 2004, em que para cada par de tensão são aplicados 10.000 ciclos. O procedimento utilizado para moldagem dos corpos-de-prova e montagem do aparato de ensaio foi igual ao utilizado para ensaio de MR. No ensaio de DP, no entanto, não foi realizada a fase de condicionamento, pois todas as deformações permanentes devem ser contabilizadas na análise. O ensaio de DP foi realizado para uma tensão de confinamento de 40 kPa e tensões confinantes de 40, 80, 120 e 160 kPa.

2.4. Quarta etapa do programa experimental

Nesta etapa se realizou o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos teóricos, para diferentes volumes de tráfego, utilizando-se as melhores misturas investigadas em camadas de base e sub-base. Foi realizado um pré-dimensionamento pelo método empírico do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), que determina a espessura das camadas em função do número N (número de operações do eixo simples padrão com rodas duplas, pressão de 5,6 kg/cm² e carregamento de 8,2 tf) e do valor de ISC do subleito.

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). Também é conhecido que os métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos, baseados no conhecimento do MR, deverão entrar em vigor no Brasil ainda no final desta década. Assim, depois de realizado o pré-dimensionamento pelo método do DNIT, empregou-se análise mecanística dos pavimentos, cujo dimensionamento foi realizado com o auxílio do programa computacional SisPav (FRANCO, 2007).

Desta forma, as estruturas de pavimentos obtidas pelo método empírico foram analisadas no programa SisPav, à luz dos resultados de MR, de forma a verificar a presença de falhas, o percentual de danos críticos e a vida de projeto de um pavimento dimensionado pelo método do DNIT. Posteriormente, as espessuras das estruturas foram otimizadas no programa SisPav, de forma a se obter estruturas de pavimentos com espessuras ótimas, sem danos críticos excessivos, atendendo a vida de projeto estabelecida.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Primeira etapa do programa experimental

A ilustração da classificação ambiental das cinzas está representada na Figura 2. Observa-se que as amostras PA-2, PA-5, PA-7, PA-9, PA-12 e PP-2 (profundidade 1,5 m) foram classificadas como Resíduos Classe I (Perigosos), por apresentarem resultados acima dos valores máximos permitidos de fluoreto, chegando a um valor máximo de 341 mg/L, quando a norma (NBR 10004/2004) permite até 150 mg/L em ensaios de lixiviação. As demais amostras foram classificadas como resíduos de Classe II-A (Não Inerte), a partir da detecção de altas concentrações de sulfato (SO₄²⁻) no ensaio de solubilização. Essa classificação de cinzas também foi observada em outros estudos, como os de Rohde *et al.* (2006), Lopes (2011) e Barros (2015).

Lopes (2011) reforça que a classificação de resíduos como não inertes (Classe II-A) não inviabiliza sua utilização em camadas granulares de pavimentos, desde que no ensaio de lixiviação, que se propõe a representar a infiltração da água da chuva no solo, todos os parâmetros analisados estejam dentro dos limites permitidos. Desta forma, 18,75% das amostras, por serem classificadas como perigosas, são inviabilizadas para utilização em camadas granulares dos pavimentos. A periculosidade dessas amostras e a heterogeneidade entre elas podem ser justificadas pela própria forma de armazenagem desses resíduos, uma vez que as cinzas 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.

Todas as amostras de cinzas coletadas resultaram em Não Plásticas (NP) e foram classificadas pela AASTHO (*American Association of State Highways and Transportation Officials*) como

materiais silto-argilosos do tipo A-4. Vizcarra (2010) e Oliveira *et al.* (2011) também obtiveram em seus estudos essa caracterização física das cinzas. Leandro (2005) e Lopes (2011) reforçam que as cinzas leves e pesadas advindas da queima do carvão mineral são materiais que apresentam elevada variação granulométrica, no entanto, na maioria dos casos, apresentam características granulares, sendo um material não coesivo e, portanto, não plástico, com predominância dos grãos com tamanho de areia e silte.

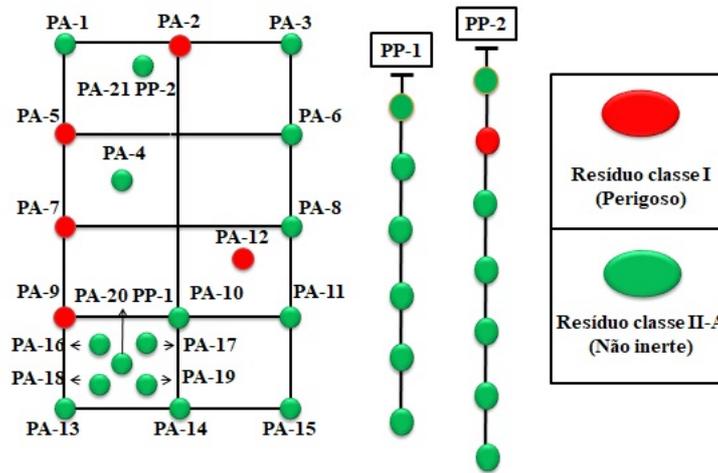


Figura 2: Classificação ambiental das cinzas analisadas

Ao serem submetidas a uma 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 32 amostras foram: Sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de cálcio (CaO). Esses compostos juntos representaram mais de 80% da composição dos resíduos, conforme se observa na Figura 3. O alto teor de sílica e de alumina favorece reações pozolânicas entre esses resíduos e a cal, produzindo compostos com propriedades cimentícias. De acordo com Chies *et al.* (2003) e Leandro (2005), do ponto de vista mineralógico, a cinza pesada é formada por uma fase vítrea de natureza sílico-aluminosa, que contempla a maioria dos grãos da cinza pesada, complementada secundariamente por mulita, quartzo, hematita e magnetita. Lopes *et al.* (2015) e Silva (2011) observaram que as características mineralógicas das cinzas leves constituem-se predominantemente de material vítreo (amorfo) de natureza sílico-aluminosa e em menor proporção de compostos cristalizados.

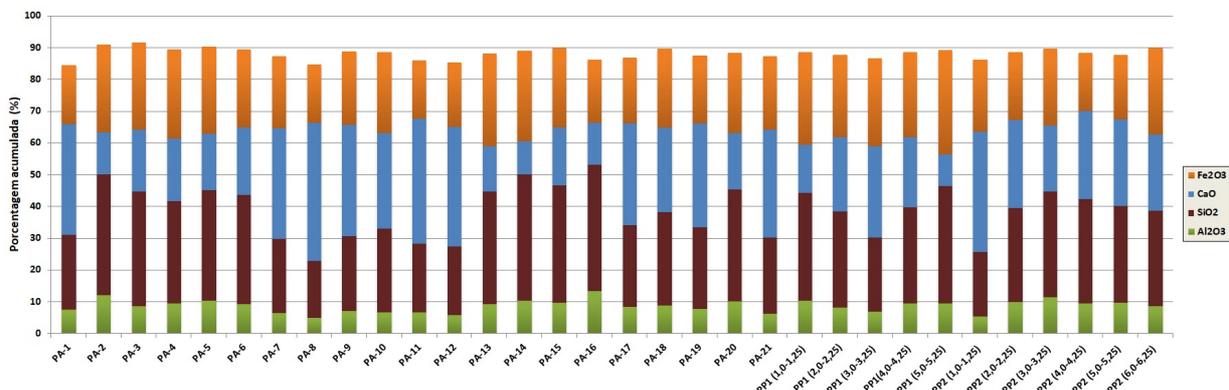


Figura 3: Análise química das amostras

Foi realizada uma análise estatística das cinzas coletadas no Módulo I, conforme DNIT (2006), de forma a determinar a média, o desvio padrão, o valor mínimo provável e o valor máximo provável, para as variáveis: umidade ótima ($h_{ót}$), massa específica seca máxima ($\gamma_{smáx}$), ISC e Expansão (E). Observou-se, uma significativa heterogeneidade entre as amostras, principalmente no que se referem aos valores dos ensaios mecânicos. A umidade ótima teve uma média de 32%, com desvio padrão de 11,7%. A massa específica seca máxima teve uma média de 1,19 g/cm³. O ISC teve uma média de 9%, com desvio padrão de 9%. O ISC de projeto (valor mínimo provável) para as cinzas foi de 1%, bem abaixo do exigido pelo DNIT para camadas de sub-base (ISC \geq 20% e expansão máxima de 1%). A expansão média foi de 2%, bem acima da tolerância admitida, com desvio padrão de 1,93%. Assim, as cinzas *in natura* do Módulo I, não podem ser utilizadas como material único em camadas dos pavimentos devido aos resultados mecânicos insatisfatórios e a sua heterogeneidade, devendo-se investigar o potencial de uso das misturas granulométricas e químicas.

4.2. Segunda Etapa do Programa Experimental

A densidade real da cinza homogeneizada utilizada nesta etapa foi de 2,44 e, com relação aos limites de consistência, foram classificadas como não plásticas. O solo apresentou uma densidade de 2,65 e o índice de plasticidade foi de 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. A caracterização física das cinzas e do solo está disposta na Tabela 2. As curvas granulométricas do solo, das cinzas e das misturas idealizadas estão dispostas na Figura 4. Pela análise ambiental, com base em ensaios de solubilização e lixiviação, as cinzas (M2) apresentaram concentrações de íons dentro dos níveis admissíveis, sendo classificada como não perigosa e não inerte (Classe II-A).

Tabela 2: Caracterização Física das Cinzas e do Solo

	Cinzas	Solo
% Pedregulho	14,3	0
% Areia Grossa	5,2	0
% Areia Média	5,1	5,2
% Areia Fina	6,6	81
% Silte	56,8	3,4
% Argila	12	10,4
Limite de Liquidez (%)	NP	10
Limite de Plasticidade (%)	NP	3
Densidade Real	2,44	2,65
Classificação AASTHO	A-4	A-2-4

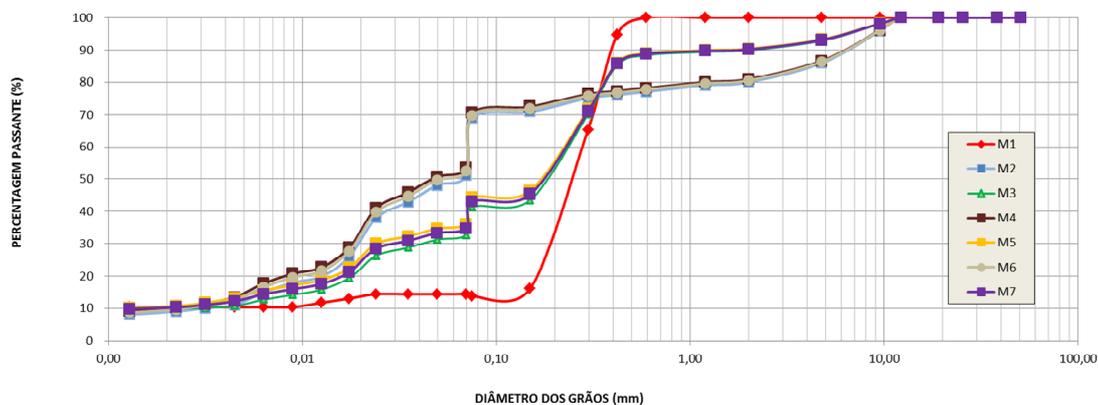


Figura 4: Curvas granulométricas das misturas

As curvas de compactação Proctor das misturas estão dispostas na Figura 5. 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, 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. De acordo com a *Federal Highway Administration* (1998) a massa específica seca máxima das cinzas geralmente estão entre 10 a 25% menores do que a dos materiais tipicamente granulares. Os resultados estão em consonância com os observados por outros autores (Leandro, 2005; Lopes, 2011; Barros, 2015). Barros (2015) argumenta que a cal apresenta uma grande absorção de água e possui massa específica seca máxima menor do que a cinza, explicando assim, as umidades ótimas maiores e massas específicas secas máximas menores das misturas à medida que se aumenta a proporção de cal.

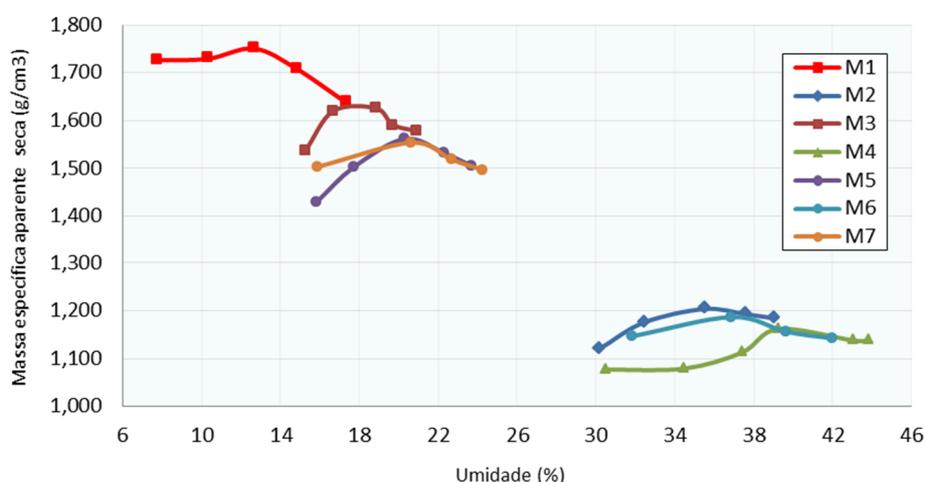


Figura 5: Curva de Proctor das misturas

Na Tabela 3 é possível visualizar os resultados dos ensaios de ISC, expansão, MR, RCS e RTCD das misturas idealizadas sem efeito de cura e na presença de cal com cura de 0, 7, 14 e 28 dias. Os valores correspondem à média de três corpos-de-prova idealizados para cada mistura e para cada tempo de cura. Os corpos-de-prova foram moldados na condição de umidade ótima e massa específica aparente máxima, na energia intermediária e imediatamente após a homogeneização da mistura. 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. Para obtenção dos parâmetros (k_1 , k_2 e k_3) tomou-se, a partir dos 3 CPs moldados, a média dos valores de MR para cada par de tensão confinante e desviatória e, a partir desses valores médios por par de tensão, obteve-se os MRs médios para cada mistura e os modelos dispostos na Tabela 3. Utilizou-se o software LabFit para determinação dos coeficientes do modelo composto.

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. Observa-se, na Tabela 3, que a cinza (M2) apresentou um ISC baixo (4%). Para a mistura M3, o ISC obtido foi de 21%, bem próximo ao ISC do solo natural (20%), o que

demonstra que as cinzas não promoveram uma estabilização dos solos. Ao analisar-se a granulometria do solo e da cinza, percebe-se que ambos os materiais possuem o mesmo percentual de argila, em que o solo apresenta como fração predominante areia fina e as cinzas a fração siltosa. Como ambas as frações possuem tamanhos de grãos semelhantes, a adição de cinzas não provocou uma correção granulométrica do solo, de forma que não foi observado incremento de suporte desse material. O principal tipo de reação que ocorre com a cinza é a pozolânica, necessitando da presença de óxido de cálcio para sua ocorrência. Desta forma, é de esperar que o solo utilizado no presente estudo não apresente elevados níveis desse composto químico necessário para ocorrência da pozolana, não reagindo, assim, com a cinza.

Tabela 3: Resultados dos ensaios mecânicos das misturas idealizadas

Misturas	ISC (%)	E (%)	Parâmetros do MR				MR médio (MPa)	RCS (MPa)	RTCD (MPa)
			K ¹	K ²	K ³	R ²			
M1 (solo)	20	0	139,3	-0,269	-0,538	0,78	161	0	0
M2 (cinza)	4	1,37	133,5	0,351	-0,343	0,53	111	0	0
M3 (M1+ M2)	21	0,95	16,79	0,062	-1,162	0,68	149	0	0
M4 (0 dias)	153	0,74	167,6	-0,444	-0,087	0,37	501	0,0	0,0
M4 (7 dias)	246	0	91,42	-0,101	-0,731	0,59	902	2,0	0,3
M4 (14dias)	234	0	260,7	0,106	0,089	0,52	1305	2,2	0,4
M4 (28 dias)	250	0	1430	0,456	-0,405	0,47	1149	3,2	0,5
M5 (0 dias)	258	1,5	149,2	-0,065	-0,513	0,75	496	0,0	0,0
M5 (7 dias)	370	0	1943,0	0,397	-0,200	0,66	698	2,7	0,3
M5 (14 dias)	370	0	647,1	0,281	0,230	0,58	849	4,5	0,4
M5 (28 dias)	370	0	318,38	0,114	0,0921	0,52	1007	5,0	0,4
M6 (0 dias)	132	0,33	338,4	-0,444	-0,273	0,75	205	0,00	0,00
M6 (7 dias)	135	0,00	608,9	0,210	-0,731	0,90	398	0,99	0,18
M6 (14dias)	137	0,00	1144,0	0,259	-0,209	0,90	450	1,11	0,24
M6 (28 dias)	122	0,00	1258,0	0,134	-0,1115	0,55	895	1,46	0,24
M7 (0 dias)	137	0,36	433,9	0,1274	-0,174	0,55	250	0,00	0,00
M7 (7 dias)	235	0,00	578,4	-0,087	-0,1405	0,77	490	2,26	0,31
M7 (14 dias)	181	0,00	1040,0	0,06937	-0,170	0,55	593	2,10	0,37
M7 (28 dias)	205	0,00	2649,0	0,2823	-0,199	0,50	735	2,37	0,38

As misturas com a cal (M4, M5, M6 e M7) apresentaram altos ISCs, todos acima de 100%. Em tempo de cura imediato, os CPs no ensaio de ISC, após compactados, têm que ficar imersos dentro de um cilindro metálico por 4 dias antes de serem rompidos. Durante esse período de imersão, foi observado que as reações ocorreram rapidamente, de forma que altas resistências puderam ser observadas com tempo de cura imediato. Em alguns casos foram observados decréscimos nos valores de CBR com aumento nos tempos de cura. Como os decréscimos foram pequenos, pressupõe-se que nesses casos as reações estavam estabilizadas e que os decréscimos foram devidos à variabilidade inerente à execução do próprio ensaio de CBR.

Com relação ao ensaio de MR, a razão k_2/k_3 determina o quanto a tensão confinante é mais influente que a tensão desviadora nos valores de MR. É possível perceber que o comportamento do solo diante do carregamento depende mais da tensão desviatória do que da tensão de confinamento. Isso deve ocorrer pela parcela de argila (10,4%) presente na composição do solo, que forneceu plasticidade e coesão ao material, tornando-o mais dependente da tensão desvio do que da tensão de confinamento. Resultados semelhantes foram obtidos por Barros (2015) e Vasconcelos (2016). Com relação às cinzas, observou-se que o material é levemente mais dependente da tensão de confinamento. Tal material tem baixa coesão, o que está de acordo com o apontando por alguns autores (Lopes, 2011; Barros, 2015), quando afirmam que o MR de solos de baixa coesão depende mais da tensão confinante do que da tensão desvio.

Observa-se pelos valores de MR médio que, de fato, não ocorreu uma estabilização granulométrica solo-cinza. A mistura granulométrica M3 apresentou módulo médio um pouco mais baixo do que o do solo natural (M1). No entanto, o efeito da adição de cal foi benéfica, melhorando o comportamento resiliente dos materiais à medida que se aumentam o teor de cal e os tempos de cura. O aumento de resistência pode ser justificado por reações entre a cal e os argilo-mineiros do solo, que por meio da troca catiônica origina Ca^{+2} livres, formando produtos cimentantes. Reações pozolânicas entre íons de cálcio (Ca^{+2}) com a sílica e a alumina presentes nas cinzas também ocorrem, produzindo compostos com propriedades cimentícias. Sabe-se que os agentes cimentantes de natureza pozolânica, têm no tempo de cura uma das variáveis mais significativas para a variação do comportamento mecânico, uma vez que o tempo de cura afeta diretamente o grau de cimentação da mistura, justificando a melhoria das propriedades mecânicas das misturas com o avanço no período 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).

Observou-se que, ao se comparar o tempo zero das misturas estabilizadas quimicamente com o módulo de resiliência do solo (M1) e da cinza (M2) houve um aumento significativo de rigidez. Comparando-se a mistura M4 com a cinza pura (M2), observou-se que o MR médio aumentou mais do que o triplo, para tempo de cura imediato. Da mesma forma, comparando-se a mistura M5 com o solo puro (M1), observou-se um aumento de cerca de 200%. Lopes (2011) e Barros (2015) afirmam que esse aumento ocorre devido às rápidas reações iniciais da cal com os finos do solo e da cinza.

Cabe-se destacar que na mistura M4 para os tempos de cura de 14 e 28 dias observou-se que os valores foram semelhantes, apresentando uma queda de cerca de 10% no valor de MR médio. Como os decréscimos foram pequenos, pressupõe-se que houve uma estagnação das reações químicas, ou seja, estas teriam se realizado por completo no tempo de cura de 14 dias.

No ensaio de RCS e RTCD 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. Os resultados dos ensaios de RCS estão representados graficamente na Figura 5a, onde se verifica que as misturas idealizadas sem a cal não resistiram à imersão. As misturas M4, M5, M6 e M7 com tempo de cura acima de 7 dias apresentaram valores superiores ao considerado como valor mínimo a ser empregado em pavimentos. 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.

Os resultados dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) estão apresentados na Figura 5b. Os resultados mostraram a mesma tendência observada nos ensaios de RCS. As misturas idealizadas sem a cal também não resistiram à imersão em água por 24 horas. A adição de 5% de cal elevou consideravelmente os valores de RTCD após 7 dias de cura, obtendo-se valores acima dos estipulados em Barros (2015) como adequados para uso em camadas de sub-base (0,1 MPa).

Foi selecionada a amostra M3 para uso em camadas de sub-bases, por ela atender aos parâmetros mecânicos mínimos de resistência, além do ponto de vista econômico ser vantajosa em relação às misturas com a cal (devido ao alto custo aquisitivo da cal). As misturas M4 (Cinza+5%Cal) e M5 (Solo+Cinza+5%Cal) foram escolhidas como as mais adequadas para uso em bases de pavimentos, por apresentarem altos valores de RCS, RTCD e MR adequados. Assim,

foram selecionadas para a 3ª etapa metodológica as amostras M3, M4 e M5, bem como a M2 pelo fato de as cinzas serem o objeto de estudo desta pesquisa.

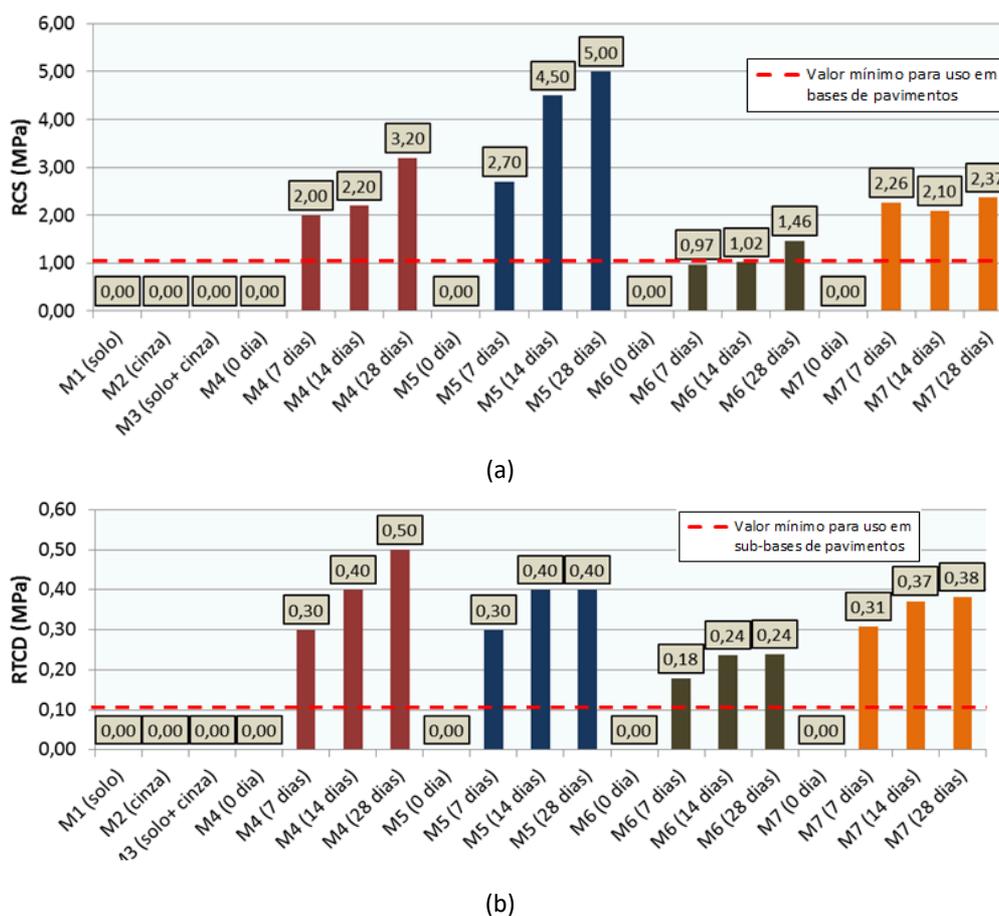


Figura 5: Curva de Proctor das misturas

4.3. Terceira Etapa do Programa Experimental

Os resultados de deformação permanente (DP) estão dispostos na Tabela 4 onde constam os valores da DP após a primeira carga (ϵ^1) e a deformação acumulada com 6.000 ciclos (ϵ^{6000}) e 10.000 ciclos (ϵ^{10000}). O acúmulo total de DP se concentrou em todos os ensaios realizados nas primeiras 6.000 aplicações de carga, mostrando que após este período as misturas tendem a se estabilizar. Observa-se que em praticamente todos os ensaios realizados o acúmulo de DP com 100% da carga aplicada ($\epsilon^{6000}/\epsilon^{10000}$) foi acima de 90%, demonstrando que a DP se concentrou nos primeiros 6000 ciclos.

Guimarães (2009) afirma que o valor admissível para DP em um pavimento é de, no máximo, 12,5 mm. Observa-se que as misturas M2 e M3 tiveram altos valores de DP, apresentando ao fim do ensaio uma DP acumulada de 13,54 mm e 10,17 mm, respectivamente. Lopes *et al.* (2015) estudaram a deformação permanente de um solo estabilizado com cinzas, com e sem adição de cal. O solo estudado pelos autores também era um solo arenoso e foi constatado que a adição de cinzas volantes com cal melhorou significativamente as propriedades mecânicas dos solos, a depender do teor de cinzas e número de ciclos de carga.

Analisando os resultados das misturas com a cal, percebe-se que em todas houve diminuição da DP com o acréscimo de cal e com o tempo de cura. Isto comprova a ocorrência de reações químicas de melhoria real das características do resíduo e, conseqüente, diminuição da deformação permanente. A adição de cal na mistura M2 diminuiu consideravelmente a deformação permanente, apresentando ao fim dos ensaios uma deformação irreversível acumulada de apenas 0,636 mm (cura imediata) e 0,406 mm (cura de 7 dias). A diminuição da DP também foi observada com a adição de cal na mistura M3, resultando em deformações irreversíveis de 1,203 mm (cura imediata) e 0,165 mm (cura de 7 dias). Observa-se que o tempo de cura exerce influência no comportamento mecânico das misturas, dado que a estabilização química do solo estudado, através de reações entre o solo, cinza e cal necessita de tempo para se tornar efetiva em termos de resistência e deformabilidade. Lopes *et al.* (2015) também comprovaram a forte influência do tempo de cura nos resultados de DP realizados em cinzas estabilizadas.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de deformação permanente

Misturas	Tensão (kPa)		ϵ^1 (mm)	ϵ^{6000} (mm)	ϵ^{10000} (mm)	$\epsilon^1/\epsilon^{6000}$ (%)	$\epsilon^{6000}/\epsilon^{10000}$ (%)
	σ_d	σ_3					
M2	40	40	0,416	0,97	0,993	42,89	97,68
	80		1,125	1,875	1,948	60,00	96,25
	120		3,073	3,823	3,896	80,38	98,13
	160		3,896	11,536	13,543	33,77	85,18
M3	40	40	0,756	1,781	1,804	42,45	98,73
	80		1,816	4,135	4,223	43,92	97,92
	120		4,233	6,268	6,547	67,53	95,74
	160		6,543	9,461	10,175	69,16	92,98
M4 (0 DIA)	40	40	0,16	0,569	0,548	28,12	103,83
	80		0,553	0,62	0,596	89,19	104,03
	120		0,595	0,596	0,586	99,83	101,71
	160		0,596	0,613	0,636	97,23	96,38
M4 (7 DIAS)	40	40	0,032	0,237	0,237	13,50	100,00
	80		0,241	0,295	0,298	81,69	98,99
	120		0,303	0,352	0,356	86,08	98,88
	160		0,353	0,402	0,406	87,81	99,01
M5 (0 DIA)	40	40	0,259	0,599	0,566	43,24	105,83
	80		0,845	1,175	1,102	71,91	106,62
	120		1,122	1,267	1,207	88,56	104,97
	160		1,217	1,302	1,203	93,47	108,23
M5 (7 DIAS)	40	40	0,025	0,052	0,058	48,08	89,66
	80		0,062	0,134	0,138	46,27	97,10
	120		0,145	0,149	0,153	97,32	97,39
	160		0,159	0,161	0,165	98,76	97,58

Por meio de observações visuais no decorrer dos ensaios, observou-se que as misturas estabilizadas (M4 e M5) são bem rígidas, de forma que com a pressão aplicada, se a base do corpo de prova não estiver devidamente plana, a amostra pode não ficar estável no equipamento, apresentando pequenos movimentos laterais no decorrer dos ensaios. Esses movimentos podem fazer com que um dos LVDT'S apresente leituras negativas, podendo ocasionar os decréscimos observados na Tabela 4 de deformação permanente entre as leituras de 6000 ciclos e

10000 ciclos. Assim, nos ensaios de DP com 7 dias de cura foi realizada uma serragem da base do corpo de prova, de forma a tentar garantir uma superfície mais plana. Observa-se que, com esse procedimento, problemas de decréscimos de DP foram atenuados. Não foi possível fazer a serragem dos CPs de cura imediata, haja vista que não apresentaram consistência adequada para esse procedimento.

4.4. Quarta Etapa do Programa Experimental

Nesta etapa utilizou-se o método empírico do DNIT para pré-dimensionar o pavimento. Com base nos ensaios realizados, podem-se propor algumas estruturas teóricas de pavimentos. No pré-dimensionamento adotou-se a seguinte estrutura: subleito local (ISC de 14% que caracteriza os solos da região), reforço de subleito (mistura M3 com ISC de 21%) e uma sub-base (também mistura M3 com ISC de 21%). O ISC de 14% foi por base no estudo de Vasconcelos (2018), que caracterizou o subleito da região da termelétrica investigada neste estudo, obtendo-se um ISC médio de 14%. 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). Foram adotados três revestimentos típicos do estado do Ceará em função do tráfego: um Tratamento Superficial Duplo (TSD) e dois Concretos Asfálticos Usinados a Quente (CAUQ), com espessuras de 7,5 cm e 12,5 cm. Os revestimentos foram obtidos, para cada volume de tráfego, conforme recomendação do DNIT (2006). Os valores das espessuras para cada camada em função de seis níveis de solicitação N, conforme o método empírico de dimensionamento de pavimentos, estão dispostos na Tabela 5.

Essas espessuras foram então utilizadas como dados de entrada no programa SisPav, onde verificou-se os modos de falha do pavimento, o tipo de dano crítico e seu valor em percentual para cada número N (vida de projeto de 10 anos). Em conformidade com valores utilizados por Bastos (2013), como dados de entrada no programa SisPav se considerou que, para tratamentos superficiais duplos, o coeficiente de Poisson é de 0,40 e módulo de resiliência constante de 500 MPa. Para revestimentos de concreto asfáltico, adotou-se 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. O modelo composto foi o que melhor representou as misturas estudadas, de forma que ele foi o utilizado no programa SisPav.

Tabela 5: Dimensionamento dos pavimentos Método do DNIT

		DIMENSIONAMENTO (Número N)				
		10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹
Método Empírico	Revestimento (cm)	2,5	2,5	7,5	12,5	12,5
	Sub- Base (M3) (cm)	17	20	15	15	15
	Ref. de subleito (M3) (cm)	15	15	15	15	15
Obtidos com SisPav	Falhas no pavimento	-	-	Fadiga	Fadiga	Fadiga
	Tipo de Dano Crítico	Tensão no topo do subleito	Tensão no topo do subleito	Fadiga na base do revestimento	Fadiga na base do revestimento	Fadiga na base do revestimento
	D _{crit} %	0,00%	0,02%	979,14%	9791,38%	97913,82%

Observou-se, conforme a Tabela 5, que para tráfegos menores do que $N = 10^7$ as estruturas pelo método do DNIT suportaram o tráfego previsto, não necessitando a colocação de uma camada de base. Observou-se que, para os tráfegos de 10^5 e 10^6 , o principal tipo de dano crítico é a tensão no topo do subleito, porém as estruturas apresentaram baixas porcentagens desses danos, estando adequadas para o tráfego previsto. O dano crítico (D_{crit}) representa, em termos percentuais, quanto de danos espera-se para esse pavimento ao fim de sua vida útil comparativamente ao dano máximo aceitável, considerando-se o tipo de dano mais provável da estrutura. Como o revestimento é do tipo TSD, de baixa rigidez, é de se esperar que ele não apresente tensões de tração elevadas, o que poderia ocasionar trincamentos na estrutura.

A partir do número $N = 10^7$ a estrutura do pavimento dimensionada pelo método do DNIT apresentou D_{crit} acima dos limites aceitáveis. As falhas para tráfego mais elevado ocorreram por fadiga no pavimento, haja vista a colocação na estrutura de uma camada de revestimento mais rígida (CBUQ). O SisPav calcula a fadiga apenas na camada asfáltica, desta forma o dano crítico no pavimento representa o nível de dano sofrido pelo revestimento asfáltico (Coutinho, 2011). Sabe-se que o método empírico, a partir do ensaio de ISC, não incorpora em sua análise o fenômeno da fadiga, de forma que os pavimentos dimensionados por esse método, de fato, tendem a apresentar o trincamento por fadiga como o principal tipo de falha (Mota, 1991; Coutinho 2011). Coutinho (2011) afirma que camadas mais rígidas tendem a atrair grande parte das tensões aplicadas ao pavimento, as quais deveriam ser distribuídas ao longo de toda a camada, o que contribui para o trincamento observado.

Salienta-se que a mistura M3 não pode ser usada, pelo método do DNIT, como base de pavimento (CBR mínimo de 80% para utilização em camadas de base). No entanto, pelo método mecanístico-empírico, que se baseia na resposta estrutural e modelos de desempenho, são necessários para análise apenas os parâmetros de MR. Sendo assim, a mistura M3 pode ser investigada para ser empregada como camada de base à luz de tais métodos.

Por fim, procedeu-se o dimensionamento da estrutura utilizando o programa SisPav. Nesta etapa, as espessuras para tráfegos mais baixos foram otimizadas pelo SisPav e, para tráfegos mais elevados, foi proposta uma nova estrutura de pavimento. Assim, duas Estruturas (EST) foram obtidas, conforme as seguintes situações de tráfego: para utilização em um trecho experimental na região da termelétrica (baixo volume de tráfego, N adotado de 10^6) e para utilização em rodovias de maiores volumes de tráfego (N adotado de 10^7), conforme mostrado na Figura 6. Para tráfego $N = 10^6$ adotou-se a mesma estrutura dimensionada pelo método empírico, com as espessuras otimizadas no SisPav. Para N igual a 10^7 , utilizou-se uma camada de base mais resistente (M4), de forma que não se faz necessário o reforço de subleito, sendo o pavimento composto apenas de uma sub-base (M3), base (M4) e revestimento (CBUQ).

As estruturas dos pavimentos obtidas tiveram bons desempenhos quando analisadas no programa SisPav, para uma vida de projeto de 10 anos, apresentando reduzidos danos críticos e baixas deflexões na superfície. A estrutura para o tráfego de 10^6 apresentou vida de projeto estimada em 49 anos e teve como dano crítico a tensão admissível no topo do subleito, equivalente a 20 % da admissível. Observou-se com o método mecanístico-empírico uma redução de 5 cm da espessura total do pavimento em comparação com a estrutura dimensionado pelo método do DNIT, comprovando o afirmado em literaturas (Motta, 1991; Coutinho, 2011; Fernandes, 2014) de que, para tráfegos mais leves, o método do DNIT tende a superdimensionar os pavimentos, onerando financeiramente as estruturas.

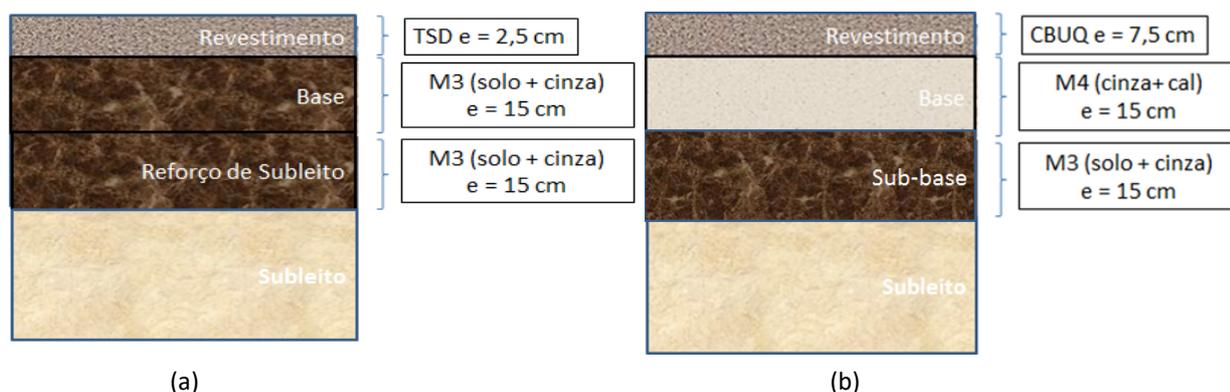


Figura 6: a) Estrutura 1 para N=10⁶; b) Estrutura 2 para N=10⁷

A estrutura para o tráfego de 10⁷ apresentou como dano crítico a fadiga no topo do revestimento, equivalente a 39% da admissível. Para essa estrutura a vida de projeto foi estimada em 26 anos. Assim, as duas estruturas apresentaram vida de projeto elevada, de forma que se espera que suportem o tráfego para o qual elas foram dimensionadas, dispendo de desempenhos satisfatórios em campo.

5. CONCLUSÕES

A principal contribuição deste estudo foi a proposição de uma solução para o reaproveitamento dos resíduos que estão depositados no Módulo I da termelétrica investigada. Foram analisadas por meio de ensaios laboratoriais 32 amostras de cinzas, coletadas em pontos específicos do módulo de armazenagem. Além disso, misturas solo-cinza-cal foram investigadas, à luz de diferentes propriedades mecânicas.

As misturas M3 (50% solo + 50% cinza) e M4 (95% cinza + 5% CAL) foram aptas do ponto de vista técnico e ambiental para serem empregadas na proposição de projetos estruturais de pavimentos. Foram propostas duas estruturas de pavimentos para diferentes volumes de tráfego com a utilização de cinzas em camadas de bases e/ou sub-bases. Essas estruturas apresentaram 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arora, S. e A. H. Aydilek (2005) Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Material. *Materials in Civil Engineering*, v. 17, n. 6. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:6(640)
- Barenberg, E. e M. R. Thompson (1976) Lime - Fly Ash - Stabilized Bases and Sub - Bases. *Transportation Research Board*, Washington, n. 37, p. 1-66. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_37.pdf> (acesso em 03/10/2017)
- Barros, K. S. (2015) *Estudo de Cinzas Volantes de uma Termelétrica da RMF para Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/25073>> (acesso em 09/08/2017)
- Bastos, J. B. S. (2013) *Influência da Variação da Umidade no Comportamento de Pavimentos da Região Metropolitana de Fortaleza*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/5627>> (acesso em 15/08/2017)

- Bergeson, K. L. e Barnes, A. G. (1998) *Iowa thickness design for low volume roads using reclaimed hydrated Class C fly ash bases*. Iowa State University, Ames, Iowa. Disponível em: <<https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/03/253iowa.pdf>> (acesso em 21/09/2017)
- BRITISH STANDARD. (2004) *BS EN 13286-7: Unbound and Hydraulically Bound Mixtures*. Part 7: Cyclic Load Triaxial Test for Unbound Mixtures.
- Chies, F.; Silva, N. I. W. e Zwonok, O. (2003) Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão - CIPE-CAL. In: Rocha, J.C. & John, U.M. *Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. Coleção Habitare*. v. 4, p. 218-239. Porto Alegre-RS.
- Coutinho, J.C.P. (2011) *Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicado a um trecho*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2328>> (acesso em 03/10/2017)
- DNER (2006) *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Edil, T. B.; Benson, C. H.; Bin, S.; Tanyu, B. F., Kim, W. H.; Senol, A. (2002) Field evaluation of construction alternatives for roadway over soft subgrade. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. n. 02-3808. DOI: 10.3141/1786-05.
- Farias, E. R. (2005) *A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102758>> (acesso em 20/12/2018)
- Fernandes, W.D. (2016) *Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil e o método da AASHTO*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7929>> (acesso em 01/03/2017)
- Ferguson, G. (1993) *Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent*. Fly ash for soil improvement. *Geotechnical Special Publication. American Society of Civil Engineers*. New York, NY. ISBN: 978-0872629868
- Franco, F. A. C. P. (2007) *Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SisPav*. Tese. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/151-2007/1107-filipe-augusto-cinque-de-proenca-franco>> (acesso em 04/05/2017)
- Guimarães, A.C.R. (2009) *Estudo de Deformação Permanente em Solos e a Teoria do Shakedown Aplicada a Pavimentos Flexíveis*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/101-2001/3849-antonio-carlos-rodrigues-guimaraes>> (acesso em 04/05/2017)
- Kolias, S.; Kasselouri-Rigopoulou, V. e Karahalios, A. (2005) Stabilization of clayey soils with high calcium fly ash and cement. In: *Cement & Concrete Composites*. n.27, p. 301-313. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.019
- Lav, A.H.; Lav, M. A. e Goktepe, A. B. (2006) *Analysis and design of a stabilized fly ash as pavement base material*. *Fuel*, n.85, p. 2359-2370. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.05.017
- Leandro, R. P. (2005) *Estudo laboratorial acerca da possibilidade de aproveitamento da cinza pesada de termelétrica em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis*. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. Disponível em: <<file:///C:/Users/User/Favorites/Downloads/Rodrigo.pdf>> (acesso em 14/11/2017)
- Little, D. N. (1999) Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates. *Prepared for the National Lime Association. Summary of Findings* v. 1, p. 1-81. Disponível em: <https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/soils-aggregates-vol1.pdf> (acesso em 19/01/2018)
- 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. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=18793@1>> (acesso em 03/11/2017)
- 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. In *Revista Pavimentação*, v. 36, p. 63-82.
- Lovell, C. W.; KE, T. C.; Huang, W. H. e Lovell J. E. (1991) Bottom ash as highway material. In: *Transportation Research Record*, n.1310, p.106-116. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1310/1310-014.pdf>> (acesso em 22/19/2017)
- Marcon, A. F. (1977) *Durabilidade e módulo de elasticidade de misturas areia-cal-cinza volante*. Tese. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/2810/1/145467.pdf>> (acesso em 23/01/2018)
- Medina, J. e Motta, L.M.G. (2005) *Mecânica dos Pavimentos*. 2ª Ed. ISBN 85-905987-1-3. Rio de Janeiro.

- Motta, L.M.G. (1991) *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas*. Tese. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Laura_Motta/publication/36219069_Metodo_de_dimensionamento_de_pavimentos_flexiveis_criterio_de_confiabilidade_e_ensaios_de_cargas_repetidas/links/583ee4d508ae8e63e6181abf/Metodo-de-dimensionamento-de-pavimentos-flexiveis-criterio-de-confiabilidade-e-ensaios-de-cargas-repetidas.pdf> (acesso em 15/11/2017)
- Nardi, J. V. (1975) *Estabilização de areia com cinza volante e cal – Efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/2751/1/141784.pdf>> (acesso em 08/10/2017)
- Oliveira, P.V. (2011) *Aplicabilidade de resíduos e rejeitos ambientais para aproveitamento em pavimentação*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <https://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2011/relatorios/ctc/civ/CIV-Priscila%20Oliveira.pdf> (acesso em 15/09/2017)
- Rohde, G. M.; Zwonok, O.; Chies, F. e Silva, N. I. W. (2006) Cinzas de carvão fóssil no Brasil – Aspectos técnicos e ambientais. In *CIENTEC*, v.1. Porto Alegre, RS.
- Pinto, S. (1971) *Estabilização de areia com aditivo de cal e cinza volante*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/2286/1/000124129.pdf>> (acesso em 04/17/2017)
- Sahu, G.; Bag, A.; Chatterjee, N.; Mukherjee, A. (2017) Potential use of flyash in agriculture: A way to improve soil health. In *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, n.6, p. 873-877.
- Schroeder, R. L. (1994) The Use of Recycled Materials in Highway Construction, in *Public Roads*. v. 57, n.2.
- Trichês, G.; Farias, E. R.; Maccarini, M. (2006) Análise dos aspectos mecânicos da utilização de misturas solo-cinzas-pesadas na pavimentação rodoviária. In: *Congresso da Associação Brasileira de Ensino e Pesquisa em Transporte*, vol. 2, p. 1291-1302.
- Vizcarra, G.O.C. (2010). *Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=16327@1>> (acesso em 05/02/2018)