



Louise dos Santos Erasmi Lopes

**Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de
Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de
Base de Pavimentos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande
Co-orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Rio de Janeiro
Maio de 2011



Louise dos Santos Erasmi Lopes

**Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de
Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de
Base de Pavimentos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela
Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof^ª. Michéle Dal Toé Casagrande

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^ª. Laura Maria Goretti da Motta

Co-orientadora

COPPE/UFRJ

Dr. Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

IME/RJ

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de Maio de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora, da orientadora.

Louise dos Santos Erasmi Lopes

Graduou-se em Engenharia Civil com ênfase em ambiental pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro) em dezembro de 2008. Ingressou no mestrado na PUC-Rio em março de 2009, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de reutilização de resíduos para Pavimentação.

Ficha Catalográfica

Lopes, Louise dos Santos Erasmi

Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de base de pavimentos / Louise dos Santos Erasmi Lopes ; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande ; co-orientadora: Laura Maria Goretti da Motta. – 2011.

208 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Cinzas de carvão mineral. 3. Cinza volante. 4. Cinzas de fundo. 5. Cal. 6. Estabilização de solos. 7. Base de pavimentos. 8. Materiais alternativos. I. Casagrande, Michelé Dal Toé. II. Motta, Laura Maria Goretti da. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 658

Aos meus pais, Helcio e Paula, aos meus irmãos, Edgard e Hellen, e ao meu amor, Diego, pelo amor, compreensão e incentivo.

Agradecimentos

A Deus, por tudo.

Aos meus pais, Helcio e Paula, que dedicaram suas vidas a mim e meus irmãos, nos dando muito mais que amor e carinho. Sem vocês nada disso seria possível. Faltam-me palavras para descrever o amor que sinto por nossa família.

Ao Edgard, meu irmão, pela amizade incontestável, pelos abraços, colos e sábios conselhos nos momentos em que mais precisei. A Hellen, minha irmã, por toda compressão, companhia e sinceridade acima de tudo. Vocês são essenciais em minha vida, amo vocês.

Ao Diego, por tudo que já vivemos juntos. Por ser muito mais que namorado, meu maior incentivador, meu amigo, por sempre acreditar em mim e me fazer persistir em busca dos meus sonhos. Amo você. Obrigada por estar sempre ao meu lado, por vibrar comigo, me consolar nos momentos difíceis, por todo o carinho e amor.

A minha avó Dyla, por todo carinho, por ser “minha fã número 1”, como ela mesma diz. A minha avó Wilma, que mesmo não estando mais aqui, se faz presente, por todos os seus inesquecíveis abraços e “cartinhas”.

A professora e amiga Michéle Casagrande pela orientação do meu trabalho, por todo o conhecimento transmitido, que muitas vezes saíam do campo técnico da Engenharia Civil, levarei comigo ao longo de toda minha vida. Sobre tudo a toda dedicação e paciência em me atender nos momentos de dúvidas e questionamentos, sem a sua compreensão e apoio o caminho teria sido muito mais árduo.

A minha co-orientadora, professora Laura Motta, pela incontestável competência e seriedade no exercício de sua profissão. Sobre tudo por todo o apoio em permitir

a utilização dos laboratórios da COPPE/UFRJ, permitindo a realização da presente pesquisa.

Um agradecimento especial a Mariluce Ubaldo, pelos conselhos e ajuda na elaboração deste trabalho. Aos técnicos de laboratório da COPPE/UFRJ, Washington, Thiago, Allan, Leandro, Carlinhos, Luizão e Beto que sempre estiveram prontos a me ajudar.

A todos os meus amigos por compreenderem os momentos de ausência. E por estarem sempre ao meu lado. A Mariana e a Priscila, “desde sempre e para sempre”, que este continue sendo o nosso “lema” até ficarmos bem velhinhas.

Aos amigos da PUC-Rio, em especial para a turma da salinha 614L, Rick, Paulinha, Thiaguinho, Carnavale e Eric, pelas risadas nos momentos de descontração e todo o apoio nos momentos de estudo. À Fernanda e à Paloma, pelo companheirismo e incentivo durante toda faculdade e mestrado.

A Luciana Szeliga e Priscila Vargas, alunas de iniciação científica que tanto me ajudaram na realização dos ensaios.

Ao Professor Alberto Sayão, que acreditou em mim, me apoiando na decisão de fazer o Mestrado.

A Luciana Garavaglia e Mirleni Amboni, da SATC, que gentilmente forneceu as cinzas que foram utilizadas no estudo.

A todos os professores da engenharia civil da PUC-Rio com os quais tive o prazer de conviver e aprender durante a graduação e o mestrado.

Aos funcionários do departamento, pela colaboração ao longo dos anos na PUC-Rio e pelo convívio prazeroso.

A CNPq pela concessão das bolsas de estudo.

Resumo

Lopes, Louise dos Santos Erasmi; Casagrande, Michéle Dal Toé (Orientadora); Motta, Laura Maria Goretti (Co-orientadora). **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos**. Rio de Janeiro, 2011. 208 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo apresenta a caracterização de dois tipos de cinzas (de fundo e volante) obtidas da queima de carvão mineral em usinas termelétricas, tendo como objetivo avaliar sua aplicabilidade em camadas de base de pavimentos rodoviários, através da mistura destas cinzas a um solo areno-siltoso não-laterítico característico do estado do Rio de Janeiro. Foram realizados ensaios de caracterização física (granulometria e limites de Atterberg), química (fluorescência de raio-X por energia dispersiva), mecânica (compactação, módulo de resiliência e deformação permanente) e, por se tratar da utilização de resíduos industriais, ensaios ambientais de solubilização e lixiviação. Tais ensaios foram realizados para o solo puro e para as misturas de solo-cinza de fundo (30 e 40% de cinzas de fundo) e solo-cinza volante (10 e 20% de cinza volante), sendo estes teores relacionados ao peso do solo seco. Também foram ensaiados corpos de provas com a adição de 3% cal. Baseando-se nos dados resultantes dos ensaios mecânicos foi realizado o dimensionamento mecanístico-empírico para uma estrutura típica de pavimento. As misturas com inserção de cinzas apresentaram um comportamento mecânico compatível com as exigências de um pavimento de baixo volume de tráfego. Os resultados obtidos demonstram que o solo em estudo é dependente da tensão confinante e que a inserção de cinza volante e a cura prévia aumentam consideravelmente o valor do módulo de resiliência, o que resulta na diminuição da espessura da camada de base em comparação ao solo puro, para um mesmo nível

de carregamento e mesmos critérios de dimensionamento. Os resultados com as cinzas de fundo também apresentaram resultados satisfatórios, aumentando o valor do módulo de resiliência, apesar de em menores taxas do que as cinzas volantes, no caso das misturas com a presença de cal e, contudo, nas misturas sem a adição de cal, obtendo melhores resultados ao serem comparados com as misturas com a presença das cinzas volantes. Os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo dependentes do teor e do tipo de cinza utilizado, da presença da cal, além do tempo de cura. Tais fatos, juntamente com os resultados dos ensaios ambientais ressaltam o emprego positivo de ambos os tipos de cinzas (de fundo e volante) de carvão mineral para aplicação em camadas de base de pavimentos rodoviários, minimizando problemas atuais de disposição de resíduos em lixões e aterros sanitários, dando um fim mais nobre a este material.

Palavras-chave

Cinzas de Carvão Mineral; Cinza Volante; Cinzas de Fundo; Cal; Estabilização de Solos; Base de pavimentos; materiais alternativos.

Abstract

Lopes, Louise dos Santos Erasmi; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor); Motta, Laura Maria Goretti (Co-Advisor). **Analysis of Mechanical and Environmental Behavior of Ash-Soil Mixtures of Coal Base Layers for Pavements.** Rio de Janeiro, 2011. 208 p. MSc. Report – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The research consists in examining the applicability of two kinds of ash (fly and bottom) of coal combustion residue from thermal power, on the layers of pavements base road by mixing these ashes with a non-lateritic sandy-silty soil, characteristic of the Rio de Janeiro state, with and without lime addition. This study presents the results of physical characterization (granulometry and Atterberg limits), chemistry (fluorescence X-ray energy dispersive), and mechanics (compression, resilient modulus and permanent deformation), and considering that ashes are industrial waste, environmental testing solubilization and leaching. These tests were conducted on the pure soil, on the ashes and on soil with bottom ash (30 and 40% of bottom ash) and fly ash (10 and 20% of fly ashes) mixtures, these levels of ashes are related to the weight of dry soil, with and without lime addition. The composite model for resilient modulus were obtained, which represents the mechanical behavior, using the finite element program (SisPAV) for the pavement design. The mixtures with the addition of ashes showed a mechanical behavior consistent with the requirements for low traffic roads. The results show that the soil is dependent on confining pressure and the inclusion of fly ash and the mixture cure dramatically increase the value of resilient modulus, which is revealed by thinner base layer in comparison to the pure soil, for the same load level and the same design criteria. The results of bottom

ashes also were acceptable, increasing the value of resilient modulus in lower taxes than the fly ashes with the addiction of lime, but showing better results in the mixtures without addiction of lime, when comparing wiht the mixtures with fly ashes. The results were satisfactory, and dependents of the levels and kind of ashes, of addiction of lime, and the cure, highlighting the use of both ashes of mineral coal in pavement base roads, eliminating the current problems of waste disposal in dumps and landfills, putting a best end for this material.

Keywords

Coal ash; fly ash; bottom ash; lime; soil stabilization; pavement base; alternative materials.

Sumário

1. Introdução.....	24
1.1 Relevância da Pesquisa.....	26
1.2 Objetivos.....	26
1.3 Organização do Trabalho.....	27
2. Revisão Bibliográfica.....	29
2.1 Considerações Iniciais.....	29
2.2 Carvão Mineral e Sua Importância na Matriz Energética Brasileira.....	30
2.3 Origem e Classificação das Cinzas.....	32
2.3.1 Cinza Volante.....	35
2.3.2 Cinza de Fundo.....	36
2.4 Aproveitamento das Cinzas de Carvão Mineral.....	38
2.4.1 Aproveitamento das Cinzas de Carvão Mineral na Pavimentação .	40
2.5 Cinza e o Meio Ambiente.....	42
2.6 Cal.....	43
2.7 Estabilização de Solos.....	44
2.7.1 Solo-Cal.....	47
2.7.2 Solo-Cinza Volante.....	54
2.7.3 Solo-Cinza de Fundo.....	56
2.7.4 Solo-Cinzas de Resíduos Sólidos Urbanos.....	57
2.8 Ensaios Dinâmicos.....	58
2.8.1 Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas – Módulo de Resiliência.....	61
3. Programa Experimental.....	65
3.1 Considerações Iniciais.....	65
3.2 Materiais.....	67

3.2.1 Solo.....	67
3.2.2 Cinzas Volante e de Fundo.....	26
3.2.2.1 Complexo Termelétrico Jorge Lacerda.....	72
3.2.3 Cal.....	74
3.2.4 Água.....	75
3.2.5 Misturas Solo-Cinza-Cal.....	75
3.3 Métodos.....	76
3.3.1 Coleta e Preparação das Amostras.....	78
3.3.2 Ensaios de Caracterização Física.....	78
3.3.2.1 Limites de Atterberg.....	79
3.3.2.2 Massa Específica dos Grãos.....	79
3.3.2.3 Análise Granulométrica.....	80
3.3.3 Ensaios de Caracterização Química e Ambiental.....	81
3.3.3.1 Composição Química.....	81
3.3.3.2 Teor de Matéria Orgânica.....	81
3.3.3.3 Ensaios de Solubilização e Lixiviação.....	82
3.3.4 Ensaios de Caracterização Mecânica.....	83
3.3.4.1 Ensaio de Compactação.....	83
3.3.4.2 Ensaio de Módulo de Resiliência ou Resiliente.....	84
3.3.4.3 Ensaio de Deformação Permanente.....	92
3.3.5 Dimensionamento do Pavimento Típico.....	94
4. Apresentação dos Resultados.....	97
4.1 Considerações Iniciais.....	97
4.2 Ensaios de Caracterização Física.....	97
4.2.1 Limites de Atterberg.....	97
4.2.2 Massa Específica dos Grãos.....	97
4.2.3 Análise Granulométrica.....	99

4.2.3.1 Classificação SUCS.....	101
4.2.3.2 Classificação HRB.....	101
4.3 Ensaios de Caracterização Química e Ambiental.....	103
4.3.1 Composição Química.....	103
4.3.2 Teor de Matéria Orgânica.....	106
4.3.3 Ensaios de Solubilização e Lixiviação.....	107
4.4 Ensaios de Caracterização Mecânica.....	110
4.4.1 Ensaio de Compactação.....	110
4.4.2 Ensaio de Módulo de Resiliência ou Resiliente.....	118
4.4.2.1 Influência do Tempo de Cura.....	122
4.4.2.2 Influência do Teor e do Tipo de Cinzas.....	128
4.4.2.3 Influência da Cal nas Misturas com Cinzas de Fundo e Volante.....	135
4.4.3 Ensaio de Deformação Permanente.....	140
4.4.3.1 Influência do Tempo de Cura.....	142
4.4.3.2 Influência do Teor e do Tipo de Cinzas.....	145
4.5 Dimensionamento do Pavimento Típico.....	148
5. Conclusão.....	154
5.1 Conclusões.....	154
5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras.....	158
Referências Bibliográficas.....	160
Anexo A.....	167
Anexo B.....	189
Anexo C.....	204

Lista de figuras

Figura 1.1 : Bacia de sedimentação de Cinzas do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda (Fonte: LEANDRO, 2005).....	26
Figura 2.1 : Gráfico representativo da Oferta Interna de Energia no Brasil com dados de 2009 (Fonte: EPE, 2010).....	30
Figura 2.2 : Comparação das Diferentes Fontes de Energia, no Brasil, em 2008 e 2009 (Fonte: EPE, 2010).....	31
Figura 2.3: Processo de Queima do Carvão Mineral em Usinas Termelétricas (Fonte: Farias, 2005).....	32
Figura 2.4: Moldagem de Peças de Concreto para Pavimentação com uso de cinza.....	41
Figura 2.5: Mecanismos de Estabilização Solo-Cal (Fonte: Inglês & Metcalf, 1972 apud Rosa, 2009).....	50
Figura 2.6 : Efeito do teor de cal sobre a resistência a compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (Fonte: Rosa, 2009).....	53
Figura 2.7: Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns tipos de solos estabilizados com cal (Fonte: Rosa, 2009).....	54
Figura 2.8 : Equipamento do Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas do Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ usado no presente estudo.....	60
Figura 3.1 : Destaque ao Mapa Pedológico do Estado do Rio de Janeiro na área de estudo (Fonte: DRM-RJ).....	69
Figura 3.2: Imagem Aérea da Localização da Jazida em Campo Grande (Fonte: Google Maps, 2010).....	69
Figura 3.3: Aspectos da jazida utilizada para obter o solo deste estudo ressaltando sua heterogeneidade.....	70
Figura 3.4: Detalhe da amostra do Solo utilizado neste estudo após secagem e destorroamento.....	70
Figura 3.5: Localização do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (Fonte: Leandro, 2005).....	71
Figura 3.6 : Aspecto da Cinza de Fundo utilizada no presente estudo.....	71
Figura 3.7 : Aspecto da Cinza Volante utilizada no presente estudo.....	72
Figura 3.8: Vista Geral do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (Fonte: site da Tractebel Energia, www2.tractebelenergia.com.br/ , consultado no dia 14/09/2010)	73
Figura 3.9: Capacidade instalada TRACTEBEL ENERGIA, set 2010 (Fonte: site da Tractebel Energia, www2.tractebelenergia.com.br/ , consultado no dia 14/09/2010).....	74
Figura 3.10: Etapa referente à Caracterização dos Materiais.....	77

Figura 3.11: Etapa referente à caracterização mecânica e ambiental.....	77
Figura 3.12: Compactador Mecânico da COPPE/UFRJ e o molde tripartido utilizado.....	86
Figura 3.13: Esquema Ilustrativo do Equipamento de Ensaio Triaxiais de Carga Repetida (Fonte: Medina & Motta, 2005).....	87
Figura 3.14: Molde tripartido 10 X 20cm, para compactação dos corpos-de-prova	87
Figura 3.15: Montagem do Equipamento do Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas da COPPE/UFRJ.....	88
Figura 3.16: Exemplo de Preparação dos corpos-de-prova após ensaio para Cura em Câmara Úmida desta pesquisa.....	93
Figura 3.1: Fluxograma de Desenvolvimento do SisPav (Fonte: Franco,2007)....	95
Figura 3.28: Estrutura do Pavimento Típico adotada para a análise mecanística-empírica (Fonte: Vizcarra,2010).....	97
Figura 4.3.a: Variação da Massa Específica dos Grãos com o teor de cinza de Fundo.....	98
Figura 4.1.b: Variação da Massa Específica dos Grãos com o teor de cinza Volante.....	99
Figura 4.4: Curvas Granulométricas dos materiais estudados.....	100
Figura 4.5: Curvas de Compactação do Solo, Cinza Pesada e Misturas com Cinzas de Fundo deste estudo.....	111
Figura 4.4: Curvas de Compactação típicas de Cinzas de Fundo (Fonte: Lovell et al., 1991).....	112
Figura 4.56: Curva de Compactação da Cinza de Fundo do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda (Fonte: Ubaldo, 2005).....	113
Figura 4.7: Curvas de Compactação de Solos típicos do Brasil (Fonte: Pinto, 2002).....	113
Figura 4.7: Curvas de Compactação do Solo, Cinza Volante e Misturas com Cinza Volante do presente estudo.....	114
Figura 4.8: Curva de Compactação da Cinza Volante do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda (Fonte: Ubaldo, 2005).....	115
Figura 4.8: Curvas de Compactação de Misturas Solo-Cinza Volante-Cal por Nardi (Fonte: Nardi,1975).....	115
Figura 4.10: Variação da Massa Esp. Aparente Seca Máxima com o teor de Cinza de Fundo do presente estudo.....	118
Figura 4.11: Variação da Massa Esp. Aparente Seca Máxima com o teor de Cinza Volante do presente estudo.....	118
Figura 4.12: Variação da Umidade Ótima com o teor de Cinza de Fundo.....	119

Figura 4.13: Variação da Úmida Ótima com o teor de Cinza Volante.....	119
Figura 4.149: Variação do Módulo de resiliência vs. Tensão Confinante para Mistura S70/CF27/C3 para os diferentes tempos de cura.....	125
Figura 4.10: Variação do Módulo de resiliência vs. Tensão Confinante para Mistura S60/CF37/C3 para os diferentes tempos de cura.....	126
Figura 4.11: Variação do Módulo de resiliência vs. Tensão Confinante para Mistura S90/CV7/C3 para os diferentes tempos de cura.....	126
Figura 4.17: Variação do Módulo de resiliência VS. Tensão Confinante para Mistura S80/CV27/C3 para os diferentes tempos de cura.....	127
Figura 4.12: Variação do Módulo de resiliência vs. Tensão Confinante para Mistura S70/CF30 para os diferentes tempos de cura.....	128
Figura 4.19: Variação do Módulo de resiliência vs. Tensão Confinante para Mistura S60/CF40 para os diferentes tempos de cura.....	129
Figura 4.20: Variação do Módulo de resiliência vs. Tensão Confinante para Mistura S90/CV10 para os diferentes tempos de cura.....	129
Figura 4.21: Variação do Módulo de resiliência vs. Tensão Confinante para Mistura S80/CV20 para os diferentes tempos de cura.....	129
Figura 4.22: Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 no tempo de cura de 0 dias.....	131
Figura 4.23: Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 no tempo de cura de 28 dias.....	131
Figura 4.24: Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 no tempo de cura de 90 dias.....	132
Figura 4.13: Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 no tempo de cura de 0 dias.....	132
Figura 4.26: Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 no tempo de cura de 7 dias.....	133
Figura 4.27: Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 no tempo de cura de 28 dias.....	133
Figura 4.28: Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 no tempo de cura de 90 dias.....	133
Figura 4.29: Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF30 e S60/CF40 no tempo de cura de 0 dias.....	134
Figura 4.30: Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF30 e S60/CF40 no tempo de cura de 90 dias.....	135
Figura 4.31: Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV10 e S80/CV20 no tempo de cura de 0 dias.....	135
Figura 4.32: Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV10 e S80/CV20 no tempo de cura de 35 dias.....	136

Figura 4.33: Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV10 e S80/CV20 no tempo de cura de 90 dias.....	136
Figura 4.34: Influência da Cal nas Misturas S70/CF27/C3 e S70/CF30 com 0 dias de cura.....	138
Figura 4.14: Influência da Cal nas Misturas S70/CF27/C3 e S70/CF30 com 28 e 35 dias de cura, respectivamente.....	138
Figura 4.36: Influência da Cal nas Misturas S70/CF27/C3 e S70/CF30 com 90 dias de cura.....	138
Figura 4.37: Influência da Cal nas Misturas S60/CF37/C3 e S60/CF40 com 0 dias de cura.....	139
Figura 4.38: Influência da Cal nas Misturas S60/CF37/C3 e S60/CF40 com 28 e 35 dias de cura, respectivamente.....	139
Figura 4.39: Influência da Cal nas Misturas S60/CF37/C3 e S60/CF40 com 90 dias de cura.....	139
Figura 4.40: Influência da Cal nas Misturas S90/CV7/C3 e S90/CV10 com 0 dias de cura.....	140
Figura 4.41: Influência da Cal nas Misturas S90/CV7/C3 e S90/CV10 com 28 e 35 dias de cura, respectivamente.....	140
Figura 4.42 - Influência da Cal nas Misturas S90/CV7/C3 e S90/CV10 com 90 dias de cura.....	141
Figura 4.43: Influência da Cal nas Misturas S80/CV17/C3 e S80/CV20 com 0 dias de cura.....	141
Figura 4.44: Influência da Cal nas Misturas S80/CV17/C3 e S80/CV20 com 28 e 35 dias de cura, respectivamente.....	141
Figura 4.45: Influência da Cal nas Misturas S80/CV17/C3 e S80/CV20 com 90 dias de cura.....	142
Figura 4.46: Efeito de Tempo de Cura na Deformação Permanente da Mistura S70/CF27/C3.....	144
Figura 4.47: Efeito do Tempo de Cura na Deformação Permanente da Mistura S60/CF37/C3.....	145
Figura 4.48: Efeito do Tempo de Cura na Deformação Permanente da Mistura S90/CV7/C3.....	146
Figura 4.49: Efeito do Tempo de Cura na Deformação Permanente na Mistura S80/CV17/C3.....	146
Figura 4.50: Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 na Deformação Permanente com cura de 7 dias.....	147
Figura 4.51: Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 na Deformação Permanente com cura de 28 dias.....	147
Figura 4.52: Influência do Teor de Cinza de Fundo nas Misturas S70/CF27/C3 e S60/CF37/C3 na Deformação Permanente com cura de 90 dias.....	148

Figura 4.53: Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 na Deformação Permanente com cura de 7 dias.....	148
Figura 4.54: Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 na Deformação Permanente com cura de 28 dias.....	149
Figura 4.15: Influência do Teor de Cinza Volante nas Misturas S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3 na Deformação Permanente com cura de 90 dias.....	149
Figura 4.16 - Estrutura do Pavimento adotada no SisPav (Fonte: Vizcarra, 2010)..	151
Figura 4.17: Características do Tráfego adotado no SisPav para um dos períodos de projeto (Fonte: Vizcarra, 2010)	151
Figura 4.18: Características do Clima adotadas no SisPav neste estudo.....	152
Figura 4.19 - Variação das espessuras da camada de base em função do período de projeto.....	153

Lista de tabelas

Tabela 3.1 : Descrição e Quantidades dos Ensaios.....	66
Tabela 3.2: Composição e Teores das Misturas estudadas nesta pesquisa.....	76
Tabela 3.3a: Datas e tempos de cura dos corpos-de-prova do Ensaio de MR.....	90
Tabela 3.1b: Datas e tempos de cura dos corpos-de-prova do Ensaio de MR.....	91
Tabela 3.2: Datas e tempos de cura dos corpos-de-prova dos Ensaios de Deformação Permanente.....	93
Tabela 4.1: Resultados da Massa Específica dos Grãos.....	100
Tabela 4.2: Resultados das Análises Granulométricas dos materiais deste estudo...	102
Tabela 4.3: Classificação SUCS dos materiais desta pesquisa.....	103
Tabela 4.4: Classificação HRB dos materiais estudados nesta pesquisa.....	105
Tabela 4.5: Elementos Químicos presentes nas Cinzas e Misturas deste estudo.....	106
Tabela 4.6: Componentes Químicos das Misturas deste estudo.....	109
Tabela 4.7: Resultados Analíticos do Ensaio de Lixiviação – Parâmetros Inorgânicos (TASQA, 2010).....	110
Tabela 4.8: Resultados Analíticos do Ensaio de Lixiviação – Parâmetros Orgânicos (TASQA, 2010).....	111
Tabela 4.9: Resultados Analíticos do Ensaio de Solubilização – Parâmetros Inorgânicos (TASQA, 2010).....	111
Tabela 4.10: Resultados Analíticos do Ensaio de Solubilização – Parâmetros Orgânicos (TASQA, 2010).....	111
Tabela 4.11: Resultados dos Ensaio de Compactação dos materiais deste estudo.	111
Tabela 4.12a: Coeficientes do Modelo Composto pelo Programa STATISTICA para os módulos de resiliência dos matérias deste estudo.....	121
Tabela 4.16b: Coeficientes do Modelo Composto pelo Programa STATISTICA para os módulos de resiliência dos materiais deste estudo.....	122
Tabela 4.13: Resultados dos Ensaio de Deformação Permanente de alguns materiais deste estudo.....	143
Tabela 4.14: Coeficientes do Modelo Composto utilizados no SisPav para representar os materiais do presente estudo.....	152
Tabela 4.15: Espessura da Camada de Base em função da Vida Útil do Projeto para o solo ou mistura estudados.....	153

Lista de quadros

Quadro 2.1: Classificação das Pozolanas segundo NBR 12653/1999 e características gerais das cinzas brasileiras (Fonte: Rohde et al., 2006).....	34
Quadro 2.2: Características da cinza volante e pesada, produtos, vantagens (Fonte:Pozzobon,1999).....	40
Quadro 2.3: Composição Média das Cales Brasileiras (Fonte: Guimarães, 2002).....	44
Quadro 2.4: Previsão da quantidade de cal em função dos diferentes tipos de solo (Fonte: Ingles & Metcalf, 1972 apud Sandroni & Consoli, 2010).....	48
Quadro 2.5: Aplicações de Misturas com Cinzas de Fundo em Projetos de Pavimentação (Fonte: Schroeder, 1994 apud Farias, 2005).....	57
Quadro 3.1: Especificações dos Carvões Energéticos Brasileiros. (Fonte: Portaria 100/1987 – CNP).....	73
Quadro 3.2: Exigências Físicas e Químicas da Cal (Fonte: Sandroni & Consoli, 2010).....	75
Quadro 3.3: Níveis de tensões utilizados durante o Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas (Fonte: Medina & Motta, 2005).....	89
Quadro 4.1: Componentes Químicos das Cinzas de Fundo e Volante determinados por Mendonça (2004) (Fonte: Ubaldo, 2005).....	107
Quadro 4.2: Concentração dos principais constituintes das cinzas de fundo e volante de diferentes procedências (Fonte: Chies (2003, apud Ubaldo, 2005)).....	108

Lista de abreviaturas

RCD	Resíduo de Construção e Demolição
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EPE	Empresa Pesquisa Energética
ASTM	American Society for Testing and Materials
CELUSA	Centrais Hidrelétricas de Urubupunga S.A
CSH	Silicato Hidratado de Cálcio
CAH	Aluminato Hidratado de Cálcio
ISC ou CBR	Índice de Suporte Califórnia
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
FHWA	Federal Highway Administration
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
DRM	Departamento de Recursos Minerais
SATC	Associação Beneficiante da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
CNP	Conselho Nacional do Petróleo
CE	Carvão Energético
EDX	Espectrômetro de fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva
LVDT	Linear variable differential transformer
HRB	Highway Research Board
MEAS	Massa Específica Aparente Seca

Lista de símbolos

MR	Módulo de resiliência
σ_d	Tensão desviadora
ε_r	Deformação Vertical Resiliente
σ_3	Tensão confinante
S	Solo
CF	Cinza de Fundo
CV	Cinza Volante
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
IP	Índice de Plasticidade
D_t	Densidade Real dos Grãos a Temperatura t
k_{24}	razão entre a densidade relativa da água a temperatura t e a 20 °C, tabelada na norma.
G_s	Massa Específica Real do s Grãos
MO	Teor de Matéria Orgânica
A	massa da amostra seca em estufa, à temperatura de 105 a 110 °C (g)
B	massa da amostra queimada em mufla, à temperatura de 440 °C (g)
w_{ot}	Umidade ótima
$\rho_{dmáx}$	Massa Específica Aparente Máxima Seca
k_1, k_2, k_3	Coeficientes de Regressão
N_f	Vida de Fadiga
fcl	Fator Campo Laboratório
ε_t	Deformação Específica de tração

*“Só existem dois dias no ano em que nada pode ser feito.
Um se chama ontem e outro se chama amanhã, portanto,
hoje é o dia certo para amar, acreditar, fazer e
principalmente viver.”*

Dalai Lama

*“Sábio é aquele que conhece os limites da própria
ignorância.”*

Sócrates