



Gino Omar Calderón Vizcarra

**Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para
Base de Pavimentos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande

Co-orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Rio de Janeiro
Março de 2010



Gino Omar Calderón Vizcarra

**Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para
Base de Pavimentos**

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

Michéle Dal Toé Casagrande

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Laura Maria Goretti da Motta

Co-orientadora

UFRJ/COPPE

Ben-Hur de Albuquerque e Silva

IME/RJ

Tácio Mauro Pereira de Campos

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de março de 2010

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

Gino Omar Calderón Vizcarra

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Nacional Jorge Basadre Grohmann (Tacna – Peru) em 2000. Trabalhou em projetos e obras no Peru no período 2001–2007. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2008, desenvolvendo Dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a pavimentos.

Ficha Catalográfica

Calderón Vizcarra, Gino Omar

Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos / Gino Omar Calderón Vizcarra; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande ; co-orientadora: Laura Maria Goretti da Motta. – 2010.

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

Dissertação (Mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Cinzas de incineração de resíduo sólido urbano (RSU). 3. Cinza volante. 4. Cinza de fundo. 5. Base de pavimentos. 6. Misturas solo-cinza. 7. Estabilização de solos. I. Casagrande, Michele Dal Toé. II. Motta, Laura Maria Goretti da. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Dedico esta Dissertação à minha avó
Carmen Luisa Vizcarra Galindo
e à minha prima
Diva Daleska Duran Vizcarra

Agradecimentos

Talvez esta seja a página mais difícil de ser escrita, pelo simples fato que são tantos para agradecer, tantos para serem apenas lembrados e outros tantos que merecem muito mais que um simples nome citado nestas páginas. Então peço desculpas pelos que por ventura venha esquecer.

À minha avó Carmen Vizcarra, pelo exemplo de vida.

Aos meus pais Rosendo e Rosa, pelo amor e carinho.

À minha família no Peru, em especial à minha tia Elizabeth, pela sua eterna preocupação.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade de estudar nesta prestigiosa instituição.

À minha orientadora, Professora Michéle Dal Toé Casagrande, com quem sempre me senti à vontade. Obrigado por ter acreditado em mim e sempre me apoiado, motivado, incentivado, compreendido, inspirado e todo o demais tão necessário para poder fazer qualquer empreendimento na vida. Obrigado, além dos ensinamentos e por tudo que consegui aprender.

À Professora Laura Maria Goretti da Motta, por ter me permitido ser mais um dos seus orientados, está por demais falar do seu grande profissionalismo, é para mim um grande privilégio.

À Banca Examinadora pelas sugestões ao presente trabalho.

A todos os colegas do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, em especial à Mariluce Ubaldo, pelo apoio e acompanhamento da parte

experimental desta dissertação, assim como ao Bororó e aos Técnicos Washington, Thiago, Allan, Leandro, Roberto e Rodrigo pela ajuda nas moldagens e preparação das amostras. Ao Carlinhos, Serginho, Maria da Gloria, Rosângela, Sandra e Vera por terem me considerado como parte da família COPPE.

Aos professores da PUC-Rio, pelas aulas ministradas, e pelos quais guardo grande respeito, apreço e admiração.

A todos os colegas das turmas 2007.2, 2008.1, 2008.2 e 2009.1 com os quais compartilhei as aulas.

Ao Gerson Alves Bastos, pela sua amizade, e por ter compartilhado as muitas horas de estudo na sala 607.C.

Ao Carlos Aguilar, pela sua generosa acolhida na minha imprevista chegada ao Rio de Janeiro.

Ao Luis Paullo, Iván Aguilar e Julio Bizarreta, pelo simples e aventureiro convívio no Alto Gávea.

À Alejandra Cruz, Bruno Carvalho, Iván Benites, Rocío Pérez, Juliana e Nilthson, pela sua amizade.

À Lucianna Szeliga, pelo acompanhamento e realização de parte dos ensaios de caracterização.

À Usina Verde S.A. na pessoa do Eng. Jorge Nascimento, pelo fornecimento das cinzas utilizadas neste estudo.

À Rita de Cassia, pelo constante apoio e preocupação.

À CAPES e ao CNPq, pela oportunidade e financiamento desta pesquisa.

Resumo

Vizcarra, Gino Omar Calderón; Casagrande, Michéle Dal Toé; Motta, Laura Maria Goretti. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. Rio de Janeiro, 2010. 120 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo apresenta a caracterização de cinzas obtidas da incineração de Resíduo Sólido Urbano (RSU) em usina geradora de energia elétrica, tendo como objetivo avaliar sua aplicabilidade em camadas de base de pavimentos rodoviários, através da mistura destas cinzas a um solo argiloso não laterítico regional. Foram realizados ensaios de caracterização química, física e mecânica, para o solo puro e para o mesmo com a adição de diferentes teores de cinzas (20 e 40%), bem como 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. A cinza volante diminuiu a expansibilidade do material, apresentando um aumento substancial no valor de CBR. Os resultados obtidos demonstram que o módulo resiliente do solo em estudo é dependente da tensão desviadora e que a inserção de cinza volante e cura prévia da mistura dobram o valor do módulo resiliente, o que resulta em 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 obtidos foram satisfatórios, sendo dependentes do teor e do tipo de cinza utilizado, ressaltando o emprego positivo da cinza volante de RSU 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. Ressalta-se que estudos sobre a utilização deste tipo de resíduos em pavimentação são raros no país e esta pesquisa agrega um conhecimento exploratório do potencial de sua aplicabilidade.

Palavras-chave

Cinzas de incineração de resíduo sólido urbano (RSU); cinza volante; cinza de fundo; base de pavimentos; misturas solo.cinza; estabilização de solos.

Abstract

Vizcarra, Gino Omar Calderón; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor); Motta, Laura Maria Goretti (Co-advisor). **Applicability of Municipal Solid Waste Ash for Pavements Base**. Rio de Janeiro, 2010. 120 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study presents the characteristics of Municipal Solid Waste (MSW) incineration ash obtained from electric energy generation place, to evaluate the MSW ash applicability road base as a pavement layer through the ash mixture with a non.lateritic regional clay soil. Chemical, physical, mechanical tests and the mechanistic.empirical design for a typical pavement structure were carried out on the pure soil and also in the soil mixture with the addition of different ash content (20 and 40%). The addition of MSW ash had a consistent mechanical behavior to be used on low traffic volume road pavements. Fly ash reduced the expansion of the material, showing a substantial increase in the CBR value. The results show that the resilient modulus of soil is dependent on the deviator stress and the fly ash addition with a mixture cure increase the value of resilient modulus, which is revealed by the decrease in thickness of the base layer, compared to pure soil for the same level of loading and the same design requirements. The results were satisfactory, being dependent on the content and type of ash used, highlighting the positive work of MSW fly ash for use in base road pavement layers, minimizing the current problems of waste disposal in landfills, giving a noble use for this material. It is noteworthy that studies on the use of such waste in pavements are rare and this research adds to an exploratory knowledge of its potential applicability.

Keywords

Municipal solid waste (MSW) incineration ash; fly ash; bottom ash; pavements base; soil.ash mixtures; soil stabilization.

Sumário

1 Introdução	19
1.1 Relevância e justificativa da pesquisa	19
1.2 Objetivos	20
1.3 Organização da Dissertação	21
2 Revisão Bibliográfica	22
2.1 Estabilização de Solos	22
2.1.1 Estabilização Mecânica	23
2.1.2 Estabilização Física	24
2.1.3 Estabilização Química	25
2.1.3.1 Solo.cimento	26
2.1.3.2 Solo.cal	28
2.2 Solo.cinza de carvão	30
2.2.1 Aplicações do Solo.cinza de carvão	31
2.2.2 Utilização de cinzas de carvão na Pavimentação	33
2.3 Solo.cinza de RSU	34
2.4 Utilização de resíduos em Pavimentação.	37
2.5 Dimensionamento de pavimentos asfálticos	40
2.5.1 Módulo de Resiliência	41
2.5.2 Sistema computacional SisPav	43
2.6 Solos expansivos	44
2.7 Considerações sobre a revisão bibliográfica	45
3 Programa Experimental	46
3.1 Materiais	46
3.1.1 Solo	46
3.1.2 Cinza Volante e Cinza de Fundo	47
3.1.2.1 Produção das cinzas de RSU	48
3.1.2.2 Processo de incineração	48
3.1.3 Misturas Solo/Cinza	53
3.2 Métodos e Procedimentos de Ensaio	54
3.2.1 Ensaio de caracterização física	55
3.2.1.1 Massa Específica Real dos Grãos	55
3.2.1.2 Limites de Atterberg	55
3.2.1.3 Análise granulométrica	56
3.2.1.4 Ensaio de MCT	56

3.2.2 Ensaio químicos	62
3.2.2.1 Composição Química	62
3.2.2.2 Teor de Matéria Orgânica	63
3.2.2.3 Solubilização e Lixiviação	64
3.2.3 Ensaio de Caracterização Mecânica	65
3.2.3.1 Ensaio de Compactação	65
3.2.3.2 Ensaio de Modulo de Resiliência	66
3.2.3.3 Ensaio de CBR	72
3.2.4 Dimensionamento de pavimento típico	74
3.3 Considerações sobre o Programa Experimental	76
4 Apresentação e Discussão dos Resultados	77
4.1 Ensaio de caracterização física	77
4.1.1 Densidade Real dos Grãos	77
4.1.2 Limites de Atterberg	79
4.1.3 Análise granulométrica	83
4.1.4 Classificação SUCS	85
4.1.5 Classificação AASHTO	85
4.1.6 Classificação MCT	86
4.2 Ensaio químicos	87
4.2.1 Composição Química	87
4.2.2 Teor de Matéria Orgânica	90
4.2.2 Ensaio de Lixiviação	92
4.2.2 Ensaio de Solubilização	93
4.3 Ensaio de Caracterização Mecânica	95
4.3.1 Ensaio de Compactação	95
4.3.2 Ensaio de Modulo de Resiliência	99
4.3.2.1 Influência do tempo de cura e atraso na compactação no modulo resiliente	103
4.3.2.2 Influência do número de ciclos de carregamento N no modulo resiliente	106
4.3.3 Ensaio de CBR	106
4.4 Dimensionamento de pavimento típico	107
4.5 Considerações sobre a apresentação e discussão dos resultados	110
5 Considerações Finais	111
5.1 Conclusões	111
5.2 Sugestões para pesquisas futuras	112
Bibliografia	114

Lista de Figuras

Figura 2.1. Efeito do tempo sobre solo estabilizado com CVRSU, cal e cimento	36
Figura 2.2. Tensões numa estrutura de pavimento	40
Figura 3.1. Solo não.laterítico estudado	47
Figura 3.2. Cinza Volante de RSU.	47
Figura 3.3. Cinza de Fundo de RSU.	47
Figura 3.4. Composição do RSU da Usina Verde (FONTES, 2008)	48
Figura 3.5. Segregação de materiais para reciclagem	50
Figura 3.6. Processo de geração de energia elétrica na Usina Verde	51
Figura 3.7. Etapas do processo de incineração de RSU na Usina Verde S/A	52
Figura 3.8. Compactador MCT da COPPE/UFRJ usado nesta pesquisa.	58
Figura 3.9. Cápsulas imersas para o ensaio de perda por imersão imediatamente após imersão.	60
Figura 3.10. Perda por imersão do solo deste estudo após 24 horas de imersão.	60
Figura 3.11 Equipamento de EDX do LABEST da COPPE/UFRJ usado nesta pesquisa.	63
Figura 3.12. Equipamento mecânico para compactação de corpos de prova.	68
Figura 3.13. Molde tripartido 10 x 20 cm, para compactação de corpos de prova.	68
Figura 3.14. Esquema Ilustrativo do Equipamento de Ensaio Triaxiais de Carga Repetida.	70
Figura 3.15. Equipamento de Ensaio Triaxiais de Carga Repetida da COPPE/UFRJ usado nesta pesquisa.	71
Figura 3.16. Tomada de leitura de deformação no ensaio CBR na amostra desta pesquisa.	73
Figura 3.17. Fotografia do Equipamento utilizado para obtenção do CBR nesta pesquisa.	74
Figura 3.18. Estrutura do pavimento típico adotada para a análise mecanística.empírica.	75
Figura 3.19. Fluxograma do método integrado de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos do SisPav.	75
Figura 4.1. Variação da densidade real dos grãos com o teor de cinza	78

volante neste estudo.	
Figura 4.2. Variação da densidade real dos grãos com o teor de cinza de fundo neste estudo.	78
Figura 4.3. Variação dos Limites de Atterberg com o teor de cinza volante neste estudo.	79
Figura 4.4. Variação do Índice de Plasticidade com o teor de cinza volante neste estudo.	80
Figura 4.5. Variação dos Limites de Atterberg com o teor de cinza de fundo deste estudo.	80
Figura 4.6. Variação do Índice de Plasticidade com o teor de cinza de fundo deste estudo.	81
Figura 4.7. Efeito da estabilização com cinza volante sobre a plasticidade de solos estabilizados.	82
Figura 4.8. Efeito da cinza volante sobre o índice de plasticidade e limite de contração linear de solos de Degirmenlik e Tuzla, estabilizados com cinza volante.	82
Figura 4.9. Curvas Granulométricas do solo, cinza de fundo e cinza volante deste estudo.	83
Figura 4.10. Curvas Granulométricas do solo, cinza volante e misturas do solo com 20% e 40% de cinza volante deste estudo.	83
Figura 4.11. Granulometria do solo, cinza de fundo e misturas do solo com 20% e 40% de cinza de fundo deste estudo.	84
Figura 4.12. Classificação MCT para o solo puro.	86
Figura 4.13. Curvas de compactação de solo e misturas com 20% e 40% de cinza volante deste estudo.	95
Figura 4.14. Variação da Massa específica aparente seca com o teor de cinza volante.	96
Figura 4.15. Variação do teor de umidade ótimo com o teor de cinza volante deste estudo.	97
Figura 4.16. Curvas de compactação de solo e misturas com 20% e 40% de cinza de fundo deste estudo.	97
Figura 4.17. Variação da Massa específica aparente seca com o teor de cinza de fundo deste estudo.	98
Figura 4.18. Variação do teor de umidade ótimo com o teor de cinza de fundo deste estudo.	98
Figura 4.19. Curva de compactação das misturas solo/cinza pesada.	99

Figura 4.20. Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente do solo puro deste estudo.	100
Figura 4.21. Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente da mistura S80/CV20 deste estudo.	101
Figura 4.22. Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente da mistura S60/CV40 deste estudo.	101
Figura 4.23. Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente da mistura S80/CF20 deste estudo.	102
Figura 4.24. Gráfico 3D do modelo composto do Módulo Resiliente da mistura S60/CF40 deste estudo.	102
Figura 4.25. Variação do Módulo Resiliente vs. tensão desviadora da mistura S60/CV40 com o tempo de atraso e o tempo de cura deste estudo.	104
Figura 4.26. Variação do Módulo Resiliente vs. tensão confinante da mistura S60/CV40 com o tempo de atraso e o tempo de cura deste estudo.	105
Figura 4.27. Variação do Módulo Resiliente vs. tensão desviadora da mistura S60/CV40 com o teor de umidade deste estudo.	105
Figura 4.28. Variação do Módulo Resiliente vs. tensão confinante da mistura S60/CV40 com o teor de umidade deste estudo.	106
Figura 4.29. Estrutura do pavimento adotada.	108
Figura 4.30. Dados do clima utilizado para o programa SisPav.	108
Figura 4.31. Variação das espessuras de camada em função do período de projeto.	109

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Combinações de Material/Aplicação em pavimentação.	35
Tabela 2.2 – Tensões numa estrutura de pavimento	39
Tabela 2.3 – Modelos de comportamento tensão.deformação de solos observados no Brasil.	43
Tabela 3.1 - Símbolos referentes a cada material.	53
Tabela 3.2 - Valores típicos de c' para diferentes granulometrias de solos.	58
Tabela 3.3 - Valores típicos de d' para diferentes granulometrias de solos	59
Tabela 3.4 - Níveis de tensões aplicados na fase de condicionamento	70
Tabela 3.5 – Níveis de Tensões utilizados durante o Ensaio Triaxial Dinâmico especificado pela COPPE	71
Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para o solo, cinza volante e misturas.	77
Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para o solo, cinza de fundo e misturas.	77
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg para o solo e misturas com cinza volante.	79
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg para o solo e misturas com cinza de fundo neste estudo.	80
Tabela 4.5 – Resultados das análises granulométricas.	84
Tabela 4.6 – Índices para classificação SUCS.	85
Tabela 4.7 – Índices para classificação AASHTO.	85
Tabela 4.8 – Composição química do solo deste estudo realizado em duas amostras do mesmo	87
Tabela 4.9 – Composição química de três argilas de comportamento não.laterítico.	88
Tabela 4.10 -. Análise química semiquantitativa de óxidos para três solos residuais e rocha alterada.	88
Tabela 4.11 - Composição química da Cinza Volante de RSU, mistura (S60/CV40) e Cinza Volante de Carvão	89
Tabela 4.12 - Composição química da Cinza de Fundo de RSU mistura (S60/CV40) e Cinza de Fundo de Carvão.	90
Tabela 4.13 - Teor de matéria orgânica do solo, da cinza de fundo e da cinza volante deste estudo.	91
Tabela 4.14 - teor de matéria orgânica da mistura S80/CV20, S60/CV40,	91

S80/CF20 e S60/CF40 deste estudo.

Tabela 4.15 – Resultados analíticos: Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos	92
Tabela 4.16 – Resultados analíticos: Lixiviado - Parâmetros Orgânicos	92
Tabela 4.17 – Resultados analíticos: Solubilizado - Parâmetros Inorgânicos	93
Tabela 4.18 – Resultados analíticos: Solubilizado - Parâmetros Orgânicos	94
Tabela 4.19 - Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.	96
Tabela 4.20 - Valores dos coeficientes do modelo composto para cada material ou mistura desta pesquisa.	100
Tabela 4.21 - Variação dos coeficientes do modelo composto com o atraso na compactação e o tempo de cura para a mistura S60/CV40 deste estudo.	104
Tabela 4.22 - Valores de expansão aos 4 dias de imersão, sem tempo de cura e três dias de atraso na compactação após hidratação.	107
Tabela 4.23 - Valores de CBR	107
Tabela 4.24 - Dados do tráfego.	108
Tabela 4.25 - Espessura de camada em função do período de projeto para cada tipo de solo ou mistura.	109

Lista de Abreviaturas

ABNT	= Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAP	= Cimento Asfáltico de petróleo
CBR	= <i>California Bearing Ratio</i>
CH	= Argila Inorgânica de Alta Plasticidade
CF	= Cinza de Fundo
CV	= Cinza Volante
CPs	= Corpos de Prova
IP	= Índice de Plasticidade
ISC	= Índice de Suporte Califórnia
MCT	= Miniatura Compactado Tropical
MR	= Módulo de Resiliência
NG'	= Não.Laterítico Argiloso
LL	= Limite de Liquidez,
LP	= Limite de Plasticidade
LABEST	= Laboratório de Estruturas
LVDT	= Linear Variable Differential Transformer"
SisPAV	= Sistema de Pavimentos
TNO	= Organização Holandesa para Pesquisa Científica Aplicada
RSU	= Resíduos Sólidos Urbanos

Lista de Símbolos

$w_{ótm}$	= umidade ótima de compactação
$\gamma_{dmáx}$	= peso específico seco aparente máximo
γ_d	= massa específica seca
w	= umidade
MR	= módulo resiliente
σ_d	= tensão desviadora
σ_3	= tensão confinante
E	= expansão
h	= altura final do corpo de prova.
h_i	= altura inicial do corpo de prova.
N_f	= vida de fadiga
ϵ_t	= deformação específica de tração
Gs	= massa específica real dos grãos
c'	= coeficiente do ensaio MCT
d'	= coeficiente angular do ramo seco da curva de compactação referente a energia de 12 golpes no ensaio Mini.MCV
e'	= coeficiente do ensaio MCT
Pi	= perda de massa por imersão no ensaio MCT
k_1, k_2, k_3	= coeficientes do modelo Composto
e	= espessura
v	= coeficiente de Poisson
SiO ₂	= Sílica
Al ₂ O ₃	= Alumina
Fe ₂ O ₃	= Hematita
SO ₃	= anidrido sulfúrico
CaO	= óxido de cálcio
Cl	= cloro
TiO ₂	= Dióxido de titânio
K ₂ O	= Óxido de potássio
P ₂ O ₅	= Pentóxido de fósforo
ZnO	= Óxido de zinco
Cr ₂ O ₃	= Óxido de crômio (III)
MnO	= Óxido de manganês (II)
SrO	= Óxido de estrôncio

ZrO ₂	= Óxido de zircônio
CuO	= Óxido de cobre (II)
PbO	= Óxido de chumbo (II)
AC	= Actínio
Br	= Bromo
Rb ₂ O	= Óxido de Rubídio
Y ₂ O ₃	= Óxido de ítrio (III)
MgO	= Óxido de magnésio
Ni	= Níquel
V ₂ O ₅	= Pentóxido de vanádio
NbO	= Monóxido de nióbio
BaO	= Óxido de bário