



Cristian Chacón Quispe

**Comportamento de um solo argiloso estabilizado com
cinzas de resíduo sólido urbano sob carregamento estático**

Dissertação de Mestrado

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

Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro
Março de 2013



Cristian Chacón Quispe

Comportamento de um solo argiloso estabilizado com cinzas de resíduo sólido urbano sob carregamento estático

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

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof^a. Karla Salvagni Heineck

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a. Maria Esther Soares Marques

Instituto Militar de Engenharia

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de Março de 2013

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

Cristian Chacón Quispe

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Nacional de Engenharia do Perú (Lima-Peru) em 2009. Trabalhou em projetos e obras geotécnicas no Peru no período 2007–2010. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2011, desenvolvendo Dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a solos reforçados.

Ficha Catalográfica

Quispe, Cristian Chacón

Comportamento de um solo argiloso estabilizado com cinzas de resíduo sólido urbano sob carregamento estático / Cristian Chacón Quispe ; orientadora Michéle Dal Toé Casagrande – 2013.

150 f. il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses.
 2. Cinzas de resíduo sólido urbano.
 3. Estabilização de solos.
 4. Cinza volante.
 5. Cinza de fundo.
 6. Ensaio triaxiais.
- I. Casagrande, Michéle Dal Taé I. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Dedico esta Dissertação ao meu pai
Darío L. Chacón Iporre que está no céu,
minha mãe Marcelina M. Quispe Loayza
e meu irmão Edwin F. Ccente Quispe .

Agradecimentos

A Deus, por ser sempre meu guia em tudo o que eu faço.

Ao meu pai, Dario L. Chacón Iporre, que agora está no céu, mas sempre acreditou em mim, em minha capacidade e confiou em mim, sendo seu último filho, para cumprir a promessa de ter ingressado a melhor universidade do Perú, a UNI, e agora acabar um passo mais e ser um futuro mestre numa das melhores universidades do Brasil, PUC-Rio.

A minha mãe, Marcelina M. Quispe Loayza, por ser o melhor exemplo que eu tenho na vida, exemplo de esforço e perseverança para conseguir qualquer objetivo proposto.

A meu irmão, Edwin Fernando Ccente Quispe, por ser mais que um irmão, um exemplo de vida e com que vou ficar agradecido a minha vida toda.

A minha namorada, Leydi Del Rocio Silva Callpa, pela compreensão, carinho e amor em todo momento.

A 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.

A minha orientadora, Professora Michéle Dal Toé Casagrande, com quem sempre me senti à vontade. Obrigado por ter me aceitado como seu orientado, foi a melhor escolha que eu fiz no ano passado depois de não poder trabalhar com o professor Sayão por seu problema de saúde. Obrigado por me ajudar em todo

momento desta pesquisa e por ser mais que uma orientadora, ser uma amiga com quem espero contar a vida toda.

A meus amigos do Peru Jhon, Hans, Diego, Joao, Marco, Abraham, Luis, Hugo, Alfonso por suas mensagens de apoio e me cumprimentar com muito afeto cada vez que voltei para Peru nestes dois anos.

A todos meus amigos da PUC-Rio, começando por meus amigos da sala 607D, Frank, Nilthson, Phillip, Julio, Fredy, Juliana, Rafael e aos meus amigos da Pós-graduação Alexander, Elvis, Luis Fernando, Eliot Jorge, Gary, Lidia, Manuella, Ingrid, Alena, João e mais pelos momentos de conversa e amizade que vai ficar para a vida toda.

Aos professores da Engenharia Civil da PUC-Rio pelas aulas ditadas e os conhecimentos transmitidos durante estes dois anos de mestrado.

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

A pessoal de Iniciação Científica, Phillipe, Tatiana, Paula e Marina, pela ajuda e realização de parte dos ensaios de caracterização desta dissertação.

A Monica Moncada pela ajuda, auxílio e disposição fornecida no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente. Aos técnicos do laboratório Amaury, meu grande amigo, e Josué pelo apoio para realizar os ensaios.

A CAPES pela oportunidade e financiamento desta pesquisa.

Resumo

Quispe, Cristian Chacón; Casagrande, Michéle Dal Toé. **Comportamento de um solo argiloso estabilizado com cinzas de resíduo sólido urbano sob carregamento estático.** Rio de Janeiro, 2013. 150 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e seu consequente reaproveitamento ou não é um problema existente no Brasil e no mundo. No Brasil, a produção de energia mediante incineração de RSU ainda está na sua etapa inicial, como por exemplo, com a implantação da Usina Verde no campus da UFRJ, com a consequente produção de subprodutos, como as cinzas volante e de fundo. Este estudo apresenta o comportamento de um solo coluvionar argiloso estabilizado com cinzas de RSU sob carregamento estático, tendo como principal objetivo avaliar a influência destas cinzas misturadas com o solo para possíveis aplicações em obras geotécnicas. Para isso foram realizados ensaios de caracterização física, química e mecânica, como ensaios de compactação Proctor Normal e ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados (CID), para o solo puro e misturas solo-cinza. Foram avaliadas as influências do teor de cinzas (20%, 30% e 40% de cinza volante e de cinza de fundo), bem como do tempo de cura (30 e 60 dias). Os resultados mostram que todas as misturas solo-cinza apresentam melhores parâmetros de resistência, em comparação do solo puro, onde as misturas solo-cinza volante apresentaram melhores resultados quando comparadas às misturas solo-cinza de fundo. A variação de teor de cinza adicionado ao solo, sem cura, mostra que para maiores teores de cinza volante a coesão diminui e ocorre o contrário com a cinza de fundo. Com relação ao tempo de cura, na maioria dos casos houve melhora do comportamento das misturas solo-cinza em comparação ao obtido sem cura. O teor de cinza (volante ou de fundo), tempo de cura e a tensão de confinamento influenciam na deformação volumétrica das misturas solo-cinza, apresentando menores deformações volumétricas para maiores teores de cinza e maiores tempos de cura. As misturas com 40% de cinza volante e 30% de cinza de fundo apresentaram as melhores características de resistência e poderiam ser utilizadas como estabilizante no solo

estudado, cumprindo exigências geotécnicas e ambientais, além de rebaixar os custos de obra e dar um destino mais nobre para as cinzas de RSU.

Palavras-chave

Cinzas de resíduo sólido urbano; estabilização de solos; cinza volante; cinza de fundo; ensaios triaxiais.

Abstract

Quispe, Cristian Chacón; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor). **Behavior of clayey soil stabilized with municipal solid waste ashes under static load.** Rio de Janeiro, 2013. 150 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Management of Municipal Solid Waste (MSW) and its subsequent reuse or not is an existing problem in Brazil and the world. In Brazil, the production of energy through incineration of MSW is still in its initial stage, for example, with the implementation of “Usina Verde” on campus at UFRJ, with the consequent production of byproducts, such as fly and bottom ashes. This study presents the behavior of a colluvial clayey soil stabilized with ashes from MSW under static load, with the main objective to evaluate the influence of these ashes mixed with the soil for possible applications in geotechnical works. For this characterization were performed physical, chemical and mechanical tests, as Proctor compaction tests Normal isotropically consolidated and drained triaxial (CID) for the pure and soil-ash mixtures. Were evaluated the influence of the ash content (20%, 30% and 40% fly ash and bottom ash) and of curing time (30 and 60 days). The results show that all mixtures soil-ash have better shear strength compared to the pure soil, where the soil- fly ash mixtures showed better results compared to mixtures of soil- bottom ash. The variation of the ash content added to the soil, without curing, shows that higher levels of ash the cohesion decrease and the opposite occurs with the bottom ash. Respect to the curing time, in most cases there was as improvement of the behavior of mixtures soil-ash compared to that obtained without curing. The ash content (fly or bottom), curing time and confinement stress influence the volumetric deformation to soil-ash mixtures, showed lower volumetric deformations to higher concentrations of ash and longer curing times. The mixtures with 40% fly ash and 30% bottom ash, showed the best characteristics of strength and could be used as stabilizer in the studied soil, compliance requirements geotechnical and environmental, in addition to lower labor costs and give a nobler destiny for the ashes of MSW.

Keywords

Municipal solid waste ashes; soil stabilization; fly ash; bottom ash; triaxial tests.

Sumário

1	Introdução	25
1.1.	Relevância e Justificativa da Pesquisa	25
1.2.	Objetivos	27
1.3.	Organização do Trabalho	27
2	Revisão Bibliográfica	29
2.1.	Considerações Iniciais	29
2.2.	Resíduo Sólido Urbano e seu impacto ao Meio Ambiente	30
2.3.	Aproveitamento das Cinzas de RSU	34
2.4.	Estabilização de solos	39
2.4.1.	Solo-Cal	42
2.4.2.	Solo-Cimento	46
2.4.3.	Solo-Cinza de Carvão	48
2.5.	Considerações Finais	52
3	Programa Experimental	54
3.1.	Materiais	54
3.1.1.	Solo	54
3.1.2.	Cinza Volante e Cinza de Fundo	58
3.1.2.1.	Produção das Cinzas de RSU	59
3.1.2.2.	Processo de Incineração	61
3.1.3.	Misturas Solo-Cinza	66
3.2.	Quantidade e Cronograma de ensaios	66
3.2.1.	Quantidade de ensaios	67
3.3.	Métodos e Procedimentos de Ensaio	68
3.3.1.	Ensaio de Caracterização Física	69
3.3.1.1.	Densidade Real dos Grãos	69
3.3.1.2.	Limites de Atterberg	69
3.3.1.3.	Análise Granulométrica	70
3.3.2.	Ensaio Químicos	70

3.3.2.1. Composição Química	70
3.3.2.2. Teor de Matéria Orgânica	71
3.3.2.3. Solubilização e Lixiviação	72
3.3.3. Ensaaios de Caracterização Mecânica	73
3.3.3.1. Ensaaios de Compactação Proctor Normal	73
3.3.3.2. Ensaaios Triaxiais	74
3.3.3.3. Ensaaios Triaxiais CID	74
3.3.3.3.1. Equipamento utilizado	74
3.3.3.3.2. Preparação dos corpos de prova	76
3.3.3.3.3. Procedimento de saturação dos corpos de prova	81
3.3.3.3.4. Adensamento e Cálculo do t_{100}	81
3.3.3.3.5. Cálculo da velocidade de cisalhamento e etapa de Cisalhamento	82
3.3.3.3.6. Análises de Resistência	84
4 Resultados e Análises	86
4.1. Ensaaios de Caracterização Física	86
4.1.1. Densidade Real dos Grãos (Gs)	86
4.1.2. Limites de Atterberg	87
4.1.3. Análise Granulométrica	88
4.1.4. Classificação SUCS	90
4.2. Ensaaios Químicos	92
4.2.1. Composição Química	92
4.2.2. Teor de Matéria Orgânica	96
4.2.3. Ensaio de Lixiviação	97
4.2.4. Ensaio de Solubilização	99
4.3. Ensaaios de Caracterização Mecânica	101
4.3.1. Ensaaios de Compactação Proctor Normal	101
4.3.2. Ensaaios Triaxiais CID	103
4.3.2.1. Influência do tipo de cinza	105
4.3.2.1.1. Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento comparando a influência do tipo de cinza	112
4.3.2.2. Influência do Teor de Cinza	116

4.3.2.2.1. Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento comparando a influência do teor de cinza	121
4.3.2.3. Influência do Tempo de Cura	123
4.3.2.3.1. Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento comparando a influência do tempo de cura	133
5 Considerações Finais	142
5.1. Conclusões	142
5.2. Sugestões para pesquisas futuras	145
Referências Bibliográficas	146

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Destinação final de RSU em toneladas por dia. (ABRELPE, 2011).....	32
Figura 2.2 – Geração de RSU em toneladas por ano. (ABRELPE, 2011)	32
Figura 2.3 – (a) Coleta de RSU em toneladas por ano. (b) Destinação final do RSU (ABRELPE, 2011).....	33
Figura 2.4 – Efeito do teor de cal sobre a resistência a compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias. (Inglês & Metcalf, 1972)	44
Figura 2.5 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência a compressão simples para alguns solos estabilizados com cal. (Inglês & Metcalf, 1972).....	45
Figura 3.1 - Localização do Campo Experimental II PUC-Rio (Soares 2005).....	55
Figura 3.2 – Argila utilizada - solo coluvionar.....	56
Figura 3.3 - Descrição morfológica do perfil do Campo Experimental II da PUC-Rio (Dylac, 1994).....	57
Figura 3.4 – Cinza Volante de RSU	59
Figura 3.5 – Cinza de Fundo de RSU	59
Figura 3.6 – Composição do RSU da COMLURB e da Usina Verde (FONTES, 2008)	60
Figura 3.7 – Segregação de materiais para reciclagem na Usina Verde (USINA VERDE, 2009).....	63
Figura 3.8 – Processo de geração de energia elétrica na Usina Verde (USINA VERDE, 2009).....	64
Figura 3.9 – Etapas do processo de incineração de RSU na Usina Verde S/A (Fontes, 2008)	65
Figura 3.10 – Equipamento de EDX do LABEST da COPPE/UFRJ (Vizcarra, 2010).....	71
Figura 3.11 – Mufla de 440 °C usada para as misturas solo-cinza do laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.	72

Figura 3.12 -(a) Caixa leitora de dados; (b) Medidor de Variação de Volume tipo Imperial College; (c) Painel de controle das Pressões; (d) Aplicação de Pressão confinante; (e) Cilindro de Acrílico; (f) Corpo-de-prova; (g) Válvulas da câmara Triaxial; (h) Controle para início do cisalhamento	75
Figura 3.13 – (a) Software CatmanEasy na etapa de cisalhamento, (b) Sistema de aquisição de dados (Ramirez; 2012).....	76
Figura 3.14 - Corpo cilíndrico compactado.....	76
Figura 3.15 – (a) Corpo de prova após moldagem; (b) Corpo de prova após aplainadas a base e a topo	77
Figura 3.16 – Capsulas com mistura de solo-cinza tirados do moldagem	77
Figura 3.17 – Teste de membrana	78
Figura 3.18 – (a) Pesagem do corpo-de-prova para montar na prensa triaxial; (b) Verificação da prensa antes do ensaio.....	78
Figura 3.19 – Colocação do papel filtro.....	79
Figura 3.20 – (a) Colocação do corpo-de-prova no equipamento triaxial; (b) Colocação da membrana com ajuda do molde de aço.	79
Figura 3.21 – Colocação do papel filtro e a pedra porosa no topo do corpo-de-prova.....	80
Figura 3.22 – (a) Fixação da membrana ao corpo de prova com os o-rings; (b) Preenchimento da câmara triaxial com água; (c) Colocação da conexão de pressão confinante.	80
Figura 3.23 – Diferentes critérios para definição de ruptura. (Head, 1986 apud Dias, 2007).....	84
Figura 4.1 – Distribuição granulométrica do solo, cinza volante e cinza de fundo.	88
Figura 4.2 – Distribuição granulométrica do solo, cinza volante e misturas com 20%, 30% e 40% de teor de cinza volante.	89
Figura 4.3 – Distribuição granulométrica do solo, cinza de fundo e misturas com 20%, 30% e 40% de teor de cinza de fundo.	89
Figura 4.4 - Curvas de compactação Proctor Normal do solo e misturas solo-cinza volante.	101
Figura 4.5 - Curvas de compactação Proctor Normal do solo e misturas solo-cinza de fundo.	102

Figura 4.6 - Curvas tensão e deformação volumétrica versus deformação axial para o solo puro (S100), ensaios de compressão triaxial. (Ramirez, 2012)	104
Figura 4.7 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP80CV20 e SP80CF20 em ensaios de compressão triaxial.	106
Figura 4.8 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP70CV30 e SP70CF30 em ensaios de compressão triaxial.	108
Figura 4.9 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP60CV40 e SP60CF40 em ensaios de compressão triaxial.	111
Figura 4.10 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP80CV20 e SP80CF20.	113
Figura 4.11 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP70CV30 e SP70CF30.	113
Figura 4.12 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP60CV40 e SP60CF40.	114
Figura 4.13 – Corpos de prova de SP80CV20; (a) Amostra cisalhada a 50 kPa; (b) Amostra cisalhada a 400 kPa	115
Figura 4.14 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP80CV20, SP70CV30 e SP60CV40 em ensaios de compressão triaxial.	116
Figura 4.15 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP80CF20, SP70CF30 e SP60CF40 em ensaios de compressão triaxial.	119
Figura 4.16 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP80CV20, SP70CV30 e SP60CV40.	121
Figura 4.17 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP80CF20, SP70CF30 e SP60CF40.	122
Figura 4.18 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP80CV20 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias em ensaios de compressão triaxial.	124

Figura 4.19 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP70CV30 sem tempo de cura e com 30 dias em ensaios de compressão triaxial.	126
Figura 4.20 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP60CV40 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias em ensaios de compressão triaxial.	127
Figura 4.21 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP80CF20 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias em ensaios de compressão triaxial.	129
Figura 4.22 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP70CF30 sem tempo de cura e com 30 dias em ensaios de compressão triaxial.	131
Figura 4.23 - Curvas tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o SP, misturas SP60CF40 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias em ensaios de compressão triaxial.	132
Figura 4.24 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP80CV20 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias.	134
Figura 4.25 – Comparação entre as envoltórias do SP, misturas SP70CV30 sem tempo de cura e com 30 dias.	134
Figura 4.26 – Comparação entre as envoltórias do SP e mistura SP60CV40 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias.	135
Figura 4.27 – Comparação entre as envoltórias do SP e mistura SP80CF20 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias.	136
Figura 4.28 – Comparação entre as envoltórias do SP e mistura SP70CF30 sem tempo de cura e com 30 dias.	137
Figura 4.29 – Comparação entre as envoltórias do SP e mistura SP60CF40 sem tempo de cura e com 30 e 60 dias.	138
Figura 4.30 – Variação da coesão para diferentes misturas solo-cinza e tempo de cura.	140
Figura 4.31 – Variação do ângulo de atrito para diferentes misturas solo-cinza e tempo de cura.	140
Figura 4.32 – Corpos de prova de SP60CV40 T60d - (a) Amostra cisalhada a 50 kPa; (b) Amostra cisalhada a 200 kPa; (c) Amostra cisalhada a 400 kPa.	141

Figura 4.33 – Corpos de prova de SP70CF30 sem tempo de cura - (a)
Amostra cisalhada a 50 kPa; (b) Amostra cisalhada a 200 kPa; (c)
Amostra cisalhada a 400 kPa..... 141

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Municípios Pesquisados por Regiões. (ABRELPE, 2011)...	31
Tabela 2.2 – Quantidade de RSU Coletada por regiões e Brasil. (ABRELPE, 2011)	32
Tabela 2.3 - Uso potencial de cinza volante de RSU. (Ferreira et al, 2003)	34
Tabela 2.4 - Comparação de diferentes opções para a aplicação de cinza volante de RSU. (Ferreira et al. 2003)	36
Tabela 2.5 – Previsão da quantidade de cal em função do tipo de solo. (Inglês & Metcalf, 1972)	43
Tabela 2.6 – Cimento requerido por volume para estabilização efetivo de diferentes solos. (Michelli & Freitag, 1959 apud Das, 2001)	47
Tabela 3.1 - Análise mineralógica (Sertã, 1986) do colúvio (3,0 -3,5 m.).	58
Tabela 3.2 - Siglas utilizadas para o solo, cinzas e as misturas.....	66
Tabela 3.3 – Quantidade de ensaios.....	68
Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para o solo, cinza volante e cinza de fundo.	86
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg para o solo e misturas solo-cinza volante. (Ramirez, 2012 e Quispe 2013)	87
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg para o solo e misturas solo-cinza de fundo. (Ramirez, 2012 e Quispe 2013).....	87
Tabela 4.4 – Resultados das análises granulométricas.	90
Tabela 4.5 – Índices para classificação SUCS.....	90
Tabela 4.6 - Caracterização Física do solo coluvionar do Campo Experimental II da PUC-Rio (Ramirez, 2012 e Quispe, 2013)	91
Tabela 4.7 – Análises químicas de capacidade de troca catiônica (CTC) e de ataque sulfúrico (Duarte, 2004 apud Soares, 2005).....	92
Tabela 4.8 – Análises químicas total em porcentagem em peso (Sertã, 1986).....	92
Tabela 4.9 – Análises mineralógica (Sertã, 1986).....	93

Tabela 4.10 – Composição química da cinza volante de RSU (Vizcarra, 2010).....	94
Tabela 4.11 – Composição química da cinza de fundo de RSU (Vizcarra, 2010).....	94
Tabela 4.12 – Composição química das misturas solo-cinza volante de RSU.....	95
Tabela 4.13 – Composição química das misturas solo-cinza de fundo de RSU.....	96
Tabela 4.14 – Teor de matéria orgânica do solo, cinza volante e cinza de fundo. (Vizcarra, 2010 e Quispe, 2013)	96
Tabela 4.15 – Teor de matéria orgânica das misturas solo-cinza.	97
Tabela 4.16 – Resultados do ensaio de lixiviação – Parâmetros Inorgânicos na Cinza Volante (Vizcarra, 2010).	98
Tabela 4.17 – Resultados do ensaio de lixiviação – Parâmetros Inorgânicos na Cinza de Fundo (Vizcarra, 2010).	98
Tabela 4.18 – Resultados do ensaio de solubilização – Parâmetros Inorgânicos na Cinza Volante (Vizcarra, 2010).	99
Tabela 4.19 – Resultados do ensaio de solubilização – Parâmetros Inorgânicos na Cinza de Fundo (Vizcarra, 2010).	100
Tabela 4.20 – Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal para o solo e misturas de solo-cinza volante.	101
Tabela 4.21 – Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal para o solo e misturas de solo-cinza de fundo.	102
Tabela 4.22 – Resumo de coesão e ângulo de atrito para o SP e as misturas solo-cinza sem tempo de cura	115
Tabela 4.23 – Resumo de coesão e ângulo de atrito para o solo argiloso (SP) e as misturas solo-cinza sem tempo de cura.	123
Tabela 4.24 – Resumo de coesão e ângulo de atrito para o solo (SP) e as misturas solo-cinza sem tempo de cura e com 30 e 60 dias de tempo de cura.	138

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CD	Adensado e drenado
CDR	Combustível Derivado do Resíduo
CF	Cinza de Fundo
CH	Argila arenosa de média plasticidade
CID	Consolidado Isotropicamente Drenado
COMLURB	Companhia Municipal de Limpeza Urbana
CTC	Capacidade de troca catiônica
CV	Cinza Volante
EDX	Espectrometria de fluorescência de Raios-X
EUA	Estados Unidos da América
IP	Índice de Plasticidade
LL	limite de liquidez
LP	Límite de Plasticidade
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MMA	Ministerio de Meio Ambiente
MVV	Medidores de Variação Volumétrica
OL	Argila orgânica de baixa plasticidade
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SM	Areias siltosas
SP	Solo Puro
SP-SC	Areias mal graduadas com argila
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
SW-SC	Areia bem graduada com argila

Lista de Símbolos

$\omega_{\text{ót}}m$	Teor de umidade ótimo de compactação
$\gamma_d \text{ máx}$	Peso específico seco aparente máximo
γ_d	Massa específica seca
γ_s	Densidade real dos grãos
ω	Teor de umidade
ρ	Massa específica do solo
G_s	Massa específica real dos grãos
e	Índice de vazios
$e_{\text{máximo}}$	Índice de vazios máximo
$e_{\text{mínimo}}$	Índice de vazios mínimo
C_u	Coeficiente de uniformidade
C_c	Coeficiente de curvatura
D_{10}	Diâmetro efetivo
D_{50}	Diâmetro médio
t_f	Tempo mínimo de ruptura
L	Altura do corpo de prova
ν	Coeficiente de Poisson
v	Velocidade de cisalhamento
'	Relativo a tensões efetivas
”	Polegadas
ε_a	Deformação axial
ε_v	Deformação volumétrica
τ	Tensão de cisalhamento
σ_1, σ_3	Tensões principais, maior e menor
σ'_c	Tensão de confinamento efetiva
σ_d	Tensão desviadora
$\Delta\sigma_c$	Acréscimo de tensão confinante aplicado
Δu	Excesso de poropressão gerado
ϕ'	Ângulo de atrito
c'	Coesão
p'	$(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ (Tensão efetiva média normal)

q	$(\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$ (Tensão de Desvio)
E	Módulo de Young
h	Altura final do corpo de prova.
kPa	Kilo Pascals
h_i	Altura inicial do corpo de prova.
%	Porcentagem
mm	Milímetro
cm	Centímetros
°C	Graus centígrados
meq	Miliequivalentes
t	Tonelada
kg	Kilogramas
H ₂ O	Água
SiO ₂	Sílica
Al ₂ O ₃	Alumina
Fe ₂ O ₃	Hematita
SO ₃	Anidro 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)
MgO	Óxido de Magnésio
Na ₂ O	Óxido de Sódio
V ₂ O ₅	Pentóxido de Vanádio
KI	Iodeto de Potássio

KCl	Cloreto de Potássio
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
NaOH	Hidróxido de sódio
CO ₂	Dióxido de Carbono
pH	Medida da acidez ou basicidade