



Sandra Helena Trindade Santos

**Análise do Comportamento de Misturas
de Solos com Cinzas de Bagaço de
Cana-de-Açúcar e Cinzas de Casca de Arroz**

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 da PUC-Rio.

Orientadora: Prof^a Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro,
Março de 2015



Sandra Helena Trindade Santos

**Análise do Comportamento de Misturas
de Solos com Cinzas de Bagaço de
Cana-de-Açúcar e Cinzas de Casca de Arroz**

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

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof^a Raquel Quadros Veloso

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof^a Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Guilherme Chagas Cordeiro

Universidade do Estadual do Norte Fluminense

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de Março de 2015

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

Sandra Helena Trindade Santos

Graduou-se em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal Fluminense em 2012. Ingressou no Mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2012, desenvolvendo Dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental.

Ficha Catalográfica

Santos, Sandra Helena Trindade

Análise do comportamento de misturas de solos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e cinzas de casca de arroz / Sandra Helena Trindade Santos; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2015.

125 f.; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar. 3. Cinza de casca de arroz. 4. Obras geotécnicas. 5. Ensaio de cisalhamento direto. I. Casagrande, Michéle Dal Toé. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus e aos meus pais que sempre me apoiaram em todas as fases da minha vida.

Agradeço, também, à CAPES pelo apoio financeiro que me permitiu realizar este estudo.

À professora e orientadora Michéle Dal Toé Casagrande, expresso minha gratidão pelo incentivo e paciência que demonstrou durante todo o período em que cursei o mestrado, pela disposição em me orientar, tanto nesta dissertação, quanto na vida acadêmica e, principalmente, pela amizade durante estes quase três anos de convívio.

Agradeço, ainda, aos meus grandes amigos Camilla Duarte, Rhaissa Rodrigues, Nathália Louzada, Giobana Rossio e Daniel da Costa por todo apoio que me foi dado durante o período no qual estudei para as matérias do mestrado, por terem compartilhado, comigo, momentos divertidos, por terem me incentivado a concluir o curso e me apoiado sempre que precisei. Sou extremamente grata pela paciência e pela amizade de todos vocês.

Também agradeço aos demais amigos que estiveram ao meu lado durante todo o curso, dentre eles, Luciana Szeliga, Júlia Carneiro, Amanda Crispim, Juan Manuel, Orlando Rojas, Adriano Malko, Fernando Azevedo. Esses queridos amigos estiveram comigo em momentos de alegria e tensão que passamos ao longo do curso, seja nos churrascos e saídas que sempre renderam boas risadas, seja nos momentos de estudo e nervosismo pré-provas.

Sou grata ao meu amigo e namorado Wagner, pelo apoio, pela paciência, por todos os momentos felizes que temos passado e, principalmente, pelo carinho e amor que recebo os quais me fazem uma pessoa mais feliz a cada dia. Ah, não

posso deixar de agradecer por você ter perdido vários finais de semana me mandando estudar.

Concluir esse curso foi muito difícil, mas seria impossível sem a ajuda de todos aqui citados, por isso, sou eternamente grata a vocês.

Resumo

Santos, Sandra Helena Trindade; Casagrande, Michéle Dal Toé. **Análise do Comportamento de Misturas de Solos com Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar e Cinzas de Casca de Arroz.** Rio de Janeiro, 2015. 125 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Apresenta-se o estudo experimental do comportamento de um solo arenoso e de um solo argiloso, reforçado e não reforçado com cinza de bagaço de cana-de-açúcar e com cinza de casca de arroz, por meio da realização de ensaios de caracterização física e química e de ensaios de cisalhamento direto. Busca-se estabelecer padrões de comportamento que possam explicar a influência da adição das cinzas, relacionando-os com os parâmetros de resistência ao cisalhamento e de deformação do solo. Os ensaios foram realizados em amostras com teores que variaram entre 5-20%. Por meio dos resultados obtidos, foi possível concluir que a inserção de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, aos solos argiloso e arenoso em estudo, mostra-se viável, uma vez que resultaram em melhoria dos parâmetros de resistência ou não causaram alterações significativas. Para a cinza de casca de arroz, em misturas com solo arenoso, a aplicação não se mostrou viável, visto que, para ambos os teores de cinza, houve um decréscimo no ângulo de atrito e nenhum acréscimo de coesão. Nas misturas com solo argiloso, a aplicação da mesma cinza mostrou-se viável, haja vista que sua aplicação resultou em melhoria dos parâmetros de resistência. Quanto ao teor de cinza para as misturas com solo argiloso, verificou-se que o melhor comportamento obtido foi com o teor de 20%, para as misturas com ambas as cinzas. Para as misturas com areia, como não houve um aumento proporcional da resistência com o aumento do teor das cinzas foi difícil determinar um teor ótimo de cinza a ser utilizado. Os resultados obtidos neste estudo, em geral, mostraram-se satisfatórios e cumpriram os objetivos iniciais propostos com relação à investigação do comportamento solo-cinza para utilização em obras geotécnicas.

Palavras-chave

Cinza de bagaço de cana-de-açúcar, cinza de casca de arroz, obras geotécnicas, ensaio de cisalhamento direto.

Abstract

Santos, Sandra Helena Trindade; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor). **Analysis of Soil Mixtures Behavior with Sugarcane Bagasse Ashes and Rice Husks Ashes.** Rio de Janeiro, 2015. **125 p.** MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This paper presents the experimental study of the behavior of a sandy soil and a clay soil, reinforced and unreinforced with sugarcane bagasse ash and rice husk ash, by performing physical and chemical characterization tests and direct shear tests. The aim is to establish patterns of behavior that may explain the influence of the addition of ashes, relating them to the shear strength parameters and soil deformation. The tests were carried out on samples with concentrations ranging from 5-20%. Through the results, it was possible to conclude that the inclusion of sugarcane bagasse ash, to clay and sandy soils under study, proves viable, since it resulted in improved strength parameters or did not cause significant alterations. For the rice husk ash in mixtures with sandy soil, the application was not feasible, since for both ash contents there was a decrease in the friction angle and no increase in the cohesion. In blends with clay soil, the application of the same ash proved to be feasible, given that its application resulted in improvement of resistance parameters. As for the ash content for mixtures containing clay soil, it was found that the best performance was obtained with 20% content for mixtures with both ashes. For mixtures with sand, as there was not a proportional increase in resistance with increasing content of ash it was difficult to determine an optimal ash content to be used. The results of this study generally were satisfactory and met the initial proposed objectives in relation to soil-ash behavioral research for use in geotechnical works.

Keywords

Sugarcane bagasse ash; rice husk ash; geotechnical works; direct shear test.

Sumário

1	Introdução	18
1.1.	Relevância da pesquisa	18
1.2.	Objetivos	19
1.3.	Organização do trabalho	20
2	Revisão Bibliográfica	21
2.1.	Considerações iniciais	21
2.2.	Cinza de bagaço de cana-de-açúcar	22
2.2.1.	Aplicações de cinza de bagaço de cana-de-açúcar	24
2.3.	Cinza de casca de arroz	27
2.3.1.	Aplicação de cinza de casca de arroz	29
2.4.	Estabilização de solos	32
2.4.1.	Estabilização mecânica	35
2.4.2.	Estabilização física	35
2.4.3.	Estabilização química	36
2.5.	Considerações finais	45
3	Programa Experimental	46
3.1.	Materiais utilizados	46
3.1.1	Areia	47
3.1.2	Solo argiloso	48
3.1.1.	Água	50
3.1.2.	Cinza de bagaço de cana-de-açúcar	50
3.1.3.	Cinza de casca de arroz	52
3.1.4.	Cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cinza casca de arroz ultrafinas	53
3.1.5.	Misturas solo-cinza	53
3.2.	Métodos e procedimentos de ensaio	55
3.2.1.	Ensaio de caracterização física	56
3.2.2.	Ensaio de caracterização química	60
3.2.3.	Ensaio de caracterização mecânica	60

3.2.4. Ensaio de resistência ao cisalhamento	63
4 Resultados e Análises	71
4.1 Ensaios de caracterização física	71
4.1.1. Areia	71
4.1.2. Solo argiloso puro	72
4.1.3. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar e misturas	74
4.1.4. Ensaios químicos	78
4.1.5. Cinza de casca de arroz e misturas	84
4.1.6. Ensaios químicos	87
4.2. Ensaio de caracterização mecânica	92
4.2.1. Solo argiloso	92
4.2.2. Solo arenoso	103
4.3. Considerações sobre os resultados	113
5 Considerações Finais	115
5.1. Conclusões	115
5.2. Sugestões para pesquisas futuras	117
6 Referências Bibliográficas	119

Lista de figuras

Figura 1 Esquema global do processo de produção de açúcar e álcool (Cordeiro, 2006).....	23
Figura 2 Fluxograma simplificado do beneficiamento industrial do arroz (CORDEIRO, 2006)	28
Figura 3 Areia em estudo.....	47
Figura 4 Local de coleta do material na praia da Barra da Tijuca - RJ	47
Figura 5 Localização do Campo Experimental II PUC-Rio (Soares 2005)	49
Figura 6 Solo Argiloso utilizado	49
Figura 7 Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar.....	50
Figura 8 Pilha cônica e alongada, utilizada na homogeneização e no quarteamento da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar (Fonte Cordeiro,2006)	51
Figura 9 Bagaço de cana-de-açúcar (a) e diferentes cinzas residuais geradas após a queima do bagaço em caldeira: cinza escura, com alto teor de carbono, característico de combustão incompleta (b), cinza, com menor teor de carbono (c), e cinza gerada após combustão completa (d). (Fonte Cordeiro 2006)	52
Figura 10 Indústria de Beneficiamento de Arroz Urbano agroindustrial, localizada em Jaraguá do Sul/SC. Fotografias dos silos de armazenagem do arroz (a) e da planta industrial (b) (Fonte Cordeiro, 2006).....	52
Figura 11 Representação gráfica do critério de ruptura de Mohr-Coulomb.....	64
Figura 12 Esquema do equipamento do ensaio de cisalhamento direto com deformação controlada (Gerscovich, 2010, <i>apud</i> Benedetti, 2011)	65
Figura 13 Moldagem dos corpos de prova do solo puro e solo-cinza - casca de arroz para ensaio	67
Figura 14 Caixa de cisalhamento direto	69
Figura 15 Prensa utilizada para a realização do ensaio de cisalhamento direto. Laboratório de Geotecnia/PUC-Rio	69
Figura 16 Curva granulométrica da areia	72
Figura 17 Gráfico de determinação do Limite de Liquidez.....	73
Figura 18 Curvas granulométricas obtidas para solo argiloso puro	74
Figura 19 Curvas granulométricas do solo arenoso, cinza de bagaço de cana-de-	

açúcar e misturas do solo com 5, 10 e 20% de cinza.....	76
Figura 20 Curvas granulométricas do solo argiloso, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e misturas do solo com 10% e 20% de cinza	77
Figura 21 Curvas granulométricas do solo arenoso, cinza de casca de arroz e misturas do solo com 10 e 20% de cinza.....	85
Figura 22 Curvas granulométricas do solo argiloso, cinza de casca de arroz e misturas do solo com 10% e 20% de cinza	86
Figura 23 Curvas de compactação do solo puro e das misturas com cinza de bagaço de cana-de-açúcar e com cinza de casca de arroz	93
Figura 24 Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal solo argiloso	94
Figura 25 Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal Bc10Argila90.....	95
Figura 26 Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal Bc20Argila80.....	95
Figura 27 Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal solo argiloso puro e com teores de cinza de bagaço de cana-de-açúcar	96
Figura 28 Envoltórias de ruptura do solo argiloso puro e com teores de cinza de bagaço de cana-de-açúcar.....	98
Figura 29 Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal solo argiloso puro	99
Figura 30 Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal Ca10Argila90....	100
Figura 31 Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal Ca20Argila80....	100
Figura 32 Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal do solo argiloso puro e com teores de cinza de casca de arroz	101
Figura 33 Envoltórias de ruptura do solo argiloso puro e com teores de cinza de casca de arroz.....	102
Figura 34 Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para areia	104
Figura 35 Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para Bc5Areia95	104
Figura 36 Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para Bc10Areia90	105
Figura 37 Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para Bc20Areia80	105
Figura 38 Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para areia pura e com teores de cinza de bagaço de cana-de-açúcar	106
Figura 39 Envoltórias de ruptura da areia pura e com teores de cinza de bagaço de	

cana-de-açúcar	107
Figura 40 Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para a areia.....	108
Figura 41 Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal Ca10Areia90....	109
Figura 42 Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal Ca20Areia80....	109
Figura 43 Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal da areia e de misturas com teores de cinza de casca de arroz.....	110
Figura 44 Envoltórias de ruptura da areia pura e com teores de cinza de casca de arroz	111

Lista de Tabelas.

Tabela 1 Símbolos utilizados para os solos e misturas.....	55
Tabela 2 Índices físicos da areia.....	71
Tabela 3 Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para areia, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e misturas.....	75
Tabela 4 Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para o solo argiloso, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e misturas	75
Tabela 5 Elementos químicos presentes na cinza de bagaço de cana-de-açúcar...	78
Tabela 6 Composições químicas das cinzas estudadas por Martirena Hernández et al. (1998), Massazza (1998) e Singh et al. (2000).....	79
Tabela 7 Composição química em termos de óxidos por espectrometria de fluorescência de raios X	80
Tabela 8 Resultados analíticos dos ensaios de lixiviação – parâmetros orgânicos (TASQA, 2014)	81
Tabela 9 Resultados analíticos dos ensaios de lixiviação – parâmetros inorgânicos (TASQA, 2014)	82
Tabela 10 Resultados analíticos dos ensaios de solubilização – parâmetros orgânicos (TASQA, 2014).....	83
Tabela 11 Resultados analíticos dos ensaios de solubilização – parâmetros inorgânicos (TASQA, 2014).....	83
Tabela 12 Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para a areia, cinza de casca de arroz e misturas	84
Tabela 13 Resultados do ensaio de densidade real dos grãos para o solo argiloso, cinza de casca de arroz e misturas	84
Tabela 14 Elementos químicos presentes na cinza de casca de arroz	87
Tabela 15 Composição química da cinza de casca de arroz por Martirena Hernández et al. (1998)	88
Tabela 16 Composição química por espectrometria de fluorescência de raios X.	88
Tabela 17 Tabela: Resultados analíticos dos ensaios de lixiviação – parâmetros orgânicos (TASQA, 2014).....	89
Tabela 18 Resultados analíticos dos ensaios de lixiviação – parâmetros inorgânicos (TASQA, 2014).....	90

Tabela 19 Resultados analíticos dos ensaios de solubilização parâmetros orgânicos (TASQA, 2014)	91
Tabela 20 Resultados analíticos dos ensaios de solubilização – parâmetros inorgânicos (TASQA, 2014).....	91
Tabela 21 Parâmetros de Resistência do solo argiloso puro e com teores de cinza de bagaço de cana-de-açúcar	98
Tabela 22 Parâmetros de Resistência do solo puro e com teores de cinza de casca de arroz	102
Tabela 23 Parâmetros de Resistência da areia pura e com teores de cinza de bagaço de cana-de-açúcar	107
Tabela 24 Parâmetros de Resistência da areia pura e com teores de cinza de casca de arroz	111
Tabela 25 Comparação da variação dos parâmetros de resistência para misturas com solo arenoso	112
Tabela 26 Comparação da variação dos parâmetros de resistência para misturas com solo argiloso.....	112

Lista de abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Bc	Cinza de Bagaço de cana-de-açúcar
Ca	Cinza de casca de arroz
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CH	Argila arenosa de média plasticidade
EDX	Espectrometria de fluorescência de raios-X
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
ML	Silte de baixa plasticidade
NBR	Norma brasileira
PUC	Pontifícia Universidade Católica
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SM	Areia siltosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos

Lista de símbolos

G_s	Densidade real dos grãos
e	Índice de vazios
$e_{\text{máx}}$	Índice de vazios máximo
$e_{\text{mín}}$	Índice de vazios mínimo
C_u	Coefficiente de uniformidade
C_c	Coefficiente de curvatura
D_{10}	Diâmetro efetivo
D_{50}	Diâmetro médio
pH	Medida de acidez ou basicidade
°C	Graus centígrados
kg	Quilograma
mL	Mililitro
mm	Milímetro
cm	Centímetro
m	Metro
t	Tonelada
t/ano	Tonelada por ano
mm/min	Milímetro por minuto
min	Minuto
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
kPa	Quilopascal
kN	Quilonewton
Ppm	Partes por milhão
τ	Tensão cisalhante efetiva
ω_{otm}	Umidade ótima
$\gamma_d \text{ máx}$	Peso específico seco máximo
γ_d	Peso específico seco
ρ	Massa específica do solo
c	Coesão

ϕ'

Ângulo de atrito

σ'

Tensão normal efetiva