



Geremy Carlos Freitas

**Análise da Potencialidade de uso de um Solo
Siltoso para Utilização em Barreira Mineral de
Aterros Sanitários no Estado de Roraima**

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.

Orientador: Prof. José Tavares Araruna Júnior

Rio de Janeiro
Agosto de 2015



Jeremy Carlos Freitas

**Análise da Potencialidade de uso de um Solo
Siltoso para Utilização em Barreira Mineral de
Aterros Sanitários no Estado de Roraima**

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. José Tavares Araruna Junior

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Gustavo Ferreira Simões

Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico da PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de agosto de 2015.

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

Jeremy Carlos Freitas

Gradou-se em Engenharia Ambiental e Sanitária na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, com período sanduíche no Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, França, no período de 2011/2012, onde cursou disciplinas sobre a gestão e os diversos tipos de tratamento de resíduos sólidos. A experiência no exterior aliada ao conhecimento adquirido durante a graduação permitiu realizar partes do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de uma cidade localizada no norte do Brasil, como Trabalho de Conclusão de Curso e motivou a pós-graduação na área de geotecnia ambiental.

Ficha Catalográfica

Freitas, Jeremy Carlos

Análise da potencialidade de uso de um solo siltoso para utilização em barreira mineral de aterros sanitários no estado de Roraima / Jeremy Carlos Freitas ; orientador: José Tavares Araruna Junior. – 2015.

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

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Aterro sanitário. 3. Barreira mineral. 4. Condutividade hidráulica. 5. Contração. 6. Resistência à compressão simples. 7. Resistência ao cisalhamento. 8. Solos de Roraima. I. Araruna Junior, José Tavares. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

Ao meu querido Jesus Cristo,
sem o qual eu nada posso fazer.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, o todo poderoso, pois sem Ele nada teria acontecido.

Aos meus pais, Sebastião e Arlete Freitas, pela vida, amor, educação, dedicação e carinho;

Aos meus irmãos, Geder e Gezer Freitas, as minhas cunhadas Jéssica Tavares e Jucy, pelo carinho e apoio e aos meus sobrinhos, Isabelly e Pedro pela sua simples existência em nossas vidas;

À minha grande família em Juiz de Fora, especialmente ao meu avô Sebastião Mendes, *in memoriam*, pelos ensinamentos valiosos ao longo de sua vida cristã exemplar;

À Primeira Igreja Batista de Rorainópolis pelas orações e incentivo;

Ao Irmão Ademar Maia e sua família pela alegria em cada chegada e a força em cada partida de Manaus;

À Igreja Batista em Botafogo, especialmente aos Pastores Márcio Mattos, Adauberto e Thiago Titillo e ao Vice-moderador Abner e a Juventude PIB Botafogo pelo acolhimento segundo os preceitos bíblicos;

À Salete Rodrigues e sua família pelo amor e cuidado demonstrado no dia a dia;

Aos meus grandes amigos Érica, Helen, Lucas, Maria e Rômulo pelo auxílio nas batalhas e momentos únicos de oração e comunhão verdadeira;

Aos amigos Rodrigo, Elaine, Mariana, Marcelo Magalhães e tantos outros com os quais caminhei ao longo desses dois anos e meio;

Ao pessoal do Laboratório de Geotecnia da PUC: Edison, Amaury, Josué, Carlos, Victor, Elizânio e os demais.

Ao Professor Araruna, pela orientação, compreensão, paciência e amizade;

À PUC-Rio e ao CNPQ, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para que mais essa vitória fosse conquistada.

Resumo

Freitas, Geremy Carlos; Araruna Júnior, José Tavares. **Análise da Potencialidade de uso de um Solo Siltoso para Utilização em Barreira Mineral de Aterros Sanitários no Estado de Roraima.** Rio de Janeiro, 2015. 202p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos exigiu a extinção dos lixões e aterros controlados nos municípios brasileiros. Embora a lei date de 2010, até agora a maioria dos municípios brasileiros ainda não conseguiu implantar aterros sanitários. A situação não é diferente no Estado de Roraima, onde nenhum de seus 15 (quinze) municípios possui um aterro sanitário em operação. Este trabalho visa a minimizar esta ocorrência, à medida que estuda as propriedades e índices geotécnicos de um solo siltoso de uma jazida do município de Rorainópolis que poderá ser empregado como material de construção de barreiras minerais de um possível Aterro Consorciado que atenderá os municípios que compõem a Região Metropolitana do Sul de Roraima, a saber: Rorainópolis, São João da Baliza, São Luís e Caroebe. O solo siltoso foi submetido a um extenso programa experimental que consistiu de ensaios de condutividade hidráulica, compressão simples e contração em corpos de prova, com diferentes relações massa-volume-umidade, compactados nas energias Proctor normal, intermediária e modificada. O programa experimental objetivou estabelecer uma faixa de variação de valores da relação massa-volume-umidade que atendesse aos critérios usualmente empregados na especificação de construção de barreiras minerais, *i.e.* condutividade hidráulica igual ou inferior a 10^{-9} m/s, resistência à compressão simples superior a 200 KPa e contração volumétrica inferior a 4%. Os resultados do programa experimental demonstraram que o solo deverá possuir um peso específico de $14,75 \pm 0,5$ KN/m³ e um teor de umidade de $28,0 \pm 3,0$ %, a fim de atender aos critérios de condutividade hidráulica e resistência. Os resultados mostraram que não é possível atender ao critério de contração volumétrica, face à presença de argilominerais 2:1 na composição do solo estudado. Não obstante, é

possível empregá-lo com essa finalidade, desde que cuidados sejam adotados para evitar a sua dessecação. Adicionalmente, foram determinados os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo através de ensaios de cisalhamento direto a fim de possibilitar a análise de estabilidade de taludes.

Palavras-chave

Aterro sanitário; barreira mineral; condutividade hidráulica; contração; resistência à compressão simples; resistência ao cisalhamento; Solos de Roraima.

Abstract

Freitas, Geremy Carlos; Araruna Júnior, José Tavares (Advisor). **An Assessment of the potential use of a compacted silty soil from Roraima State as a landfill mineral barrier.** Rio de Janeiro, 2015. 202p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Law of the National Solid Waste Policy demanded the extinction of controlled dumps and landfills in Brazilian municipalities. Although the date 2010 law, so far most municipalities have yet to deploy landfills. The situation is no different in the state of Roraima, where none of his fifteen (15) municipalities has a landfill in operation. This work aims to minimize this occurrence, as studying the properties and geotechnical contents of a clay soil deposit of Rorainópolis municipality that may be used as a building material mineral barriers of a possible Syndicated landfill that will serve the municipalities that make up the metropolitan area of southern Roraima, namely: Rorainópolis, São João da Baliza, São Luís and Caroebe. The clay soil was subjected to an comprehensive experimental program consisting of hydraulic conductivity tests, simple compression and contraction on specimens with different mass-volume-moisture relations, compacted in standard, intermediate and modified energies. The experimental program aimed to establishing a range of variation of volume-mass-moisture values that met the criteria usually employed in the construction specification of mineral barriers, *i.e.* hydraulic conductivity equal to or less than 10^{-9} m / s, compressive resistance higher than 200 KPa and volumetric shrinkage of less than 4,0 %. The results of the experimental program demonstrated that the soil must have a specific weight of 14.75 ± 0.5 KN / m³, and a moisture of $28.0 \pm 3.0\%$ content, in order to meet the criteria hydraulic conductivity and resistance. The results show that the volumetric shrinkage criterion cannot be meet due to the presence of 2: 1 clay soil composition studied. Nevertheless, it is possible to use it as a building material mineral barrier, as long as care is adopted to prevent

desiccation. In addition it was determined the soil shear parameters of resistance through direct shear tests to enable the slope stability analysis.

Keywords

Landfill; impermeable barrier; hydraulic conductivity; contraction; resistance to simple compression; shear strength; Soils of Roraima.

Sumário

1 Introdução	26
1.1. Organização da Dissertação	27
2 Revisão Bibliográfica	29
2.1. Resíduos Sólidos	29
2.2. Disposição Final de Resíduos Sólidos	31
2.3. Aterros Sanitários	38
2.4. Sistemas de Impermeabilização de Base	46
2.4.1. Barreiras Minerais com Solo Natural	47
2.4.2. Barreiras Minerais com Geossintéticos	50
2.4.3. Barreiras Minerais com Solo Compactado	50
2.4.3.1. Características dos Solos	51
2.5. Condutividade Hidráulica de Solos	60
2.5.1. Fatores que Afetam a Condutividade Hidráulica de Solos	60
2.5.2. Equipamentos para a Obtenção da Condutividade Hidráulica de Solos	68
2.6. Contração dos Solos	72
2.7. Resistência ao Cisalhamento em Barreiras Minerais	76
2.7.1. Fatores que Afetam a Resistência ao Cisalhamento	78
3 Materiais e métodos	79
3.1. Materiais	79
3.2. Métodos	87
3.2.1. Ensaios de Caracterização Física	87
3.2.2. Ensaios de Caracterização Química	88
3.2.3. Ensaios de Caracterização Mineralógica	91
3.2.4. Ensaios de Caracterização Mecânica	94
3.2.5. Ensaios de Caracterização Hidráulica	100
3.2.6. Ensaios de Contração	104

4 Apresentação e análise dos resultados	107
4.1. Caracterização Geotécnica	107
4.2. Caracterização Química	110
4.3. Caracterização Mineralógica	113
4.4. Ensaio de Compactação	115
4.4.1. Ensaio de Compactação Com Reuso	115
4.4.2. Ensaio de Compactação sem Reuso	116
4.5. Ensaio de Condutividade Hidráulica	119
4.6. Ensaio de Contração	137
4.7. Ensaio de Compressão Simples (ou Não Confinada)	146
4.8. Ensaio de Cisalhamento Direto	150
4.9. Definição da Área Admissível	159
5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	194
6 Referências Bibliográficas	165
Anexo A – Resultados das análises de microscopia eletrônica de varredura	171
Anexo B - Relação entre contração axial e a variação da temperatura e da umidade relativa do ar	181
Anexo c – Resultados dos Ensaio de Cisalhamento direto	189

Lista de tabelas

Tabela 1: Diferentes formas de Classificação dos Resíduos Sólidos, IPT/CEMPRE (2000).	30
Tabela 2: Situação de municípios roraimenses quanto à disposição final de resíduos sólidos, dados obtidos a partir do Portal da Transparência do Governo Federal (transparencia.gov.br).	37
Tabela 3: Critérios para seleção de áreas para instalação de aterros sanitários, IPT (1995).	41
Tabela 4: Classificação dos aterros sanitários com base na Taxa máxima de deposição, Gariglio (2003).	42
Tabela 5: Critérios para a dispensa de impermeabilização complementar de acordo com a NBR 15849 (ABNT, 2010).	48
Tabela 6: Valores de Excedente Hídrico entre os anos 1961 e 2008, para o município de Rorainópolis Roraima.	49
Tabela 7: Diferenças entre as geomembranas de polietileno e de PVC (apud MACAMBIRA, 2002).	50
Tabela 8: CTC e Superfície Específica dos principais argilominerais e frações silte e argila modificado de Costa (2002).	56
Tabela 9: Condutividade hidráulica dos argilominerais (adaptado de MESRI e OLSON, 1971).	68
Tabela 10: Vantagens e desvantagens de Permeâmetros, modificado de Daniel (1994).	70
Tabela 11: Variação entre valores de condutividade hidráulica obtida no campo e em ensaios de laboratório (DANIEL, 1987).	71
Tabela 12: Classificação das trincas conforme sua magnitude (KLEPPE e OLSON, 1985).	73
Tabela 13: Programa Experimental.	107
Tabela 14: Resumo das características granulométricas dos materiais, em porcentagem.	108
Tabela 15: Limites de Consistência (%), índice de plasticidade e	108

atividade.

Tabela 16: Capacidade de Troca Catiônica e Superfície Específica.	110
Tabela 17: Superfície específica de alguns argilominerais, LCPC (1979).	110
Tabela 18: CTC para alguns argilominerais, adaptado de Stevenson (1985)	110
Tabela 19: Teor de Matéria Orgânica e pH.	111
Tabela 20: Concentrações dos principais óxidos e elementos do solo.	112
Tabela 21: Elementos presentes em alguns corpos de prova.	113
Tabela 22: Valores de Umidade Ótima e γ_d máx, para os ensaios com reuso.	116
Tabela 23: Valores de Umidade Ótima e γ_d máx, para os ensaios sem reuso.	117
Tabela 24: Resumo dos valores de Umidade Ótima e γ_d máx, para os ensaios com e sem reuso.	118
Tabela 25: Condições iniciais, parâmetros de ensaio e condutividade hidráulica das amostras compactadas na Energia do Proctor Normal.	119
Tabela 26: Condições iniciais, parâmetros de ensaio e condutividade hidráulica das amostras compactadas na Energia do Proctor Intermediária.	123
Tabela 27: Condições iniciais, parâmetros de ensaio e condutividade hidráulica das amostras compactadas na Energia do Proctor Modificada.	125
Tabela 28: Dados dos ensaios de cisalhamento direto para a Energia do Proctor Normal.	150
Tabela 29: Dados dos ensaios de cisalhamento direto para a Energia do Proctor Intermediária.	151
Tabela 30: Dados dos ensaios de cisalhamento direto para a Energia do Proctor Modificada.	154
Tabela 31: Resultados dos ensaios de cisalhamento para as energias do Proctor normal, intermediária e modificada.	158
Tabela 32: Parâmetros dos pontos inseridos na zona admissível.	161

Lista de figuras

Figura 1: Aumento da geração de resíduos sólidos entre os anos de 2012 e 2013 (ABRELP, 2013).	31
Figura 2: Geração de resíduos sólidos de acordo com a região (ABRELP, 2013).	32
Figura 3: Lixão ou vazadouro (FEAM, 2010).	33
Figura 4: Destinação final de resíduos sólidos no Brasil (ABRELP, 2013).	34
Figura 5: Destinação final de resíduos sólidos no Brasil (ABRELP, 2013).	34
Figura 6: Destinação final de resíduos sólidos na região Norte do Brasil (ABRELP, 2013).	35
Figura 7: Destinação final de resíduos sólidos em Roraima (ABRELP, 2013).	36
Figura 8: Vista de um aterro sanitário, Manual de Operações de Aterros Sanitários (CONDER, 2002).	39
Figura 9: Aterro em trincheiras, Caderno técnico de reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos (FEAM, 2010).	43
Figura 10: Espalhamento e compactação dos resíduos sólidos, Manual de Operações de Aterros Sanitários (CONDER, 2002).	44
Figura 11: Aterro em Rampa, Caderno técnico de reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos (FEAM, 2010).	45
Figura 12: Aterro Sanitário, adaptado do site do Governo do Estado de Rondônia (www.rondonia.ro.gov.br).	45
Figura 13: Requisitos legais para resíduos não perigosos (ISSMGE, 2006).	47
Figura 14: Requisitos legais para resíduos perigosos (ISSMGE, 2006).	47
Figura 15: Método Tradicional para especificação da Zona Admissível mediante teor de umidade e peso específico seco (DANIEL e BENSON, 1999).	51
Figura 16: Área aceitável segundo a abordagem tradicional, transpassada	53

por linhas de mesma condutividade hidráulica (DANIEL e BENSON, 1990).	
Figura 17: Procedimentos para obtenção da área admissível (DANIEL e BENSON, 1990).	54
Figura 18: Aplicação do método de definição da área admissível (BENSON e DANIEL, 1990).	55
Figura 19: Aplicação do método de definição da área admissível, acrescentando os parâmetros de resistência ao cisalhamento e contração volumétrica. (BENSON e DANIEL, 1990).	55
Figura 20: Melhores formas de compactação das camadas impermeabilizantes de fundo de aterros sanitários (McBean et al., 1995).	57
Figura 21: Probabilidade de a condutividade hidráulica exceder $1,0 \times 10^{-7}$ cm/s em função da espessura da camada (BENSON e DANIEL, 1994).	58
Figura 22: Conectividade hidráulica.	59
Figura 23: Efeito da compactação na estrutura interna do solo, (LAMBE e WHITMAN, 1979).	61
Figura 24: Variação da condutividade hidráulica em função do teor de umidade (LAMBE e WHITMAN, 1979).	62
Figura 25: Resultados de condutividade hidráulica e massa específica seca e umidade de moldagem (MITCHELL et al., 1965).	63
Figura 26: Fluxo de água através de macroporos, entre os grumos (OLSEN, 1962).	64
Figura 27: Condutividade hidráulica para solos com diâmetros máximos de torrões de	65
Figura 28: Variação da condutividade hidráulica devido ao amento da energia de compactação (MITCHELL et al., 1965).	65
Figura 29: Relação entre condutividade hidráulica e fração granulométrica do solo (BENSON et al., 1994).	66
Figura 30: Relação entre condutividade hidráulica e índice de plasticidade (BENSON et al., 1994).	67
Figura 31: Relação entre condutividade hidráulica e atividade (BENSON et al., 1994).	67
Figura 32: Permeâmetro de parede rígida (DANIEL, 1994).	69

Figura 33: Permeâmetro de parede flexível (DANIEL, 1994).	69
Figura 34: Relação entre trincas e contração volumétrica (KLEPPE e OLSON, 1985).	73
Figura 35: Variação da contração volumétrica em função do teor de umidade de moldagem para diferentes energias de compactação (ALBRECHT e BENSON, 2001).	74
Figura 36: Principais configurações utilizadas em aterros sanitários (SHARMA e LEWIS, 1994).	77
Figura 37: Superfícies de ruptura que ocorrem em aterros sanitários (SHARMA e LEWIS, 1994).	77
Figura 38: Localização do Estado de Roraima e do município de Rorainópolis. Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA.	79
Figura 39: Localização do ponto de coleta da amostra. Fonte: Google Earth.	80
Figura 40: Foto do local de amostragem.	80
Figura 41: Perfil do solo da jazida.	81
Figura 42: Acondicionamento da amostra para o transporte.	81
Figura 43: Mapa de localização do município de Rorainópolis dentro do contexto do (a) Escudo das Guianas e dos (b) domínios tectono-estratigráficos de Roraima (apud ALMEIDA, 2006).	83
Figura 44: Domínios lito estruturais de Roraima (IBGE, 2005).	84
Figura 45: Encarte tectônico de parte de Roraima (adaptado de CPRM, 2004).	85
Figura 46: Recorte do mapa geológico do Estado de Roraima com destaque para a região de coleta da amostra e legenda de interesse (CPRM, 2004).	86
Figura 47: Agitador mecânico e materiais para o Ensaio de Azul de Metileno.	89
Figura 48: Execução e resultado do Ensaio de Azul de Metileno.	89
Figura 49: Equipamento de medição do pH (Fonte: www.tecnopon.com.br).	91
Figura 50: Equipamento Hitachi TM – 1000, utilizado nas análises de MEV.	92
Figura 51: Preparação das lâminas pelo método do gotejamento.	92

Figura 52: Obtenção de amostras para as análises de MEV.	93
Figura 53: Resultado de uma das análises de MEV.	94
Figura 54: Ensaio de compactação.	95
Figura 55: Prensa de Cisalhamento Direto pertencente ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do DEC da PUC-Rio.	96
Figura 56: Preparação das amostras para o ensaio de cisalhamento direto.	97
Figura 57: Preparação das amostras.	98
Figura 58: Equipamento utilizado nos ensaios de compressão simples.	99
Figura 59: Corpo de prova antes e após o ensaio de compressão simples.	99
Figura 60: Equipamento utilizado.	100
Figura 61: Saturação das linhas de fluxo.	101
Figura 62: Teste da membrana.	101
Figura 63: Montagem e acomodação da amostra.	102
Figura 64: Colocação da membrana.	102
Figura 65: Enchimento da Câmara	103
Figura 66: Equipamento do Ensaio de Contração.	105
Figura 67: Curva granulométrica do solo em estudo.	108
Figura 68: Carta de Plasticidade de Casagrande.	109
Figura 69: Análise qualitativa, espectro experimental do solo.	111
Figura 70: Difratoograma da amostra de solo natural.	113
Figura 71: Difratoograma da amostra de solo passante na peneira #200.	114
Figura 72: Difratoograma da amostra de solo passante na peneira #400.	114
Figura 73: Difratoogramas reunidos, amostra total, material passante nas peneiras #200 e #400.	115
Figura 74: Curvas de compactação com diferentes energias, com reuso de material.	116
Figura 75: Curvas de compactação com diferentes energias, sem reuso de material.	117
Figura 76: Curvas de compactação com e sem reuso.	118
Figura 77: Variação da condutividade hidráulica do solo compactado na Energia do Proctor Normal.	120
Figura 78: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto P01.	121

Figura 79: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto P05.	121
Figura 80: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto P01.	122
Figura 81: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto P05.	123
Figura 82: Condutividade hidráulica do solo compactado na Energia do Proctor Intermediária.	124
Figura 83: Condutividade hidráulica do solo compactado na Energia do Proctor Modificada.	126
Figura 84: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto P01, Energia do Proctor Modificada.	127
Figura 85: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto P05, Energia do Proctor Modificada.	127
Figura 86: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto P01, Energia do Proctor Modificada.	128
Figura 87: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto P05, Energia do Proctor Modificada.	128
Figura 88: Condutividade hidráulica do solo nas energias do Proctor normal, intermediária e modificada em função do teor de umidade de moldagem.	129
Figura 89: Condutividade hidráulica do solo nas energias do Proctor normal, intermediária e modificada em relação ao teor de umidade ótima.	130
Figura 90: Variação da condutividade hidráulica devido à variação da energia de compactação.	131
Figura 91: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto A.	132
Figura 92: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto B.	132
Figura 93: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto A.	130
Figura 94: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto B.	130

Figura 95: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto C.	134
Figura 96: Resultado da análise de MEV com ampliação de 100 (cem) vezes para o ponto D.	134
Figura 97: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto C.	135
Figura 98: Resultado da análise de MEV com ampliação de 4000 (quatro mil) vezes para o ponto D.	135
Figura 99: Relação entre a condutividade hidráulica e o índice de vazios.	136
Figura 100: Relação entre a condutividade hidráulica e o índice de vazios.	136
Figura 101: Relação entre a condutividade hidráulica e o índice de vazios.	137
Figura 102: Valores de Contração com o tempo, para Energia do Proctor Normal.	138
Figura 103: Valores de Contração com o tempo, para Energia do Proctor Intermediária.	139
Figura 104: Valores de Contração com o tempo, para Energia do Proctor Modificada.	139
Figura 105: Relação entre as curvas de compactação e de contração axial, para a Energia do Proctor Normal.	140
Figura 106: Relação entre as curvas de compactação e de contração axial, para a Energia do Proctor Intermediária.	141
Figura 107: Relação entre as curvas de compactação e de contração axial, para a Energia Modificada.	142
Figura 108: Valores de contração axial máxima para os corpos de prova em função do teor de umidade.	143
Figura 109: Resultados dos ensaios de contração axial em função da umidade ótima.	143
Figura 110: Resultados dos ensaios de contração diametral.	144
Figura 111: Resultados dos ensaios de contração volumétrica em relação ao teor de umidade ótima.	144
Figura 112: Curvas do ensaio de compressão simples para Energia do Proctor Normal.	146
Figura 113: Curvas do ensaio de compressão simples para Energia do	147

Proctor Intermediária.	
Figura 114: Curvas do ensaio de compressão simples para Energia do Proctor Modificada.	147
Figura 115: Compressão Simples em função do teor de umidade ótima.	148
Figura 116: Compressão Simples em função do teor de umidade.	149
Figura 117: Envoltórias de resistência para os pontos da Energia do Proctor Normal.	151
Figura 118: Ângulo de resistência ao cisalhamento em relação à umidade ótima para Energia do Proctor Normal.	151
Figura 119: Coesão em relação à umidade ótima para a Energia do Proctor Normal.	152
Figura 120: Envoltórias de resistência para os pontos compactados na Energia do Proctor Intermediária.	153
Figura 121: Ângulo de resistência ao cisalhamento em relação à umidade ótima para Energia do Proctor Intermediária.	153
Figura 122: Coesão em relação à umidade ótima para Energia do Proctor Intermediária.	154
Figura 123: Envoltórias de resistência para os pontos moldados na Energia do Proctor Modificada.	155
Figura 124: Ângulo de resistência ao cisalhamento em relação à umidade ótima para Energia do Proctor Modificada.	155
Figura 125: Coesão em relação à umidade ótima para Energia do Proctor Modificada.	156
Figura 126: Relação entre a coesão e o teor de umidade, nas três energias de compactação.	156
Figura 127: Relação entre a coesão e o teor de umidade ótimo, nas três energias de compactação.	157
Figura 128: Relação entre o ângulo de resistência ao cisalhamento e o teor de umidade, nas três energias de compactação.	157
Figura 129: Relação entre o ângulo de resistência ao cisalhamento e o teor de umidade ótimo, nas três energias de compactação.	158
Figura 130: Área aceitável considerando a condutividade hidráulica, onde os símbolos abertos representam valores de $k \leq 10^{-9} \text{m/s}$ e símbolos	160

fechados representam $k \geq 10^{-9}$ m/s.

Figura 131: Área aceitável considerando a resistência, onde os símbolos abertos representam valores acima de 200 KPa símbolos fechados representam valores abaixo de 200 KPa. 161

Figura 132: Área aceitável considerando os parâmetros de condutividade hidráulica e de resistência. 162

Figura 133: Resultados das análises de MEV do Ponto 01 da Energia do Proctor Normal com ampliação de, 100 e 1000 vezes. 171

Figura 134: Resultados das análises de MEV do Ponto 01 da Energia do Proctor Normal com ampliação de 2000 e 4000 vezes. 172

Figura 135: Resultados das análises de MEV do Ponto 05 da Energia do Proctor Normal com ampliação de, 100 e 1000 vezes. 173

Figura 136: Resultados das análises de MEV do Ponto 05 da Energia do Proctor Normal com ampliação de 2000 e 4000 vezes. 174

Figura 137: Resultados das análises de MEV do Ponto 02 da Energia do Proctor Intermediária com ampliação de, 100 e 1000 vezes. 175

Figura 138: Resultados das análises de MEV do Ponto 02 da Energia do Proctor Intermediária com ampliação de, 2000 e 4000 vezes. 176

Figura 139: Resultados das análises de MEV do Ponto 01 da Energia do Proctor Modificada com ampliação de, 100 e 1000 vezes. 177

Figura 140: Resultados das análises de MEV do Ponto 01 da Energia do Proctor Modificada com ampliação de, 2000 e 4000 vezes. 178

Figura 141: Resultados das análises de MEV do Ponto 05 da Energia do Proctor Modificada com ampliação de, 100 e 1000 vezes. 179

Figura 142: Resultados das análises de MEV do Ponto 05 da Energia do Proctor Modificada com ampliação de, 2000 e 4000 vezes. 180

Figura 143: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 01 da Energia do Proctor Normal. 181

Figura 144: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 02 da Energia do Proctor Normal. 182

Figura 145: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 03 da Energia do Proctor Normal. 182

Figura 146: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do 183

ar para o ponto 04 da Energia do Proctor Normal.	
Figura 147: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 05 da Energia do Proctor Normal.	183
Figura 148: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 01 da Energia do Proctor Intermediária.	184
Figura 149: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 02 da Energia do Proctor Intermediária.	184
Figura 150: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 03 da Energia do Proctor Intermediária.	185
Figura 151: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 04 da Energia do Proctor Intermediária.	185
Figura 152: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 05 da Energia do Proctor Intermediária.	186
Figura 153: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 01 da Energia do Proctor Modificada.	186
Figura 154: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 02 da Energia do Proctor Modificada.	187
Figura 155: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 03 da Energia do Proctor Modificada.	187
Figura 156: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 04 da Energia do Proctor Modificada.	188
Figura 157: Relação entre a contração, temperatura e umidade relativa do ar para o ponto 05 da Energia do Proctor Modificada.	188
Figura 158: Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 01 da Energia do Proctor Normal.	189
Figura 159: Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 02 da Energia do Proctor Normal.	189
Figura 160: Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 03 da Energia do Proctor Normal.	191
Figura 161: Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 04 da Energia do Proctor Normal.	191
Figura 162: Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 01 da Energia do Proctor Intermediária.	193

Figura 163: Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 02 da Energia do Proctor Intermediária.	194
Figura 164: Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 03 da Energia do Proctor Intermediária.	195
Figura 165: Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 04 da Energia do Proctor Intermediária.	196
Figura 166: Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 05 da Energia do Proctor Intermediária.	197
Figura 167 Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 01 da Energia do Proctor Modificada.	198
Figura 168: Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 02 da Energia do Proctor Modificada.	199
Figura 169: Envoltória de resistência para o ponto 03 da Energia do Proctor Modificada.	200
Figura 170: Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 04 da Energia do Proctor Modificada.	201
Figura 171: Curvas de Tensão x Deslocamento Horizontal para o ponto 05 da Energia do Proctor Modificada.	202

Lista de Abreviaturas

ABLP - Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELP - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM - Serviço Geológico do Brasil
DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPA - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISSMGE - International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MPRR - Ministério Público do Estado de Roraima
SEDU - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano
SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos