

Thaís Cristina Campos de Abreu

**Avaliação do potencial de geração de
biogás de resíduos sólidos urbanos de
diferentes idades**

Tese de Doutorado

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

Orientadores: Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos
Profa. Denise Maria Mano Pessôa

Rio de Janeiro, Setembro de 2014

Thaís Cristina Campos de Abreu

**Avaliação do potencial de geração de
biogás de resíduos sólidos urbanos de
diferentes idades**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor 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. Tácio Mauro Pereira de Campos

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Profa. Denise Maria Mano Pessoa

Co-orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Eduardo Dell’Avanzi

Universidade Federal do Paraná

Prof. José Fernando Thomé Jucá

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Roberto Francisco de Azevedo

Universidade Federal de Viçosa

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, Setembro de 2014

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

Thais Cristina Campos de Abreu

Graduou-se em Engenharia Ambiental (Universidade Federal do Paraná) em 2005. Em 2008 apresentou a dissertação de mestrado intitulada Avaliação do Transporte do Herbicida Paraquat em solos do Campo Experimental de Bom Jardim, RJ, em Geotecnia, pelo Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Em 2009 ingressou no curso de doutorado em geotecnia da mesma universidade. Durante o doutorado orientou trabalhos de iniciação científica e monográfica de conclusão de curso com pesquisas voltadas para o transporte de contaminantes biológicos, caracterização físico-química dos RSU, avaliação experimental da produção de biogás e avaliação de recalques da massa de RSU. Principais área de interesse e linhas de pesquisa: Mecânica dos Solos, Geotecnia Experimental, Geotecnia Ambiental.

Ficha Catalográfica

Abreu, Thaís Cristina Campos de

Avaliação do potencial de geração de biogás de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades / Thaís Cristina Campos de Abreu ; orientadores: Tácio Mauro Pereira de Campos, Denise Maria Mano Pessôa. – 2014. 307 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Resíduo sólido urbano. 3. Geração de biogás. 4. Aterro sanitário. 5. Ensaio de laboratório. I. Campos, Tácio Mauro Pereira de. II. Pessôa, Denise Maria Mano. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Serviço Social. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

São inúmeros os agradecimentos, ainda que em breves palavras, pessoas contribuíram de maneira direta ou indireta para conclusão de uma etapa.

Agradeço a Deus, pois sem a proteção, bençãos, amparo e intuições, nem uma vírgula seria rascunhada.

Aos meus pais, irmãos e familiares por me incentivarem a continuar na área acadêmica, principalmente nos momentos de tormentas. Agradeço especialmente à minha irmã, que leu minha tese tão rapidamente fazendo algumas correções.

Ao meu orientador, professor Tácio, por permitir meu crescimento profissional, me desafiando em mais uma pesquisa. Toda a relação entre orientador/orientada foi de respeito, sendo prazeroso aprender com uma pessoa de um coração bom e um pesquisador aberto a novos temas e áreas, aceitando a conexão destas.

À professora Denise por abrir as portas do laboratório e por confiar os alunos aos meus ensinamentos e orientação. Sem isso, não teria sido possível meu amadurecimento profissional. Agradeço também pelos ensinamentos transmitidos.

Ao meu “Time dos Queridos” (Camila, Fernando, Francisco, Fábio, Lauro, João, Mayara e Paula) por ter tido a oportunidade de trabalhar com estas pessoas incríveis que tenho a honra em tê-los como amigos.

Ao professor Franklin por toda a preocupação, carinho e ternura. Sua crença no meu trabalho muitas vezes foram maiores que as minhas.

Ao professor Celso pelos seus conhecimentos e compartilhar sábios conselhos.

Aos professores Dell’Avanzi e Jucá por ter o prazer de contar com suas sugestões para a melhoria da minha tese.

Ao professor Kai pelo conhecimento transmitido em questões essenciais.

Aos amigos, tanto os que estavam perto quanto os distantes geograficamente (Algemiro, Arash, Armando, Arthur, Maria Bernadete, Clarisse, Davi, Edson, Eliot, Emílio, Guillermo, Jackeline, José Silvestre, Juliana, Luciana, Maira, Michel, Priscila, Paula, Pedro, Ricardo, Ricardo Cesar, Simone, Suelen, Taíse, Wagner, Wellinton) que dividiram momentos importantes e auxiliaram nesta caminhada, alguns com seus ouvidos, outros com palavras, ou ainda, com seu tempo, risadas, lágrimas, abraços, lembranças, paciência e seus carinhos.

À COMLURB por disponibilizarem a infraestrutura e equipe técnica.

À Novo Gramacho S.A., em especial ao Eng. Diogo, Eng. Vinícius, Sr. Marquinhos, Sr. Edson, Sr. Claudio, Sr. “Véio”, que contribuíram para a realização da coleta de amostras no Aterro.

Ao CNPq, ao PRONEX e a PUC-Rio pelo auxílio financeiro.

Resumo

Abreu, Thaís Cristina Campos de; de Campos, Tácio Mauro Pereira; Pessoa, Denise Maria Mano. **Avaliação do potencial de geração de biogás de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades**. Rio de Janeiro, 2014. 307 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese tem por objetivo avaliar o potencial de geração de biogás, por degradação anaeróbica de resíduos sólidos urbanos em perfis de um aterro sanitário. As amostras foram obtidas a partir de perfis de sondagem compostos por materiais dispostos em épocas distintas e com diferentes idades em relação a seu estágio de decomposição. Foi elaborado protocolo específico para determinação da temperatura, pH, composição gravimétrica, distribuição granulométrica, teores de umidade, de matéria orgânica, de sólidos voláteis e de lignina nessas amostras e criada metodologia com o uso de dados topográficos, para a determinação das idades de disposição dos resíduos. Foi ainda desenvolvido equipamento eudiométrico para a determinação potencial bioquímico de metano, com medidas de variação volumétrica e avaliação do prognóstico de geração de metano por modelos de primeira ordem mais consagrados (LandGEM e IPCC). Os dados experimentais indicaram que poucas propriedades apresentaram uma correlação com o perfil e com a idade dos RSU, devido à alta heterogeneidade do material. Embora o potencial de biogás e a idade dos RSU não tenham apresentado correlação entre si, o material mais novo, de quase um ano, produziu maior quantidade de biogás e houve uma redução de 78% dessa produção para a do material de 3 anos. Verificou-se uma relação entre o teor de matéria orgânica e de sólidos voláteis com a produção de biogás para materiais com até 4 anos. O prognóstico da geração de biogás aplicando os dados experimentais aos modelos EPA e IPCC foi menor do que quando adotados os parâmetros *default*. A retroanálise segundo o IPCC, com os dados experimentais, indicaram valores de DOC muito inferiores aos usados com *default*, resultando em menores emissões de biogás.

Palavras-chave

Resíduo sólido urbano; geração de biogás; aterro sanitário; ensaio de laboratório.

Abstract

Abreu, Thaís Cristina Campos de; de Campos, Tácio Mauro Pereira (Advisor); Pessoa, Denise Maria Mano (Co-Advisor). **Evaluation of the potential of biogas generation from urban solid waste with variable ages**. Rio de Janeiro, 2014. 307 p. D.Sc Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The aim of this thesis is to evaluate of the potential biogas generation formed in the anaerobic phase from the degradation of urban solid waste with variables ages of deposition in a sanitary landfill. The materials were obtained from borehole profiles, being composed of materials disposed at different times and with variables ages in relation to their state of deposition. The knowledge of the physic-chemical characteristics is essential for assessing the biochemical potential of gases. Thus, it was developed: (i) a protocol for determination of properties, such as temperature, pH, gravimetric composition, particle size distribution, moisture content, organic matter content, volatile solids content, lignin content; (ii) one eudiometer device was constructed, with volume variation measurements for determining the biochemical methane potential; (iii) methodology to identify the ages of waste disposal by topography; and (iv) a methodology for predicting methane generation by well-known first order models (LandGEM and IPCC). Due to the high heterogeneity of the material, the experimental data indicated that few properties showed a trend in their behavior with respect to the profile and the age of MSW. Although the potential for biogas generation and the age of MSW showed no correlation, the newer material (almost one year old) showed higher biogas production. Gas production related to the 3 year old material was 78% lower compared to the newer one. Even with limited data, there is a relationship between the content of organic matter and/or volatile solid matter with the production of biogas for materials with more than 4 years. The prediction of biogas generation by applying experimental data was lower compared to the results applying EPA and IPCC models. The back-calculation analysis with the experimental data determined of IPCC indicated much lower DOC values than those used with the default, resulting in lower emission of biogas.

Keywords

Solid waste; biogas generation; sanitary landfill; laboratory testing

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1 Introdução..... | 19 |
| 1.1 <i>Descrição do problema</i> | 19 |
| 1.2 <i>Objetivos</i> | 28 |
| 1.3 <i>Organização da Tese</i> | 29 |
| 2 Revisão Bibliográfica..... | 31 |
| 2.1 <i>Classificação do Resíduo Sólido Urbano (RSU)</i> | 31 |
| 2.2 <i>Cenário sobre a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil</i> | 34 |
| 2.2.1 <i>Geração de RSU per capita</i> | 34 |
| 2.3 <i>Disposição de RSU</i> | 37 |
| 2.3.1 <i>Destinação</i> | 39 |
| 2.4 <i>Decomposição da matéria orgânica</i> | 42 |
| 2.5 <i>Metodologias de Caracterização dos RSU</i> | 55 |
| 2.5.1 <i>Caracterização Física</i> | 56 |
| 2.5.1.1 <i>Composição gravimétrica</i> | 57 |
| 2.5.1.2 <i>Peso específico</i> | 66 |
| 2.5.1.3 <i>Teor de umidade</i> | 71 |
| 2.5.1.4 <i>Temperatura</i> | 77 |
| 2.5.1.5 <i>Análise granulométrica</i> | 79 |
| 2.5.2 <i>Características Químicas</i> | 85 |
| 2.5.2.1 <i>Potencial hidrogeniônico</i> | 87 |
| 2.5.2.2 <i>Relação carbono/nitrogênio</i> | 87 |
| 2.5.2.3 <i>Teor matéria orgânica (MO)</i> | 87 |
| 2.5.2.4 <i>Teor de sólidos voláteis (SV)</i> | 88 |
| 2.5.2.5 <i>Poder calorífico</i> | 92 |
| 2.5.3 <i>Características Biológicas</i> | 93 |
| 2.5.3.1 <i>Teor de lignina (LG)</i> | 94 |
| 2.5.3.2 <i>Biodegradabilidade da fração orgânica do RSU</i> | 97 |
| 2.5.3.3 <i>Curva de Crescimento Bacteriano</i> | 98 |
| 2.5.3.4 <i>Ensaio biológicos para a produção de biogás</i> | 100 |
| 2.5.3.4.1 <i>Índice de Respiração</i> | 101 |
| 2.5.3.4.2 <i>Digestão Anaeróbica</i> | 101 |
| 2.5.3.5 <i>Ensaio de Potencial Bioquímico de Metano</i> | 104 |
| 2.5.3.6 <i>Método de medição de gás por ensaios anaeróbicos de batelada</i> | 108 |
| 2.6 <i>Modelos para geração de biogás</i> | 110 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.6.1 | Modelo Triangular..... | 112 |
| 2.6.2 | Modelo de Ordem Zero | 113 |
| 2.6.3 | Modelo de Primeira Ordem..... | 116 |
| 2.6.4 | Modelo de Segunda Ordem..... | 125 |
| 2.6.5 | Modelo de biodegradação sequencial..... | 126 |
| 3 | Amostragem e Caracterização | 141 |
| 3.1 | <i>Coleta das amostras de resíduos sólidos urbanos in situ.....</i> | <i>142</i> |
| 3.2 | <i>Furo de Sondagens</i> | <i>146</i> |
| 3.3 | <i>Determinação das propriedades físicas dos RSU em campo.....</i> | <i>149</i> |
| 3.3.1 | Temperatura..... | 149 |
| 3.3.2 | Potencial hidrogeniônico (pH) <i>in situ</i> | 150 |
| 3.4 | <i>Armazenamento e transporte de amostras para análise em laboratório.....</i> | <i>151</i> |
| 3.5 | <i>Determinação das propriedades físicas dos RSU em laboratório.....</i> | <i>151</i> |
| 3.5.1 | Teor de Umidade..... | 151 |
| 3.5.2 | Composição Gravimétrica | 153 |
| 3.5.3 | Distribuição Granulométrica | 154 |
| 3.5.4 | Densidade Relativa dos Grãos | 156 |
| 3.5.5 | Separação do RSU para o ensaio de produção de gás em laboratório | 157 |
| 3.5.6 | Teor de Matéria Orgânica..... | 159 |
| 3.5.7 | Teor de Sólidos Voláteis..... | 160 |
| 3.5.8 | Teor de Lignina..... | 160 |
| 3.5.9 | Potencial hidrogeniônico | 163 |
| 4 | Eudiômetro | 164 |
| 4.1 | <i>Ensaio do Potencial Bioquímico de Metano</i> | <i>168</i> |
| 4.1.1 | Montagem do equipamento..... | 168 |
| 4.1.1.1 | Descrição do Equipamento | 169 |
| 4.1.1.2 | Implementação do Sistema de Vedação..... | 171 |
| 4.1.1.3 | Preparo do Fluido Selante..... | 172 |
| 4.1.2 | Montagem do Ensaio GB ₂₁ | 172 |
| 4.1.3 | Método de quantificação do biogás | 174 |
| 4.2 | <i>Lodo Anaeróbio</i> | <i>175</i> |
| 4.3 | <i>Ajuste da curva não-linear aos dados experimentais do ensaio GB₂₁.....</i> | <i>175</i> |
| 5 | Identificação da Idade dos RSU | 178 |
| 5.1 | <i>Metodologia para obtenção do modelo digital</i> | <i>178</i> |
| 5.2 | <i>Determinação da idade dos RSU</i> | <i>180</i> |
| 6 | Apresentação dos dados de campo | 185 |
| 6.1 | <i>Propriedades físicas dos RSU em campo</i> | <i>185</i> |
| 6.1.1 | Temperatura..... | 186 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.1.2 | Potencial hidrogeniônico <i>in situ</i> | 187 |
| 6.2 | <i>Determinação das propriedades físicas dos RSU em laboratório</i> | 189 |
| 6.2.1 | Teor de Umidade..... | 189 |
| 6.2.2 | Composição Gravimétrica | 191 |
| 6.2.3 | Distribuição Granulométrica | 200 |
| 6.2.4 | Densidade Relativa dos Grãos (G_s)..... | 203 |
| 6.2.5 | Potencial Hidrogeniônico da fração orgânica | 205 |
| 6.2.6 | Teor de Matéria Orgânica e de Sólidos Voláteis | 206 |
| 6.2.7 | Teor de Lignina..... | 209 |
| 7 | Apresentação dos dados eudiométricos | 212 |
| 7.1 | <i>Ensaio GB₂₁</i> | 212 |
| 7.1.1 | Furo 128C..... | 212 |
| 7.1.2 | Furo 131 | 218 |
| 7.1.3 | Furo 134B..... | 224 |
| 7.1.4 | Furo 161A..... | 226 |
| 7.2 | <i>Ajuste não-linear aos dados experimentais do ensaio GB₂₁</i> | 233 |
| 7.3 | <i>Correlação entre as características físico-químicas do RSU</i> | 238 |
| 8 | Modelos para prognóstico da geração de metano | 242 |
| 8.1 | <i>Modelo LandGEM (USEPA)</i> | 242 |
| 8.1.1 | Características do modelo..... | 242 |
| 8.1.2 | Considerações para a modelagem no LandGEM..... | 245 |
| 8.2 | <i>Modelo IPCC 2006</i> | 251 |
| 8.2.1 | Características do modelo..... | 251 |
| 8.2.2 | Considerações para a modelagem ao modelo IPCC..... | 257 |
| 8.3 | <i>Retroanálise da geração de Metano</i> | 261 |
| 9 | Discussão dos resultados | 267 |
| 9.1 | <i>Propriedades físicas dos RSU em campo</i> | 267 |
| 9.1.1 | Temperatura <i>in situ</i> | 267 |
| 9.1.2 | Potencial hidrogeniônico <i>in situ</i> | 269 |
| 9.2 | <i>Propriedades físicas dos RSU em laboratório</i> | 271 |
| 9.2.1 | Teor de Umidade..... | 271 |
| 9.2.2 | Composição Gravimétrica | 273 |
| 9.2.3 | Distribuição Granulométrica | 274 |
| 9.2.4 | Densidade Relativa dos Grãos (G_s)..... | 275 |
| 9.2.5 | Potencial Hidrogeniônico da fração orgânica | 278 |
| 9.2.6 | Teor de Matéria Orgânica e de Sólidos Voláteis | 278 |
| 9.2.7 | Teor de Lignina..... | 280 |
| 9.3 | <i>Ensaio GB₂₁</i> | 282 |
| 9.3.1 | Furo 128C..... | 282 |
| 9.3.2 | Furo 131 | 283 |
| 9.3.3 | Furo 134B..... | 284 |

| | |
|--|------------|
| 9.3.4 Furo 161A..... | 285 |
| 9.4 Parâmetros obtidos pelo ajuste à função de von Bertalanffy | 285 |
| 9.5 Prognósticos da geração de metano | 288 |
| 10 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros..... | 290 |
| 10.1 Conclusões | 290 |
| 10.2 Sugestões | 295 |
| Referências bibliográficas..... | 296 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1– Descarte de lixo feita por “Tigres” | 21 |
| Figura 1.2 – Ações antrópicas e as alterações climáticas | 23 |
| Figura 2.1 - Classificação do RSU usando o diagrama triangular..... | 34 |
| Figura 2.2 – Geração de RSU nas diferentes Regiões do Brasil no ano de 2011 | 36 |
| Figura 2.3 – Disposição de RSU no Estado do Rio de Janeiro | 39 |
| Figura 2.4– Processos de aterramento de resíduos..... | 41 |
| Figura 2.5 – Composição média de células bacterianas..... | 42 |
| Figura 2.6 – Variação populacional microbiana durante decomposição de resíduo em reatores | 47 |
| Figura 2.7 - Fatores que influenciam a geração de metano em aterros de RSU..... | 50 |
| Figura 2.8 - Grupo de fatores que afetam a produção de gás em aterros | 51 |
| Figura 2.9 - Distribuição de sulfato em diversos constituintes do RSU | 54 |
| Figura 2.10 – Uma forma de amostragem e composição gravimétrica..... | 60 |
| Figura 2.11 - Esquema de amostragem e preparação de amostras para análises..... | 62 |
| Figura 2.12 - Processo de quarteamento de amostras.. .. | 63 |
| Figura 2.13 – Variação do peso específico com a profundidade..... | 67 |
| Figura 2.14 – Peso específico para RSU compactados..... | 68 |
| Figura 2.15 - Correlação do peso específico com a idade | 70 |
| Figura 2.16 - Correlação da umidade com a idade do RSU | 76 |
| Figura 2.17 - Taxa de crescimento das metanogênicas..... | 78 |
| Figura 2.18 - Variação a temperatura dos RSU com a profundidade..... | 79 |
| Figura 2.19 - Faixa de variação dos tamanhos dos constituintes dos RSU..... | 80 |
| Figura 2.20 - Distribuição do tamanho das partículas dos RSU..... | 82 |
| Figura 2.21 - Variação do tamanho das partículas com a idade do RSU..... | 83 |
| Figura 2.22 - Variação da distribuição granulométricas pela classificação mecânica..... | 84 |
| Figura 2.23 - Variação granulométrica dos RSU considerando aspectos relevantes | 85 |
| Figura 2.24 – Variação do teor de SV com a idade do RSU. | 89 |
| Figura 2.25 – Variação do teor de SV com a idade..... | 89 |

| | |
|---|-----|
| Figura 2.26 - Perfil do teor de SV com a profundidade. | 91 |
| Figura 2.27 - Variação do teor de SV com o tempo durante um tratamento biológico. | 92 |
| Figura 2.28 - Curva de crescimento bacteriano. | 98 |
| Figura 2.29 – Esquema para bio-ensaio anaeróbico. | 103 |
| Figura 2.30 – Aparato de Warburg. | 105 |
| Figura 2.31 – Representação da produção de materiais orgânicos de rápida e lenta degradação num período de 5 anos. | 113 |
| Figura 2.32 – Variação do parâmetro L_0 para o modelo de zero ordem. | 115 |
| Figura 2.33 – Variação do parâmetro t para o modelo de zero ordem. | 115 |
| Figura 2.34 – Variação do parâmetro L_0 para o modelo de primeira ordem. | 118 |
| Figura 2.35 – Variação do parâmetro k para o modelo de primeira ordem. | 118 |
| Figura 2.36 – Representação dos períodos de tempo assumidos pelo modelo. | 138 |
| Figura 3.1– Localização do Aterro Metropolitano de Jardim Gramacho. | 141 |
| Figura 3.2 - Perfuratriz. | 143 |
| Figura 3.3 - Exterior do amostrador. | 143 |
| Figura 3.4 - Interior do amostrador. | 144 |
| Figura 3.5 - Extração de amostras. | 145 |
| Figura 3.6 - Coleta de amostras. | 145 |
| Figura 3.7 – Amostras. | 146 |
| Figura 3.8 – Drenagem de chorume no poço de perfuração. | 148 |
| Figura 3.9 – Localização geográfica dos furos de sondagem. | 149 |
| Figura 3.10 - Propriedade física <i>in situ</i> – Temperatura. | 150 |
| Figura 3.11 - Propriedades físicas <i>in situ</i> – Temperatura e pH. | 150 |
| Figura 3.12 - Determinação do teor de umidade. | 152 |
| Figura 3.13 – Secagem do material em estufa. | 152 |
| Figura 3.14 – Separação gravimétrica. | 153 |
| Figura 3.15 – Pesagem do material plástico. | 154 |
| Figura 3.16 – Agregado Fino. | 154 |
| Figura 3.17 – Destorroamento e peneiramento da fração grossa. | 156 |
| Figura 3.18 – Sedimentação e peneiramento fino. | 156 |
| Figura 3.19 – Pesagem do material nos picnômetros e aplicação do vácuo. | 157 |
| Figura 3.20 – Teor de M.O. | 159 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.21 – Teor de SV | 160 |
| Figura 3.22 – Sistema para determinação do teor de lignina.. | 161 |
| Figura 3.23 – Processo de filtração e lavagem. | 162 |
| Figura 3.24 – Processo de acidificação e filtração para determinação do teor de lignina..... | 162 |
| Figura 4.1– Eudiômetro | 164 |
| Figura 4.2 – Ensaio BMP de Duran (2010)..... | 165 |
| Figura 4.3 – Tubo eudiométrico conforme DIN 38414, Part8 | 166 |
| Figura 4.4 – Projeto de construção do tubo eudiômetro..... | 167 |
| Figura 4.5 – Mini digestor para produção de biogás | 167 |
| Figura 4.6 – Equipamento para ensaio BMP com 2 tubos eudiométricos..... | 170 |
| Figura 4.7 – Montagem do ensaio GB21..... | 173 |
| Figura 4.8 – Representação gráfica do modelo de von Bertalanffy..... | 176 |
| Figura 5.1 – Critério de triangulação de Delaunay. | 179 |
| Figura 5.2 – Forma simplificada da disposição dos pontos de amostragem | 180 |
| Figura 5.3 – Perfil topográfico Leste-Oeste do AMJG para o ano de 2009 | 182 |
| Figura 5.4 – Perfil topográfico Leste-Oeste do AMJG para os anos de 2009, 2010, 2011 e 2013..... | 182 |
| Figura 5.5 – Perfil de sondagem a seção geológica para o ano de 2009. | 183 |

Lista de Gráficos

| | |
|---|-----|
| Gráfico 5-1 – Perfil da idade dos RSU..... | 181 |
| Gráfico 6-1 – Perfil de temperatura x profundidade dos furos | 186 |
| Gráfico 6-2 – Temperatura x idade dos RSU | 187 |
| Gráfico 6-3 – Perfil de pH x profundidade dos furos..... | 188 |
| Gráfico 6-4 - pH x idade dos RSU | 188 |
| Gráfico 6-5 – Perfil de umidade x profundidade dos furos..... | 190 |
| Gráfico 6-6 – Teor de umidade x idade dos RSU..... | 190 |
| Gráfico 6-7 – Composição gravimétrica dos RSU a 5 m | 194 |
| Gráfico 6-8 – Composição gravimétrica dos RSU a 10 m | 195 |
| Gráfico 6-9 – Composição gravimétrica dos RSU a 15 m | 196 |
| Gráfico 6-10 – Composição gravimétrica dos RSU a 20 m | 196 |
| Gráfico 6-11 – Perfil da composição gravimétrica dos furos | 198 |
| Gráfico 6-12 – Composição de papel em relação à idade do RSU | 198 |
| Gráfico 6-13 - Composição de metal em relação à idade do RSU | 199 |
| Gráfico 6-14 – Composição de inerte em relação à idade do RSU | 199 |
| Gráfico 6-15 – Distribuição granulométrica furo 128C..... | 200 |
| Gráfico 6-16 – Distribuição granulométrica furo 134 B..... | 201 |
| Gráfico 6-17 – Distribuição granulométrica furo 302 | 202 |
| Gráfico 6-18 – Distribuição granulométrica furo 161 A..... | 203 |
| Gráfico 6-19 – Perfil de densidade relativa dos grãos para os furos | 204 |
| Gráfico 6-20 - Densidade relativa dos grãos x idade dos RSU | 205 |
| Gráfico 6-21 – Perfil do teor de matéria orgânica dos furos | 207 |
| Gráfico 6-22 - Teor de MO x idade dos RSU..... | 208 |
| Gráfico 6-23 – Perfil do teor de sólidos voláteis dos furos..... | 209 |
| Gráfico 6-24 – Perfil do teor de lignina não solúvel dos furos | 211 |
| Gráfico 6-25 – Relação entre o teor de LG e a idade dos RSU..... | 211 |
| Gráfico 7-1 – Volume de biogás acumulado - furo 128C – 5 m..... | 213 |
| Gráfico 7-2 – V_0 /kg SV - furo 128C – 5 m..... | 214 |
| Gráfico 7-3 – Volume de biogás acumulado - furo 128C – 10 m..... | 215 |
| Gráfico 7-4 – V_0 /kg SV - furo 128C – 10 m..... | 216 |
| Gráfico 7-5 – Volume de biogás acumulado - furo 128C – 15 m..... | 217 |
| Gráfico 7-6 – V_0 /kg SV - furo 128C – 15 m..... | 218 |
| Gráfico 7-7 – Volume de biogás acumulado - furo 131 – 5 m | 219 |
| Gráfico 7-8 – V_0 /kg SV - furo 131 – 5 m | 220 |

| | |
|--|-----|
| Gráfico 7-9– Volume de biogás acumulado - furo 131 – 15 m | 221 |
| Gráfico 7-10 – V_0 /kg SV - furo 131 – 15 m | 222 |
| Gráfico 7-11 – Volume de biogás acumulado - furo 131 – 25 m | 223 |
| Gráfico 7-12 – V_0 /kg SV - furo 131 – 25 m | 223 |
| Gráfico 7-13 – Volume de biogás acumulado - furo 131 – 30 m | 224 |
| Gráfico 7-14 – Volume de biogás acumulado - furo 134B – 5 m..... | 225 |
| Gráfico 7-15 – V_0 /kg SV - furo 134B – 5 m..... | 226 |
| Gráfico 7-16 – Volume de biogás acumulado - furo 161A – 5 m..... | 227 |
| Gráfico 7-17 – V_0 /kg SV - furo 161A – 5 m..... | 227 |
| Gráfico 7-18 – Volume de biogás acumulado- furo 161A – 10 m..... | 228 |
| Gráfico 7-19 – V_0 /kg SV - furo 161A – 10 m..... | 229 |
| Gráfico 7-20 – Volume de biogás acumulado - 161A – 15 m | 230 |
| Gráfico 7-21 – V_0 /kg SV - furo 161A – 15 m..... | 231 |
| Gráfico 7-22 – Volume de biogás acumulado - furo 161A – 20 m..... | 232 |
| Gráfico 7-23 – V_0 /kg SV - furo 161A – 20 m..... | 232 |
| Gráfico 7-24 – Ajuste da geração de metano considerando a 1ª parte da curva do furo128C-5m..... | 235 |
| Gráfico 7-25 – Ajuste da geração de metano considerando a 2ª parte da curva do furo128C-5m..... | 236 |
| Gráfico 7-26 – Perfil do volume potencial de biogás acumulado..... | 237 |
| Gráfico 8-1 - Estimativa da produção de metano pelo modelo LandGEM para o AMJG com parâmetros “default” do EPA e Banco Mundial/Abreu (2009)..... | 246 |
| Gráfico 8-2 - Estimativa da produção de metano pelo modelo LandGEM utilizando dados do material novo (1 ano – furo 128C-5m)... | 248 |
| Gráfico 8-3 - Estimativa da produção de metano pelo modelo LandGEM para o AMJG com a unidade de k em dias ⁻¹ | 250 |
| Gráfico 8-4 - Estimativa da produção de metano pelo modelo IPCC para AMJG | 260 |
| Gráfico 8-5– Volume de metano acumulado obtido a partir dos parâmetros de ajuste da eq. de von Bertalanffy aos dados experimentais..... | 262 |
| Gráfico 8-6 – Retroanálise para o modelo IPCC para o material do furo 128C-5m | 263 |
| Gráfico 8-7– Estimativa de geração de metano pelo modelo IPCC usando o parâmetro retroanalizado do Furo 128C-5m..... | 264 |
| Gráfico 8-8 – Estimativa de geração de metano pelo modelo IPCC usando o parâmetro retroanalizado dos pontos ensaiados..... | 265 |
| Gráfico 9-1 – Correlação entre G_s e teor de MO | 277 |
| Gráfico 9-2 – Relação entre teor de SV e idade dos RSU..... | 279 |

| | |
|---|-----|
| Gráfico 9-3 – Relação entre o teor de LG e a idade dos RSU..... | 281 |
| Gráfico 9-4 - Correlação entre volume acumulado de biogás e teor de MO..... | 286 |
| Gráfico 9-5 - Correlação entre L_0 e teor de MO..... | 286 |
| Gráfico 9-6 - Correlação entre volume acumulado de biogás e teor de SV..... | 287 |
| Gráfico 9-7 - Correlação entre L_0 e teor de SV..... | 287 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 2-1– Cenário da disposição de RUS no Brasil | 38 |
| Tabela 2-2 – Composição química dos constituintes orgânicos do resíduo. | 43 |
| Tabela 2-3 – Composição típica do biogás gerada a partir dos RSU..... | 45 |
| Tabela 2-4 – Efeito das variáveis que influenciam a geração de gás em aterros de RSU..... | 55 |
| Tabela 2-5 – Categorias dos resíduos para a composição gravimétrica..... | 65 |
| Tabela 2-6 – Valores de peso específico levando em relação à compactação..... | 68 |
| Tabela 2-7 - Valores de peso específico em relação à compactação e conteúdo de MO | 69 |
| Tabela 2-8 – Valores de peso específico pra aterros nacionais | 69 |
| Tabela 2-9 - Valores de peso específico para os Bairros da cidade do R.J..... | 69 |
| Tabela 2-10 - Valores de peso específico para cada constituinte do RSU..... | 71 |
| Tabela 2-11 - Valores de umidade em diversos países..... | 74 |
| Tabela 2-12 - Valores de umidade para os constituintes do RSU..... | 74 |
| Tabela 2-13 - Teor de umidade de RSU em base seca e úmida..... | 75 |
| Tabela 2-14 – Teor de umidade de RSU em diferentes condições de degradação | 77 |
| Tabela 2-15 - Relação entre temperatura e solubilidade em água para gases..... | 78 |
| Tabela 2-16 - Variação do teor de SV para alguns constituintes do RSU..... | 90 |
| Tabela 2-17 – Teor de SV em relação a idade/profundidade | 92 |
| Tabela 2-18 - Valores de teor de lignina..... | 96 |
| Tabela 2-19 - Variação do teor de lignina com a profundidade | 97 |
| Tabela 2-20 – Ensaios de batelada..... | 109 |
| Tabela 2-21 – Desempenho de alguns modelos de geração de gases de aterros sanitários..... | 140 |
| Tabela 3-1 - Segregação da composição gravimétrica do RSU..... | 158 |
| Tabela 5-1 – Identificação das idades dos RSU..... | 181 |
| Tabela 6-1 – Propriedades dos RSU obtidas <i>in situ</i> | 185 |
| Tabela 6-2 – Teor de umidade na base seca dos RSU..... | 189 |
| Tabela 6-3 – Composição Gravimétrica do Furo 128C | 191 |
| Tabela 6-4 – Composição Gravimétrica do Furo 134B..... | 192 |
| Tabela 6-5 – Composição Gravimétrica do Furo 302..... | 193 |
| Tabela 6-6 – Composição Gravimétrica do Furo 161A..... | 193 |
| Tabela 6-7 – Densidade relativa dos grãos dos RSU..... | 203 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 6-8 – Potencial hidrogeniônico da fração orgânica dos RSU | 206 |
| Tabela 6-9 – Teor de MO e SV | 207 |
| Tabela 6-10 – Teor de lignina não solúvel..... | 210 |
| Tabela 7-1 – Dados de entrada do ensaio do furo 128C – 5 m..... | 212 |
| Tabela 7-2 – Dados de entrada do ensaio do furo 128C – 10 m..... | 215 |
| Tabela 7-3 – Dados de entrada do ensaio do furo 128C – 15 m..... | 216 |
| Tabela 7-4 – Dados de entrada do ensaio do furo 131 – 5 m | 218 |
| Tabela 7-5 – Dados de entrada do ensaio do furo 131 – 15 m | 220 |
| Tabela 7-6 – Dados de entrada do ensaio do furo 131 – 25 m | 222 |
| Tabela 7-7 – Dados de entrada do ensaio do furo 131 – 30 m | 224 |
| Tabela 7-8 – Dados de entrada do ensaio do furo 134B – 5 m..... | 225 |
| Tabela 7-9 – Dados de entrada do ensaio do furo 161A – 5 m..... | 226 |
| Tabela 7-10 – Dados de entrada do ensaio do furo 161A – 10 m..... | 228 |
| Tabela 7-11 – Dados de entrada do ensaio do furo 161A – 15 m..... | 229 |
| Tabela 7-12 – Dados de entrada do ensaio do furo 161A – 20 m..... | 231 |
| Tabela 7-13 – Parâmetros da curva de von Bertalanffy. | 234 |
| Tabela 7-14 - Correlação de Spearman | 240 |
| Tabela 8-1 – Parâmetros <i>default</i> do modelo LandGEM | 244 |
| Tabela 8-2 – Quantidade de massa disposta no aterro por ano..... | 245 |
| Tabela 8-3 – <i>Default</i> DOC – IPCC, 2006..... | 253 |
| Tabela 8-4 – <i>Default</i> da composição de resíduos – IPCC, 2006..... | 253 |
| Tabela 8-5 – Valores <i>default</i> para o MCF – IPCC, 2006. | 254 |
| Tabela 8-6 – <i>Default</i> de k – IPCC, 2006..... | 255 |
| Tabela 8-7 – Cálculo do DOC para o Aterro de Gramacho. | 257 |
| Tabela 8-8 – Retroanálise do valor de DOC para o modelo IPCC | 263 |