

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**CAMPUS LONDRINA**  
**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**GEORGE MITSUO YADA JUNIOR**

**PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DO SOLO SOB O**  
**DEPÓSITO DE RESÍDUOS DE ROLÂNDIA-PR**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2**

**LONDRINA**  
**2014**

**GEORGE MITSUO YADA JUNIOR**

**PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DO SOLO SOB O  
DEPÓSITO DE RESÍDUOS DE ROLÂNDIA-PR**

Projeto de pesquisa apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Moreira dos Santos  
Co-orientador: Pesq. Dr. Cezar Francisco Araujo Junior.

**LONDRINA**

**2014**

## RESUMO

YADA JUNIOR, George Mitsuo. Propriedades Geotécnicas do antigo depósito de resíduos de Rolândia-PR. 2014. 63 f. Trabalho de conclusão de curso (graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2014.

A poluição ambiental decorrente do equivocado encerramento e da ausência de monitoramento dos depósitos de resíduos se tornou um problema relevante atualmente. O encerramento de aterros e depósitos de resíduos deve ser realizado com a introdução e compactação do solo de modo que a camada de cobertura minimize a poluição e a degradação ambiental. As propriedades geotécnicas são fundamentais para a caracterização das propriedades do solo. Este estudo tem por objetivo avaliar propriedades geotécnicas de um solo do antigo depósito de resíduos em encerramento do município de Rolândia-PR. O depósito de resíduos em encerramento está localizado em uma área com coordenadas geográficas de Latitude 23°18'21090" S e Longitude 51°22'29760" W. A área de depósito de resíduos de Rolândia foi dividida em três partes distintas: jusante, talude, e a camada de cobertura do depósito de resíduos. Na amostragem do solo, foram coletadas três amostras deformadas aleatória de 10 kg em cada área na profundidade de 5 – 20 cm para os ensaios de caracterização e o ensaio de Proctor com energia intermediária de compactação. Foram coletadas duas amostras indeformadas aleatórias em cada local para avaliação da estrutura do solo, por meio de anéis volumétricos de alumínio de 2,54 cm de altura (1") por 6,35 cm de diâmetro interno (2,5"). O solo do talude apresentou uma média de 500 g.kg<sup>-1</sup> de argila em sua composição, com 290 g.kg<sup>-1</sup> de areia. Na camada de cobertura, o teor de argila apresentou média de 750 g.kg<sup>-1</sup> e apenas 200 g.kg<sup>-1</sup> de areia. Isso influenciou os valores de densidade de partícula, os quais foram superiores nos solos do talude (3,03 g.cm<sup>-3</sup>) pelos maiores teores de areia. Além disso, os menores valores de densidade crítica de compactação foram obtidos no solo da camada de cobertura do lixão, devido à maior composição de argila neste solo. O grau de compactação não diferiu entre as três áreas, demonstrando que o trabalho de compactação do solo na camada final (sobre os resíduos) de encerramento do lixão foi realizado de forma ineficiente, pois o grau de compactação se assemelha com os valores obtidos na base do depósito, que foi um local ausente da ação de maquinários compactadores. O correto encerramento dos depósitos de resíduos pode contribuir para reduzir o fluxo de gases para a atmosfera, bem como, o fluxo de poluentes para o lençol freático.

**Palavras-chave:** curva de compactação do solo, grau de compactação, umidade ótima e densidade máxima.

## ABSTRACT

YADA JUNIOR, George Mitsuo. Geotechnical properties of the former waste disposal in Rolândia-PR. 2014. 63 f. Trabalho de conclusão de curso (graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2014.

Environmental pollution resulting from mistaken foreclosure and lack of monitoring of a waste disposal has become a major problem today. The closure of landfills and waste should be carried out with the introduction and soil compaction so that the cover layer minimizes pollution and environmental degradation. The geotechnical properties are essential for the characterization of soil properties. This study aims to evaluate the geotechnical properties of soil of the former waste disposal site in the municipality of foreclosure Rolândia - PR . The deposit of waste into foreclosure is located in an area with geographical coordinates of Latitude 23 ° 18'21090 " S Longitude 51°22'29760" W. The area of waste disposal Rolândia was divided into three distinct parts: downstream, ramp, and cover the deposit of waste layer. Soil sampling in three random samples deformed 10 kg were collected in each area in water depth 5-20 cm for characterization testing and testing with intermediate Proctor compaction energy. Undisturbed two random samples were taken from each location for evaluation of the soil structure, soil core through the aluminum of 2.54 cm (1") by 6.35 cm internal diameter (2.5 "). The soil had an average slope of 500 g.kg<sup>-1</sup> clay in its composition, with 290 g.kg<sup>-1</sup> sand. In the cover layer, clay content had an average of only 750 g.kg<sup>-1</sup> and 200 g.kg<sup>-1</sup> sand. This influenced the values of particle density , which were higher in soils of the ramp (3.03 g.cm<sup>-3</sup>) the higher sand content . In addition, the lower critical density values were obtained in the compaction of soil in landfill cover layer due to the higher clay composition in the soil. The degree of compaction did not differ between the three areas, showing the work of soil compaction on the final layer (on waste) closing the dump was performed inefficiently, since the degree of compaction is similar to the values obtained using the deposit, which was a missing action compactor machinery site. Proper closure of a waste disposal can help reduce the flow of gases into the atmosphere, as well as the flow of pollutants into groundwater.

**Keywords:** soil compaction curve, degree of compaction, optimum moisture, maximum density.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: EXEMPLO DE LIXÃO POLUIDOR NO ESTADO DE MINAS GERAIS .....	15
FIGURA 2: EXEMPLO DE ATERRO SANITÁRIO NO ESTADO DE MINAS GERAIS.....	17
FIGURA 3: ATERRO CONTROLADO CONSTRUÍDO NO ESTADO DE MINAS GERAIS.....	18
FIGURA 4: COMPORTAMENTO DAS CURVAS DE COMPACTAÇÃO PARA SOLOS DE GRANULOMETRIA DISTINTAS .....	25
FIGURA 5: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, EM DESTAQUE O ANTIGO LIXÃO DE ROLÂNDIA.....	31
FIGURA 6: VISTA DA ENTRADA PRINCIPAL DO IAPAR, NA RODOVIA CELSO GARCIA CID.....	32
FIGURA 7: IMAGEM DE SATÉLITE MOSTRANDO O LIXÃO DE ROLÂNDIA DIVIDIDO EM TRÊS PARTES PARA EXECUÇÃO DO ESTUDO: (1) SE REFERE À JUSANTE DO LIXÃO; (2) INDICA A ÁREA DO TALUDE; (3) A ÁREA DO DEPÓSITO DE RESÍDUOS, COBERTA DE SOLO E VEGETAÇÃO.....	33
FIGURA 8: FOTO MOSTRANDO ÁREA À JUSANTE DO ANTIGO DEPÓSITO DE RESÍDUOS, REPRESENTADA NA IMAGEM AÉREA PELO PONTO 1.....	34
FIGURA 9: FOTO DA ÁREA SELECIONADA PARA RETIRADAS DA AMOSTRAS RELATIVAS AO O PONTO 2 .....	34
FIGURA 10: FOTO EVIDENCIANDO COLETAS DE SOLO LOCALIZADO NA ÁREA DO PONTO 3 .....	35
FIGURAS 11(A) E 11(B): AMOSTRAGEM DAS AMOSTRAS DEFORMADAS DO SOLO DO DEPÓSITO DE RESÍDUOS DE ROLÂNDIA- PR.....	36
FIGURA 12: COLETA DA AMOSTRA INDEFORMADA .....	36
FIGURA 13: AMOSTRAS REVESTIDAS DE FILME PLÁSTICO PVC. ....	37
FIGURA 14: AJUSTE DO SOLO NO ANEL VOLUMÉTRICO.....	38
FIGURA 15: TRIÂNGULO DE CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL SEGUNDO .....	39
FIGURA 16: CILINDRO COM A PRIMEIRA CAMADA DE SOLO RECEBIDA.....	40
FIGURA 17: SOQUETE APLICANDO ENERGIA DE COMPACTAÇÃO.....	40
FIGURA 18: ESCARIFICAÇÃO DA CAMADA DE SOLO PELO FACÃO.....	41
FIGURA 19(A) E 19(B): AJUSTE DA ALTURA DO SOLO DE ACORDO COM O CILINDRO DE PROCTOR, E POSTERIORMENTE AFERIÇÃO DO SEU PESO.....	41
FIGURA 20: EXTRATOR DE CORPO DE PROVA.....	42
FIGURAS 21(A) E 21(B): COLETA DE SOLO PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO.....	42
FIGURA 22. CURVA DE COMPACTAÇÃO DE UM SOLO DE COBERTURA DO DEPÓSITO DE RESÍDUOS EM ENCERRAMENTO EM ROLÂNDIA, PR. ....	49
FIGURA 23: DENSIDADE CRÍTICA EM FUNÇÃO DA ÁREA À JUSANTE E DO TALUDE .....	53
FIGURA 24: DENSIDADE CRÍTICA EM FUNÇÃO DA ÁREA DO TALUDE E DA COBERTURA.....	53
FIGURA 25: DENSIDADE CRÍTICA EM FUNÇÃO DA ÁREA À JUSANTE E DA COBERTURA.....	53
FIGURA 26: COMPARAÇÃO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO DAS ÁREAS.....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coordenadas geográficas das amostras coletadas no depósito de resíduos em Rolândia – PR.....	37
Tabela 2: Granulometria das amostras da área jusante ao depósito de resíduos de Rolândia.....	46
Tabela 3: Propriedades físicas do solo das camadas a jusante, no talude e na cobertura do depósito de resíduos de Rolândia-PR.....	48
Tabela 4: Umidade ótima, densidade crítica de compactação e Grau de compactação das amostras, obtida através da relação entre a densidade crítica e a densidade aparente.....	52

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
<b>3. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>11</b>
<b>4. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
4.1. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) .....	13
4.2. LIXÃO, ATERRO SANITÁRIO E ATERRO CONTROLADO .....	14
4.2.1. Lixão .....	14
4.2.2. Aterro sanitário .....	16
4.2.3. Aterro controlado .....	18
4.3 IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS POR ATERROS E LIXÕES .....	18
4.4. ENCERRAMENTO DE ATERRO OU LIXÃO .....	19
4.5 MONITORAMENTO GEOTÉCNICO .....	21
4.6 COMPACTAÇÃO DO SOLO .....	22
4.7 POROSIDADE TOTAL, DENSIDADE APARENTE E DENSIDADE DE PARTÍCULA DO SOLO .....	26
4.7.1 Porosidade total do solo .....	26
4.7.2 Densidade do sol .....	26
4.7.3 Densidade de partículas .....	27
4.8 ASPECTOS HISTÓRICOS DA ÁREA .....	27
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
5.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO DEPÓSITO DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	30
5.2 LABORATÓRIO DE FÍSICA DO SOLO .....	31
5.3 ESQUEMA AMOSTRAL DO DEPÓSITO DE RESÍDUOS .....	32
5.4 AMOSTRAGEM DE SOLO .....	35
5.5 ANÁLISES REALIZADAS .....	37
5.6 ENSAIO DE PROCTOR COM ENERGIA INTERMEDIÁRIA DE COMPACTAÇÃO .....	39
5.7 ENERGIA INTERMEDIÁRIA DE PROCTOR .....	43
5.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	44
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>7. CONCLUSÃO .....</b>	<b>54</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>55</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a preservação do meio ambiente induz o engenheiro ambiental ao conhecimento de múltiplas áreas, sendo necessário o profissional executar projetos que visem uma interação equilibrada com a ciência do solo, os recursos hídricos, a vegetação e os animais, de forma que não gere impactos negativos ao meio biótico e abiótico. A solução dos problemas referentes à estrutura do solo se faz a partir da integração das propriedades presentes na Geotecnia com os conhecimentos da mecânica dos solos e das rochas, da geologia e da pedologia. Ela tem grande preocupação com o equilíbrio entre o progresso e a preservação.

Os ensaios geotécnicos contribuem para a compreensão dos processos que ocorrem no solo e para a sustentabilidade do meio ambiente, pois reconhecem a estabilidade do solo e seu comportamento físico na região, muito útil para a adequada construção de barragens, aterros e rodovias. O entendimento sobre o comportamento do solo pode prevenir impactos ambientais de diversos tipos e níveis.

A partir do conhecimento das propriedades geotécnicas dos solos, obtidas por meio de ensaios de caracterização, de compactação, de permeabilidade, de adensamento e de resistência, permite-se a elaboração de projetos de Geotecnia com a finalidade de controlar a compactação e a deterioração do solo pela erosão (MIGUEL E PINESE, 2004).

Para alguns casos ambientais, tal como a construção de aterros sanitários e seu respectivo fechamento, o estudo é focado no isolamento dos resíduos, de forma que estes não impactem negativamente no meio ambiente. A degradação da fração orgânica e inorgânica dos resíduos sólidos urbanos gera o chorume, que associado às águas pluviais que permeiam a massa de resíduos, resulta nos lixiviados. Além das cargas orgânicas e inorgânicas, a presença de metais pesados aumenta o potencial poluidor degradador do chorume. Essa produção, associada às formas inadequadas de disposição final, como lixões e aterros controlados, resulta em situações de contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais, que geram impactos negativos ao meio ambiente e à saúde da população.



O encerramento de aterros sanitários deve ser acompanhado de procedimentos tecnológicos executivos que devem ser adotados desde antes da instalação e durante o desenvolvimento. Assim, a fim de atingir os requisitos mínimos, a compactação do solo da base do aterro e da cobertura do solo inerte, em áreas de destinação final de resíduos sólidos, deve ser realizada a fim de minimizar o fluxo de água e resíduos no perfil do solo.

A estabilidade dos solos na construção de taludes rodoviários, barragens de terra e aterros sanitários é essencial para evitar diversos impactos. Quando o solo é transportado e depositado para a construção de um aterro, fica num estado relativamente fofo e heterogêneo e, portanto, de baixa resistência e muito deformável, apresentando comportamento diferente de local para local (PINTO, 2000). A compactação de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários indica a redução de volume que a massa de resíduos pode sofrer quando submetida a uma determinada pressão, geralmente aplicada por meio do emprego de equipamentos mecânicos.

Ao longo do tempo de operação de um aterro sanitário, a constante deposição de camadas sobrepostas de resíduos e o processo de decomposição da matéria orgânica acabam por promover uma redução volumétrica do aterro e alterar ao seu comportamento geotécnico, principalmente em relação à sua estabilidade e aos possíveis recalques. Portanto, uma boa compactação garante, também, aos maciços de um aterro sanitário, condições estruturais e de estabilidade (CATAPRETA et al., 2003).

Assim, quando se encerra a atividade de um lixão ou aterro sanitário, deve-se cobrir o topo da área com uma camada de solo compactada. Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), esta camada de cobertura tem a função de dificultar a infiltração das águas precipitadas sobre as células do aterro, evitar a proliferação de vetores de doenças, a catação, impedir o arraste de materiais pela ação dos ventos e facilitar a movimentação das máquinas e veículos sobre o aterro (IPT, 2000).

A umidade é um fator relevante para a estrutura do solo, pois influencia a quantidade de deformação que ocorre no solo. Em condição de solo seco, a capacidade de suporte de carga do solo torna-se elevada, suficiente para o solo suportar maiores pressões aplicadas. Dessa forma, a compactação do solo pode ser

atenuada quando o solo possui baixos teores de umidade (DIAS JUNIOR, 2000); Em umidades baixas, o atrito entre as partículas é muito alto e não consegue uma significativa redução dos vazios. Para umidades mais elevadas, a água provoca um efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam e se acomodam num arranjo mais compacto (PINTO, 2000; DIAS JUNIOR, 2000). Ou seja, em condições de elevada umidade, o solo fica mais susceptível à compactação devido à sua baixa capacidade de suporte de carga (ASSIS E LANÇAS, 2005). Para os solos que necessitam de alto grau de compactação, como em cobertura de aterros, é necessário aplicar a energia dos

O ensaio de Proctor é considerado o teste padrão em estudos de compactação do solo e pode ser útil para determinar a densidade do solo máxima e a umidade ótima de compactação em laboratório daquele solo específico (SOUZA JÚNIOR, 2005).

Assim, cabe ao engenheiro ambiental entender esse paradigma atual para monitoramento e avaliação de aterros sanitários, compreendendo os fundamentos geotécnicos e de mecânica dos solos, para evitar os processos responsáveis pela degradação do ambiente. Melhor que remediar, a prevenção dos problemas ambientais deve ser realizada com prioridade, de forma racional, e exige o entendimento sobre como, onde e por que estes ocorrem. O grande desafio do engenheiro ambiental é saber estabelecer o equilíbrio entre o progresso e a preservação.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem por objetivo geral avaliar propriedades geotécnicas de um solo do antigo depósito de resíduos em encerramento do município de Rolândia-PR.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar e modelar a curva de compactação do solo usado na cobertura do lixão, do solo da parte do talude, e do solo a jusante (adjacente) do depósito de resíduos.
- b) Determinar a densidade do solo máxima e a umidade ótima de compactação do solo por meio do ensaio de Proctor com energia intermediária de compactação.
- c) Determinar o grau de compactação do solo e relacionar a adequabilidade ambiental do depósito de resíduos.

### 3. JUSTIFICATIVA

A problemática do lixo no meio urbano abrange alguns aspectos relacionados à sua origem e produção, assim como o conceito de inesgotabilidade e os reflexos de comprometimento do meio ambiente, principalmente a poluição do solo, ar e dos recursos hídricos (BECEGATO et al., 2009).

A disposição direta dos resíduos domésticos no solo é a forma corrente de disposição para a maioria dos municípios brasileiros. Diversos aterros são feitos de forma inadequada, sob as mais variadas justificativas. Sem o estudo da compactação do solo, os resíduos são simplesmente lançados pela sua ponta, podendo resultar em uma compressibilidade exagerada do aterro devido aos grandes vazios que podem se formar entre as camadas lançadas. Além disso, aumenta-se a porosidade do próprio material que permanecia em estado fofo, que resulta, desta maneira, em uma instabilidade do solo do local, o qual pode perder totalmente sua resistência se, porventura, sofrer saturação por chuvas pesadas.

Ao longo do tempo de operação de um aterro sanitário, a constante deposição de camadas sobrepostas de resíduos e o processo de decomposição da matéria orgânica acabam por promover uma redução volumétrica do aterro e alterar ao seu comportamento geotécnico, principalmente em relação à sua estabilidade e aos possíveis recalques. Por isso, o estudo de uma energia de compactação mais adequado para determinado tipo de solo permitirá um aproveitamento mais eficiente das características do solo, de maneira a influenciar consideravelmente o dimensionamento do pavimento, garantindo aos maciços de um aterro sanitário condições estruturais e de estabilidade (CATAPRETA et al., 2003).

A compactação do aterro também influencia diretamente a biodegradação da massa de lixo, pois sua atividade diminui consideravelmente a presença de oxigênio no interior. Além da compactação da massa de lixo, a compactação da camada de cobertura e a granulometria do solo utilizado contribuem para a minimização da infiltração de águas pluviais, evitando que o oxigênio dissolvido nestas águas seja carregado para o interior dos resíduos sólidos urbanos.

Desta maneira, a caracterização do solo utilizado para cobertura dos depósitos de resíduos, bem como a utilização do ensaio de Proctor basicamente para determinar se o uso de equipamentos compactadores em campos são eficazes para estabilidade do lixão, pode gerar economias significativas ao monitoramento de aterros e depósitos de resíduos, assim como aos novos aterros a serem implantados futuramente, contribuindo para a preservação ambiental. Alcançar a sustentabilidade no paradigma do controle de resíduos sólidos urbanos é um desafio complexo. Além da perspectiva geotécnica, todas as disciplinas ambientais precisam estar integradas, de modo multidisciplinar, para a conservação completa do meio ambiente.

## 4. REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Segundo a norma brasileira da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT 10004, de 2004 – Resíduos sólidos – classificação, resíduos sólidos são:

“aqueles resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível”.

A mesma norma também define o processo de classificação de resíduos envolvendo a identificação ou atividade que o originou e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. Sendo que os resíduos são classificados em classe I ou perigosos; classe II ou não perigosos; classe II A ou não inertes e classe B ou inertes (ABNT, 2004).

Os resíduos sólidos de origem urbana (RSU) compreendem aqueles produzidos pelas inúmeras atividades desenvolvidas em áreas com aglomerações humanas do município, abrangendo resíduos de várias origens, como residencial, comercial, de estabelecimentos de saúde, industriais, da limpeza pública (varrição, capina, poda e outros), da construção civil e, finalmente, os agrícolas. Dentre os vários RSU gerados, são normalmente encaminhados para a disposição em aterros sob responsabilidade do poder municipal os resíduos de origem domiciliar ou aqueles com características similares, como os comerciais, e os resíduos da limpeza pública (IPT/CEMPRE, 1995).

Diversos trabalhos têm demonstrado que as características geofísicas das camadas de cobertura e intermediárias estão diretamente relacionadas às práticas de operação dos depósitos de resíduos. O tipo de solo, o maquinário utilizado no

recobrimento e a espessura das camadas de cobertura e intermediárias, são determinantes no volume de lixiviado gerado, acentuando ou atenuando a percolação para as camadas inferiores.

O volume de lixiviado gerado, assim como sua composição, é diretamente influenciado pelos volumes de água precipitados. Depósitos de resíduos localizados em regiões com índices pluviométricos superiores tendem a produzir maiores volumes de lixiviados, onerando a implantação de sistemas de tratamento ou intensificando degradação ambiental em situações de disposição inadequada, como é o caso dos lixões e dos aterros controlados (NAVES, 2013).

## 4.2. LIXÃO, ATERRO SANITÁRIO E ATERRO CONTROLADO

No mundo inteiro, com algumas poucas exceções, os aterros sanitários representam a principal destinação final dos resíduos sólidos, apesar do imenso esforço em se reduzir, reutilizar e reciclar.

A grande dificuldade reside nos custos de operação de um aterro sanitário, que pressupõe tratamento adequado de líquidos e gases efluentes, além de todos demais cuidados previstos nas normas técnicas. Vale ressaltar que os textos normativos sobre resíduos sólidos foram elaboradas, em sua maioria, há duas décadas e praticamente não incorporaram os conceitos recentes de geotécnica ambiental e de biotecnologia (JUCÁ, 2003).

Além dos aterros sanitários, são consideradas formas de disposição final os aterros controlados e os lixões, sendo estes últimos uma forma inadequada.

### 4.2.1. Lixão

O lixão é definido como uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos municipais, caracterizado pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública sendo ainda caracterizado como descarga de resíduos a céu aberto. (IPT/CEMPRE, 2000)

Na classificação lixão ou vazadouro há os sem nenhum controle quanto ao tipo de resíduo depositado nem quanto ao local de disposição. Nesses casos, resíduos domiciliares e comerciais de baixa periculosidade são depositados juntamente com os industriais e hospitalares, de alto poder poluidor. Pela Figura 1, observa-se um exemplo típico de lixões a céu aberto.

Os resíduos sólidos lançados podem acarretar problemas à saúde pública, como proliferação de vetores de doenças (moscas, mosquitos, baratas, ratos), geração de maus odores e, principalmente, poluição do solo e das águas subterrâneas e superficiais, pela infiltração do chorume (líquido de cor preta, mau cheiro e de elevado potencial poluidor, produzido pela decomposição da matéria orgânica contida no lixo) (ABNT, 2004).

Nos lixões podem haver outros problemas associados, como por exemplo, a presença de animais (inclusive a criação de porcos), a presença de catadores (residentes no local), além de riscos de incêndios causados pelos gases gerados pela decomposição dos resíduos e de escorregamentos, quando da formação de pilhas muito íngremes, sem critérios técnicos.



**Figura 1: Exemplo de Lixão poluidor no estado de Minas Gerais.  
Fonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM).**



#### 4.2.2. Aterro sanitário

Segundo a ABNT (1992) aterro sanitário é uma técnica de disposição final de RSU no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos na menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores se for necessário.

Os critérios de engenharia mencionados materializam-se no projeto do sistema de drenagem periférica e superficial para afastamento da água da chuva, de drenagem de fundo para coleta do percolado, de sistema de tratamento para o percolado drenado, de drenagem e queima dos gases gerados durante o processo de bioestabilização da matéria orgânica (BIDONE e POVINELLI, 1999).

Para a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB (1997), o aterro sanitário é uma obra de engenharia que tem como objetivo acomodar o resíduo no solo no menor espaço prático possível, sem causar danos ao meio ambiente ou à saúde pública. Esta técnica consiste basicamente na compactação dos resíduos no solo, na forma de camadas que são periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte.

O aterro sanitário é considerado como uma forma de disposição no solo que, fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, garante um acondicionamento seguro em termos de poluição ambiental e proteção à saúde pública. (ROCCA et al.,1999).

Já para a CETESB (1997), o aterro sanitário é definido como um processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, particularmente o lixo domiciliar, que fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite uma confinamento segura, em termos de controle da poluição ambiental e proteção ao meio ambiente.

Esse método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos na menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada trabalho, ou intervalos menores, se necessário (Figura 2).

O aterro sanitário deve contar com todos os sistemas de proteção ambiental:

- impermeabilização de base e laterais;
- recobrimento diário dos resíduos;
- cobertura final das plataformas de resíduos;
- coleta e drenagem de lixiviados;
- coleta e tratamentos dos gases;
- drenagem superficial;
- tratamento de lixiviados;
- monitoramento ambiental.

Embora seja uma técnica simples, os aterros sanitários exigem cuidados especiais e procedimentos específicos. A avaliação do impacto ambiental local e sobre a área de influência nas fases de implantação, operação e monitoramento devem ser sempre considerados na elaboração dos estudos técnicos.

De acordo com a NBR 13896/1997 da ABNT, recomenda-se a construção de aterros com vida útil mínima de 10 anos. O seu monitoramento deve prolongar-se, pelo menos, por mais 10 anos após o seu encerramento.



**Figura 2: Exemplo de Aterro sanitário no estado de Minas Gerais.**

**Fonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM).**

#### 4.2.3. Aterro controlado

O aterro controlado é uma forma de disposição final de resíduos sólidos no solo, em que são adotadas precauções tecnológicas durante o desenvolvimento, como o recobrimento dos resíduos com argila (na maioria das vezes sem compactação), para aumentar a segurança do local, minimizando os riscos de impactos ao meio ambiente e à saúde pública (Figura 3).

Embora seja uma técnica preferível ao lançamento a céu aberto, não substitui o aterro sanitário (BIDONE e POVINELLI, 1999).

Pode ser definido como uma forma de disposição final que polui de forma localizada, semelhante ao aterro sanitário, entretanto, a área de disposição é minimizada. Geralmente, não dispõe de impermeabilização de base, nem de sistemas de tratamento do percolato ou do biogás gerado (IPT/CEMPRE, 2000).



**Figura 3: Aterro controlado construído no estado de Minas Gerais.**  
**Fonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM).**

#### 4.3 IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS POR ATERROS E LIXÕES

Os resíduos sólidos urbanos provocam inúmeros problemas de saúde pública, como a proliferação de vetores de doenças (moscas, mosquitos, baratas, ratos),

geração de gases que causam odores desagradáveis e intensificação do efeito estufa e, principalmente, poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas pelo chorume – líquido de coloração escura, malcheiroso e de elevado potencial poluidor, produzido pela decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos.

No aspecto ambiental, os lixões agravam a poluição do ar, do solo e das águas, além de provocar poluição visual. Os resíduos em encostas podem provocar deslizamentos devido à instabilidade dos taludes pela sobrecarga e absorção temporária da água da chuva (FEAM, 2010).

No aspecto social, os lixões a céu aberto interferem na estrutura local, pois a área torna-se atraente para as populações do entorno, que buscam a separação e comercialização de materiais recicláveis, apesar das condições insalubres e sub-humanas (FEAM, 2010).

#### 4.4. ENCERRAMENTO DE ATERRO OU LIXÃO

O encerramento adequado e acompanhado de procedimentos tecnológicos das atividades operacionais de disposição de resíduos em aterros constitui o marco inicial dos trabalhos para recuperação ambiental da área utilizada.

Ele só pode ser considerado encerrado quando estiver estabilizado, tanto do ponto de vista bioquímico como geotécnico, e a área utilizada devidamente recuperada e apta para uma nova ocupação e aproveitamento (BERNARDES JÚNIOR; SABAGG; FERRARI, 1999). Entretanto, em alguns trabalhos técnico-científicos o termo encerramento tem sido utilizado para designar o término das atividades de disposição dos resíduos sólidos em aterros, dos serviços de cobertura com solo e com revestimento vegetal e implantação de dispositivos de drenagem (JORGE; BAPTISTI; GONÇALVES, 2004).

Segundo Lanza (2009), a desativação dessas áreas ocupadas por lixões é feita, muitas vezes, sem critérios técnicos, realizando-se apenas o encerramento da disposição de resíduos no local, fechamento e abandono da área.

Uma das técnicas utilizadas para o encerramento e recuperação de uma área degradada por deposição inadequada de lixo envolve a remoção total dos resíduos depositados, transportando-os para um aterro sanitário, seguida da deposição de solo natural da região na área escavada. Contudo, ações deste porte compreendem elevados custos, inviabilizando economicamente este processo e forçando a adoção de soluções mais simples e econômicas de modo a minimizar o problema (MONTEIRO, 2001).

Uma primeira alternativa é para a transformação dessas áreas de aterro comum é a suspensão do recebimento de resíduos. Nesse caso, o fechamento do lixão deve ser realizado em paralelo com o estudo de alternativas de novos locais para disposição de lixo, de modo que não seja inviabilizada a disposição deste, em curto prazo, no município (IPT/CEMPRE, 1995). Além disso, caso haja uma área para instalação de células, é feito o processo de revitalização da área do lixão, transformando-o em aterro sanitário, devido às dificuldades em se encontrar novas áreas para disposição de resíduos na região.

Quanto às condições sanitárias, as ações necessárias correspondem à movimentação e conformação da massa de lixo; eliminação de fogo e fumaça; delimitação da área, identificação dos locais onde houve ou não a disposição de lixo e limpeza da área de domínio. Os aspectos ambientais são tratados pelas ações: drenagem das águas superficiais; drenagem, coleta e tratamento de gases e chorume; cuidados para evitar e minimizar a contaminação do lençol freático e arborização do entorno da área e estabelecimento de vegetação pioneira (IPT/CEMPRE, 1995).

Segundo o IPT (2000), o sistema de cobertura tem a função de eliminar a proliferação de vetores; diminuir a taxa de formação de percolados; reduzir a exalação de odores; impedir a catação; permitir o tráfego de veículos sobre o aterro; eliminar a queima de resíduos e a saída descontrolada do biogás. Além disso, deve ser resistente a processos erosivos e adequado à futura utilização da área.

Segundo Jucá (2003), a camada de cobertura dos resíduos é o elo entre o lixo e o ambiente atmosférico, por isso, é tão importante para a liberação de gases do aterro, como na entrada de ar atmosférico e águas pluviais na massa de lixo. A cobertura diária é realizada ao fim de cada jornada de trabalho (0,20 m de espessura

de solo) e a cobertura intermediária nos locais onde a superfície de disposição fica inativa por períodos mais prolongados, aguardando a conclusão de um patamar para começar o próximo.

O sistema de cobertura final é responsável por diminuir a infiltração de água na célula, exigindo pouca manutenção, não está sujeito à erosão, acomoda assentamento sem fratura e possui um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro (ABNT, 2004).

Normalmente, a camada de cobertura ou de fechamento está diretamente sobre o resíduo, pois é um importante recurso de engenharia para o fechamento e isolamento do resíduo depositado no aterro, com o objetivo de diminuir a quantidade de emissões de gases para a atmosfera e a entrada de água da chuva o que aumentaria significativamente a quantidade de lixiviado produzido, e conseqüentemente maior contaminação de solos e águas subterrâneas no entorno, além de impedir o aparecimento de vetores nocivos.

A camada de cobertura é importante para prever também o comportamento geotécnico, biológico e da própria operação do aterro.

#### 4.5 MONITORAMENTO GEOTÉCNICO

A mecânica dos resíduos objetiva o estudo do comportamento dos sistemas de disposição de resíduos durante a operação e após o fechamento, incluindo todos os seus componentes (revestimento, cobertura, sistemas de drenagem de líquidos percolados e de gases), além dos próprios resíduos, também avalia a estabilidade e a integridade das estruturas e determinação das propriedades geotécnicas dos resíduos.

A grande heterogeneidade e o comportamento dependente do tempo desses materiais torna indispensável a associação de ensaios de laboratório e de campo a monitoramentos de sistemas de disposição reais para o estudo do seu comportamento geotécnico e, conseqüentemente, para o desenvolvimento de projetos mais seguros e econômicos (SIMÕES, 2000).

O comportamento geotécnico dos sistemas de disposição de RSU é função não só de sua composição e forma de operação, mas também das condições geoambientais da área. Desta forma, a utilização de dados obtidos em condições diferentes deve ser vista criteriosamente, reforçando a necessidade de realização de monitoramentos em campo.

Dentro deste contexto, diversos trabalhos vêm sendo realizados, com o objetivo de investigar o comportamento geotécnico dos RSU e dos sistemas de disposição como um todo, por meio de ensaios de laboratório e de campo, do monitoramento de aterros existentes e da proposição de modelos de comportamento.

O monitoramento geotécnico dos aterros sanitários deve ser previsto quando da elaboração do plano de monitoramento ambiental, na fase de projeto, devendo-se prever uma sistemática de monitoramento geotécnico que permita controlar as condições de estabilidade e o comportamento do maciço tanto em termos de recalques e deslocamentos como de geração e variabilidade das pressões internas de chorume e gases.

#### 4.6 COMPACTAÇÃO DO SOLO

A disposição direta dos resíduos sólidos urbanos no solo é a forma corrente de disposição para a maioria dos municípios. Entretanto, poucos estudos foram conduzidos para avaliar os efeitos provocados principalmente pelo percolado ou chorume, que se infiltra no solo.

Quatro fatores são fundamentais para o processo de disposição dos resíduos sólidos urbanos: geometria e operação do aterro, características iniciais dos resíduos, ambiente interno da massa de lixo e ambiente externo da massa de lixo. (MACIEL, 2003).

A geometria do aterro influencia diretamente os processos anaeróbios. Na maioria dos aterros, a vedação da massa de lixo é realizada por uma fina camada de solo compactado, principalmente pela dificuldade de obtenção e custos de transporte

desse material. A fina camada de solo pode permitir a entrada de oxigênio para o interior do lixo, inibindo a ação dos micro-organismos anaeróbios no processo de biodegradação dos RSU. Assim, verifica-se a biodigestão anaeróbica em profundidades superiores a 3 metros (JUCA et al., 2005).

A compactação do aterro também influencia diretamente a biodegradação da massa de lixo, pois sua atividade diminui consideravelmente a presença de oxigênio no interior. Além da compactação da massa de lixo, a compactação da camada de cobertura e a granulometria do solo utilizado contribuem para a minimização da infiltração de águas pluviais, evitando que o oxigênio dissolvido nestas águas seja carregado para o interior dos RSU.

Quanto às características dos RSU depositados no aterro, a composição gravimétrica e a umidade são fatores primordiais na geração dos gases e na geração do lixiviado.

Assim, um aterro funciona como um grande biodigestor, em que os resíduos são depositados com a umidade característica e a biodigestão gera subprodutos: o lixiviado e o biogás. Quanto maior a disponibilidade de matéria orgânica biodegradável nos RSU, maior a quantidade dos subprodutos.

Uma solução intermediária para restringir o escoamento do chorume para os aquíferos subterrâneos é a compactação do solo da base, reduzindo sua permeabilidade. Assim, o conhecimento dos processos envolvidos nesse escoamento, através das condições de permeabilidade natural e do solo compactado, diante do escoamento de chorume, permite estabelecer quais parâmetros devem ser avaliados para viabilizar ambientalmente as instalações e também definir potencialmente sua capacidade de confinar e atenuar os eventuais impactos sobre o solo.

A compactação do solo é um processo físico, da qual, embora possa resultar em impactos negativos ao meio ambiente quando relacionado, por exemplos, na produtividade agrícola e recarga de aquíferos; para alguns casos ambientais, tal como a construção de aterros e seu respectivo fechamento, a compactação do solo é uma exigência. O aumento do grau de compactação influencia e altera os valores de densidade do solo, volume total de poros, macroporosidade, capacidade de infiltração



de água, aeração, condutividade hidráulica (DIAS JUNIOR E PIERCE, 1996) e o comportamento compressivo do solo (ARAUJO-JUNIOR et al., 2011).

A compactação do solo local para as bases de aterros constitui uma forma pouco custosa de preparo, reduzindo a permeabilidade e garantindo um confinamento maior do chorume, apesar de não atingir, algumas vezes, os valores exigidos pelos órgãos ambientais. Neste caso, é fundamental conhecer os mecanismos envolvidos, que permitem avaliar e quantificar eventuais impactos, assim como estabelecer critérios específicos para execução e operação do sistema de disposição de resíduos.

Vários fatores podem afetar a compactação dos RSU em um aterro sanitário, Boscov e Abreu (2000) indicam alguns desses fatores principais: composição dos resíduos; espessura da camada de resíduo a ser compactada; o tipo, peso e velocidade dos equipamentos empregados na compactação; umidade dos resíduos; inclinação do plano de compactação e número de passadas executadas pelo equipamento compactador. Dentre estes fatores, pode-se destacar o teor de umidade dos resíduos em aterros sanitários. Esta umidade representa a quantidade relativa de água contida na massa de RSU, e pode variar de acordo com a composição dos resíduos e com a estação do ano.

A compactação do solo consiste na utilização de técnicas e procedimentos que promovam o aumento da compacidade pela redução do volume de vazios. Este aumento de compacidade é obtido por meio da aplicação de esforços externos gerados mecanicamente, objetivando o aumento da resistência, a redução da compressibilidade, permeabilidade e variação volumétrica decorrente dos processos de umedecimento e secagem (VARGAS, 1977).

O ensaio de Proctor, proposto por Ralf Proctor, método descrito em 1933, determina a relação entre a densidade do solo, conteúdo de água e energia de compactação de um solo com estrutura alterada. Quando se alcança a máxima densidade, denomina-se o teor de umidade ótima de compactação, em um determinado nível de energia aplicado (SILVA et al., 2010).

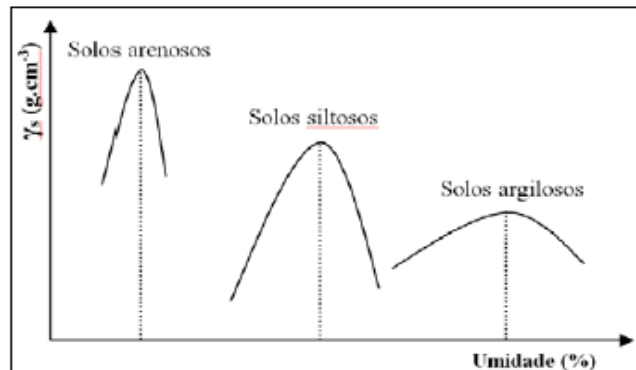
Segundo Proctor, a compactação varia em função de quatro variáveis: a) Peso específico seco; b) Umidade; c) Energia de compactação e d) Tipo de solo. A compactação dos solos tem uma grande importância para as obras geotécnicas, pois,

através do processo de compactação consegue-se promover no solo um aumento de sua resistência e uma diminuição de sua compressibilidade e permeabilidade.

O Ensaio de Próctor Intermediário, ABNT (NBR 7182/86), utiliza amostra de solo previamente seca ao ar e destorroada. Inicia-se o ensaio, acrescentando-se água até que o solo fique com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima. Uniformizando-se bem a umidade, uma porção de solo é colocada no cilindro, e submetida a 26 golpes de um soquete. Isto se repete por 5 vezes, pois o solo é dividido em 5 camadas. Após a compactação da última camada, regulariza-se a superfície e determina-se a massa específica do corpo de prova. Com uma amostra do seu interior determina-se a umidade. Com estes valores determina-se o peso específico seco.

A curva de compactação, que consiste na relação entre a densidade do solo seco em função da umidade. Geralmente, associa-se uma reta aos pontos ascendentes do ramo seco, outra aos pontos descendentes do ramo úmido e unem-se as duas por uma curva parabólica. A curva define uma densidade do solo máxima à qual corresponde uma umidade ótima.

Segundo Vargas (1977), dentre as diversas técnicas de controle da compactação em campo, destaca-se a utilização da relação entre a densidade do solo em campo e a densidade do solo máxima, determinada em laboratório por meio do ensaio de compactação. Essa relação é definida como grau de compactação (GC), geralmente expresso em porcentagem (HOLTZ E KOVACS, 1981). A Figura 4 apresenta o comportamento típico das curvas de compactação para diferentes tipos de solo em função de sua predominância granulométrica.



**Figura 4: Comportamento das curvas de compactação para solos de granulometria distintas.**  
Fonte: Vargas (1977).

## 4.7 POROSIDADE TOTAL, DENSIDADE APARENTE E DENSIDADE DE PARTÍCULA DO SOLO

### 4.7.1 Porosidade total do solo

O volume de poros total do solo é ocupado pelo ar e pela água. Como as partículas do solo têm forma, arranjo e estrutura diferentes, há uma variação na macro e microporosidade do solo. A porosidade do solo total pode ser calculada pela relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas. Esta propriedade influencia o fluxo de gases e água no interior do perfil do solo, bem como influencia os processos de troca entre o solo e a atmosfera (FLINT e FLINT, 2002). A porosidade do solo está relacionada a uma série de características importantes do solo: movimento e retenção de água, arejamento, reações do solo e manejo do solo.

### 4.7.2 Densidade do solo

Densidade do solo, comumente chamada Densidade aparente, é a relação entre a massa de uma amostra de solo seco a 110°C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros. É a massa de uma unidade de volume de solo seco. Os resultados são expressos em gramas por centímetro cúbico, variando muito de solo para solo e, num mesmo solo, de horizonte para horizonte.

Há diferentes fatores que afetam a densidade aparente, como a estruturação e o teor de matéria orgânica. Um solo compactado por manejo incorreto, por exemplo, tende a perder sua estrutura e aumento dos valores da densidade aparente. Quando o teor de matéria orgânica do solo eleva-se, a densidade aparente tende a diminuir (FLINT e FLINT, 2002).

#### 4.7.3 Densidade de partículas

A densidade de partículas é a relação entre a massa de sólidos da amostra de solo e o volume ocupado pelas partículas do solo. O volume do solo ocupado pelas partículas é considerado sem levar em conta o espaço poroso.

Os valores da densidade de partícula geralmente são expressos em gramas por centímetro cúbico, e variam entre 2,3 e 3,0 g/cm<sup>3</sup>. Apesar de existir esta faixa de variação, a maioria dos solos apresentam valores de 2,60 a 2,75 g/cm<sup>3</sup>. As densidades dos principais componentes minerais dos solos (quartzo, feldspatos e argilas silicatadas) estão próximas destes valores.

A densidade de partícula varia com a composição das partículas e não é afetada por variação no seu tamanho. Num solo que apresenta quantidades elevadas de minerais mais pesados, como magnetita, por exemplo, a densidade de partículas é alta. Da mesma forma, num solo que apresente elevado teor de matéria orgânica, a densidade de partícula é baixa. A matéria orgânica exerce grande influência na densidade de partícula, nos horizontes superficiais de densidades de partículas mais baixas que os horizontes subjacentes (EMBRAPA, 1997).

#### 4.8 ASPECTOS HISTÓRICOS DA ÁREA

O lixão da Prefeitura Municipal de Rolândia foi utilizado para depósito de resíduos domésticos com destinação final até julho de 2002 e era considerado um “vazadouro a céu aberto”. A área está localizada no perímetro urbano da cidade, na vertente esquerda do ribeirão Vermelho (SANTOS, 2003). A área total do lixão tem 65.318 m<sup>2</sup>, sendo a área efetiva com lixo de 30.318 m<sup>2</sup>, com volume estimado para 180.000 m<sup>3</sup> de lixo depositado (MELO et al., 2011).

Este lixão iniciou o funcionamento nos anos 40, até que foi decretado o seu encerramento pela prefeitura municipal após 60 anos de funcionamento, pois a área ultrapassou o limite máximo de saturação para recebimento dos resíduos urbanos e também pela proximidade de conjuntos habitacionais, decorrente da expansão urbana do município (MELO et al., 2011).

O manejo dos resíduos sólidos urbanos não era adequado em relação aos critérios técnicos ambientais e sanitários para a destinação e tratamento final de resíduos. O lixo urbano de Rolândia era disposto diretamente ao solo natural, sem a cobertura constante do lixo por material inerte após a conclusão de cada jornada de trabalho (MELO et al., 2011).

Os resíduos eram despejados por caminhões da coleta municipal e compactados superficialmente por uma esteira ou empurrado vertente abaixo, para reduzir o volume de resíduos. Além disso, na área do antigo depósito não havia drenos condutores de águas superficiais para evitar a infiltração de água e a consequente saturação das massas dos compostos orgânicos (MELO et al., 2011).

Durante o seu funcionamento, o lixão recebia diferentes tipos de resíduos, principalmente matéria orgânica proveniente da coleta domiciliar. Após a disposição, os resíduos ficavam completamente expostos às condições meteorológicas, ocorrendo a combustão espontânea e a decomposição dos resíduos com produção de chorume, que não recebiam tratamento e sem drenos.

A antiga área de destinação final dos resíduos sólidos urbanos do município de Rolândia está abandonada. Após o encerramento do lixão, não ocorreu recuperação da área degradada para minimizar os impactos ambientais e sanitários, além dos aspectos paisagísticos.

O projeto apresentado pela Prefeitura Municipal de Rolândia de encerramento deste lixão previa o processo de recuperação da área com as fases: sistema de cobertura; análise da estabilidade dos maciços de terra e dos resíduos sólidos dispostos; sistema de drenagem superficial das águas pluviais; sistema de drenagem dos líquidos percolados (chorume) e recirculação destes líquidos; sistema de drenagem dos gases e sistema de monitoramento. Contudo, não foi colocado em prática na sua íntegra como estava previsto (MELO et al., 2011)

O local onde foram depositados os resíduos foi totalmente coberto por solo com um talude de 8 a 10 metros de altura, composto pela massa de lixo de todos os anos de funcionamento.

Nesse lixão desativado, a massa de resíduos recoberta está em contínuo processo de decomposição anaeróbica, lenta e durará longos anos, produzindo percolados e sérios riscos de poluição do meio ambiente e à saúde pública.

Portanto, deve-se fazer um monitoramento geotécnico e ambiental contínuo na área, por meio do controle de deslocamentos horizontais e verticais, do nível de chorume e pressões de gases, da qualidade das águas subterrâneas e superficiais, além do curso d água presente à jusante da área.

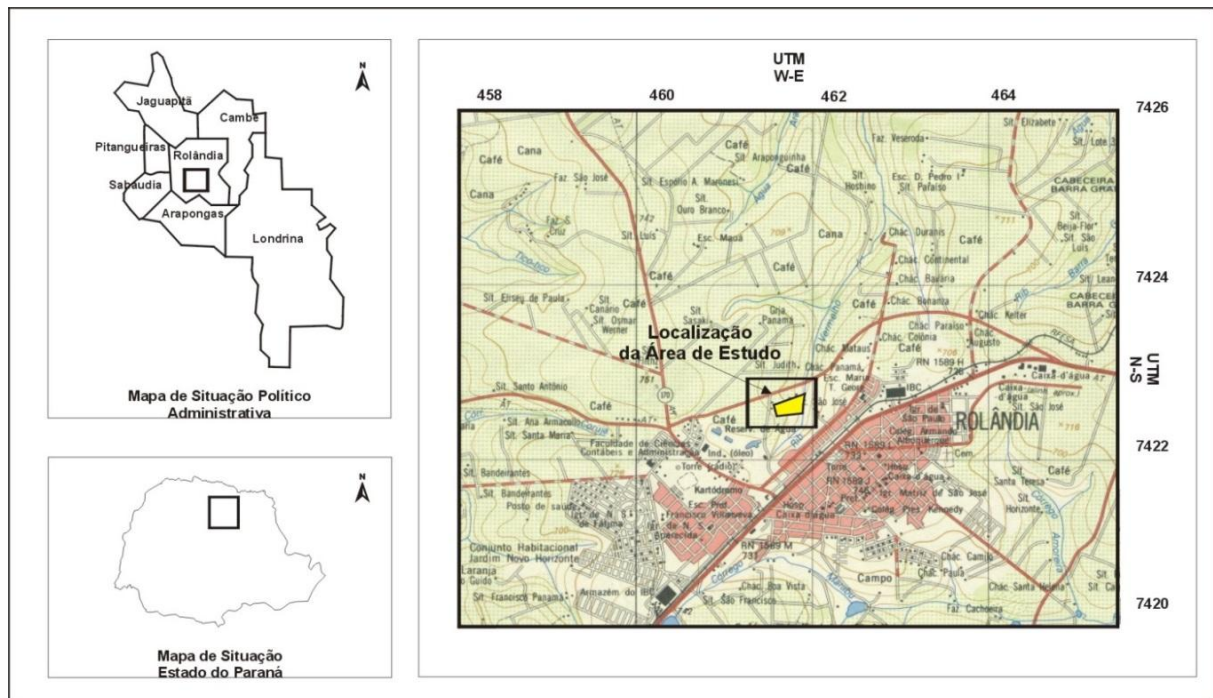
## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO DEPÓSITO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O depósito de resíduos em encerramento está localizado em uma área do município de Rolândia, Estado do Paraná, com coordenadas geográficas de Latitude 23°18'21090" S e Longitude 51°22'29760" W (Figura 5).

O clima da região é classificado como Cfa - subtropical úmido, pela classificação de Köppen (TREWARTHA e HORN, 1980). Desta forma, a cidade possui temperatura média inferior a 18°C para o mês mais frio (mesotérmico) e temperatura média acima de 22° para o mês mais quente (IAPAR, 1994).

O município de Rolândia está localizado no Terceiro Planalto Paranaense, na Microrregião Geográfica de Londrina, e possui 467,310 km<sup>2</sup> de área total. O depósito de resíduos tem aproximadamente 30.318 m<sup>2</sup> de área efetiva e o volume depositado abrange 180.000 m<sup>3</sup> de lixo (MELO et al., 2011). Em abril de 2002, o depósito de resíduos foi desativado e para isso, aplicou-se uma camada compactada de solo como cobertura sobre os resíduos.



**Figura 5: Mapa de localização da área de estudo, em destaque o antigo lixão de Rolândia. Fonte: SANTOS (2003).**

## 5.2 LABORATÓRIO DE FÍSICA DO SOLO

As análises físicas e mecânicas do solo foram realizados no Laboratório de Física do Solo do Instituto Agrônomo do Paraná -IAPAR em Londrina, Estado do Paraná, Latitude  $23^{\circ}21'30''$  S e Longitude  $51^{\circ}10'17''$  W (Figura 6). O IAPAR é um órgão de pesquisa vinculado à Secretaria da Agricultura e do Abastecimento – SEAB, que fornece embasamento tecnológico às políticas públicas de desenvolvimento rural do Estado do Paraná.





**Figura 6: Vista da entrada principal do IAPAR, na Rodovia Celso Garcia Cid.  
Fonte: Adaptado de Google Maps (2013).**

O Laboratório de Física do Solo do IAPAR possui uma área de 96 m<sup>2</sup> e conta com o apoio de dois técnicos de laboratório. Neste, análises físicas e mecânicas do solo são realizadas tais como: granulometria das partículas sólidas do solo, densidade de partículas, densidade do solo, distribuição de poros por tamanho, curva de retenção de água pelo solo, estabilidade dos agregados em água, resistência mecânica do solo à penetração do cone, curva de compactação pelo ensaio de Proctor com energia intermediária, condutividade hidráulica do solo saturado. Estas análises visam atender os projetos de pesquisa desenvolvidos pelo IAPAR e outras universidades, bem como, satisfazer a demanda de produtores rurais e a população em geral.

### 5.3 ESQUEMA AMOSTRAL DO DEPÓSITO DE RESÍDUOS

A área de depósito de resíduos de Rolândia foi dividida em três partes distintas (Figura 7), jusante, talude, e a camada de cobertura do depósito de resíduos. A amostragem do solo foi realizada em duas etapas: a) coleta de amostras deformadas aleatória para os ensaios de caracterização e o ensaio de Proctor com energia

intermediária de compactação; b) amostras indeformadas para avaliação da estrutura do solo.



**Figura 7: Imagem de satélite mostrando o lixão de Rolândia dividido em três partes para execução do estudo: (1) se refere a jusante do lixão; (2) indica a área do talude; (3) a área do depósito de resíduos, coberta de solo e vegetação.**

**Fonte: Google Earth.**

A área a jusante do lixão representada pelo ponto 1 (Figura 7) é exibida pela Figura 8. Essa área está localizada em um relevo relativamente plano, abaixo do depósito, com vegetação integral e arborizada, constituída por solo natural, diferente do solo inerte implantado na camada final de cobertura do lixão, provavelmente retirado de áreas de empréstimo. As três amostras de solo deformadas coletadas nesta área foram denominadas G-1, G-2 e G-3.



**Figura 8: Foto mostrando área à jusante do antigo depósito de resíduos, representada na imagem aérea pelo ponto 1.**

A área do talude é mostrada na Figura 9, e representa o ponto 2 na imagem de satélite (Figura 7). O solo possui uma vegetação de bambus em locais pontuais, porém há predominância de gramíneas. As amostras de solo deformadas foram denominadas de G-4, G-5 e G-6.



**Figura 9: Foto da área selecionada para retiradas das amostras relativas ao o ponto 2.**

A área do ponto 3 (Figura 7) sobre o lixão é apresentada na Figura 10. É o local onde houve a adição de uma camada de cobertura de solo, e supostamente compactada em seu encerramento. As amostras coletadas foram descritas como G-7, G-8 e G-9.



**Figura 10: Foto evidenciando coletas de solo localizado na área do ponto 3.**

#### 5.4 AMOSTRAGEM DE SOLO

Três amostras deformadas foram coletadas em cada uma das áreas estudadas, totalizando 9 amostras de 10 kg de solo cada, na profundidade de 5 -20 cm.

Para a coleta das amostras deformadas, utilizou-se um enxadão e uma pá, assim como sacos plásticos para devida armazenagem (Figuras 11(a) e 11(b)). Em seguida, as amostras foram secas ao ar e levadas ao laboratório onde foram peneiradas em malha de 4,8 mm.



(a)

(b)

**Figuras 11(a) e 11(b): Amostragem das amostras deformadas do solo do depósito de resíduos de Rolândia-PR.**

As amostras indeformadas foram coletadas utilizando um amostrador de Uhland (Uhland, 1949) e anéis volumétricos de alumínio com dimensões de 2,54 cm de altura (1”) por 6,35 cm de diâmetro interno (2,5”). Foram coletadas duas amostras indeformadas por área estudada, totalizando seis amostras, na profundidade entre 5 – 10 cm (Figura 12). As amostras indeformadas foram embaladas em filme plástico PVC para a preservação da estrutura do solo (Figura 13).



**Figura 12: Coleta da amostra indeformada.**



**Figura 13: Amostras revestidas de filme plástico PVC.**

A Tabela 1 indica as Coordenadas geográficas dos pontos de coleta das amostras do solo, indeformadas e deformadas.

Tabela 1: Coordenadas geográficas das amostras coletadas no depósito de resíduos em Rolândia - PR

PONTO	Coordenadas Geográficas		Amostra	
	S	W	Deformada	Indeformada
1	23°18'369"	51°22'432"	x	x
2	23°18'372"	51°22'432"	x	x
3	23°18'370"	51°22'432"	x	
4	23°18'399"	51°22'461"	x	x
5	23°18'369"	51°22'466"	x	
6	23°18'373"	51°22'539"	x	x
7	23°18'375"	51°22'537"	x	x
8	23°18'363"	51°22'535"	x	x
9	23°18'364"	51°22'536"	x	

## 5.5 ANÁLISES REALIZADAS

No laboratório de Física do Solo do IAPAR as amostras indeformadas de solo foram inicialmente preparadas de tal modo que os volumes das mesmas correspondessem ao volume do anel (Figura 14). Em seguida, as amostras foram

saturadas com água em uma bandeja durante 48 horas. Após a saturação, as amostras foram colocadas em mesa de sucção com 60 cm de coluna de água até estabilizar, ou seja, ausência de fluxo de água.

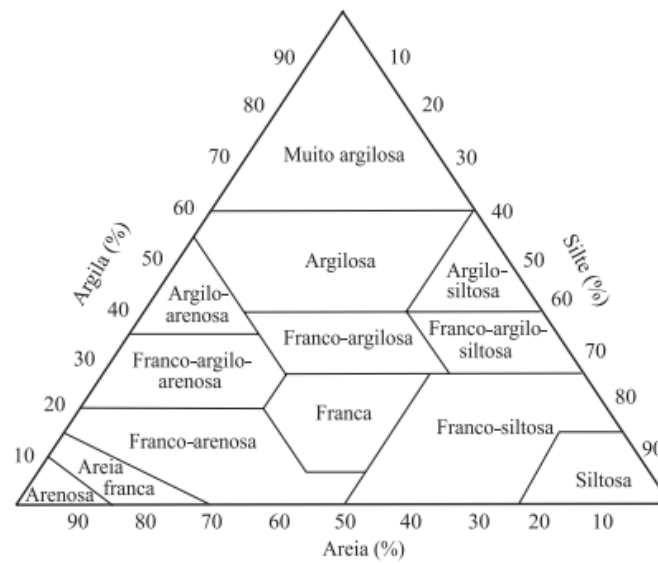
Após estabilizar na mesa de sucção, a massa de solo úmida foi determinada em balança de precisão e determinou-se o volume de microporos. A macroporosidade foi determinada pela diferença entre o volume de poros total e o de microporosidade (FLINT e FLINT, 2002).



**Figura 14: Ajuste do solo no anel volumétrico.**

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (DAY, 1965), a qual se utilizou 10 gramas de solo seco ao ar, 10 mL de NaOH a 1N como dispersante químico. A dispersão mecânica foi realizada com agitação lenta durante 2 horas em mesa agitadora a uma velocidade de 200 rotações por minuto (GROHMANN E RAIJ, 1977).

As classes texturais das amostras de solo foram avaliadas conforme Lemos e Santos (1984) (Figura 15).



**Figura 15: Triângulo de classificação textural segundo Lemos e Santos (1984).**

## 5.6 ENSAIO DE PROCTOR COM ENERGIA INTERMEDIÁRIA DE COMPACTAÇÃO

Em outubro de 2013, foi coletado aproximadamente 10 kg de solo com estrutura deformada na camada entre 5 e 20 cm. As amostras foram secas, destorroado e peneirado em malha de 4,8 mm, de acordo com a NBR 7182/ 1986. Este solo preparado foi colocado em uma bandeja metálica de 1m<sup>2</sup>, na qual recebeu inicialmente uma quantidade de água borrifada apenas para remover sua poeira. Com duas espátulas, o solo fora homogeneizado quanto à sua umidade.

A compactação consiste na adição de solo, parcelado em cinco camadas. Inicialmente, adicionou-se uma porção de solo no cilíndrico de Proctor (dimensões de 15,24 cm de diâmetro por 17,78 cm de altura, volume 3.243 cm<sup>3</sup>), com o intuito de preencher 20% do volume de dentro do cilindro após sua compactação (Figura 16).





**Figura 16: Cilindro com a primeira camada de solo recebida.**

Para a devida compactação, utilizou-se o soquete grande de 4,55 kg dotado de dispositivo de controle de altura de queda 45,7 cm, 26 vezes por cada camada de solo adicionada (Figura 17). Ao final de cada camada, exceto pela última, o solo era escarificado com um facão para que as camadas adicionadas posteriormente se agreguem com maior facilidade (Figura 18).



**Figura 17: Soquete aplicando energia de compactação.**



**Figura 18: Escarificação da camada de solo pelo facão.**

Ao final da quinta camada, o corpo de prova deve ter sua altura correspondente a altura do cilindro de Proctor, de forma a não ultrapassar 1 cm deste. Assim, apenas retira-se o excesso de solo até atingir a altura do cilindro (Figura 19(a)), o qual é levado para averiguação de sua massa em uma balança (Figura 19(b)).



(a)



(b)

**Figura 19(a) e 19(b): Ajuste da altura do solo de acordo com o cilindro de Proctor, e posteriormente aferição do seu peso.**

Após anotar a massa de solo do cilindro de Proctor, utilizou-se um macaco hidráulico para a extração do solo do interior do molde cilíndrico, conforme a Figura 20.



**Figura 20: Extrator de corpo de prova.**

Com o solo retirado do cilindro, o solo compactado foi cortado ao meio, com auxílio do facão, e parte de seu interior foi coletada, aproximadamente 100 gramas, para determinar a umidade (Figuras 21(a) e 21(b)).



(a)

(b)

**Figuras 21(a) e 21(b): Coleta de solo para determinação da umidade do solo.**

Desta forma, este solo é repeneirado e o processo de compactação é repetido diversas vezes, porém com conteúdos crescentes de água no solo, e consequentemente valores de densidade do solo diferentes, até que se obtenham valores decrescentes de densidade, formando assim uma parábola, onde o eixo das abscissas representa a umidade gravimétrica, e o eixo das ordenadas expressa a densidade do solo.

Com a parábola preparada, a umidade crítica e a densidade máxima são correspondidas pelos valores situados no vértice da parábola, indicando, assim, a máxima compactação do solo amostrado (NBR 7182/1986).

## 5.7 ENERGIA INTERMEDIÁRIA DE PROCTOR

Para a determinação da energia (ou esforço) de compactação do ensaio de Proctor com energia intermediária, foi utilizado a equação segundo Zica (2010):

$$EC = \frac{n \cdot P \cdot H}{V} * N \quad \dots \text{(equação 1).}$$

Em que:

n = número de golpes;

P = peso do soquete;

H = altura de queda;

V = volume de solo compactado;

N = número de camadas.

Substituindo os devidos valores na equação, nota-se que a energia utilizada neste ensaio foi determinada por:

$$EC = \frac{4,45 \text{ kg} \cdot \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot (0,457 \text{ m}) \cdot (5 \text{ camadas}) \cdot (26 \text{ impactos por camada})}{3,24 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} \quad \dots \text{(equação 2)}$$

$$EC = 8.004,67 \text{ kJ/m}^3$$

As curvas de compactação foram obtidas por meio de uma regressão do tipo  $y = a(x)^2 + b(x) + c$ , ajustada aos valores das umidades plotadas no eixo dos x e aos valores da densidade do solo plotados em y.

O grau de compactação (GC) foi calculado pela expressão :  $GC = \frac{D_s}{D_{sm\acute{a}x}} \cdot 100$  (Holtz e Kovacs,1981) em que  $D_s$  corresponde à densidade aparente do solo da amostra coletada indeformada e  $D_{sm\acute{a}x}$  à densidade do solo no ponto máximo da curva ajustada.

## 5.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados da densidade do solo e do grau de compactação foram submetidos ao Teste T. Além disso, foram realizadas a estatística descritiva destes resultados. As regressões que representam a curva de compactação do solo foram obtidas por meio do software Sigma Plot 11.0 - 2010.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises granulométricas do solo do depósito de resíduos estão apresentados na Tabela 2. As análises granulométricas das amostras situadas na parte inferior do depósito, jusante ao lixão, apresentaram resultados que classificam o solo como textura argilosa e muito argilosa, com porcentagem predominante da fração argila, representando entre 510 e 660  $\text{g.kg}^{-1}$  das partículas com diâmetro menor ou igual a  $2\mu\text{m}$ . As frações silte se apresentaram entre 190 a 240  $\text{g.kg}^{-1}$ , enquanto a areia entre 150 a 250  $\text{g.kg}^{-1}$ . Ferreira e Mahler (2006) encontraram, no aterro de Nova Iguaçu (RJ), argila acima de 50% em todas as amostras de solo, indicando que os solos possuíam baixa permeabilidade e eram de boa qualidade para se utilizar em cobertura de aterros de resíduos.

No solo coletado no talude do lixão, percebe-se que os valores de granulometria apresentaram as maiores quantidades de areia em sua composição diante das três áreas distintas analisadas. Mesmo assim, de acordo com a literatura, este solo se enquadra como textura argilosa, com teores de argila entre 470 e 550  $\text{g.kg}^{-1}$ , silte entre 120 e 260  $\text{g.kg}^{-1}$ , e areia de 260 a 330  $\text{g.kg}^{-1}$ . Esta maior composição de areia pode ser devido ao efeito de lixiviação do solo ocasionado pela água pluvial, que desloca a argila presente no solo do talude para camadas mais profundas ou para a região a jusante do depósito de resíduos.

Os resultados das análises granulométricas do solo da camada de cobertura final sobre o depósito de resíduos, representados pela análise das amostras G-7, G-8 e G-9, classificam-no como muito argiloso de acordo com LEMOS e SANTOS (1984). O teor de argila deste solo atingiu os maiores valores em comparação com o solo de base e o solo do talude, variando de 710 a 770  $\text{g.kg}^{-1}$  ao passo que o teor de silte registrou proporções de apenas 50 a 70  $\text{g.kg}^{-1}$ , as menores de toda área estudada. A quantidade de areia presente neste solo também foi inferior em relação ao solo das outras áreas avaliadas, com variação de 160 a 240  $\text{g.kg}^{-1}$ .

Segundo Guedes (2007), a introdução de solos mais finos ou solos argilosos são mais eficientes na retenção de gases do que os solos com granulometria mais

grossas, com maiores teores de areias e siltes. Normalmente, os projetos de cobertura de aterros de RSU, privilegiam solos bem compactados (IGNATIUS, 1999) e de menor granulometria, para aumentar as condições de eficiência na camada de cobertura do aterro.

Tabela 2: Granulometria das amostras da área jusante ao depósito de resíduos de Rolândia

ÁREA	AMOSTRA	ARGILA (g.kg <sup>-1</sup> )	SILTE (g.kg <sup>-1</sup> )	AREIA (g.kg <sup>-1</sup> )	CLASSE TEXTURAL
Jusante	G-1	510	240	250	Argilosa
	G-2	550	230	220	Argilosa
	G-3	660	190	150	Muito Argilosa
Talude	G-4	470	250	280	Argilosa
	G-5	470	260	260	Argilosa
	G-6	550	120	330	Argilosa
Cobertura	G-7	710	50	240	Muito Argilosa
	G-8	770	70	160	Muito Argilosa
	G-9	760	50	190	Muito Argilosa

Por meio das análises laboratoriais, foi observado que o solo da área a jusante do depósito apresentou densidade de partículas 2,88 e 2,91 g.cm<sup>-3</sup> (Tabela 3). Estes valores são coerentes com os valores encontrados por Beutler et al. (2005), com solos de textura similar ao deste trabalho. Os valores de porosidade total apresentaram uma média de 0,58 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>, sendo, deste total, 0,53 – 0,55 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup> de microporos e 0,03 – 0,04 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup> de macroporos. A densidade aparente do solo, representada pela densidade no momento da amostragem, variou de 1,24 e 1,20 g.cm<sup>-3</sup>.

Os valores de densidade de partícula da área do talude atingiram os maiores de toda à área de estudo amostradas neste trabalho, com valores de 2,96 e 3,10 g /cm<sup>3</sup>. Os valores de porosidade total variaram de 0,56cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup> a 0,60cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>. Destes valores, a quantidade representativa de microporos encontrada foi de 0,42 e 0,47 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>, e conseqüentemente os teores de macroporos atingiram 0,14 e 0,15 cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>. A densidade aparente do solo variou de 1,18 e 1,35 g.cm<sup>-3</sup>. Os elevados valores de densidade de partícula deste solo podem estar relacionados com a mineralogia presente na composição do solo, assim como à presença de pouca vegetação no

talude quando comparada às outras regiões. Com a menor quantidade de vegetação das 3 áreas analisadas, o local do talude pode possuir uma baixa presença de matéria orgânica no solo. Buckman e Brady (1974) relatam que a presença da matéria orgânica, mesmo com massa muito menor que os sólidos minerais, reduz os valores de densidade de partícula do solo.

Resende et al.,(2012) ressaltam que a porosidade do solo está relacionada com a estrutura do solo e textura do solo, assim como, de modo geral, solos com maior presença de areia em sua composição possuem maior macroporosidade que solos argilosos com menores concentrações de areia. Segundo Lima et. al.(2007), a porosidade do solo é referida como ideal quando se apresentar com  $0,500 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  do seu volume total, no qual a microporosidade, responsável pelo armazenamento de água, variaria entre  $0,250$  e  $0,330 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Já a macroporosidade, representada pelo volume de poros responsáveis pela aeração das raízes, ficaria entre  $0,170$  e  $0,250 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

De acordo com as análises de densidade de partícula da área de cobertura do lixão, nota-se que os valores para o solo desta área foi inferior aos demais solos, variando de  $2,85$  a  $2,90 \text{ g.cm}^{-3}$  (Tabela 3). Estes resultados de densidade de partícula podem ser devido à granulometria do solo, mais argiloso que os outros solos estudados e com menores teores de areia em sua composição. Sua porosidade total foi obtida com valores de  $0,62$  e  $0,55 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ .

A macroporosidade do solo desta área de cobertura de solo é superior aos valores da jusante ao lixão e do talude. Segundo Laurindo et al.,(2009), quanto maior o número de poros (macroporos) o solo apresentar, menor será sua densidade. Este solo, por se apresentar exatamente sobre os resíduos depositados por anos no lixão, inclusive muitos resíduos domiciliares, sofre intensa interferência da ação de microorganismos decompositores anaeróbios. Este solo provavelmente apresenta teores de matéria orgânica superiores aos solos pertencentes ao talude e a jusante do depósito de resíduos. A matéria orgânica tem o poder de flocular o solo, abrir espaços e, por isso, diminuir a massa em relação ao volume. Assim, a densidade do solo é reduzida, bem como o efeito da compactação realizado no local.



Tabela 3: Propriedades físicas do solo das camadas a jusante, no talude e na cobertura do depósito de resíduos de Rolândia-PR.

ÁREA	g.cm <sup>-3</sup>		cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup>		
	Den Solo	D.Particula	Por.Total	Mic.Poro	Mac.Poro
Jusante	1.24	2.88	0.57	0.53	0.03
Jusante	1.20	2.91	0.59	0.55	0.04
Talude	1.35	3.10	0.56	0.42	0.15
Talude	1.18	2.96	0.60	0.47	0.14
Cobertura	1.11	2.90	0.62	0.33	0.29
Cobertura	1.27	2.85	0.55	0.36	0.20

Pela figura 22, observam-se as curvas de compactação do depósito de resíduos em três posições. Todas as curvas apresentaram a forma parabólica representada por uma equação polinomial quadrática.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da regressão do solo da área a jusante, do talude e da camada de cobertura do depósito foram de 0,92, 0,92 e 0,97 respectivamente. Pelas curvas percebe-se que o teor de umidade é altamente relevante para a compactação do solo, assim como influencia no seu grau. Além da umidade, o tipo de solo também é importante para a trajetória das curvas.

O solo da área do talude apresentou os maiores de densidade do solo para qualquer teor de umidade em relação aos solos da jusante e de cobertura do depósito. Em contrapartida, os menores valores de densidade do solo em relação à umidade gravimétrica foram encontrados para o solo de cobertura. Pode ter outras variáveis influenciando o comportamento além da distribuição granulométrica.

O comportamento das curvas de compactação pode estar relacionado à diferente constituição granulométrica das partículas sólidas do solo (Tabela 2) e à diferente teor de matéria orgânica do solo nas diferentes posições.

A curva de compactação do solo da camada de cobertura foi deslocada para a direita e para baixo em relação às curvas das camadas do talude e a jusante (Figura 22). O maior teor de argila (Tabela 2) e provavelmente o maior teor de carbono orgânico

do solo da camada de cobertura podem ter contribuído para o deslocamento da curva de compactação do solo.

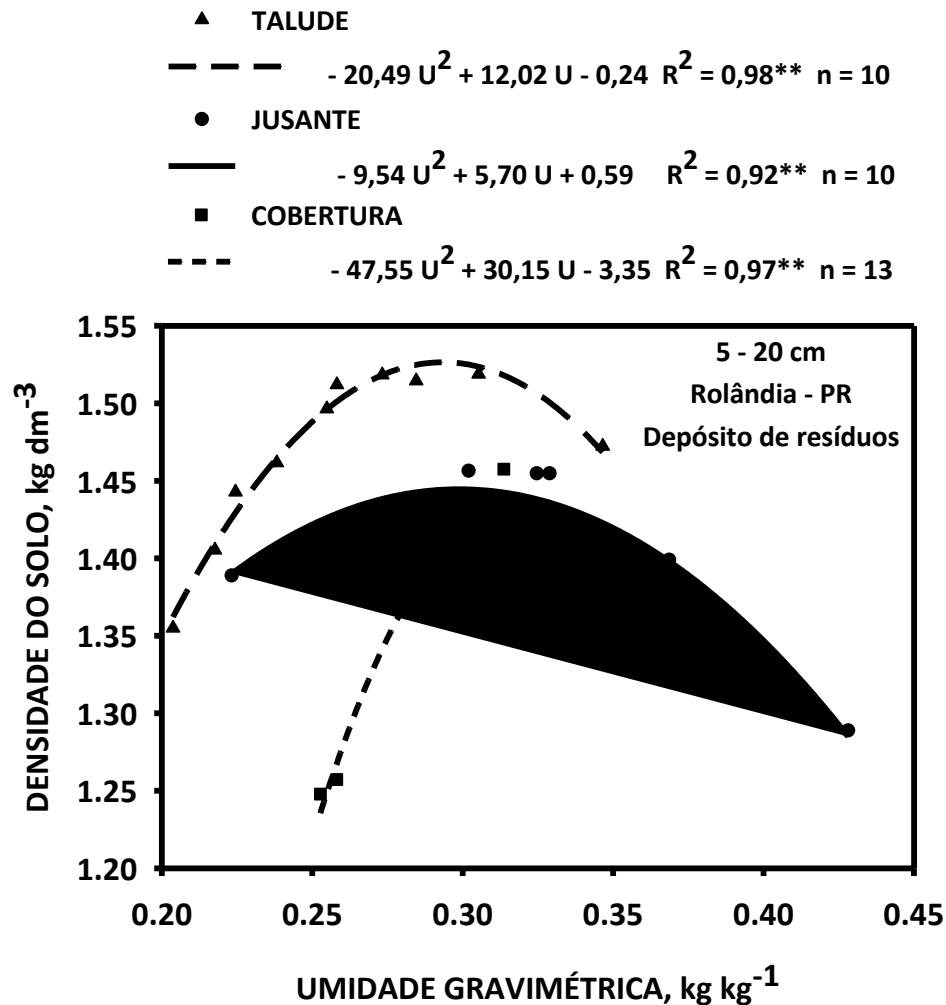


Figura 22. Curva de compactação do solo do talude, a jusante e na cobertura do depósito de resíduos de Rolândia-PR.

De acordo com as curvas de compactação, pôde-se estimar, através dos coeficientes das regressões, a umidade ótima de compactação para cada amostra (aplicando a derivada na regressão igualada à zero), e conseqüentemente, sua densidade crítica de compactação. Desta forma, nota-se que a umidade ótima da amostra da área jusante apresentou valores de  $0,2833 \text{ kg.kg}^{-1}$ ,  $0,3122 \text{ kg.kg}^{-1}$  e  $0,3252 \text{ kg.kg}^{-1}$  e densidade crítica  $1,53 \text{ kg.dm}^{-3}$ ,  $1,45$  e  $1,41 \text{ kg.dm}^{-3}$  respectivamente (Tabela 4). No solo amostrado do talude, a umidade ótima de compactação variou de  $0,2782$

kg.kg<sup>-1</sup> a 0,2981 kg.kg<sup>-1</sup> e a densidade crítica encontrada foi de 1,46 kg.dm<sup>-3</sup> na amostra G-4, 1,51 kg.dm<sup>-3</sup> na amostra G-5, e 1,52 Kg.dm<sup>-3</sup> na amostra G-6. Com a modelagem da curva de compactação do solo de cobertura do depósito de resíduos, os valores de umidade ótima de compactação obtidos variaram de 0,3035 a 0,3171 Kg.Kg<sup>-1</sup>, valores superiores a umidade ótima de compactação do solo do talude do lixão.

Com os valores de densidade crítica do solo (1,42 a 1,45 Kg.dm<sup>-3</sup>) e da densidade do solo, estimou-se o grau de compactação da região jusante do depósito de resíduos de Rolândia. Nota-se que o grau de compactação atingiu valores de 79,61%, 83,84% e 86,42%. Estes valores são justificados devido à ausência de compactação nesta área, que é uma área adjacente (jusante) ao depósito de resíduos, e sofre apenas influência indireta do lixão pela ação dos ventos e das chuvas que, inclusive, pode vir a -contaminar esta área.

O grau de compactação para o solo do talude variou de 82,94% a 86,50% (Tabela 4), sendo, portanto, próximo aos valores obtidos na base do depósito de resíduos. Através da análise estatística pelo teste T, nota-se que não houve diferença nos valores de densidade crítica de compactação entre as duas áreas (Figura 23), assim como também não houve diferença entre os graus de compactação das áreas (Figura 26). Desta forma, pode-se perceber que não houve compactação efetiva no encerramento e cobertura do talude, visto que seu grau de compactação não se diferencia estatisticamente do grau de compactação do solo da base, onde não houve trabalho de compactação.

Pela comparação entre os valores de umidade ótima de compactação da área do talude com a jusante e a cobertura do lixão, pode-se notar que o solo do talude expressou menores valores de umidade ótima para se atingir a densidade crítica do solo. Através da comparação entre a granulometria das duas áreas distintas, o teor de areia presente no solo do talude supera os valores da área adjacente ao lixão, contribuindo para a redução do valor de umidade ótima de compactação. Pacheco e Dias Junior (1990) observaram que a umidade ótima de compactação diminuiu e a densidade do solo máxima correspondente aumentou, à medida que se adicionou areia em um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média, em um de textura argilosa e em um de textura muito argilosa.

No solo do talude, os valores de densidade máxima do solo são superiores e se diferenciam do solo da parte de cobertura do lixão (Figura 24). Essa diferença é devido a granulometria dos dois solos, com grande predominância de argila no solo da cobertura final do lixão e menores teores de areia no mesmo. O solo do talude, por haver mais areia em sua composição, possui valor de densidade crítica superior ao solo de cobertura do depósito. Dias Junior e Estanislau (1999) relatam que essa diferença pode ser devido à maior capacidade de empacotamento das partículas do solo e à forma irregular dos grãos da areia ou à maior densidade de partículas da areia.

Mentges et al. (2007) também observaram que os teores de areia e argila influenciaram os valores de Densidade Crítica e de Umidade gravimétrica ótima dos solos. À medida que aumentou o teor de areia, houve um aumento na Densidade Crítica e uma redução na Umidade gravimétrica ótima. Já, com o aumento do teor de argila, ocorreu um decréscimo na Densidade Crítica e um aumento na Umidade gravimétrica ótima do solo.

De acordo com a Tabela 4, os valores de densidade do solo aparente da área de cobertura do lixão variaram de 1,18 a 1,26 g.cm<sup>-3</sup>. O grau de compactação do solo variou entre 81,46%, 83,09%, 83,60%. Por meio da Figura 25, verifica-se que não houve diferença significativa entre as médias da densidade crítica do solo da parte a jusante do depósito de resíduos e da parte de cobertura final do depósito.

Em comparação com o grau de compactação das outras áreas analisadas, através do teste T (Figura 26), nota-se que não houve diferença estatística entre todas as áreas, área a jusante do depósito, área do talude e área de cobertura final dos resíduos. Desta forma, o trabalho de compactação do solo na camada final (sobre os resíduos) de encerramento do lixão foi realizado de forma ineficiente, pois o grau de compactação se assemelha com os valores obtidos na base do depósito, que é um local ausente da ação de maquinários, sem influência direta do lixão, exceto com o escoamento dos resíduos na superfície que se deslocavam do talude para a base.

Tabela 4: Umidade ótima, densidade crítica de compactação e grau de compactação das amostras, obtida através da relação entre a densidade crítica e a densidade aparente.

LOCAL	Umid.ótima (kg.kg <sup>-1</sup> )	Dens.Crít (kg.dm <sup>-3</sup> )	Média da Densidade do solo (kg.dm <sup>-3</sup> )	Grau de Compactação (%)
Jusante	0.2833	1.53		79.61
Jusante	0.3122	1.45	1.22	83.84
Jusante	0.3252	1.41		86.42
Talude	0.2981	1.46		86.50
Talude	0.2782	1.51	1.26	83.58
Talude	0.2937	1.52		82.94
Cobertura	0.3171	1.42		83.60
Cobertura	0.3152	1.42	1.18	83.09
Cobertura	0.3035	1.45		81.46

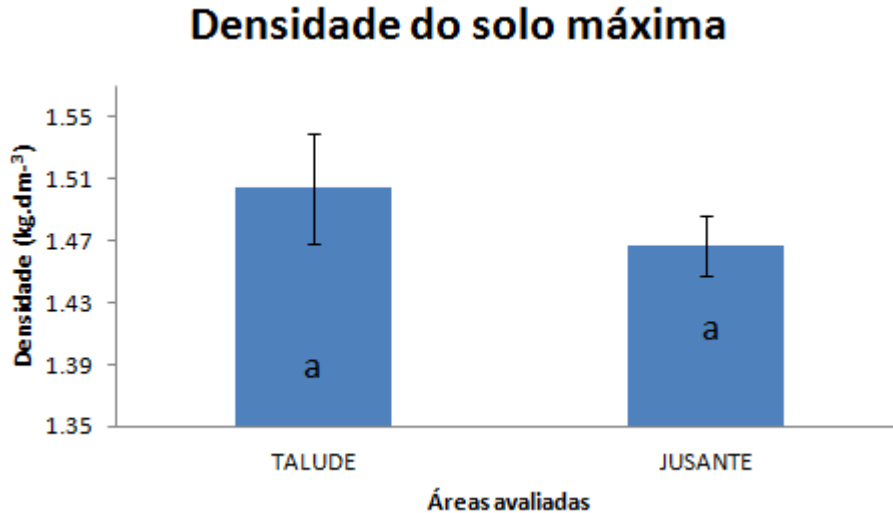


Figura 23: Densidade do solo máxima da área a jusante e do talude. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si através do Teste T. As barras representam o erro padrão da média.

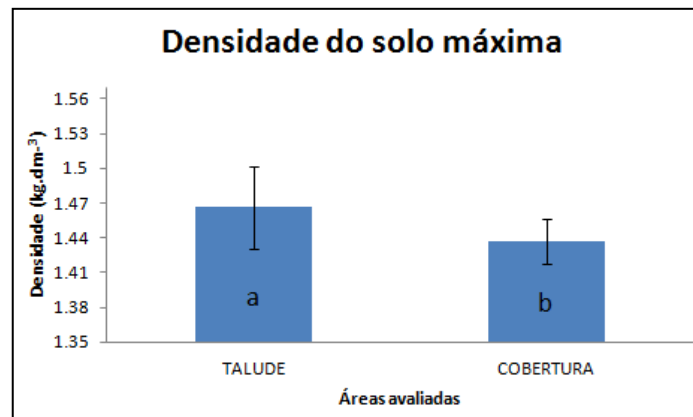


Figura 24: Densidade do solo máxima da área do talude e da cobertura. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si através do Teste T. As barras representam o erro padrão da média.

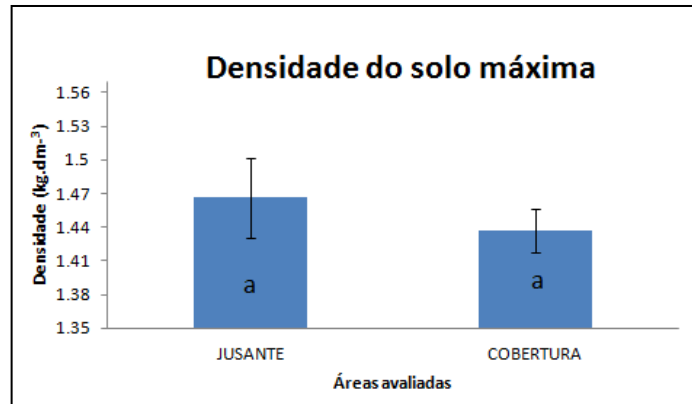


Figura 25: Densidade do solo máxima das camadas da área a jusante e da cobertura. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si através do Teste T. As barras representam o erro padrão da média.

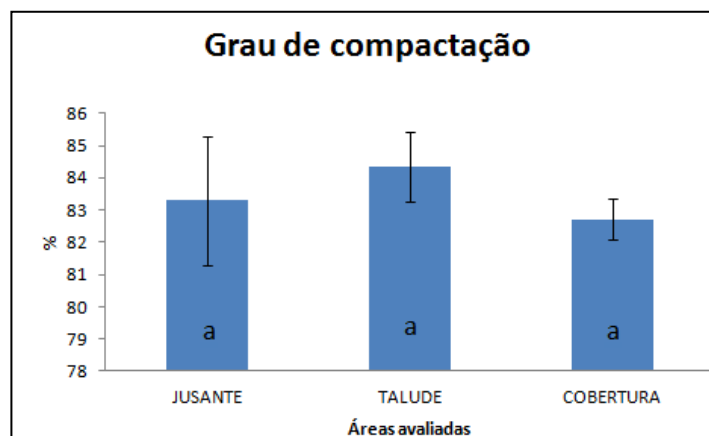


Figura 26: Grau de compactação do solo das três áreas do depósito. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si através do Teste T. As barras representam o erro padrão da média.

## 7. CONCLUSÃO

A curva de compactação do solo das camadas do depósito de resíduos foi alterada.

O grau de compactação não foi alterado entre o solo das camadas de cobertura, jusante e talude, e estão abaixo do indicado para o adequado encerramento de depósitos de resíduos. Com esta camada de compactação deficiente, há riscos ambientais de carregamento de resíduos com a chuva, infiltração de contaminantes para o interior do lixão, assim como o risco de vazamentos de gases e explosões em determinadas circunstâncias.

Portanto, um conjunto de práticas errôneas aliadas à deficiente legislação e fiscalização da Prefeitura do município de Rolândia fez com que o lixão, há 11 anos atrás, apresentasse seu encerramento de forma insatisfatória no ponto de vista ambiental. É necessário que haja a contratação de profissionais da área de engenharia ambiental para a avaliação ambiental completa na área e a solução dos problemas no setor, a fim de que não se agravem os efeitos indesejados como, por exemplo, os riscos de contaminação do solo, da água e do ar, a proliferação de vetores causadores de doenças, entre outros efeitos.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo - **Ensaio de Compactação NBR 7182**, 1984. 10 p.

ABNT. Projeto de poço para captação de água subterrânea: NBR 12212. Rio de Janeiro, **ABNT**, 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação. **ABNT**, Rio de Janeiro, 2004.71 p.

ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S. de; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga de um Latossolo e umidade crítica para o tráfego de um trator. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 115-131, jan./fev. 2011.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação da compressibilidade de um nitossolo vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p. 507-514, 2005.

BECEGATO, V.A.; STEFANATO, R.; FERREIRA, F. J. F.; CUNHA, J.U; CABRAL, J.B.P.; Investigações geofísicas aplicadas no lixão desativado do município de Saudade do Iguaçu-PR. **Rev. Geogr. Acadêmica**, v.3, n.1, 2009.

BERNARDES JÚNIOR, C.; SABAGG, M.A.F.; FERRARI, A.A.P. Aspectos Tecnológicos de Projetos de Aterros de Resíduos Sólidos, In: RESID - Seminário sobre resíduos sólidos. **Anais**. São Paulo: ABGE, 1999, p. 51-68.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:843-849, 2005.

BIDONE, F.R.A.; POVINELLI, J. Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos. São Carlos. **Editora EESC / USP**, São Carlos. 1999. 109 p.



BOSCOV, M.E.G.; ABREU, R.C. Aterros Sanitários. Previsão de desempenho x comportamento real. **ABMS**, São Paulo, 2000.

BRAJA, M. Das. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**; São Paulo: Thomson Learning, 2006.

BUCKMAN, H.O. & BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 1974. 594 p.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F.; BATISTA, H. P.; MARTINS, H. L. Avaliação da Compactação dos Resíduos Sólidos Urbanos Dispostos no Aterro Sanitário da BR-40 em Belo Horizonte – MG (CD ROM). In: **5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - REGEO'2003**. Porto Alegre/RS: ABMS, 2003.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Resíduos sólidos domiciliares e de serviços de saúde: tratamento e disposição final. Texto básico. São Paulo: **Cetesb**, 1997.

DAY, P.R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: **American Society of Agronomy**, 1965. v.1, p.545-566. (Agronomy, 9).

DIAS JUNIOR, M. de S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; SCHAEFER, C. E. G. R. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2000. v. 1, p. 55-94.

DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 175-182, jan./mar. 1996.

DIAS JUNIOR, M. S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. 1994. 114p. Tese de doutorado. East Lansing, Michigan State University, 1994.

DIAS JUNIOR, M.S. & ESTANISLAU, W.T. Grau de compactação e retenção de água de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23, p.45-51, 1999.

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPS). Manual de métodos de análise de solo 2.a ed. Rio de Janeiro, **EMBRAPA - CNPS**, 1997. 212p. (EMBRAPA-CNPS).

FERREIRA, Maria Alice da Silva; MAHLER, Cláudio Fernando. **Avaliação do solo das camadas de cobertura intermediárias e finais** - Estudo de caso. Rio de Janeiro: Ufrj, 2006.

FLINT, L.E; FLINT, A.L. Porosity. In: Dane JH, Topp GC. (ed.) Methods of soil analysis: physical methods. **Madison: Soil Science Society of America**. p.241–254, 2002.

GROHMANN, F; RAIJ, B. van. Dispersão mecânica e pré-tratamento para análise granulométrica de Latossolos argilosos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.1, n.1, p.52-53, jan./abr. 1977.

GUEDES, V.P. Estudo do fluxo de gases através do solo de cobertura de Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos. 2007 117 f. **Tese de Mestrado em Engenharia Civil** – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia – COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981. 733 p.

IGNATIUS, S.G. Fluxo unidirecional de gás através de um solo compactado - Determinação laboratorial de parâmetros. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo. 337p, 1999.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Cartas climáticas do Estado do Paraná. Londrina: **lpar**, 1994. 49p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS E COMPROMISSO EMPRESARIAL COM A RECICLAGEM - IPT e CEMPRE. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 1ªed. São Paulo: **IPT/CEMPRE**, 1995. 278 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS E COMPROMISSO EMPRESARIAL COM A RECICLAGEM - IPT e CEMPRE. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 2 ed. São Paulo: **IPT/CEMPRE**, 2000. 199 p.

JORGE, F. N. de; BAPTISTI, E. de; GONÇALVES, A. Monitoramento em Aterros Sanitários nas Fases de Encerramento e de Recuperação: desempenhos mecânicos e ambiental, in: RESID - Seminário sobre resíduos sólidos. **Anais**. São Paulo: ABGE, 2004.

JUCA, J.F.T; MARIANO, M.O.H.; ALVES, M.C.M.; MACIEL, F.J.; BRITO, A. Disponibilidade do Biogás em uma Célula do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca. **23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. 2005.

JUCÁ, J.F.T. Disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. In: 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Porto Alegre, 2003. **Anais**: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003. 32p.

LANZA, V. C. V. **Caderno Técnico De Reabilitação De Áreas Degradadas Por Resíduos Sólidos Urbanos**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) - Fundação Israel Pinheiro, 2009. 28 p.

LAURINDO, M. C. O.; NÓBREGA, L. H. P.; PEREIRA, J. O.; MELO, D.; LAURINDO, E. L. Atributos físicos do solo e teor de carbono orgânico em sistemas de plantio direto e cultivo mínimo. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.17 n.5, p. 367-374, 2009.

LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 2.ed. Campinas: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**; Embrapa-SNLCS, 1984. 46p.

LIMA, C. G. R. da; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M. M.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v.31, n.6 ,pg. 1233-1244, 2007.

MACIEL, F.J. Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/Pe. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Brasil. 2003.

MELO, A.C.; BARROS, M. V.F.; FERNANDES, F. Diagnóstico da Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Município de Rolândia (PR). **Revista Geografia**, Londrina, v. 20, n. 2, p. 5-28, 2011.

MENTGES, M. I.; Fontanela, E.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. A. S. Densidade máxima pelo ensaio de Proctor normal para seis solos em diferentes manejos e sua relação com o teste de compressão axial. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 31, 2007, Gramado. **Resumos...** Gramado: SBCS, 2007.

MIGUEL, M.G., PINESE, J.P.P. 2004. Breve panorama sobre a Geotecnia Ambiental. **Bol. de Geografia**,v.22, n.1, p.75-85, Maringá, 2004.

MONTEIRO, J. H. P. Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Victor Zular Zveibil (coord.). 15 ed. Rio de Janeiro: **IBAM**, 2001. 200 p.

NAVES, L. C. Influência da compactação do solo na produção e no potencial poluidor de lixiviados de resíduos sólidos urbanos. 2013. 132 p. **Dissertação (Mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais)**-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

PACHECO, A.A.R.C.;DIAS JUNIOR, M.S. Estudo comparativo de métodos de campo e laboratório aplicados à confecção de blocos de adobe. **Ci. Prát.**, v.14, p.176-190, 1990.

PINTO, C.S.,(2000). "Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas" Ed. **Oficina de Textos**, São Paulo. pg 107-120.

RESENDE, T.M.; MORAES, E.R.; FRANCO, F.O.; ARRUDA, E.M.; ARAÚJO, J.R.; SANTOS, D.S.; BORGES, E.N.; RIBEIRO, B.T. Avaliação Física Do Solo Em Áreas Sob Diferentes Usos Comadição De Dejetos Animais No Bioma Cerrado. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 28, Supplement 1, p. 179-184, Mar. 2012.

ROCCA, A. C. Resíduos Sólidos Industriais. 2 ed. **Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental**. São Paulo, 1993. 233 p.

SANTOS, M.M.; CELLIGOI. A. Avaliação Hidrogeológica nas adjacências do antigo Lixão de Rolandia –PR .XIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços . **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, p.195-204, 2003.

SIMÕES, G. F. Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos. 2000. **Tese (Doutorado)**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A.; DIAS JUNIOR, M. de S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. Indicadores da qualidade física do solo. In: Jong van Lier, Q. (Ed.). Física do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 241 - 281. 2010.

SOUZA JÚNIOR, J. D. O Efeito da Energia de Compactação em Propriedades dos Solos Utilizados na Pavimentação do Estado do Ceará. **Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes**. Universidade Federal do Ceará. , Fortaleza. Ce. 211p, 2005.

TREWARTH, G. T.; HORN, L. H. **An introduction to climate**. New York, McGraw-Hill, 1980. 416p.

UHLAND, R.E. Physical properties of soils as modified by crops and management. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.14, p.361-366, 1949.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509 p.

ZICA, E. S. Estudo comparativo entre energias de compactação do subleito para subsidiar projetos de pavimentação. 2010. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica/Geotécnica de pavimentos)** - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 117 p. 2010.