

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS  
SÓLIDOS URBANOS (RSU) DA REGIÃO DE SANTA MARIA,  
PRÉ E PÓS-TRIAGEM**

**Milena Tomasi Habitzreuter**

Porto Alegre  
2008

**MILENA TOMASI HABITZREUTER**

**ANÁLISE DA COMPACTAÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS  
SÓLIDOS URBANOS (RSU) DA REGIÃO DE SANTA MARIA,  
PRÉ E PÓS-TRIAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Orientação: Prof. Dr. Luiz Antônio Bressani

Porto Alegre  
2008

**MILENA TOMASI HABITZREUTER**

**ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS  
SÓLIDOS URBANOS (RSU) DA REGIÃO DE SANTA MARIA,  
PRÉ E PÓS-TRIAGEM**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de maio de 2008

**Prof. Luiz Antônio. Bressani**  
PhD. University of London  
orientador

**Prof. Fernando Schnaid**  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Eduardo Dell'Avanzi (UFPR)**  
PhD. University of Colorado at Boulder

**Prof. Gino Roberto Gehling (UFRGS)**  
Dr. Universitat Politecnica de Catalunya

**Prof.(a) Karla Salvagni Heineck (UFRGS)**  
Dr.(a) Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## AGRADECIMENTOS

Diversas pessoas e instituições foram fundamentais na realização deste trabalho, e cabe aqui um agradecimento especial. Agradeço em primeiro lugar ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que por disponibilizar um corpo docente qualificado e uma estrutura adequada, proporcionou que a realização deste estudo fosse proveitosa e gratificante.

Agradeço ao meu orientador Luiz Antonio Bressani, pela sua generosidade em compartilhar seus extensos conhecimentos, pela atenção, e pelos esforços dedicados para que o meu desenvolvimento pessoal e profissional tenha sido maximizado.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos e pelo apoio durante o mestrado.

Muito obrigada à Biblioteca de Engenharia da UFRGS, ao COMUT, e em especial à Silvia, que com uma atenção mais que especial, fez com que chegassem em minhas mãos verdadeiras relíquias!

Agradeço aos meus amigos queridos, hoje espalhados pelo Brasil, pelo apoio e pela compreensão em momentos de ausência.

Agradeço aos meus pais, Mauro e Rossana, que sempre acreditaram em mim, e sempre me deram apoio incondicional em tudo. Meus exemplos, meus amores! Motivo das minhas eternas saudades!

Por fim, um agradecimento especial ao meu noivo. Mais que isso, ao meu companheiro de vida! Obrigada por ter se aventurado comigo em Porto Alegre, obrigada por fazer meus dias mais especiais, obrigada pelo seu amor sempre! Obrigada pela compreensão e pelos conselhos! Obrigada por fazer parte disto tudo! Te amo!

## RESUMO

HABITZREUTER, M. T. Análise da Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) da Região de Santa Maria Pré e Pós-Triagem. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Neste trabalho foi estudada a caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos da macro-região de Santa Maria (RS). A região estudada é composta pelos municípios de Júlio de Castilho, São Pedro, e pela região da Quarta Colônia, que por sua vez engloba os municípios de Faxinal do Soturno, Nova Palma, São João do Polêsine, Agudo, Paraíso do Sul e Dona Francisca. Os ensaios de caracterização gravimétrica foram realizados na Unidade de Triagem de Paraíso do Sul, município vizinho à Santa Maria no período entre julho e setembro de 2007. Avaliou-se a composição do resíduo in natura e após a triagem de material reciclável e orgânico para que fosse possível analisar a eficiência da triagem e estudar algumas características físicas do rejeito (resíduo sem as porções orgânica e reciclável). A massa de resíduos sólidos urbanos da macro-região de Santa Maria é bastante heterogênea e apresenta variações de acordo com as características sócio-econômicas das regiões. Os resultados da caracterização gravimétrica dos resíduos urbanos mostraram uma significativa influência de fatores externos, tais como a presença de umidade devido ao nível pluviométrico e a ação dos ventos. Isto é devido ao fato que materiais como papel e papelão são descaracterizados em presença de umidade e misturam-se às porções de rejeito e matéria orgânica. A realização da caracterização gravimétrica pré e pós-triagem permitiu uma análise da eficiência da caracterização (ou triagem) feita pela esteira e a verificação do potencial de aproveitamento dos resíduos. A média dos dados analisados indica uma eficiência de cerca de 86 % na triagem efetuada pela esteira, sendo que grande parte do material mal caracterizado é matéria orgânica, um material difícil de ser triado e que muitas vezes incorpora-se a outros materiais. O resíduo da região de Santa Maria apresenta um potencial de aproveitamento de 62 %, seja com a triagem de recicláveis, seja com a compostagem da matéria orgânica. Foi feito um ensaio de compactação no material de rejeito da esteira, o qual foi compactado em prensa estática com uma pressão equivalente de 250 kPa, obtendo-se um fardo com densidade de 7,66 kN/m<sup>3</sup> (ou cerca de 750 kgf/ m<sup>3</sup>). Este fardo de rejeito apresentou uma consistência firme que permitiu seu manuseio sem necessidade de reforços, mas seu elevado peso dificultou as operações de transporte. Este rejeito compactado não tinha uma significativa quantidade de material orgânico, e por isso, a compactação não gerou líquido (chorume) em quantidade significativa. A compactação do rejeito proporcionou uma redução volumétrica da ordem de 3,2 vezes.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; compactação de resíduos sólidos urbanos; composição gravimétrica.

## ABSTRACT

HABITZREUTER, M. T. Gravimetric Composition Analysis of Municipal Solid Waste from Santa Maria Region, Pré and Post Separation Process. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

On this work the gravimetric composition of solid wastes from Santa Maria (RS) region was studied. The region is composed by the towns of Júlio de Castilho and São Pedro and by the so-called Quarta Colônia, composed by Faxinal do Soturno, Nova Palma, São João do Polêsine, Agudo, Paraíso do Sul e Dona Francisca towns. The tests were carried out at the *Separation* Unity of Paraíso do Sul, close to Santa Maria town, which receive the municipal waste of the region. The gravimetric characterization tests were carried out from July to September 2007. The composition of the waste was determined just after arrival and also after the separation of organic matter and recyclables, in order to study the efficiency of the separation process and analyze some physical characteristics of the waste with and without these components. The municipal solid wastes from Santa Maria region is heterogeneous and presents variations which are related to socio-economic characteristics of the regions which originated them. The results of gravimetric characterization showed a significant influence of the external factors, such as the presence of humidity, due to rains, and the wind. This is due to the fact that materials like cardboard and normal paper loose their characteristics and aspect in presence of water, getting mixed up with the refuse and organic matter. The characterization carried out pre and post separation of recyclables allowed to examine the efficiency of the separation which is done on the mat and also to make an analysis of the potential of waste reuse. The data average indicates an efficiency of around 86% in the separation process on the mat, being organic matter a large part of the material wrongly classified as refuse, as it is a difficult material to select from the waste and one which easily incorporates into others. The waste from Santa Maria region has a potential of 62% of being reused or through recycling or by composting (organic matter). A compaction test was carried out on the refusal of the mat. The material was compacted statically on a frame with an equivalent pressure of 250 kPa. A block of refuse with unity weight of 7.66 kN/m<sup>3</sup> was obtained. This block had a firm consistency and did not require reinforcing to be moved around, but its large weight imposed some difficulties. The refuse had little quantity of organic matter and so the test did not generate significant amount of liquid. The refuse compaction generated a volumetric reduction of 3.2 times.

Key-word: Municipal solid waste; compaction; characterization.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....</b>	<b>15</b>
2.1. ASPECTOS GERAIS.....	15
2.1.1. Geração dos RSU.....	16
2.1.2. Composição e Propriedades.....	18
2.1.2.1. Porosidade .....	19
2.1.2.2. Umidade .....	19
2.1.2.3. Capacidade de Campo .....	21
2.1.2.4. Permeabilidade .....	21
2.1.2.5. Massa Específica .....	21
2.1.2.6. Temperatura.....	22
2.1.2.7. Composição Gravimétrica .....	22
2.1.2.8. Resistência ao Cisalhamento .....	22
2.1.2.9. Compressibilidade e Recalques.....	24
2.1.2.10. Tamanho dos Grãos e Curva Granulométrica .....	25
2.2. PRINCIPAIS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	25
2.2.1. Mecanismos Físico-Químicos de Degradação.....	26
2.2.2. Mecanismos Biológicos de Degradação .....	27
2.2.2.1. Degradação Aeróbia .....	27
2.2.2.2. Degradação Anaeróbia .....	27
2.3. FORMAS DE DISPOSIÇÃO DE RSU .....	28
2.3.1. Lixões.....	28
2.3.2. Aterros Controlados.....	29
2.3.3. Aterros Sanitários .....	29
2.2.4. Incineração .....	32
2.2.5. Compostagem .....	32
2.2.6. Reciclagem.....	32
2.3.7. Plasma Térmico .....	33
<b>3. ATERROS SANITÁRIOS .....</b>	<b>35</b>
3.1. ASPECTOS GERAIS.....	35

3.2. SELEÇÃO DA ÁREA.....	36
3.3. DEFINIÇÃO DO ARRANJO DO ATERRO.....	38
3.3.1. Aterros em Valas Integralmente Cobertas .....	38
3.3.2. Aterros Positivos em Células Únicas.....	38
3.3.3. Método da Trincheira.....	39
3.3.4. Método da Meia Encosta .....	39
3.3.5. Método da Área .....	39
3.4. SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE FUNDO .....	39
3.5. SISTEMAS DE DRENAGEM.....	43
3.5.1. Drenagem de Água da Chuva .....	43
3.5.2. Drenagem de Lixiviados.....	43
3.5.3. Drenagem de Gases .....	44
3.5.4. Sistemas de Cobertura .....	45
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>47</b>
4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	47
4.1.1. Caracterização Gravimétrica.....	47
4.1.2. Aspectos de Compactação .....	52
<b>5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
5.1. CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA .....	55
5.1.1. Julho de 2007.....	58
5.1.2. Agosto de 2007 .....	64
5.1.3. Setembro de 2007 .....	69
5.3. COMPACTAÇÃO .....	75
<b>6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....</b>	<b>79</b>
ANEXO A – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ANEL DINAMOMÉTRICO .....	85



## LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1: Percentual da população, PIB e geração de resíduos sólidos por região. ....	17
Figura 2.2: Composição percentual média do resíduo domiciliar de alguns países. ....	19
Figura 2.3: Composição percentual média em programas de coleta seletiva. ....	20
Figura 2.4: Evolução da disposição de resíduos sólidos no Brasil. ....	29
Figura 2.5: Fotografia do lixão da Cachimba, Curitiba/PR. ....	30
Figura 2.6: Ação de catadores em lixões. ....	30
Figura 2.7: Reprodução de um aterro sanitário, apresentando as três fases de implantação do projeto. ....	31
Figura 2.8: Planta de um equipamento plasma térmico. ....	34
Figura 3.1: Métodos de operação de um aterro sanitário: (a) método da trincheira, (b) método da área, (c) método da meia encosta. ....	40
Figura 3.2: Exemplos de liners compósitos. ....	42
Figura 3.3: Sistema de drenagem de água de chuva. (a) tubo de drenagem que libera a água em um canal de drenagem; (b) tanque coletor que armazena a água canalizada. ....	43
Figura 3.4.: Lagoa de Estabilização de um aterro sanitário. ....	44
Figura 3.5: Sistema de drenagem de gás. (a) dreno de gás; (b) queimador de gás. ....	45
Figura 4.1: Mapa da região de Santa Maria. Em destaque os municípios atendidos pela UT de Paraíso do Sul. ....	48
Figura 4.2: Balança utilizada para a pesagem dos materiais. ....	49
Figura 4.3: Ficha de Caracterização. ....	50
Figura 4.4: Fases da operação - (a) quarteamento do resíduo, (b) material quarteado, (c) separação do material e (d) pesagem das amostras. ....	51
Figura 4.5: Esquema da esteira de triagem da UT de Paraíso do Sul. ....	52
Figura 4.6: Prensa de compactação da UT. ....	53
Figura 4.7: Esquema do anel dinamométrico utilizado para os ensaios de compactação em laboratório. ....	54
Figura 5.1: Junção entre dois diferentes níveis da esteira de triagem. ....	58
Figura 5.2: Resultados da caracterização gravimétrica pré-triagem de julho de 2007. ....	59
Figura 5.3: Resultado do material selecionado pela esteira de triagem em julho de 2007. ....	60
Figura 5.4: Percentuais de materiais recicláveis selecionados pela esteira de triagem em julho de 2007. ....	61

Figura 5.5: Resultado da caracterização gravimétrica do material descartado pela esteira de triagem em julho de 2007.....	63
Figura 5.6: Resultados da caracterização gravimétrica pré-triagem de agosto de 2007.....	65
Figura 5.7: Resultados do material selecionado pela esteira de triagem em agosto de 2007...	66
Figura 5.8: Percentuais de materiais recicláveis selecionados pela esteira de triagem em agosto de 2007.....	67
Figura 5.9: Resultado da caracterização gravimétrica do material descartado pela esteira de triagem em agosto de 2007.....	69
Figura 5.10: Resultado da caracterização gravimétrica pré triagem em setembro de 2007.....	70
Figura 5.11: Resultados do material selecionado pela esteira de triagem em setembro de 2007...	71
Figura 5.12: Percentuais de materiais recicláveis selecionados pela esteira de triagem em setembro de 2007.....	71
Figura 5.13.: Resultado da caracterização gravimétrica do material descartado pela esteira de triagem em setembro de 2007.....	73
Figura 5.14: Dados médios de caracterização (a) pré e (b) pós-triagem nas regiões estudadas..	74
Figura 5.15: Curvas de compactação estática obtida em laboratório para dois tipos de resíduos.....	76
Figura 5.16: Curvas de compactação estática obtida em laboratório para polietileno de baixa densidade.....	77
Figura 5.17: Foto do fardo de rejeito compactado ao final do ensaio.....	78

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1: Diâmetro de partículas de materiais encontrados em RSU. ....	26
Tabela 5.1: Materiais recicláveis e seus respectivos valores de venda. ....	57
Tabela 5.2: Dados referentes à coleta na esteira de triagem no mês de julho. ....	62
Tabela 5.3: Transferência de massa durante as três etapas da caracterização gravimétrica em julho de 2007. ....	64
Tabela 5.4: Dados referentes à coleta na esteira de triagem no mês de agosto. ....	68
Tabela 5.5: Transferência de massa durante as três etapas da caracterização gravimétrica em julho de 2007. ....	69
Tabela 5.6: Dados referentes à coleta na esteira de triagem no mês de setembro. ....	72
Tabela 5.7: Transferência de massa durante as três etapas da caracterização gravimétrica em setembro de 2007. ....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CPT: *cone penetration test*.

CTRC: central de tratamento de resíduos de Caturrita.

$e$ : índice de vazios.

EIA: estudo de impacto ambiental.

EPA: *Environment Protect Agency*.

GCL: *geosynthetic clay liners*.

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.

JC: Júlio de Castilhos.

LAGEO: Laboratório de Geotecnologia.

$n$ : porosidade.

QC: Quarta Colônia.

QC<sub>1</sub>: Quarta Colônia (região de Nova Palma).

QC<sub>2</sub>: Quarta Colônia (regiões de Polêsine, Faxinal e Paraíso do Sul).

QC<sub>3</sub>: Quarta Colônia (regiões de Dona Francisca e Agudo).

RSU: resíduos sólidos urbanos.

SP: São Pedro.

SPT: *standard penetration test*.

UT: unidade de triagem.



## 1. INTRODUÇÃO

A disposição adequada de resíduos sólidos urbanos (RSU), do ponto de vista ambiental e de segurança pública é recente. Os aterros planejados e controlados não eram rotina antes de 1970, sendo que o primeiro aterro com *liner* de impermeabilização duplo foi documentado em 1978. Já aterros mais sofisticados, com múltiplas camadas de impermeabilização e contenção de gases e fluidos, começaram a ser construídos a partir de 1980, devido à regulamentação imposta pela *Environment Protect Agency* (EPA).

Os resíduos sólidos constituem um problema sanitário de grande importância para uma comunidade, uma vez que falhas nos procedimentos de coleta, transporte, tratamento e disposição podem acarretar na proliferação de micro e macro vetores de doenças. O controle sanitário consiste em medidas que visam prevenir e controlar doenças transmitidas por ratos, pulgas, moscas, mosquitos, baratas, etc... Atenta-se também para o impacto psicológico positivo que age sobre uma população com hábitos e ambiente limpos. Pode-se apontar também a importância econômica ligada ao controle sanitário dos resíduos sólidos, seja em relação ao aumento da vida útil da população, seja na economia em recursos destinados ao tratamento de doenças transmitidas pelos vetores já citados.

Tendo em vista as questões sanitárias e sócio-econômicas lançadas em face à disposição de RSU, campanhas de educação e conscientização ambiental têm sido recorrentemente implantadas em diversos municípios. A ideia central destas campanhas é o conceito dos 3 R's: Reduzir, Reutilizar e Reciclar. O fator Reduzir indica que o consumidor deve, sempre que possível, controlar a quantidade de resíduos que gera, visando sempre a redução, evitando desperdício. Por Reutilizar entende-se que existem inúmeras maneiras de reaproveitar objetos como, por exemplo, utilizar ambos os lados de uma folha de papel e aproveitar embalagens retornáveis para outros fins. Já o termo Reciclar procura formar o terceiro ponto do tripé da educação ambiental, aparecendo como alternativa nos casos em que não foi possível reduzir nem reutilizar o resíduo. Estes aspectos fazem parte de programas de gestão de resíduos, que envolvem equipes multidisciplinares e que contam com a colaboração de toda a população.

Programas de Gestão de Resíduos estão começando a surgir como elementos indispensáveis na administração de municípios, mas acredita-se que os principais resultados apareçam apenas em longo prazo. Desta forma, encaminha-se para aterros sanitários não apenas os rejeitos não contemplados pela política dos 3 R's, e sim todo e qualquer tipo de resíduo sólido urbano. A disposição de resíduos sólidos urbanos em um aterro sanitário forma taludes de rejeitos, cujo comportamento geomecânico ainda não é bem conhecido. A década de 90 foi marcada pela preocupação com a medida da permeabilidade, compressibilidade, previsão de recalques e sistemas de coleta de gases e lixiviado. Porém em países em desenvolvimento como o Brasil, até mesmo essas questões ainda não foram resolvidas a contento. É inquestionável que incansáveis pesquisas têm resultado em grandes avanços nas duas últimas décadas, mas é importante ressaltar que são muitos os desafios geotécnicos no projeto e construção de aterros no País.

Uma das propriedades mais relevantes dos RSU é a caracterização. O percentual de cada componente da massa de resíduos pode indicar como a massa vai se comportar em relação a recalques, compactação, geração de gases e lixiviados, etc. Regulamentações de gerenciamento, fiscalizações e normas devem levar em conta a composição dos resíduos, que mudam consideravelmente de acordo com localização geográfica, clima, condição sócio-econômica e cultura da região. A variabilidade de materiais e suas contribuições para a massa de resíduos impedem que se faça uma generalização, e que se use com segurança valores de referência existentes na literatura.

*Composição* é um termo usado para descrever os componentes individuais que integram a massa de resíduos, e suas distribuições relativas, geralmente baseadas em percentuais em peso. A caracterização dos resíduos sólidos consiste em identificar os diversos materiais que o compõe e determinar suas propriedades. É preciso levar em conta que a composição varia ao longo do tempo, isto é, o resíduo recém-coletado apresenta características diferentes daquele já disposto há algum tempo. Isto ocorre devido aos processos físicos e biológicos, como compactação e a biodegradação, aos quais o resíduo é submetido.

O processo de caracterização de resíduos sólidos ainda não é normalizado no Brasil e não é um procedimento simples devido à heterogeneidade do material e a conseqüente dificuldade em obter-se uma amostra significativa. Para realizar o processo de caracterização é necessário efetuar a amostragem dos resíduos, procedimento que no Brasil é normalizado pela ABNT NBR 10007/2004.

Depois de coletada a amostra, é possível determinar parâmetros como teor de umidade, densidade aparente, poder calorífico e a composição física propriamente dita. A composição física do resíduo depende da condição sócio-econômica da região, sendo que regiões menos desenvolvidas apresentam resíduos com alto teor de matéria orgânica. Já regiões mais desenvolvidas apresentam rejeitos com percentuais significativos de recicláveis como papéis, produtos eletrônicos, vidros e embalagens. O Brasil possui mais da metade dos seus resíduos composto por matéria orgânica, enquanto países como Estados Unidos e Japão não apresentam parcela significativa deste rejeito destinada a aterros sanitários (IPT/CEMPRE, 2000).

É neste contexto que se insere o presente estudo. A PRT – Prestação de Serviços Ltda. está implementando a Central de Tratamento de Resíduos da Caturrita (CTRC), um aterro sanitário que atenderá o município de Santa Maria (RS) e região. Através deste trabalho, pretende-se caracterizar gravimetricamente os RSU da região e analisar o sistema de triagem que será implementado junto ao aterro, através de uma simulação na Unidade de Triagem (UT) de Resíduos de Paraíso do Sul. Pretende-se ainda avaliar o impacto da triagem frente ao processo de compactação de resíduos. Esta meta deve ser alcançada através dos seguintes objetivos específicos:

- a) revisão da literatura técnica nacional e internacional relevantes ao tema;
- b) definição da metodologia de caracterização de resíduos a ser utilizada;
- c) caracterização dos resíduos da região, a partir dos resíduos encaminhados para a UT de Paraíso do Sul, operada pela PRT;
- d) avaliação do sistema de triagem proposto pela CTRC, na esteira da Central de Triagem do município de Paraíso do Sul, operado pela PRT;
- e) caracterização dos resíduos da região após o procedimento de triagem, executado na UT;
- f) executar ensaios de compactação no resíduo “in natura” e no rejeito após o processo de triagem;
- g) comparar os resultados dos ensaios de compactação, avaliando os possíveis efeitos provocados pela triagem no processo.



## 2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

### 2.1. ASPECTOS GERAIS

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 10004/2004, Resíduos Sólidos são resíduos em estado sólido ou semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Inclui-se na definição lodos provenientes de ETAs e líquidos que não podem ser lançados na rede pública de esgoto ou em corpos d'água. A mesma norma classifica os resíduos de acordo com sua periculosidade da seguinte maneira:

- a) CLASSE I – *Resíduos Perigosos*. São resíduos que apresentam características como inflamabilidade, patogenicidade, toxicidade, reatividade e corrosividade;
- b) CLASSE II – *Resíduos Não Perigosos*,
  - CLASSE IIa – *Resíduos Não Inertes*. Apresentam características de biodegradabilidade, solubilidade e combustibilidade;
  - CLASSE IIb – *Resíduos Inertes*.

Dentre os resíduos citados acima, os resíduos sólidos urbanos (RSU) vêm recebendo maior destaque, e sido tema de diversos estudos. Os RSU abrangem resíduos de origem domiciliar, comercial, varrição, e ainda resíduos industriais que sejam classe II. Estima-se que, no Brasil, sejam gerados diariamente 0,78 kg de resíduo sólido por habitante (Jucá, 2003). A crescente preocupação com a disposição correta destes resíduos, priorizando a preservação ambiental, com medidas economicamente viáveis para os municípios, justificam o aumento de pesquisas englobando RSU e suas características. Nesta dissertação a atenção será voltada apenas a

resíduos sólidos urbanos. Resíduos perigosos, provenientes de serviços de saúde e resíduos industriais apresentam outras formas de disposição, e não se encaixam no contexto deste estudo.

Determinar parâmetros e características físico-químicas de RSU não é uma tarefa fácil devido à heterogeneidade do material e de sua composição gravimétrica e a dificuldade de obtenção de amostras significativas. A estes fatores soma-se ainda a inexistência de normas técnicas padronizadas para os ensaios destes materiais, o que faz com que sejam utilizadas normas definidas primeiramente para solos e que nem sempre se adaptam adequadamente a resíduos. Apesar das dificuldades apresentadas a determinação de parâmetros de RSU é de extrema importância e para executá-la é possível valer-se de ensaios de investigação *in situ* e também de ensaios laboratoriais. Devido à dificuldade de obtenção de amostras representativas os ensaios de laboratório são em geral questionáveis, resultando em uma tendência à execução de ensaios *in situ*, sempre que possível.

Para investigações *in situ* é necessário levar em consideração o tipo de resíduos, a forma de disposição do aterro e a idade do material depositado. O procedimento de amostragem pode ser executado através de poços, cavas ou furos exploratórios. A estruturação do maciço pode ser determinada através de ensaios convencionais do tipo SPT ou CPT. Ensaios SPT apresentam resultados satisfatórios em aterros constituídos por materiais finos previamente triturados. Já em aterros de resíduos domésticos e industriais a presença de materiais muito resistentes dificulta sobremaneira a cravação do amostrador, muitas vezes inviabilizando a amostragem (Marques, 2001). Ensaios CPT apresentam as mesmas dificuldades citadas para ensaios SPT, e são também limitados pela profundidade e deflexão angular dos furos.

### 2.1.1. Geração dos RSU

O processo de urbanização, aliado ao processo de modernização das cidades é um dos principais responsáveis pelo aumento na produção per capita de resíduos. Cada vez mais são utilizadas embalagens descartáveis, produtos eletrônicos, proteções de isopor, vidros e papéis no cotidiano das populações. A indústria da reciclagem vem contribuindo significativamente no controle de resíduos, pois seleciona materiais de valor econômico agregado, processando-os e inserindo-os novamente no mercado. Este esforço, porém, não tem sido suficiente para frear a produção de resíduos, que é cada vez maior, constituindo-se em grave problema de gestão e gerenciamento nos municípios.

A geração de resíduos está ligada à situação sócio-econômica da população. Regiões cuja população tem um poder aquisitivo maior, tendem a apresentar uma maior geração de resíduos. A Figura 2.1 ilustra um gráfico relacionando o percentual da população, o PIB e a geração de resíduos por região brasileira.

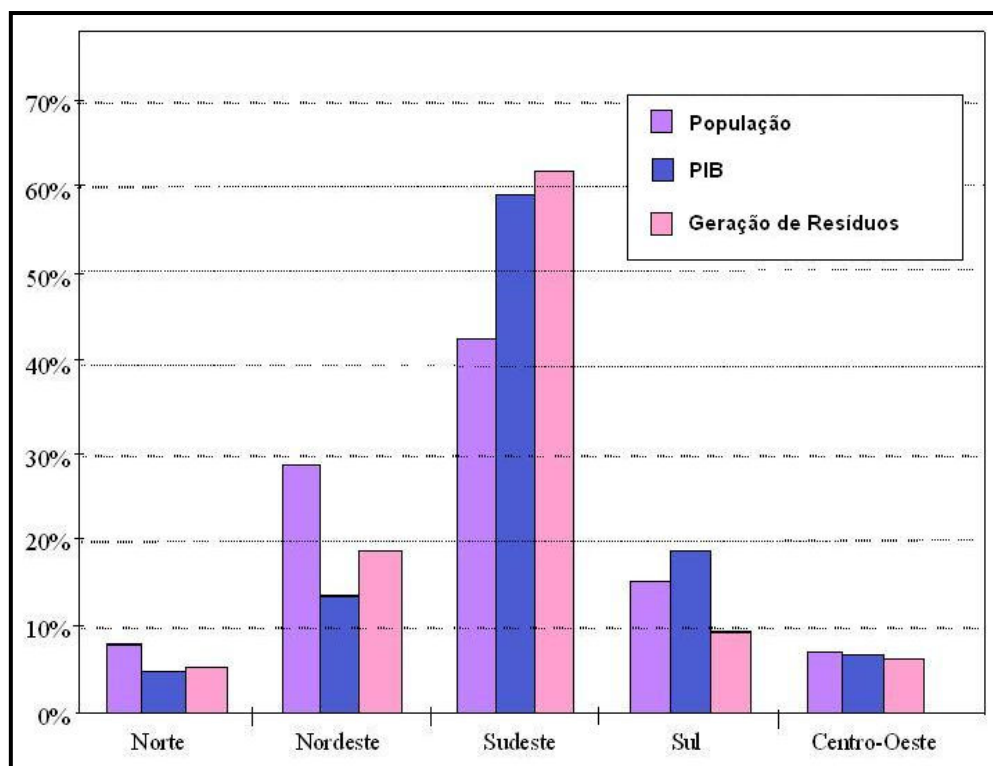


Figura 2.1: Percentual da população, PIB e geração de resíduos sólidos por região (baseado em: Jucá, 2003).

Uma discrepância pode ser observada na região Sul, aonde o PIB é elevado, porém a geração de resíduos é baixa. Este fato pode estar associado aos programas de separação de resíduos recicláveis, às campanhas educacionais e associações de catadores, que em conjunto resultam na diminuição do volume de resíduos coletados através dos serviços de limpeza pública. Já nas regiões Norte e Nordeste, a geração de resíduos segue a tendência de menor geração, condizente com o baixo PIB da região.

Dados do IBGE apresentados por Boscov (2006), indicam um aumento significativo na disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários. Os indicadores apontam que em 1990 apenas 10% dos resíduos gerados eram encaminhados para aterros sanitários, contra um percentual de 36% em 2000. Já a quantidade de resíduos levada para lixões caiu de 76% para 21% neste mesmo período. O aumento da conscientização ambiental em conjunto com

legislações mais rígidas são os maiores aliados na luta contra a disposição inadequada de resíduos.

### 2.1.2. Composição e Propriedades

A composição do resíduo gerado em um município é o que comanda todo o comportamento geomecânico, bem como todas as reações bioquímicas, que ocorrem em uma massa de lixo. A caracterização dos resíduos sólidos consiste em identificar os diversos materiais que o compõe e determinar suas propriedades. Deve ser levado em conta o fato de que a composição varia ao longo do tempo, isto é, o resíduo recém-coletado apresenta características diferentes daquele já disposto. Isto ocorre devido aos processos físicos e biológicos, como compactação e a biodegradação, os quais o resíduo sofre.

Os procedimentos de caracterização são de extrema importância neste estudo e, portanto, serão discutidos com profundidade no Capítulo 3. O Brasil possui mais da metade dos seus resíduos composta por matéria orgânica, enquanto países como Estados Unidos e Japão não apresentam parcela significativa deste rejeito destinada ao aterro. A Figura 2.2 apresenta gráficos com a composição física dos resíduos provenientes de regiões mundiais e a Figura 2.3 a composição resultante da coleta seletiva de algumas cidades do país.

No que diz respeito às dimensões das partículas, podem ser aplicados procedimentos conhecidos e utilizados pela mecânica dos solos, porém eles são executados com extrema dificuldade. Dados obtidos por Jessberger (1994) através de um método próprio para a determinação da curva granulométrica de RSU apontam para uma tendência de maior quantidade de material fino com o aumento da idade dos resíduos. Por ser um material extremamente heterogêneo, a dimensão das partículas dos resíduos se estende por faixas amplas, com distribuição típica próxima à dos cascalhos, com menos de 20% de finos (Marques, 2001).

Dentre as propriedades físicas dos resíduos, as mais importantes do ponto de vista da engenharia são (Sharma e Lewis, 1994, Silveira, 2004): porosidade total, umidade, capacidade de campo, coeficiente de permeabilidade, peso específico, composição gravimétrica, resistência e compressibilidade. A seguir, as propriedades supracitadas serão discutidas em detalhes.

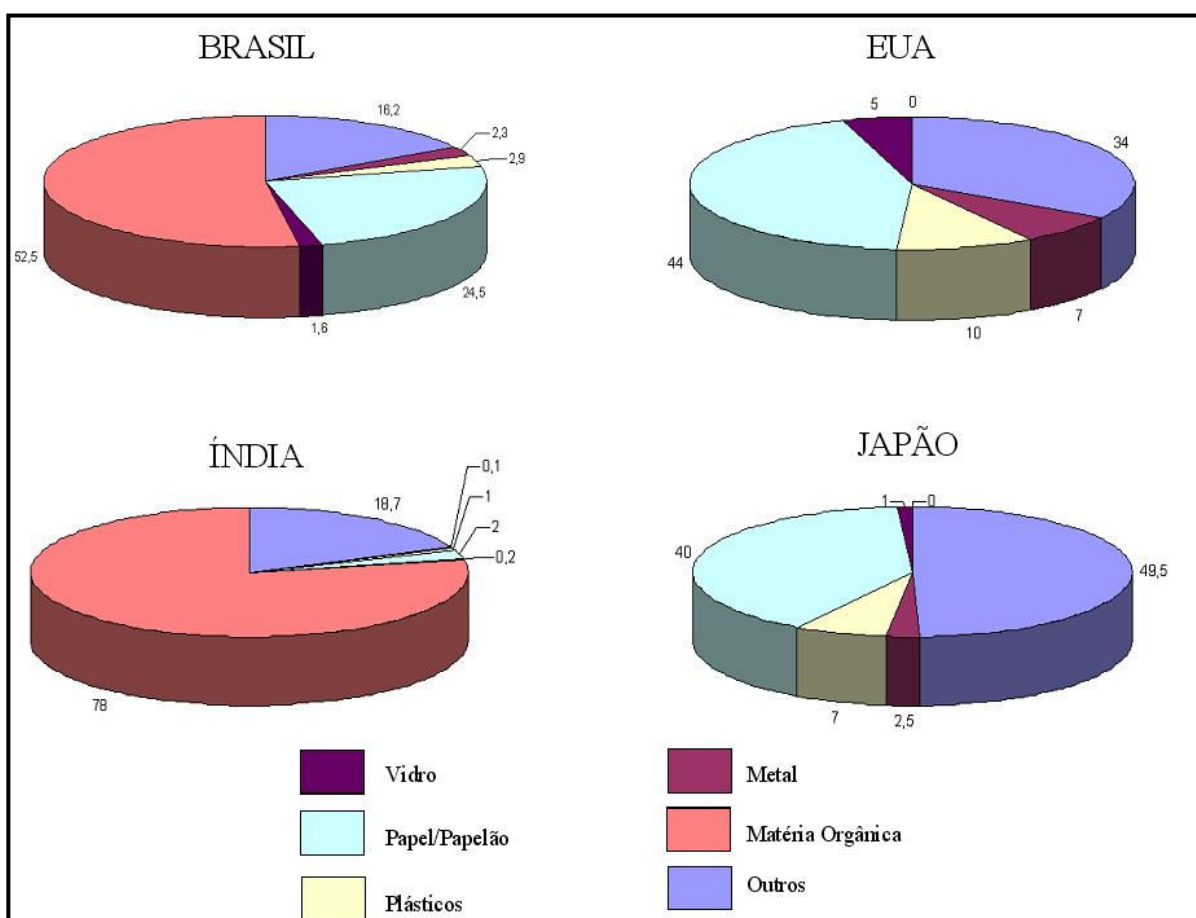


Figura 2.2: Composição percentual média do resíduo domiciliar de alguns países (modificado de IPT/CEMPRE, 2000).

#### 2.1.2.1. Porosidade

A porosidade ( $n$ ) pode ser relacionada ao índice de vazios ( $e$ ), através da relação  $n = e/(1 + e)$ , e para um grau de saturação de 100% é definida como sendo a relação entre o volume de água e o volume total. Para RSU um valor típico de porosidade é 0,67 (Sharma e Lewis, 1994). Para fins de comparação, a porosidade de uma camada de solo compactado é de cerca de 0,40.

#### 2.1.2.2. Umidade

O teor de umidade de uma massa de resíduos é fortemente influenciado pelo teor de matéria orgânica contido na mesma, pelas condições climáticas, pela estação do ano e pela eficiência dos sistemas de drenagem interna de líquidos e percolados do aterro. O teor de umidade de um aterro sanitário pode ser atribuído, em primeiro lugar, ao teor de matéria orgânica, uma vez que materiais inorgânicos apresentam umidade abaixo de 10%. A consequência direta

deste fato é uma tendência ao aumento da umidade de acordo com o aumento do teor de matéria orgânica (Knochenmus *et al.*, 1998).

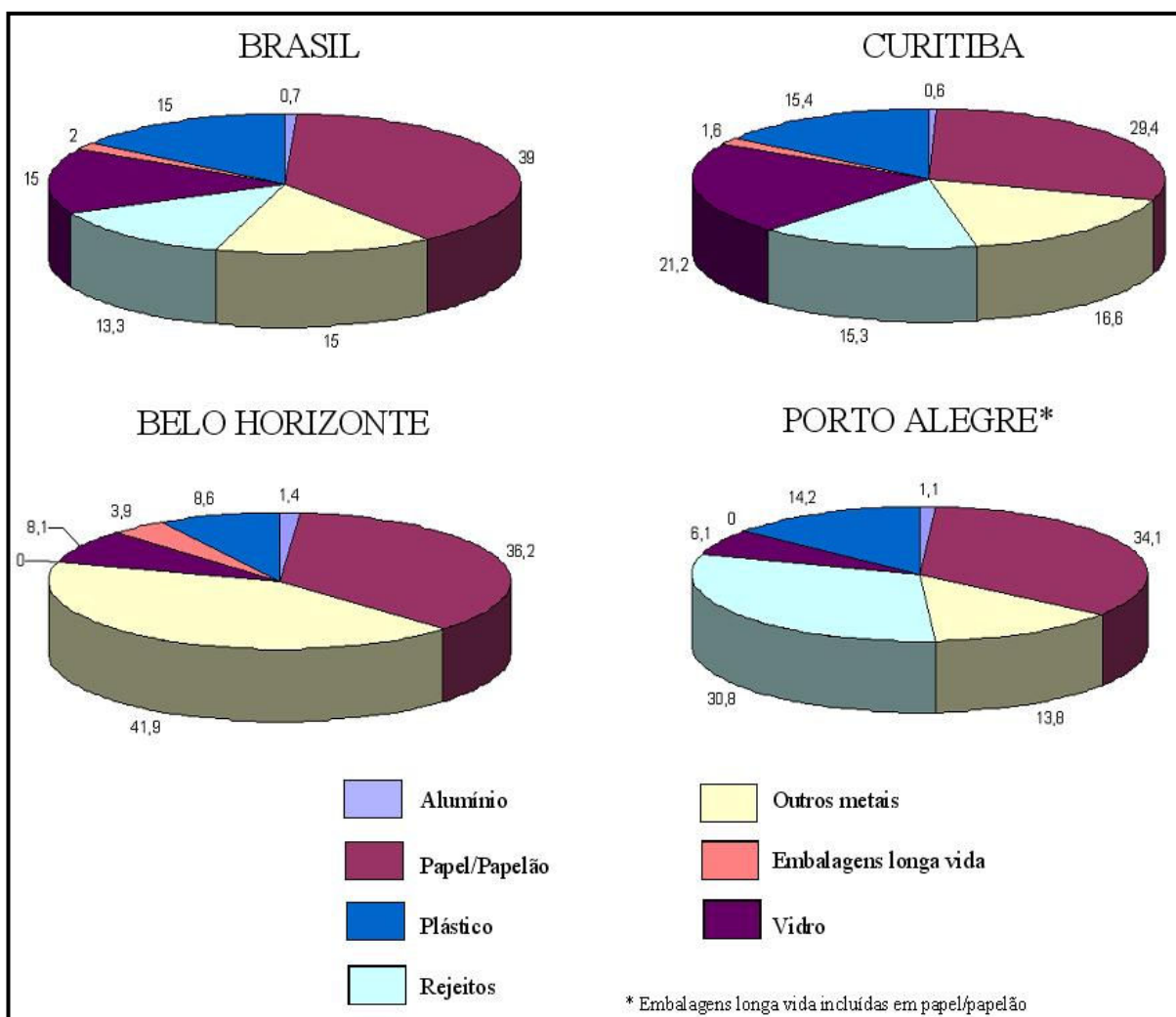


Figura 2.3: Composição percentual média em programas de coleta seletiva (baseado em: IPT/CEMPRE, 2000).

Tchobanoglous *et al.* (1993) relatam que o teor de umidade de RSU varia entre 15 e 40%, sendo que um valor típico para este parâmetro é de 25%. Ao avaliar valores de teor de umidade é necessário lembrar que as camadas de resíduo são usualmente separadas por uma camada de solo, que em geral apresentam teor de umidade bem inferior que a do resíduo em si. Cabe ressaltar, que como todas as propriedades de RSU, a umidade também é muito sensível a mudanças climáticas e sócio-econômicas. Recomenda-se, então, muito critério ao utilizar valores de referência determinados em regiões com características muito distintas daquela em que se está trabalhando.

### 2.1.2.3. Capacidade de Campo

A capacidade de campo é definida como sendo o conteúdo volumétrico de água após um longo período de drenagem, o que consiste na água que ficou retida nos poros do resíduo. Em RSU, um valor típico da capacidade de campo é 0,224, enquanto que para uma argila compactada, por exemplo, este valor é de 0,356 (Sharma e Lewis, 1994). Segundo Calle (2007) a capacidade de campo pode ser influenciada por diversos fatores, entre eles: estrutura dos resíduos, teor de matéria orgânica, seqüência de horizontes pedogênicos, teor de umidade inicial e altura da lâmina d'água.

### 2.1.2.4. Permeabilidade

A permeabilidade é uma propriedade de grande relevância em um aterro de resíduos, principalmente no que diz respeito ao dimensionamento e operação dos sistemas de coleta de gases e lixiviado. Esta propriedade pode ser medida tanto através de ensaios laboratoriais como em ensaios *in situ* e depende da forma de disposição, grau de compactação, pressão de sobrecarga, composição e idade do RSU e, portanto, deve ser determinada em cada caso, sempre que for necessário. A faixa de variação desta propriedade é extremamente ampla, mas encontra-se na ordem de  $10^{-3}$  cm/s (Manassero *et al.*, 1996), podendo ser comparada à permeabilidade encontrada em areias muito finas ou em areias contendo material granular fino (Knochenmus *et al.*, 1998).

### 2.1.2.5. Massa Específica

A massa específica dos RSU depende da composição da massa de resíduos, do estado de decomposição, do grau de compactação, da espessura da camada de resíduo e da cobertura. É determinada como sendo a massa dos resíduos em função do volume por eles ocupados e sua determinação é fundamental para o dimensionamento de equipamentos e instalações. É uma propriedade variável ao longo do tempo, pois os processos de degradação e compressão alteram seus valores (SILVEIRA, 2004). A determinação *in situ* da massa específica é de difícil execução e pode apresentar elevada dispersão de resultados.

O método mais simples e confiável para determinar a massa específica (ou o peso específico) consiste na escavação de um poço ou trincheira, com a pesagem do material e determinação do volume a partir do preenchimento da cava (Marques, 2001). Devido aos processos de adensamento e compressão do maciço sob efeito das cargas sobrejacentes, a massa específica

tende a aumentar com a profundidade Segundo Mota (2000) é usual adotar valores de massa específica da ordem de 200 a 300 kg/m<sup>3</sup>.

#### 2.1.2.6. Temperatura

A temperatura dentro de uma massa de resíduos é de fundamental importância, principalmente no que concerne à atividade microbiótica. Os microorganismos que promovem a biodegradação são sensíveis a mudanças bruscas de temperatura, e atuam em uma faixa ótima. O valor da temperatura ao longo da profundidade pode ser medido através de termômetros digitais colocados em tubos dispostos no aterro. Calle (2007) apresenta valores de temperatura que chegam aos 60 °C em uma profundidade de 20m, independente da temperatura ambiente. Marques (2001) cita resultados que incluem valores entre 40 e 60 °C a pequenas profundidades em um aterro situado na Grécia, e valores entre 31 e 38 °C para profundidades entre 4 a 6 m, e 42 e 59 °C em profundidades da ordem de 30 m no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo.

As temperaturas mais elevadas são atribuídas ao processo de decomposição aeróbia (60 a 70 °C), enquanto temperaturas na faixa de 50 °C podem ser atribuídas à fase anaeróbia do processo de degradação. Desta forma, existe a possibilidade de avaliar o estágio de decomposição dos resíduos através da determinação da temperatura, o que pode ser muito interessante frente à possibilidade do reaproveitamento da área após o fechamento do aterro.

#### 2.1.2.7. Composição Gravimétrica

É a relação entre o peso de cada componente presente na amostra e o peso total da amostra, e segundo Boscov (2006) é umas das características que mais influenciam nas propriedades geomecânicas dos RSU. As Figuras 1.2 e 1.3 apresentaram um panorama geral da composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil e no mundo. É com base na composição gravimétrica que se determina o teor de matéria orgânica, parâmetro importante frente aos projetos de drenagem de gases e percolados e também na previsão de recalques.

#### 2.1.2.8. Resistência ao Cisalhamento

Parâmetros de resistência são muito difíceis de serem medidos, devido à heterogeneidade do material e da representatividade das amostras coletadas. Machado *et al.* (2006) apontam que a maior parte dos dados de resistência constantes na literatura provém de países temperados, cujas características dos resíduos são muito diferentes daquelas encontradas em países



tropicais como o Brasil. Mesmo com as dificuldades apontadas, considera-se que a resistência ao cisalhamento de maciços sanitários é função de um ângulo de atrito interno e de uma coesão, que são definidos a partir de uma envoltória de Mohr-Coulomb. Tanto a coesão como o ângulo de atrito interno, podem ser estimados por retroanálises de ruptura e ensaios de campo e laboratório.

Em laboratório os parâmetros de resistência podem ser determinados a partir de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais em dispositivos de grande dimensão. Nestes ensaios não é possível identificar claramente o estado de ruptura, pois os RSU são materiais capazes de atingir grandes deformações sem romper mesmo para elevadas tensões. Faz-se necessário, portanto, admitir um critério de ruptura para definir parâmetros de resistência em uma faixa de deformação aceitável. Marques (2001) observa que o ângulo de atrito máximo é mobilizado para deformações menores ou iguais a 20%, mas a coesão, por outro lado, necessita de deformações bem maiores para sua mobilização, não sendo possível determinar um valor que caracterize a condição limite do material.

Embora os resíduos sejam considerados materiais quase integralmente granulares, logo após o lançamento dos RSU no aterro percebe-se a presença de um intercepto coesivo, o qual é devido aos componentes fibrosos do RSU. Em maciços aonde este efeito de reforço não é constatado, a umidade passa a ser o fator de maior influência para a resistência ao cisalhamento, sendo que o aumento no teor de umidade reduz significativamente a coesão do material. A literatura relata uma ampla variação dos parâmetros de resistência: para a coesão, valores que vão de 10 a 60 kPa e para o ângulo de atrito, valores de 18 a 49° (Boskov, 2006).

É possível também obter parâmetros de resistência através de ensaios *in situ*, em geral realizados através de ensaios penetrométricos do tipo SPT e CPT ou por pressiômetros. Os resultados constantes da literatura apresentam grande dispersão, o que torna a interpretação dos dados muito complexa. Os ensaios SPT são dificultados pela presença de materiais muito resistentes e atualmente não existe uma correlação entre o número de golpes ( $N_{SPT}$ ) e a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos. Ensaios sísmicos permitem a obtenção de propriedades dinâmicas e podem ser utilizados para o reconhecimento e caracterização de aterros sanitários. Parâmetros de resistência obtidos por retro-análises, por sua vez, devem ser interpretados com cautela, pois é possível existir diversas combinações de parâmetros que satisfaçam a condição de equilíbrio.

### 2.1.2.9. Compressibilidade e Recalques

Vários são os fatores que influenciam os mecanismos de recalque, entre eles pode-se citar: densidade e índice de vazios iniciais, composição do aterro, processos de compactação, idade e altura do aterro, teor de matéria orgânica, histórico de tensões, produção e drenagem de líquidos e gases, atividade de solidificação do resíduo compactado, e ainda de fatores ambientais como umidade e temperatura (Boscov 2006, Comoulos e Koryalos 1997, Jiangying *et al.* 2004).

É comum dividir os recalques observados em aterros sanitários independentemente dos mecanismos que os provocam. Geralmente esta divisão é feita de maneira análoga à observada na mecânica dos solos clássica, ou seja, em três fases ao longo do tempo, como segue (Jiangying *et al.*, 2004; Simões e Campos, 1998; Wall e Zeiss 1995): compressão inicial, compressão primária e compressão secundária. A compressão inicial ocorre imediatamente após a aplicação de uma carga, e está associada à redução do índice de vazios e do tamanho das partículas. Esta forma de recalque é análoga à compressão elástica que ocorre em solos e é virtualmente instantânea (Wall e Zeiss, 1995).

A compressão primária resulta da rápida dissipação das poro-pressões de água e de gases. Em geral, este tipo de recalque ocorre até 30 dias após a aplicação de uma carga (Boscov, 2006). Simultaneamente à compressão primária ocorre a compressão secundária, porém os efeitos desta última são mascarados durante a fase inicial, devido ao fato da magnitude da compressão primária ser maior em relação à secundária. Acredita-se que o aumento da umidade afeta diretamente os recalques iniciais e primários, uma vez que altera o módulo de elasticidade dos resíduos e aumenta o peso da massa de resíduos e a tensão efetiva do maciço (Wall e Zeiss, 1995). Já a compressão secundária está associada à lenta e gradual biodegradação dos resíduos e ao *creep*. Esta fase pode durar décadas, e segundo Boscov (2006) é a responsável pela maior parcela dos recalques em aterros sanitários. Durante a compressão secundária o processo de biodegradação faz com que parcelas de material sólido sejam convertidas em líquidos e gases que, uma vez drenados para fora do aterro, provocam recalques consideráveis. Park e Lee (2002) afirmam que a idade do aterro é de fundamental importância para este mecanismo, assim como a umidade e a temperatura. Jucá (2003), afirma que também influenciam neste processo fatores como composição dos resíduos, fluxo de umidade e grau de compactação inicial. A compactação inicial, por exemplo, permitirá um

maior ou menor fluxo de umidade no interior do maciço, o que influencia a biodegradação e, conseqüentemente, os recalques.

O fenômeno de compressão secundária é de particular interesse, pois age em longo prazo e resulta em significativas diminuições na altura do aterro. Park e Lee (2002) relatam que os recalques de longo prazo podem ser divididos em duas fases distintas, como segue: uma fase inicial, na qual os recalques são dominados por interações mecânicas, como por exemplo, compressões tardias e reorientações de longo prazo; e uma fase final, na qual as taxas de compressão são maiores por causa da inclusão dos efeitos da biodegradação. Nesta fase, eventuais aumentos na umidade do maciço podem aumentar a compressão mecânica, devido ao próprio peso da água, estimular a biodegradação, e ainda promover o rearranjo das partículas, induzindo assim, mais recalques.

#### 2.1.2.10. Tamanho dos Grãos e Curva Granulométrica

Curvas granulométricas já são bem conhecidas pela Geotecnia Clássica, e têm se mostrado uma ferramenta interessante para o estudo da Geotecnia Ambiental. A heterogeneidade da massa de resíduos faz com que uma única determinação do tamanho dos grãos possa levar a graves erros. Sendo assim, o tamanho das partículas de cada material deve ser avaliado de maneira individual, e então, de acordo com a percentagem gravimétrica do resíduo, obtém-se uma estimativa da granometria geral. A Tabela 2.1 apresenta valores para o diâmetro das partículas de diferentes tipos de materiais encontrados na massa de RSU. Tendo em mãos a gravimetria do resíduo e os respectivos diâmetros dos grãos é possível traçar curvas granulométricas que representem a distribuição dos resíduos em função de suas dimensões.

## 2.2. PRINCIPAIS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Sabe-se que o material depositado em um aterro sanitário não é inativo, e sob influência de agentes naturais como a chuva, mudanças de temperatura e ações de microorganismos, torna-se objeto de evoluções complexas, constituídas de sobreposições de mecanismos físicos, químicos e biológicos. Dentre esses processos, pode-se citar a dissolução de minerais e o carreamento desse material através dos vazios e partículas finas e a biodegradação da matéria orgânica (Castilhos Jr. *et al.*, 2003). Como resultado têm-se os principais elementos poluidores de um aterro sanitário: o biogás e o chorume. A seguir, serão descritos os

fenômenos biológicos, físicos e químicos que resultam na biodegradação em um aterro sanitário. Cabe ressaltar que não se pretende esmiuçar aspectos técnicos que envolvem conceitos avançados de bioquímica, e sim apenas apresentar esses fenômenos com suas principais características.

Tabela 2.1: Diâmetro de partículas de materiais encontrados em RSU.

<b>Material</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>
Papelão	431,8
Papel	292,1
Plástico	203,2
Borracha	177,8
Tecido	139,7
Couro	127,0
Madeira/Metal	121,9
Vidro	101,6
Resíduos Alimentares	88,9
Podas Vegetais	76,2
Outros	38,1

Fonte: Oliveira (1994)

### 2.2.1. Mecanismos Físico-Químicos de Degradação

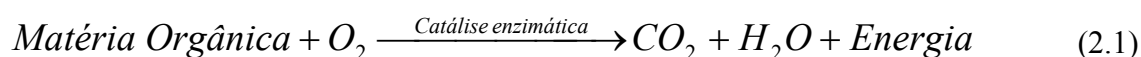
Os elementos minerais presentes na massa de RSU são objetos de processos físico-químicos de dissolução que podem, ou não, serem estequiométricas. A dissolução estequiométrica é definida como sendo a dissolução de uma substância sólida originando um soluto cuja composição é idêntica àquela do sólido dissolvido. A não estequiométrica, por outro lado, origina um soluto quimicamente alterado, com características diferentes do sólido dissolvido. A cinética do processo de dissolução é influenciada pelas características das partículas sólidas, e também pela composição da solução.

### 2.2.2. Mecanismos Biológicos de Degradação

Os mecanismos biológicos de biodegradação em um aterro sanitário ocorrem através da ação de microorganismos heterotróficos, que oxidam substratos orgânicos para suprir suas necessidades energéticas. Tais microorganismos podem, ou não, serem tolerantes à presença de oxigênio, o que condiciona o desenvolvimento de diferentes espécies ao meio.

#### 2.2.2.1. Degradação Aeróbia

Em meio aeróbio os microorganismos se desenvolvem em presença de oxigênio molecular, ou em poucos casos incorporado a elementos minerais, e são basicamente bactérias, leveduras e fungos. O meio pode ser considerado aeróbio durante a disposição dos resíduos e logo após a cobertura, quando ainda observa-se pequena quantidade de oxigênio aprisionado à célula de resíduo. É nesta fase que se inicia a primeira fase do processo de biodegradação, na qual a matéria orgânica é submetida à ação de enzimas, resultando em uma reação exotérmica, que libera água e CO<sub>2</sub>, como mostra a Equação 2.1.



A degradação aeróbia é relativamente curta, dura em média cerca de 30 dias após a disposição do rejeito no aterro. Devido ao fato de ser um processo exotérmico, o material submetido a esta etapa da biodegradação encontra-se em temperatura superior à ambiente. Os lixiviados formados nesta fase apresentarão altas concentrações de sais solúveis.

#### 2.2.2.2. Degradação Anaeróbia

Como foi dito anteriormente, a presença de oxigênio na massa de resíduos é observada por pouco tempo, e conforme a quantidade de oxigênio vai diminuindo começam a surgir microorganismos facultativos, ou seja, que sobrevivem em presença ou ausência de O<sub>2</sub>. Esses microorganismos serão responsáveis por converter a matéria orgânica particulada, como celulose e materiais putrescíveis, em compostos dissolvidos, em um processo denominado *hidrólise*. Em uma segunda etapa, já na ausência completa de oxigênio, os microorganismos anaeróbios estritos obtêm energia através da transformação da matéria orgânica hidrolisada. Esta fase pode durar anos, e produz compostos orgânicos simples de alta solubilidade como os ácidos graxos voláteis, fenômeno conhecido por *acidogênese*.

Em uma terceira fase, os ácidos graxos produzidos se misturam com o líquido que percola pela massa de resíduos, fazendo com que seu pH reduza para valores entre 4 e 6. Esta redução do pH favorece o aparecimento de maus odores, pois promove a liberação de gás sulfídrico e amônia. Os lixiviados produzidos aqui apresentam alto teor de matéria orgânica, resultando em valores de DBO da ordem de 10 g/L. A quarta e última fase ocorre quando bactérias metanogênicas consomem compostos orgânicos simples, formando gás metano e carbônico. Nesta fase o pH está próximo do neutro, em valores entre 6,6 e 7,3. As bactérias metanogênicas são muito sensíveis à mudanças de pH, o que faz com que qualquer acúmulo de ácidos possa prejudicar a decomposição desta fase. Castilhos Jr. *et al.*(2003) atentam para o fato de que embora o processo anaeróbio de biodegradação possa ser dividido em quatro etapas distintas, na prática elas não são tão bem definidas. Isto porque o aterramento contínuo de resíduos promove variação na idade do material, proporcionando o aparecimento de duas ou mais fases simultaneamente.

### 2.3. FORMAS DE DISPOSIÇÃO DE RSU

Os resíduos sólidos urbanos podem ser dispostos no solo, submetidos a processos térmicos, compostagem ou ainda reaproveitados. A disposição no solo é a mais comum, e pode ser efetuada por meio de lixões, aterros controlados e aterros sanitários. Processos térmicos são menos comuns, pois são dispendiosos e geralmente utilizados para tratar resíduos perigosos. O reaproveitamento pode ocorrer por meio de reuso, reciclagem e compostagem. As tecnologias de reaproveitamento de resíduos vêm se aprimorando muito, e a quantidade de estudos dedicada a esse tema vêm aumentando significativamente. A Figura 2.4 apresenta a evolução da destinação final dos resíduos sólidos no Brasil (Jucá, 2003). A seguir serão apresentadas as principais formas de deposição de resíduos no Brasil.

#### 2.3.1. Lixões

Os lixões consistem em uma forma completamente inadequada de disposição de resíduos, infelizmente ainda utilizada, mas com tendências de extinção. Nos lixões, os resíduos são lançados livremente nos solos, sem nenhum cuidado com controle de poluição, contaminação de solos, proliferação de vetores e invasão de catadores. Apesar de constituírem uma prática completamente inadequada de disposição, os lixões são institucionalizados e autorizados pelas prefeituras, sob a alegação de ser a única solução viável. A Figura 2.5 apresenta uma

fotografia de um lixão em Curitiba, e a Figura 2.6 ilustra a ação incontrolada de catadores nestes locais.

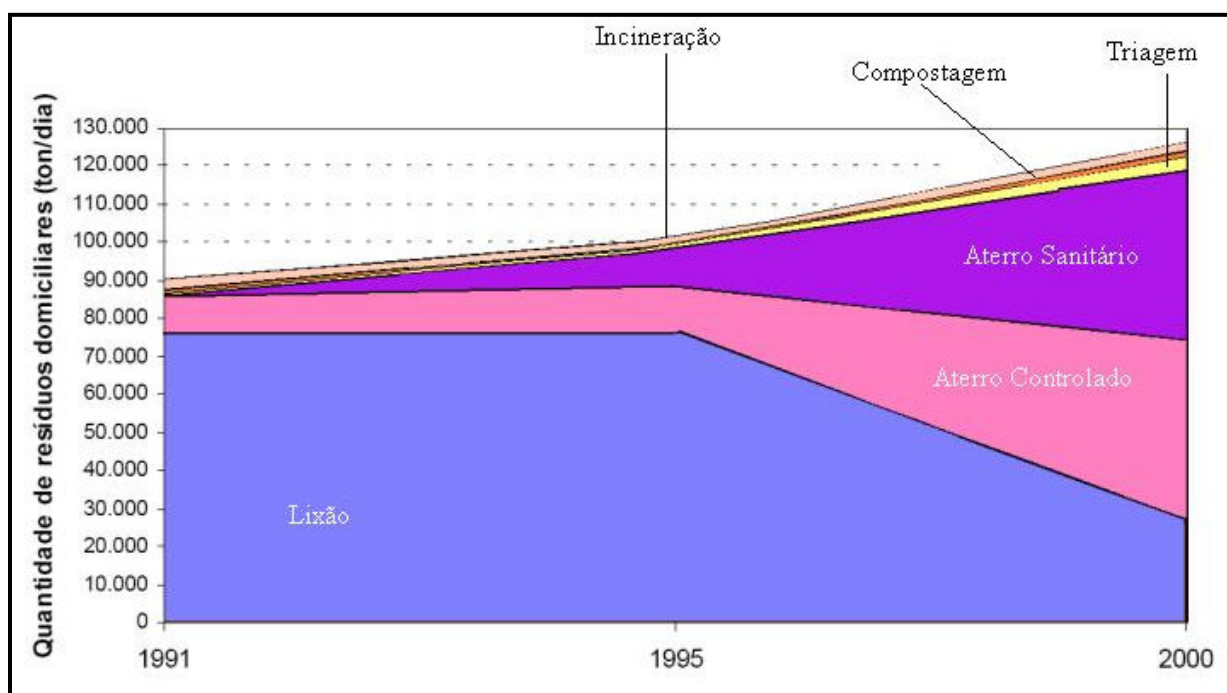


Figura 2.4: Evolução da disposição de resíduos sólidos no Brasil (modificado de Jucá, 2003).

### 2.3.2. Aterros Controlados

Aterros controlados são processos de disposição nos quais algumas medidas de precaução são tomadas. Existe a colocação de camadas de cobertura e sistemas rudimentares de impermeabilização de solos, desta forma existe um controle na proliferação de vetores e mau cheiro. Eventualmente podem apresentar controle de entrada e saída de pessoas e animais, mas em geral não existe preocupação com drenagem de gases e líquidos. É uma técnica mais adequada que os lixões, não substitui os aterros sanitários, sendo adotada por 13% dos municípios brasileiros (Bidone e Povinelli, 1999).

### 2.3.3. Aterros Sanitários

Os aterros sanitários constituem-se na forma mais adequada de disposição de resíduos sólidos no solo. Em uma situação ideal, este tipo de obra deveria apenas receber os rejeitos que não são passíveis de reciclagem e compostagem, mas a cultura brasileira ainda não está condicionada a encaminhar corretamente seus resíduos. Sendo assim, nos aterros brasileiros é

possível encontrar todos os tipos de rejeitos, desde matéria orgânica, recicláveis, carcaças de animais mortos, pneus, etc...



Figura 2.5: Fotografia do lixão da Cachimba, Curitiba/PR (ONDARPC, 2006).

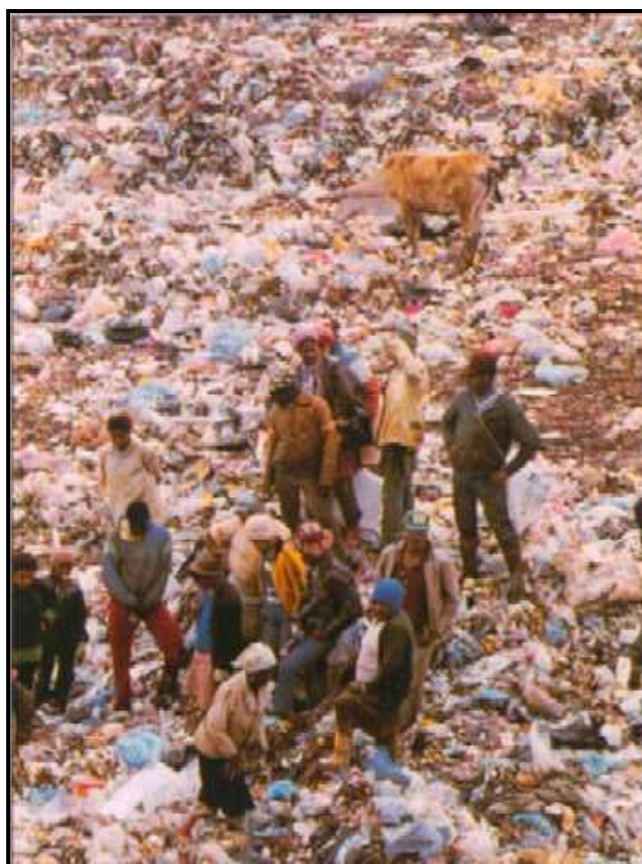


Figura 2.6: Ação de catadores em lixões (USP, 2006).



As vantagens desta forma de disposição estão no fato de que os aterros são construídos seguindo critérios de engenharia e normas operacionais, proporcionando um confinamento seguro aos resíduos destinados e um impacto mínimo ao ambiente. São obras complexas que exigem projetos de impermeabilização, drenagem de líquidos e gases, estruturas de apoio, monitoramento geotécnico e ambiental e equipamentos de compactação. Um bom resumo de todos os aspectos de um projeto de aterro sanitário é apresentado por Azambuja (2006).

Em um aterro sanitário, a obra desenvolve-se concomitantemente com a operação. Desta maneira, enquanto uma área está sendo preparada para receber os resíduos, uma outra já os está recebendo, e possivelmente existe uma primeira área que já encerrou suas atividades e está sendo recuperada. Várias são as exigências impostas por norma para a implementação de um projeto de aterro de resíduos. Tais exigências vão desde a altura do lençol freático no terreno escolhido, até questões de facilidade de acesso e aceitação da população vizinha. Todas estas exigências estão na norma brasileira ABNT NBR 8419/1992. A Figura 2.7 apresenta um esquema de um projeto de aterro sanitário com suas três fases possíveis de operação.

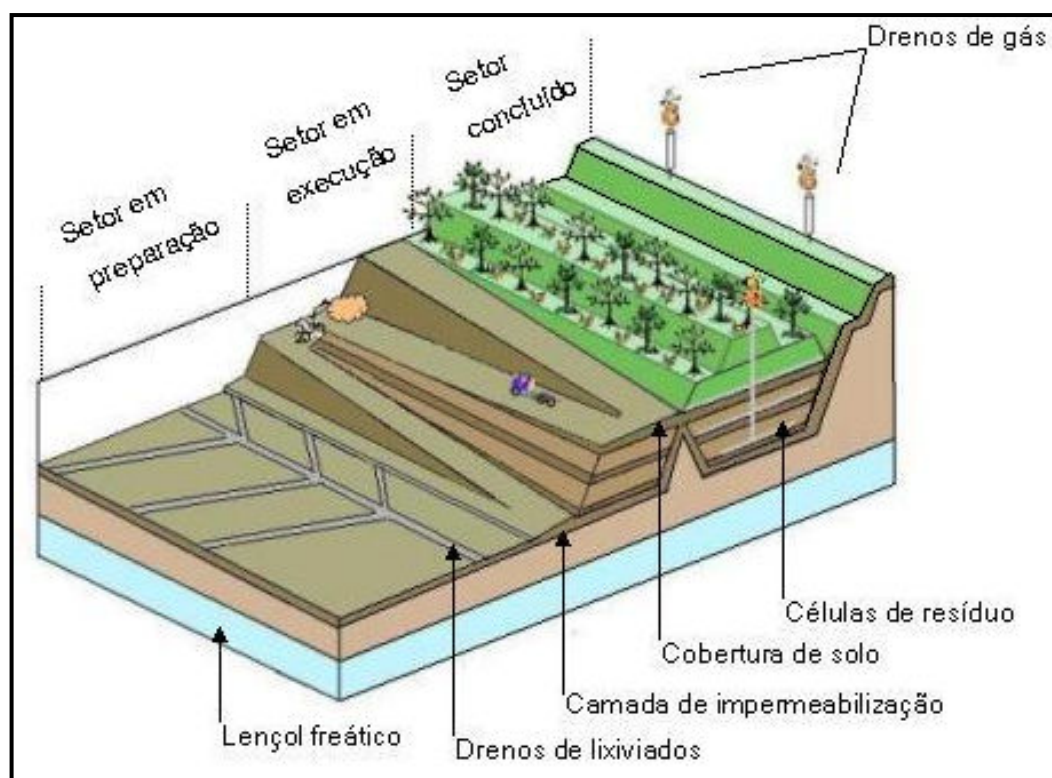


Figura 2.7: Reprodução de um aterro sanitário, apresentando as três fases de implantação do projeto (modificado de Braga *et al.*, 2002).

#### 2.2.4. Incineração

A incineração é um processo de combustão térmica, no qual visa-se reduzir o volume e o peso do resíduo, diminuindo também suas características de periculosidade. A redução de volume final geralmente é da ordem de 90%, tendo como rejeito as cinzas, que são encaminhadas para aterros. É uma técnica bastante interessante já que reduz significativamente a quantidade de resíduos disposta em aterros, porém deve ser um procedimento continuamente controlado, devido ao processo da queima que emite gases tóxicos à atmosfera.

Devido aos cuidados com a poluição atmosférica, o processo de incineração torna-se caro, e muitas vezes inviável financeiramente. No Brasil, esta técnica é utilizada em larga escala apenas para o tratamento de resíduos perigosos e de serviço de saúde, e devido aos grandes questionamentos em relação ao potencial poluidor da técnica, a incineração vem sendo gradativamente proibida no mundo.

#### 2.2.5. Compostagem

Segundo Bidone e Povinelli (1999), “a compostagem é um processo biológico aeróbio e controlado de transformação de resíduos orgânicos em resíduos estabilizados, com propriedades completamente diferentes do material que lhe deu origem”. Em outras palavras, o processo de compostagem consiste em submeter a matéria orgânica à um tratamento biológico, no qual a fração orgânica é decomposta e transformada em um composto rico em nutrientes, diferente da matéria orgânica inicial lançada.

Em geral este procedimento é feito em pátios, aonde o material é disposto em montes cônicos, denominados leiras. Através do acompanhamento e correção da umidade e temperatura das leiras, obtém-se que os microorganismos decomponham a matéria orgânica, dando origem a uma substância escura, uniforme e rica em nutrientes denominada húmus. O húmus é o produto final, que pode ser comercializado como aditivo nos solos, atuando como adubo e fonte de nutrientes.

#### 2.2.6. Reciclagem

São muitos os benefícios gerados através da reciclagem de resíduos. O principal é o a conservação de recursos naturais aliada ao melhor aproveitamento do espaço disponível em um aterro sanitário. Porém, Tchobanoglous *et al.* (1993) lembram que a coleta e o transporte

do material a ser reciclado requerem energia e mão de obra, o que exige que a maior parte dos programas de reciclagem seja subsidiada economicamente. A cultura da reciclagem de resíduos está sendo continuamente inserida no cotidiano das pessoas, e no Brasil cada vez mais é possível optar por adquirir produtos recicláveis, como materiais de escritório e móveis, e até mesmo apreciar obras de arte feitas com este tipo de material.

Em uma massa de resíduos sólidos urbanos existe uma infinidade de materiais que podem ser reciclados, voltando ao ciclo comercial, agregando valor, gerando empregos e contribuindo com o desenvolvimento sustentável. O exemplo mais bem sucedido de material reciclado é o das latas de alumínio, que no Brasil têm uma taxa de reaproveitamento de 96,2% (Abralatas, 2007). Outros exemplos de materiais recicláveis encontrados no RSU são: garrafas PET, vidro, papel, papelão, plásticos em geral, metais etc... No Brasil, alguns municípios já apresentam sistema de coleta seletiva, que agregado a campanhas educativas e programas especiais, cumpre um importante papel para a sociedade e para o meio ambiente. Neste contexto ainda há muito a ser feito, principalmente no que concerne à educação ambiental da população. O cidadão deve passar a considerar a separação de resíduos em sua residência como uma tarefa rotineira, e não apenas como uma alternativa utilizada por poucos.

### 2.3.7. Plasma Térmico

O plasma térmico é uma tecnologia utilizada com sucesso em atividades industriais como, por exemplo, na produção do aço e tem sido estudada para ser utilizada na destruição de resíduos. No Brasil, o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo) é o pioneiro nesta frente de pesquisa. O plasma térmico, também conhecido por plasma químico ou industrial, é um gás ionizado a partir de temperaturas extremamente elevadas (cerca de 15000 °C), considerado uma alternativa segura e definitiva para o tratamento de resíduos. O processamento de plasma gera subprodutos completamente inertes e os gases passam por um completo sistema de purificação. Esta técnica é extremamente interessante, pois os resíduos tratados são convertidos em gases com alto poder energético, inerte e economicamente utilizável. A Figura 2.8 ilustra o esquema do primeiro plasma térmico construído nos Estados Unidos, e atualmente o maior do mundo (Civil Engineering, 2006).

No equipamento esquematizado pela Figura 2.8 o RSU será transportado para uma das seis cúpulas que possuem o interior de cerâmica e a parte externa de aço, e depois será imerso em água. Seis lanternas de plasma criarão arcos artificiais de luz em cada cúpula, que serão

aquecidas em temperaturas superiores à superfície solar. A alta temperatura transformará o RSU em um material líquido ou gasoso. Cabe ressaltar que o plasma térmico não é um processo de combustão e sim um processo de redução química. O gás formado sairá da câmara com temperatura em torno de 1200 °C e será transportado para um lavador de gás. Depois de limpo o gás é encaminhado para um gerador de turbina elétrica, que será usado para aumentar a gaseificação. Como produto haverá um líquido super-aquecido que será resfriado até alcançar uma forma sólida vítrea que será quebrada em grãos. Os grãos são inertes e podem posteriormente ser utilizados como agregados de concreto.

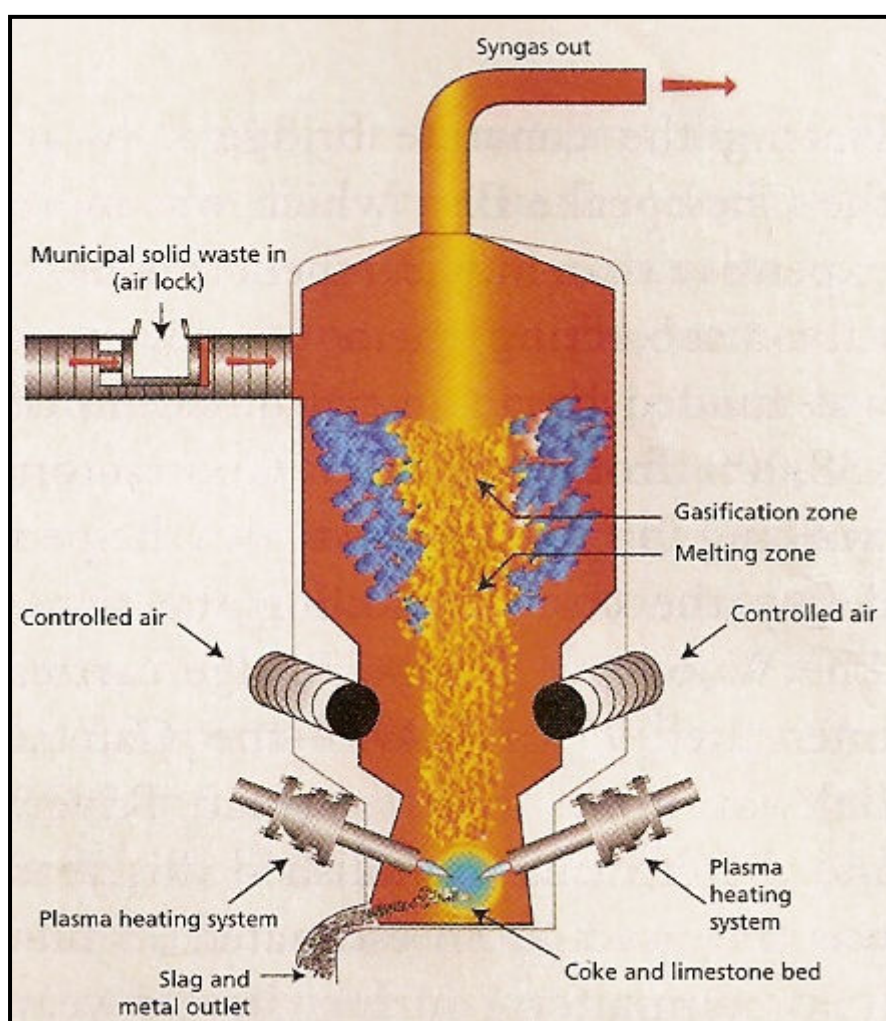


Figura 2.8: Planta de um equipamento plasma térmico (Civil Engineering, 2006).

### **3. ATERROS SANITÁRIOS**

#### **3.1. ASPECTOS GERAIS**

No Capítulo 2 os aterros sanitários foram descritos como a maneira mais apropriada de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, e também uma alternativa economicamente viável para países como o Brasil. Para Azambuja (2006), os aterros são atualmente “(...) considerados complexos sistemas estruturais, que conjugam uma série de materiais pré-fabricados com diferentes funções, com materiais naturais e com substratos apropriados que tem como objetivo organizar e manter os materiais inservíveis ao homem em condições ambientais controladas”. Por se tratar de uma obra complexa e de grande interesse sócio-ambiental, neste capítulo serão discutidos com maior profundidade questões operacionais e técnicas relevantes aos aterros sanitários.

O aterro sanitário é uma obra geotécnica na qual a obra caminha em conjunto com o empreendimento, pois a construção da obra é realizada através da operação do aterro. Boscov (2006) lista as principais funções de um engenheiro geotécnico em um aterro sanitário como sendo: estudo da estabilidade de taludes e escavação de jazidas para o empréstimo de solo; projetos das fundações das estruturas de apoio (escritório, banheiros, galpões); projeto do sistema de impermeabilização e estudo da geomecânica dos resíduos.

O primeiro passo a ser dado frente à necessidade de se construir um aterro sanitário é o levantamento dos dados da região, que servirá de base para a escolha do tipo de sistema de operação a ser adotado, e também para todo o controle e monitoramento da operação do empreendimento. O levantamento dos dados leva em conta as características da região a ser atendida pela obra, como dados sobre a população, atividades sócio-econômicas e serviços de saneamento básico. O número de habitantes e a previsão do crescimento populacional, em conjunto com o poder aquisitivo e grau de escolaridade definem o tipo de comunidade que será atendida, e conseqüentemente o tipo de resíduo que será gerado.

Na fase de levantamentos preliminares é necessário ainda um diagnóstico do gerenciamento de resíduos que está sendo seguido na região, e todas as etapas desde a geração até o destino final devem ser levantadas. Segundo Gomes e Martins (2003) nesta etapa são fundamentais informações sobre a geração per capita de resíduos, composição gravimétrica e serviços de limpeza pública. Devem ser detalhados, com o maior grau possível aspectos relativos à geração dos resíduos, aos serviços de varrição, coleta, transporte, tratamento e seu destino final. A partir destas informações, será possível definir o sistema adequado de disposição final, e então, segue-se com aspectos diretamente relacionados com o projeto do aterro, listados a seguir. Cabe ressaltar que os aspectos legais da obra de um aterro sanitário estão descritos na NBR 8419/92.

### 3.2. SELEÇÃO DA ÁREA

Em geral, a escolha da área adequada para a implantação de um aterro sanitário é responsabilidade dos Planos Diretores ou então do Estudo de Impacto Ambiental (EIA), ambos normalmente executados por uma equipe diferente daquela que realizará a construção do empreendimento. Os principais critérios para a escolha da localização, descritos na NBR 8419/92, são:

- a) o local deve ser tal que o impacto ambiental seja minimizado, e a aceitação da instalação pela população seja maximizada;
- b) a área escolhida deve apresentar declividade superior a 1% e inferior a 30%;
- c) são desejáveis a existência de um depósito natural de solo com permeabilidade inferior a  $10^{-6}$  cm/s, e de uma zona não saturada com espessura superior a 3m;
- d) o aterro deve estar localizado a uma distância mínima de 200m de qualquer curso d'água;
- e) a distância entre a obra e núcleos populacionais, deve ser superior a 500m;
- f) a obra não pode ser executada em áreas sujeitas a inundações em períodos de recorrência de 100 anos;

- g) deve haver uma camada de solo não saturado, de espessura superior a 1,5m, distanciando a superfície do nível do lençol freático;
- h) a área deve apresentar subsolo com coeficiente de permeabilidade predominantemente inferior a  $10^{-5}$  cm/s.

A investigação da área exige a utilização de técnicas não invasivas, como geofísica de superfície (mapeamento preliminar), e as invasivas como a sondagem a trado e ensaios de SPT (Teixeira *et al.*, 2006). A técnica é escolhida a partir do objetivo desejado, por exemplo: para determinar características hidrogeológicas do terreno, uma alternativa é o uso de ferramentas geofísicas, já o conhecimento de características físico-químicas do solo exige a utilização de investigação por sondagem.

Azambuja (2006) alerta que um aspecto importante para a escolha da área de disposição tem sido recorrentemente negligenciado: a densidade de lineamentos tectônicos. O autor argumenta que áreas cujo depósito geológico é recente não são aconselhadas para a construção de aterros de resíduos, pois nestas áreas o comportamento hidrogeológico é comandado por camadas de sedimentos mais grosseiros. Já em solos residuais o comportamento hidrogeológico é comandado pela tectônica uma vez que a velocidade do fluxo é maior nas falhas.

A seleção da área pode utilizar ferramentas modernas, como o geoprocessamento, que consiste na utilização e manipulação de informações georreferenciadas para promover a melhoria na qualidade dos resultados e facilitar a operação. Na ausência desta ferramenta é possível realizar a mesma tarefa através de uma análise manual utilizando-se os mesmos critérios. Os critérios de engenharia usualmente empregados na escolha da área são: critérios ambientais, critérios de uso e ocupação do solo e critérios operacionais.

Os critérios ambientais são relativos a questões como: distância de recursos hídricos, áreas inundáveis, geologia (potencial hídrico), condutividade hidráulica do solo, profundidade do lençol freático, fauna e flora da região. Já os critérios de uso e ocupação de solo englobam fatores como distância de vias, legislação municipal e distância de centros urbanos. Por último os critérios operacionais devem levar conta questões como clinografia (declividade), espessura

do solo (horizonte B) e reaproveitamento da área após o fechamento do aterro. O custo da terra e a vida útil também são fatores importantes na escolha do local.

### 3.3. DEFINIÇÃO DO ARRANJO DO ATERRO

Azambuja (2006) cita que existem diferentes maneiras de projetar um aterro de acordo com as características da área e do resíduo. O autor separa a tipologia dos aterros em: aterros em valas integralmente cobertas e aterros positivos em células únicas. Bidone e Povinelli (1999) por sua vez, classificam os aterros de acordo com o método de operação em: método da trincheira, método da meia encosta e método da área.

#### 3.3.1. Aterros em Valas Integralmente Cobertas

Esta tipologia consiste de unidades estreitas e longas construídas em trincheiras, geralmente abaixo do nível do terreno, o que melhora a estabilidade das cavas e permite a implantação de coberturas fixas ou móveis de um único vão. Estas coberturas podem ser construídas em estruturas metálicas com revestimento de telhas metálicas ou de membranas sintéticas e podem ser reaproveitadas e deslocadas ao longo de novas valas.

As vantagens desta técnica são menor utilização de solo, pois não há necessidade de cobertura mineral, menor infiltração de águas pluviais no aterro devido a proteção da cobertura fixa ou móvel, baixo custo de implantação devido a ausência de problemas de estabilidade de solo de cobertura, menor impacto visual na paisagem e a possibilidade de aplicação de ações corretivas em casos de percolação de contaminantes. Dentre as desvantagens da técnica pode-se citar: o custo da cobertura eleva o custo de implantação, o custo da impermeabilização é maior, a instalação de geomembranas é mais difícil facilitando o aparecimento de lesões no sistema e o potencial de reaproveitamento da área é menor.

#### 3.3.2. Aterros Positivos em Células Únicas

Esta técnica consiste em unidades de distribuição especial que formam uma espécie de tronco de pirâmide acima do terreno original e apresentam profundidades menores do que a das valas. Neste sistema não é possível prover uma cobertura integral da célula, sendo possível apenas local coberturas móveis que protejam apenas as frentes de disposição. São aterros mais fáceis de gerenciar e que podem atingir grandes alturas, e além disso, exigem camadas



de solo em cada patamar de disposição. Conforme o relevo do local, as células podem ser construídas em meia encosta.

### 3.3.3. Método da Trincheira

É recomendado em locais com terrenos planos ou levemente inclinados, e aplicável à pequenas comunidades, cuja produção diária de resíduo não ultrapasse dez toneladas. Em geral são escavadas trincheiras de pequeno porte, na qual os resíduos são descarregados sem nenhum processo de compactação. Neste método não há necessidade da entrada dos caminhões nas trincheiras. O espalhamento dos resíduos é feito manualmente e o material proveniente da escavação é utilizado na cobertura da trincheira. Recomenda-se depositar o material remanescente da escavação sobre a trincheira após o fechamento objetivando acelerar os recalques.

### 3.3.4. Método da Meia Encosta

Recomendado para áreas secas e de encostas, geralmente utilizando o material escavado no próprio local para a cobertura do resíduo. A operação é efetuada realizando-se a compactação do resíduo depositado com um trator de esteira, até que se alcance camadas de três a quatro metros de altura. Em seguida, o mesmo trator escora, na parte oposta da operação, o material de cobertura, formando assim, células sanitárias.

### 3.3.5. Método da Área

É uma técnica recomendada em situações onde a topografia natural permite o recebimento dos resíduos sem a alteração de sua configuração natural. Os resíduos são simplesmente descarregados e compactados, formado uma elevação em forma de um tronco de pirâmide, que recebe uma camada de cobertura ao fim de cada dia de operação. A Figura 3.1 ilustra as três alternativas de disposição citadas por Bidone e Povinelli (1999).

## 3.4. SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE FUNDO

O maior potencial poluidor de um aterro sanitário é a contaminação do solo e da água de subsuperfície pelo líquido escuro, ácido e com alto teor de matéria orgânica conhecido como chorume. O transporte de poluentes em solos tropicais tem sido exaustivamente estudado nos

últimos anos no Brasil, e Boscov (2006) faz um resumo dos principais pontos referentes ao assunto: (a) solos tropicais apresentam maior capacidade de retenção de poluentes, devido à mineralogia e capacidade de troca catiônica; (b) há predominância de cargas variáveis, podendo resultar na retenção significativa de ânions; (c) a retenção depende de fortes reações químicas, geralmente não consideradas por modelos tradicionais; (d) processos biológicos podem atenuar o potencial agressivo do poluente.

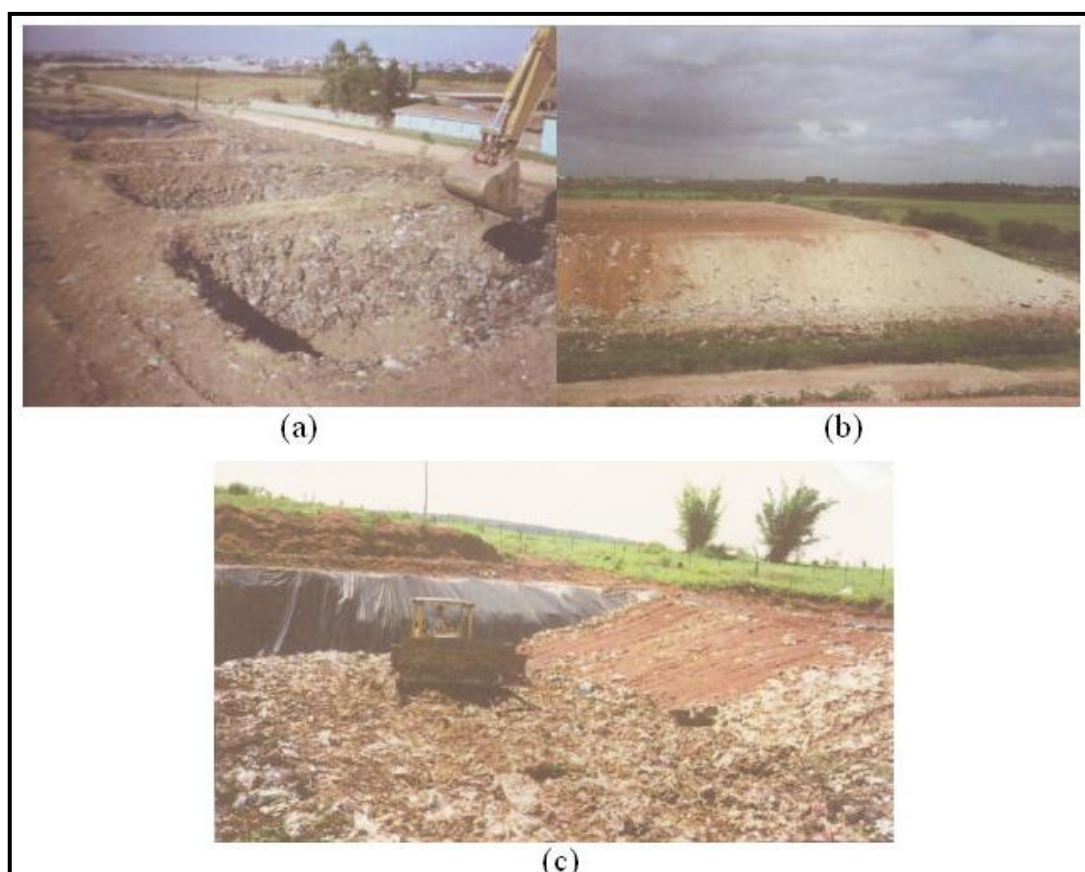


Figura 3.1: Métodos de operação de um aterro sanitário: (a) método da trincheira, (b) método da área, (c) método da meia encosta (Bidone e Povinelli, 1999).

As características e a composição do percolato variam conforme a idade e a composição gravimétrica do resíduo depositado. Segundo Marques (2001) a composição também é função da fase de decomposição em que a amostra de percolato é coletada, uma vez que líquidos coletados durante a fase ácida da decomposição apresentarão pH baixo e altas concentrações de DBO, DQO e metais pesados. Já amostras coletadas durante a metanogênese tendem a apresentar pH próximo ao neutro e concentrações de DBO e DQO mais baixas. Aos fatores que podem influenciar a geração de percolados já citados, somam-se ainda os índices

pluviométricos, as características das camadas de cobertura e a eficiência dos sistemas de impermeabilização.

Com o objetivo de minimizar os impactos ambientais do aterro e para maximizar a segurança da destinação adequada do percolado são instalados sistemas de impermeabilização de cobertura e de fundo e drenos que encaminham o percolado para sistemas de tratamento. Tais sistemas têm como objetivo reduzir ao máximo o transporte advectivo e difusivo de poluentes para a zona vadosa e/ou ao aquífero subjacente. Os sistemas de impermeabilização são definidos de acordo com as pressões efetivas e as pressões de líquidos e gases gerados pelo aterro e são compostos por camadas denominadas *liners*. Os *liners* são camadas de determinado tipo de material que atuam como barreiras horizontais impermeáveis e têm como função minimizar a infiltração de água para o depósito de resíduos (*liners* de cobertura) e controlar a liberação de efluente líquido (*liners* de fundo).

Em geral os *liners* podem ser divididos em três categorias distintas, a saber: *liners* naturais de argila, *liners* de argila compactada e *liners* compósitos. Os *liners* naturais de argila são formações naturais de baixa condutividade hidráulica de solos ricos em argila, onde os resíduos podem ser enterrados ou dispostos em camadas. Estas formações são difíceis de serem encontradas, pois devem apresentar condutividade hidráulica entre  $10^{-8}$  e  $10^{-9}$  m/s e serem contínuas, sem imperfeições ou fissuras. Em geral, recomenda-se a utilização de outros tipos de *liners* para assegurar a integridade do meio ambiente. Os *liners* de argila compactada são construídos a partir de solo natural, e devem seguir critérios rigorosos de compactação e levar em conta propriedades como plasticidade, porcentagem de finos, porcentagem de material grosseiro, tamanho máximo de partículas, teor de argila e tamanho dos agregados. Os *liners* compósitos utilizam de forma conjunta camadas de argila e geossintéticos, são constituídos por uma fina camada de argila expansiva entre dois geotêxteis, sendo conhecidos por GCLs (*Geosynthetic Clay Liners*). De maneira geral, os melhores resultados têm sido observados pelos *liners* compósitos que reduzem a condutividade hidráulica do sistema devido à atenuação de eventuais defeitos na geomembrana, facilitam o direcionamento do fluxo ao sistema de coleta e ainda atuam como proteção contra trincas de secagem. A Figura 3.2 ilustra dois exemplos de *liners* compósitos. O uso de GCLs vem aumentando significativamente e esta técnica tem se mostrado bastante eficiente para impermeabilizar o fundo de um aterro de resíduos. Guyonnet *et al.* (2005) afirmam que os GCLs são de fácil

aplicação quando comparados aos *liners* de argila compactada, mas danos físicos e interações químicas com o percolado podem danificar o material, comprometendo sua eficácia.

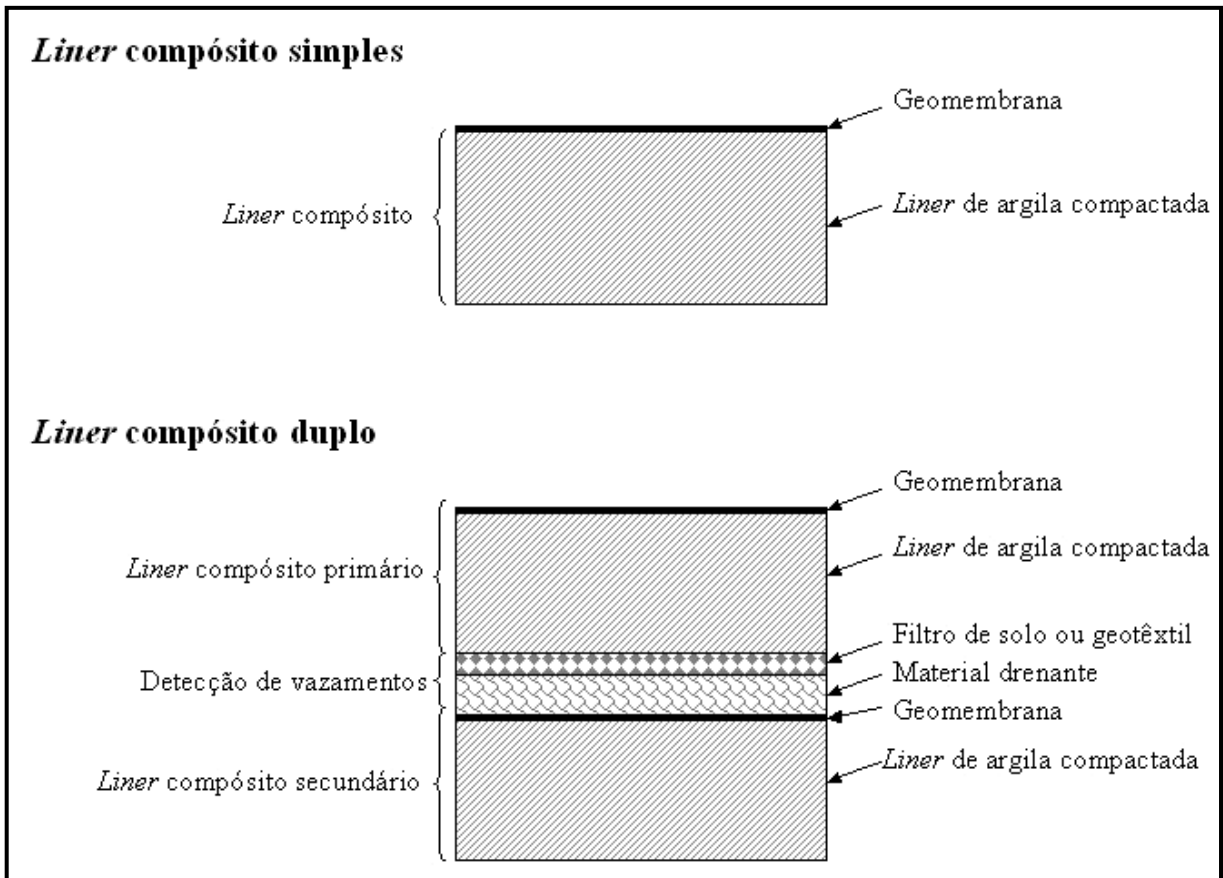


Figura 3.2: Exemplos de liners compostos.

Em diversos países existem normas que definem a configuração na qual deve ser executado o sistema de impermeabilização de fundo. No Brasil, a CETESB (1993) baseia-se em condições hidrogeológicas para regularizar o revestimento de fundo em um aterro sanitário. Para condições favoráveis a recomendação é de camada de solo com espessura mínima de 3 m de solo não saturado com permeabilidade menor ou igual a  $10^{-8}$  m/s entre o nível do lençol e a primeira camada do aterro. Áreas com solos de permeabilidade superior a  $10^{-6}$  m/s são desaconselhadas para a construção de aterros sanitários, mesmo que o projeto inclua sistemas eficientes de impermeabilização e drenagem. Cabe ressaltar que estas recomendações não consideram a possível saturação da camada de solo, o que poderia facilitar a migração dos poluentes por difusão.

### 3.5. SISTEMAS DE DRENAGEM

Eficientes sistemas de drenagem garantem a estabilidade do maciço, evitando o aparecimento de pressões neutras elevadas de chorume e gás, além de garantirem a segurança do meio ambiente ao restringirem o acúmulo de líquido sobre as camadas impermeabilizantes. Neste quesito o desafio está em garantir a integridade dos drenos, uma vez que a própria composição dos fluidos submete o sistema de drenagem a colmatção física, química e biológica, além do aparecimento de trincas.

#### 3.5.1. Drenagem de Água da Chuva

Em um aterro sanitário drenar a água da chuva, não permitindo sua entrada nas camadas de resíduo, significa diminuir a quantidade de percolado a ser tratado, resultando em menor custo e maior segurança ambiental. Existem várias maneiras de inibir a entrada da água da chuva no maciço, e uma delas é a colocação de tubos de drenagem que canalizam a água para valas dispostas ao redor do aterro, como mostra a Figura 3.3. De acordo com Lima (1995) os drenos devem ser posicionados respeitando a topografia natural do terreno. É possível trabalhar com drenos provisórios e permanentes, sendo que os provisórios são de fácil execução sendo constituídos de valas ou leiras de terra batida ao longo das células. Já a drenagem permanente exige um melhor preparo, sendo constituída em geral por tubos de concreto.



Figura 3.3: Sistema de drenagem de água de chuva. (a) tubo de drenagem que libera a água em um canal de drenagem; (b) tanque coletor que armazena a água canalizada (HowStuffWorks, 2007).

#### 3.5.2. Drenagem de Lixiviados

Mesmo com os esforços em impedir a entrada da água da chuva, a drenagem não é perfeita, e a água que entra no maciço se mistura ao chorume gerado pela degradação da matéria orgânica, dando origem a um líquido potencialmente poluidor com elevada DBO. Sendo assim, o sistema de drenagem de percolados deve atender com segurança à demanda imposta pelo aterro, e encaminhar o material para um local de tratamento. A estimativa da produção de chorume geralmente é feita com base em modelos que calculem o balanço hídrico a partir de dados climatológicos locais e das propriedades hidráulicas das camadas de cobertura e dos resíduos. Segundo Boscov (2006), o método mais utilizado para esta estimativa é o programa computacional HELP. De maneira geral, o percolado é tratado em um local dentro do próprio aterro sanitário, através de lagoas de estabilização. Estas lagoas consistem em um eficiente método de tratamento de percolados, são de fácil execução e apresentam baixo custo associado. O tratamento é realizado através da biodigestão da matéria orgânica contida no percolado por bactérias aeróbias e anaeróbias. A Figura 3.4. ilustra uma lagoa de estabilização para o tratamento de percolados.



Figura 3.4.: Lagoa de Estabilização de um aterro sanitário.

### 3.5.3. Drenagem de Gases

O processo de biodegradação é responsável pela geração de um gás conhecido como gás de aterro, composto de cerca de 50% metano e 50% dióxido de carbono, incluindo pequenas parcelas de nitrogênio e oxigênio. Dos compostos deste gás o metano é o de maior interesse econômico e ambiental, pois além de um alto poder calorífico (cerca de 9000 kcal/m<sup>3</sup>) também é extremamente poluente. Assim sendo, um aterro sanitário conta com um sistema de coleta de gases que em geral promove a queima do metano na superfície, como mostra a Figura 3.5. Recomenda-se que os drenos de gases formem um sistema interligado aos drenos de percolados, para permitir o monitoramento simultâneo de líquidos e gases. Devido ao seu alto poder calorífico, o biogás apresenta uma excelente fonte de energia alternativa, e tem sido muito estudado com o objetivo de reduzir o consumo de combustíveis fósseis e para a compra e venda de créditos de carbono. Lima (1995) apresenta valores de produção de biogás que variam entre 2000 e 112000 m<sup>3</sup>/dia, dependendo do porte do aterro.



Figura 3.5: Sistema de drenagem de gás. (a) dreno de gás; (b) queimador de gás (HowStuffWorks, 2007).

#### 3.5.4. Sistemas de Cobertura

Quando a operação do aterro é encerrada é instalado um sistema de cobertura final, para evitar a entrada da água da chuva no maciço. Em condições climáticas favoráveis é suficiente uma camada de cobertura simples, caso contrário exige-se um sistema de cobertura mais completo. Em geral este sistema é constituído por uma manta de polietileno, e uma camada de solo compactado de 60 cm. Geossintéticos também podem ser utilizados, sempre visando eliminar a entrada de água para o maciço. Acima da camada de solo a vegetação é reconstituída, com o objetivo de minimizar os impactos visuais causados pelo aterro. Várias maneiras de

reutilização da área do aterro já foram propostas, mas como os recalques e a geração de gases combustíveis são observados mesmo após décadas do fechamento da célula, ainda se questiona a segurança da área aproveitada.



## 4. METODOLOGIA

O presente estudo baseia-se em dois objetivos principais: caracterização gravimétrica do resíduo e análise dos aspectos de compactação do rejeito. A caracterização gravimétrica será realizada no resíduo *in natura* e no resíduo submetido à triagem. Desta forma, será possível obter uma avaliação da eficiência da triagem, e uma caracterização minuciosa do rejeito resultante. O material analisado corresponde ao resíduo sólido urbano gerado pela macro-região de Santa Maria, região central do estado do Rio Grande do Sul. As amostras a serem analisadas foram coletadas a partir dos resíduos que são depositados atualmente no município de Paraíso do Sul, localizado a cerca de 60 km de Santa Maria. O depósito de Paraíso do Sul é uma Unidade de Triagem (UT), mantida pela empresa financiadora do estudo (PRT Ltda.), e administrada por uma Cooperativa de Catadores. A Unidade de Triagem recebe resíduos dos municípios: Faxinal do Soturno, Nova Palma, São João do Polêsine, Agudo, Paraíso do Sul, Dona Francisca, São Pedro do Sul e Júlio de Castilhos. Destes municípios apenas os dois últimos não integram a região da Quarta Colônia. A Figura 4.1 apresenta um mapa da região, no qual estão destacados os municípios atendidos pela UT de Paraíso do Sul. A empresa PRT Ltda. está construindo um novo aterro sanitário no município de Santa Maria, e o término da obra está previsto para o início de 2008. A partir da conclusão da obra, o aterro passará a receber os resíduos gerados pela região, e vai contar com pré-tratamentos como triagem de recicláveis e compostagem. Neste capítulo estão descritas os procedimentos executados e os materiais utilizados para realizar os ensaios de caracterização e compactação, além do cronograma de atividades.

### 4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 4.1.1. Caracterização Gravimétrica

A metodologia de caracterização gravimétrica foi baseada na padronização descrita pela ASTM (1992), mas contou com algumas adaptações para adequar as condições de trabalho.

Para dar início ao procedimento foram reunidos materiais como pás, balança, lonas, materiais de limpeza e equipamentos de segurança pessoal. A balança utilizada já encontrava-se disponível na UT, e foi gentilmente cedida pela Cooperativa para a realização das medições. A balança é manual e fixa com precisão de 0,01 kg, como mostra a Figura 4.2. Sacos plásticos comuns foram utilizados para o armazenamento do material selecionado, com exceção do rejeito e da matéria orgânica que foram depositados em galões plásticos com capacidade de 200 litros. A ASTM (1992) aconselha a utilização de contêineres para o armazenamento dos materiais selecionados, mas por se tratar de amostras pequenas (cerca de 100 kg), optou-se pela utilização de sacos plásticos e galões. Os ensaios de caracterização gravimétrica foram realizados entre julho e setembro de 2007, período no qual foi possível coletar três conjuntos de dados referentes aos resíduos gerados pela região. A seguir estão descritos os passos seguidos para a execução da caracterização gravimétrica, pré e pós-triagem, dos resíduos.

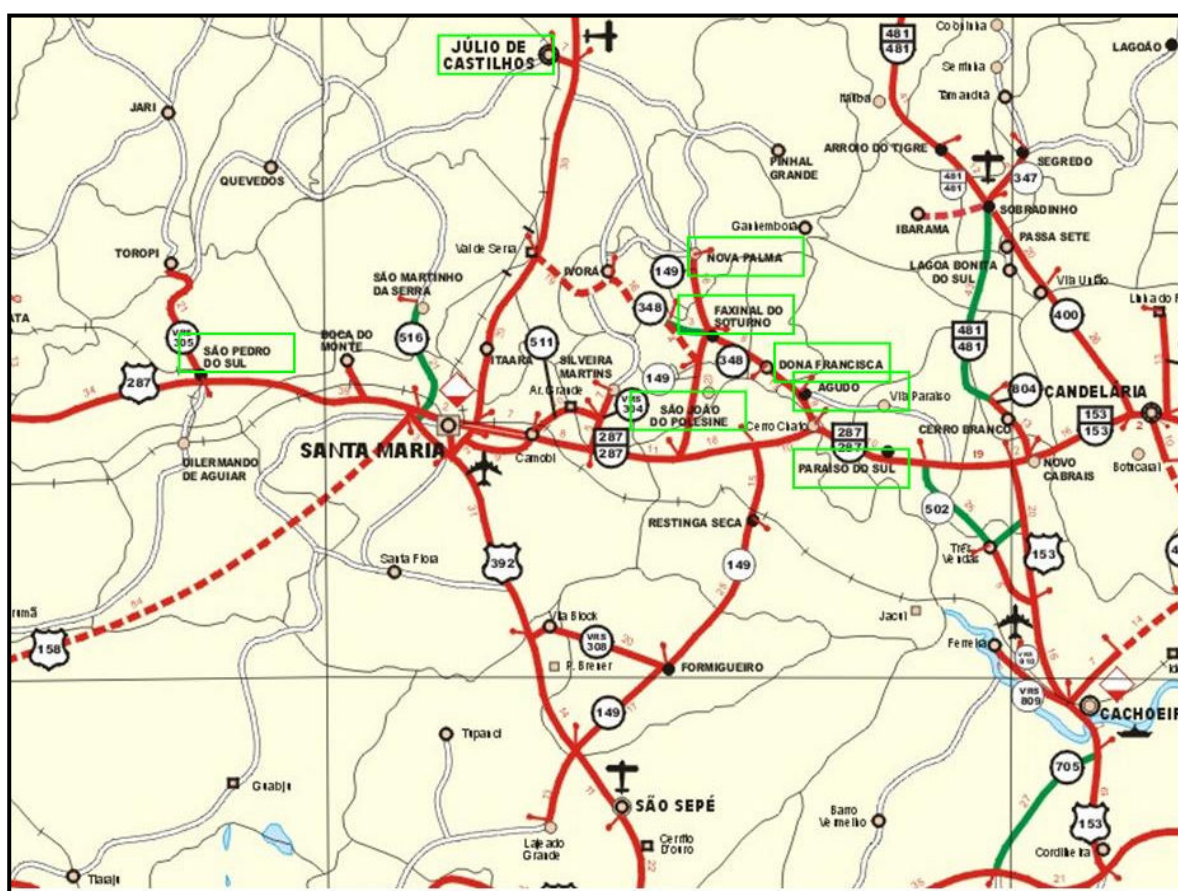


Figura 4.1: Mapa da região de Santa Maria. Em destaque os municípios atendidos pela UT de Paraíso do Sul.

■ Um pátio plano e nivelado foi selecionado dentro da unidade de Paraíso do Sul. O caminhão de coleta a ser amostrado chegava na UT e era direcionado para este pátio, aonde efetuava-se

a descarga da carga completa co caminhão. A movimentação do resíduo foi feita com o auxílio de uma pá carregadeira, o que impediu a cobertura prévia do solo por lona, pois a ação das máquinas certamente perfuraria a cobertura. Desta forma, nesta etapa é comum a interação entre o solo e o resíduo.



Figura 4.2: Balança utilizada para a pesagem dos materiais.

▣ Os caminhões de coleta que foram utilizados para a amostragem foram selecionados de acordo com o local de procedência, pois tenciona-se escolher uma carga de cada região.

▣ A ASTM (1992) fornece um cálculo com base estatística para a determinação do número de amostras a ser selecionada, mas este cálculo foi desenvolvido para grandes aterros. No caso da UT de Paraíso do Sul, durante o período de estudo é possível analisar uma amostra de cada região, cercado assim, todo o espaço amostral. Desta forma foram selecionados, por mês, uma carga proveniente de Júlio de Castilhos e uma de São Pedro do Sul. Os municípios que integram a região da Quarta Colônia não têm cronogramas fixos, podendo ter seus resíduos misturados aleatoriamente de acordo com a situação de operação dos caminhões. Sendo assim, no primeiro mês foram analisadas três diferentes amostras provenientes da Quarta Colônia, e nos meses seguintes, apenas uma.

▣ O material despejado pelo caminhão selecionado foi então submetido a um processo de quarteamento, executado com o auxílio da pá carregadeira presente na unidade. A máquina foi operada por um dos cooperativados, e do processo resulta uma amostra de aproximadamente 100 kg.

■ Após a seleção de cada uma das amostras, o material sobressalente era encaminhado para a boca da moega, para ser posteriormente triado pelo sistema usual da Cooperativa. O pátio após cada quarteamento era limpo, para que não houvesse interferência nos resíduos da próxima descarga.

■ A amostra retirada do material era armazenada em dois galões de 200 litros cada um, e posteriormente pesada e colocada sobre uma lona limpa e seca, aonde foi executada a caracterização manual. Funcionários da unidade foram previamente treinados para auxiliar a separação. Os materiais caracterizados são: matéria orgânica, vidro, garrafas PET, embalagens longa vida, papel/papelão, plásticos, latas de alumínio, metais e rejeito.

### CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

**Origem:**

**Data:**

Pré-triagem

Pós-triagem

### COMPOSIÇÃO

	<b>Matéria Orgânica</b>	<b>Vidro</b>	<b>PET</b>	<b>Longa Vida</b>	<b>Papel/Papelão</b>	<b>Plástico</b>	<b>Latas</b>	<b>Metais</b>	<b>Outros</b>
<b>Kg</b>									
<b>%</b>									

Figura 4.3: Ficha de Caracterização.

■ Cada uma das nove classes citadas teve seu percentual disposto em um saco plástico comum com capacidade de 100 litros, no qual foi pesada. A partir destes dados foi possível calcular o percentual em massa dos componentes do resíduo. Ao fim do período de amostragem preenche-se uma ficha como aquela ilustrada pela Figura 4.3. Ao fim dos três meses de amostragem os valores dos percentuais médios mensais de cada componente da massa de resíduo serão novamente submetidos a uma média aritmética, que resultará na composição gravimétrica final. Cabe ressaltar que não se pretende avaliar as flutuações

sazonais na composição média do resíduo, motivo pelo qual efetua-se uma média geral. A Figura 4.4 ilustra as principais etapas do processo.



Figura 4.4: Fases da operação - (a) quarteamento do resíduo, (b) material quarteado, (c) separação do material e (d) pesagem das amostras.

■ O material amostrado e caracterizado será novamente reunido nos galões, despejado na concha da pá carregadeira, misturado manualmente e encaminhado para a moega da esteira de triagem. A esteira é limpa antes de cada procedimento. O material será então despejado na esteira e submetido à triagem. Um esquema do funcionamento da esteira está ilustrado na Figura 4.5. Como mostra a figura, o resíduo cai na esteira através de uma moega com controle manual de fluxo. No primeiro nível da esteira, os catadores separam os recicláveis em diversas categorias. No segundo nível dois catadores separam os rejeitos, que caem em uma caixa específica. O restante do material é considerado matéria orgânica e é deslocado até o fim da esteira e encaminhado para uma caixa.

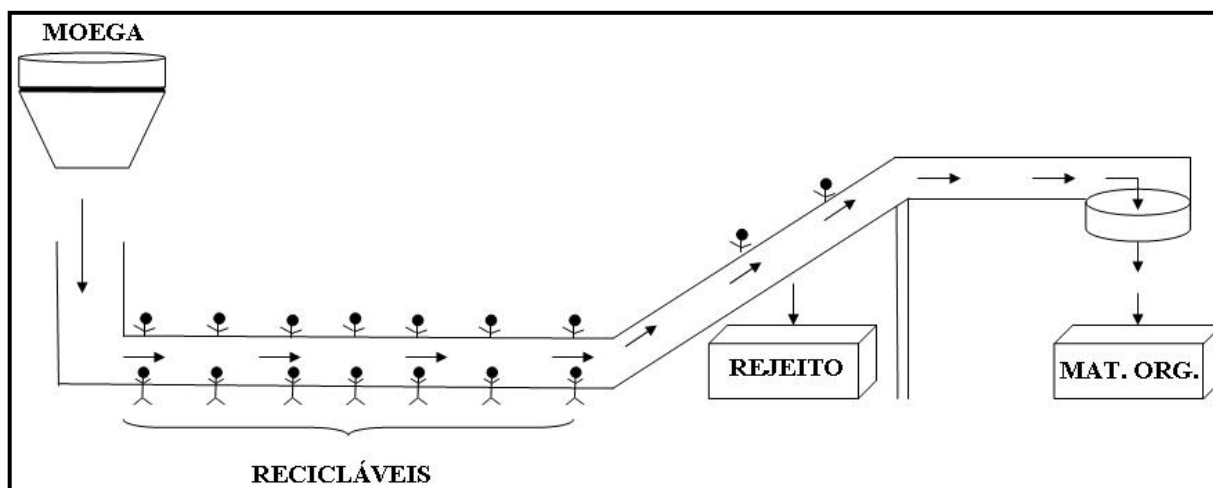


Figura 4.5: Esquema da esteira de triagem da UT de Paraíso do Sul.

- Os resíduos separados são pesados separadamente, e então é obtida a caracterização gravimétrica feita pela esteira de triagem.
- O material considerado rejeito pela esteira de triagem foi pesado, disposto em uma lona limpa e caracterizado de maneira análoga àquela descrita anteriormente. Como resultados finais para a caracterização, obtiveram-se as composições gravimétricas do resíduo *in natura*, a caracterização efetuada pelo processo de triagem e a caracterização do rejeito pós-triagem.

#### 4.1.2. Aspectos de Compactação

A PRT Ltda pretende inovar em seu novo empreendimento, realizando a compactação e enfardamento do rejeito antes de encaminhá-lo ao aterro, com o objetivo de facilitar o transporte e principalmente, prolongar a vida útil da obra. A Empresa encontra-se em fase de negociação para a importação de uma prensa contínua que compacta e amarra o rejeito em fardos de 2 m<sup>3</sup> de volume. Frente a esta alternativa, optou-se pela realização um ensaio de compactação do material descartado pela esteira para analisar o comportamento do rejeito no processo. O ensaio foi realizado no resíduo submetido à triagem, restando na composição apenas rejeito.

O ensaio foi realizado em campo, em uma prensa estática já existente na UT, representada pela Figura 4.6. A prensa disponível é muito antiga, sem manual ou identificação do fabricante, e não foi possível determinar a pressão de atuação. Por isso foi necessário aferir de maneira indireta a pressão de trabalho da prensa. Este processo foi realizado da seguinte maneira:

■ Em campo foi medida a densidade correspondente aos fardos de três diferentes materiais compactados, a saber: garrafas de polietileno brancas, plástico resistente e polietileno de baixa densidade transparente. Pequenas amostras destes materiais foram coletadas na UT e encaminhadas ao Laboratório de Geotecnologia (LAGEO) da UFRGS em Porto Alegre, aonde foram determinadas as curvas de compactação destes materiais.



Figura 4.6: Prensa de compactação da UT.

■ Em laboratório um anel dinamométrico foi utilizado para a realização dos ensaios. A Figura 4.7 apresenta um esquema do equipamento. No cilindro do anel o material era depositado, e sempre que necessário o material foi cortado ao meio para possibilitar o enchimento do cilindro. Este cilindro era então posicionado na base, e ao rodar manualmente a manivela representada no esquema, a base do equipamento é levantada, comprimindo o material contra um anel. O equipamento é dotado de dois deflectômetros, através dos quais é possível obter o deslocamento do material e a tensão necessária para efetuar a compactação.

■ Através da execução destes ensaios é possível obter as curvas de compactação dos materiais, relacionando a pressão aplicada com a densidade dos resíduos.

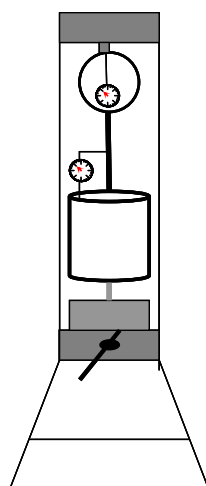


Figura 4.7: Esquema do anel dinamométrico utilizado para os ensaios de compactação em laboratório.

Os ensaios foram realizados em três diferentes materiais para que a pressão da prensa estática fosse estimada com a maior precisão possível. A partir da determinação da pressão iniciou-se o ensaio de compactação em campo. Para isso foi selecionada aleatoriamente uma carga no pátio de descarga. Esta carga foi despejada na esteira, aonde foi submetido à triagem. O rejeito descartado foi pesado e disposto no equipamento, prensado e amarrado com arames. Desta forma, foi possível determinar a taxa de compactação do resíduo e analisar a aparência dos fardos, para verificar a viabilidade de manuseio e transporte.



## **5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **5.1. CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA**

Os dados experimentais para a caracterização gravimétrica foram coletados de julho à setembro de 2007, sendo que foi obtido um conjunto de dados por mês. Foram observados em campo os principais fatores de influência na caracterização gravimétrica do resíduo e as dificuldades inerentes ao processo. Em primeiro lugar pode-se citar a grande influência exercida pela umidade, observada já no primeiro dia de amostragem em que a presença de chuva alterou significativamente os resultados. A chuva faz com que o material torne-se mais plástico e durante todas as etapas, uma quantidade de solo vai sendo agregada ao processo, já que o pátio não pavimentado permite a aderência do solo úmido aos diversos materiais presentes no resíduo. A água também reduz a resistência de materiais como papéis e papelões, o que resulta em uma massa disforme que durante a caracterização é definida como rejeito. Desta forma, em dias de chuva, as análises devem ser feitas com cautela, pois diversos percentuais podem aparecer alterados e, como consequência, a realidade do resíduo pode ser mascarada. Por outro lado, esta é também a realidade da seleção feita na esteira e este aspecto deve ser considerado na análise dos dados.

A ação dos ventos também influencia a caracterização gravimétrica quando não há uma estrutura fechada para executar os ensaios. Durante este estudo, o manuseio dos materiais foi feito em galpões abertos nas laterais, permitindo que rajadas de vento carregassem materiais para dentro ou para fora da amostra selecionada, resultando em uma transferência de massa de resíduo. Foi observado que durante as três etapas do estudo (pré-triagem, triagem e pós-triagem) a massa da amostra foi alterada, às vezes para mais, outras vezes para menos. Atribuem-se estas diferenças à ação do vento e também à incorporação de solo que ocorre cada vez que as máquinas movimentam a amostra.

Nas caracterizações pré e pós-triagem os materiais foram selecionados segundo uma classificação mais geral, como mostrado no Capítulo 4. Já na esteira de triagem os catadores promovem uma seleção mais elaborada, separando os materiais em um número maior de categorias. A Tabela 5.1 descreve os diferentes tipos de materiais selecionados na esteira e seus respectivos preços de venda (referentes a agosto 2007). Ainda quanto à separação efetuada pelos catadores, é importante descrever o critério de seleção. Durante a triagem executada na esteira, são selecionados apenas materiais com valor comercial e com comprador garantido na região. Materiais recicláveis sem potencial de comercialização são desprezados pelos catadores e caracterizados como rejeito. Já a caracterização manual efetuada antes e após a esteira, dentro do escopo da pesquisa, selecionou todos os recicláveis existentes no resíduo, não levando em consideração o possível mercado de venda. Estes diferentes critérios de caracterização podem ser responsáveis por possíveis diferenças nos percentuais de recicláveis e rejeitos encontrados nas diferentes etapas da caracterização.

Outro fator inerente ao equipamento utilizado durante a seleção é a perda de material. A própria conformação da esteira permite que resíduos menores caiam durante o seu funcionamento. A esteira ainda apresenta uma junção entre dois níveis que é o ponto crítico de perda de material, como mostra a Figura 5.1. Uma bacia coletora é posicionada embaixo desta junção para minimizar a perda. O material coletado pela bacia é tratado como rejeito e re-incorporado à amostra. Outras medidas também foram tomadas para diminuir as perdas e ganhos de material, como efetuar a limpeza das pás das máquinas e das lonas. Cabe ressaltar que os rejeitos são separados na esteira por dois trabalhadores e o restante é encaminhado para o contêiner de matéria orgânica. Muitas vezes os responsáveis pela coleta dos rejeitos não dão conta de retirar todos os materiais não aproveitáveis, sendo comum encontrar rejeitos na caixa de matéria orgânica, indicando que frente à alternativa de compostagem será necessário efetuar, mais uma vez, a triagem do material orgânico.

A falta de um cronograma de descarga dos resíduos é um problema operacional que pôde ser constatado já no primeiro dia, e que impede uma programação prévia para a coleta das amostras. Embora exista uma rota programada para a coleta, ela muitas vezes não é respeitada. Em diversas ocasiões os caminhões não completam a carga na região programada, e passam em outras localidades com o objetivo de completar a capacidade da caçamba. Em outros casos, caminhões em manutenção são substituídos por outros já carregados, misturando resíduos de duas regiões diferentes. Sabe-se que as cargas dos municípios de Júlio de

Castilhos e São Pedro chegam todos os dias. O maior problema está nos caminhões provenientes dos municípios da Quarta Colônia, que não apresentam dias de chegada e locais de coleta fixos. Assim a apresentação dos resultados foi estruturada em ordem cronológica, e os resultados são apresentados de acordo com as datas de coleta. Comentários e discussões pertinentes a cada conjunto de dados serão apresentados nas sub-sessões a seguir.

Tabela 5.1: Materiais recicláveis e seus respectivos valores de venda.

<b>Denominação</b>	<b>Descrição dos Materiais</b>	<b>Preço (R\$/kg)</b>
Ráfia	Sacos grandes de material plástico, geralmente utilizados na embalagem de adubos e fertilizantes	0,12
Papelão	Papelão de diversas cores	0,47
Baixa branco	Polietileno de baixa densidade branco ou transparente	0,55
Baixa colorido	Polietileno de baixa densidade colorido	0,20
Jornal	Folhas de jornal	0,07
Papel Misto	Papel comum de diversas cores	0,30
Papel Branco	Papel comum branco	0,35
Longa Vida	Embalagens longa vida de diversos tamanhos	0,37
Polietileno	Polietileno de diversas cores	0,75
Balde/Bacia	Materiais plásticos resistentes, geralmente pedaços de baldes, vasos e bacias	0,45
Branco Escrito	Polietileno branco ou leitoso impressos, como embalagens de produtos de limpeza	0,85
Cristal Escrito	Polietileno transparente impresso, como embalagens de álcool líquido	1,10
Polipropileno	Polipropileno de diversas cores	1,20
Margarina	Embalagens de margarina	0,65
PVC	Pedaços de materiais em PVC	0,20
Lata	Objetos feitos de lata e ferro	0,25
PET Azeite	Embalagens PET de azeite e óleo de cozinha	0,10
PET Branca	Embalagens PET 2 litros transparentes	0,55
PET Verde	Embalagens PET 2 litros verdes	0,55
Alumínio	Materiais com alumínio (ex: latas de refrigerante)	3,00
Cobre	Materiais que contenham (ex: fios elétricos)	9,00
Vidro	Pedaços de vidro de diversas cores	0,05



Figura 5.1: Junção entre dois diferentes níveis da esteira de triagem.

### 5.1.1. Julho de 2007

No mês de julho os dados foram coletados entre os dias 18 e 20, nos quais cinco cargas de resíduos foram analisadas. No dia 18/07 foi amostrada uma carga do município de Nova Palma, no dia 19/07 uma carga dos municípios de São João do Polêsine (Polêsine), Faxinal do Soturno (Faxinal) e Paraíso do Sul, e no dia 20/07 foi possível amostrar três cargas, a primeira do município de São Pedro, a segunda do município de Júlio de Castilhos e a última dos municípios de Dona Francisca e Agudo. Os municípios de Polêsine, Faxinal, Paraíso do Sul, Dona Francisca, Agudo e Nova Palma integram a chamada Quarta Colônia. Para fins práticos as cargas foram nomeadas da seguinte maneira: os resíduos provenientes da região da Quarta Colônia (QC) foram separados em: QC<sub>1</sub> (Nova Palma), QC<sub>2</sub> (Polêsine, Faxinal e Paraíso do Sul) e QC<sub>3</sub> (Dona Francisca e Agudo). Os dois municípios restantes foram nomeados SP (São Pedro) e JC (Júlio de Castilhos).

A Figura 5.2 apresenta os gráficos da caracterização gravimétrica de todas as cargas analisadas antes da triagem. É possível verificar na Figura 5.2 que a região QC<sub>1</sub> apresenta o maior percentual de rejeito em sua composição (57%). Destaca-se que este valor foi

influenciado pela umidade do resíduo, pois a coleta foi realizada em um dia chuvoso, fazendo que o resíduo chegasse na UT extremamente úmido, com muito solo incorporado e difícil de separar. A chuva foi um fator determinante apenas no primeiro dia de amostragem, portanto este efeito só foi observado nos dados da região QC<sub>1</sub>. É possível afirmar que as amostras provenientes da região da Quarta Colônia (QC<sub>1</sub>, QC<sub>2</sub> e QC<sub>3</sub>) apresentam menor percentual de matéria orgânica em sua composição. Este fato pode ser explicado pela população da região ser em sua grande maioria rural, e a matéria orgânica gerada é utilizada nos próprios sítios e fazendas como adubo para a plantação.

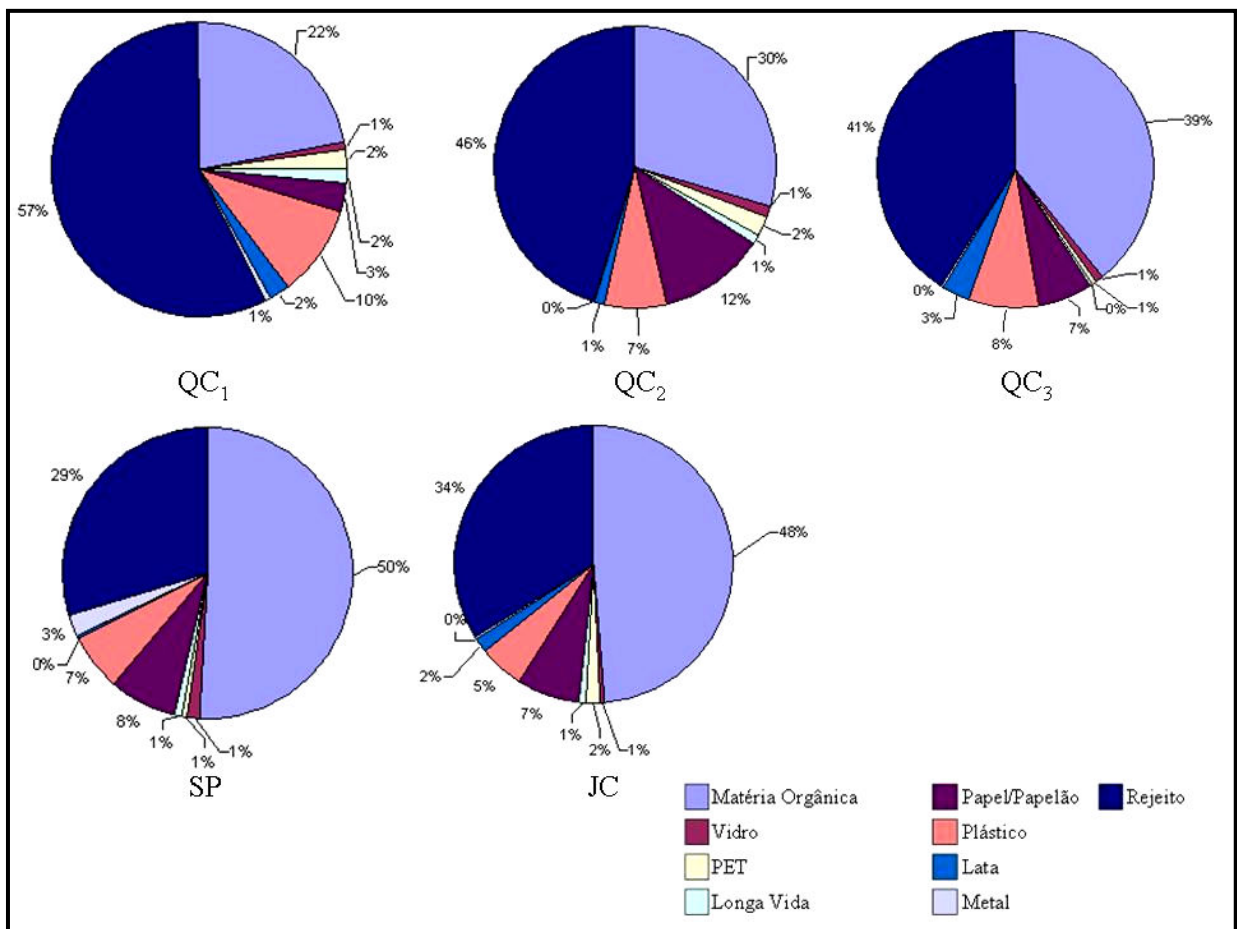


Figura 5.2: Resultados da caracterização gravimétrica pré-triagem de julho de 2007.

A influência da chuva na amostragem da região QC<sub>1</sub> também pode ser observada no baixo percentual de papel/papelão e no alto percentual de plástico em relação às outras regiões. Os papéis e papelões modificam-se em presença de água, tornando-se difíceis de identificar e provavelmente misturando-se aos rejeitos durante a caracterização. Já os plásticos permanecem visíveis em resíduos muito úmidos, mas agregam-se ao barro e à matéria

orgânica, aumentando o seu peso, o que explica o alto percentual deste material na caracterização gravimétrica. A região QC<sub>3</sub> apresenta o maior percentual de plástico e a região QC<sub>2</sub> o maior percentual de papel/papelão.

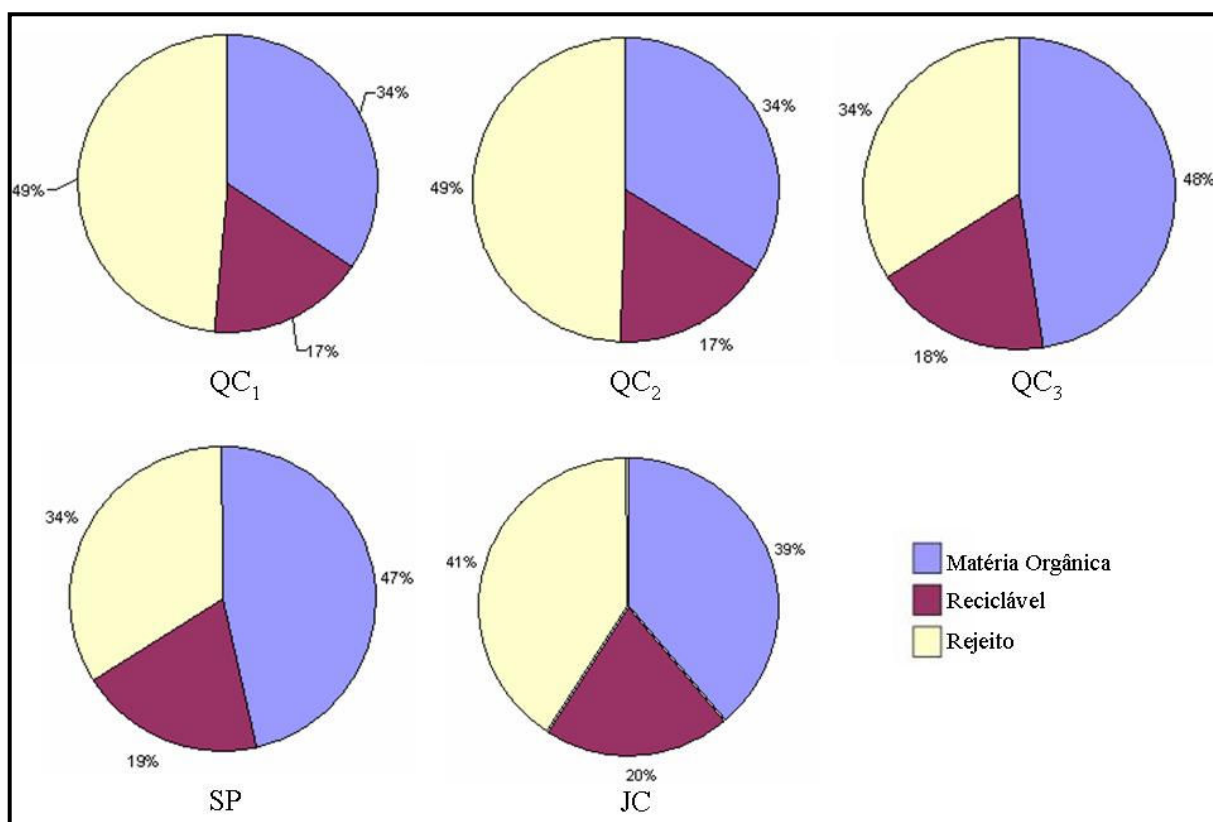


Figura 5.3: Resultado do material selecionado pela esteira de triagem em julho de 2007.

Foram observadas algumas diferenças significativas entre os percentuais de materiais separados pelo processo de caracterização na pré-triagem e pelo processo de separação na esteira, aqui referenciado de triagem. Estas diferenças foram maiores na fração caracterizada como de rejeitos e de matéria orgânica. Isto pode ser observado na comparação dos gráficos da Figura 5.2 com os gráficos apresentados pela Figura 5.3, que representa a caracterização feita pela esteira de triagem. Estas diferenças podem ter sido geradas por diferenças nos procedimentos utilizados nas duas fases ou por agregação ou perda de materiais nos dois processos, especialmente no que se refere à incorporação de solo durante o manuseio no pátio, perda de umidade por exposição ao clima ou outras perdas. Um aspecto observado em campo foi o de que rejeitos mais leves, como papéis e plásticos leves, são carregados por rajadas de vento de maneira aleatória, já que o pátio é aberto e o galpão da esteira não tem paredes laterais, apenas cortinas pouco eficientes. Isto é um fator que pode contribuir na perda ou

ganho de certa massa de materiais leves, mas acredita-se ser de menor importância relativa. Já o material classificado como matéria orgânica, pode incluir uma quantidade de solo do pátio incorporado durante o manuseio e transporte com máquinas. Estes fatores não puderam ser eliminados, já que não puderam ser feitas alterações nas condições de operação da Unidade de Triagem.

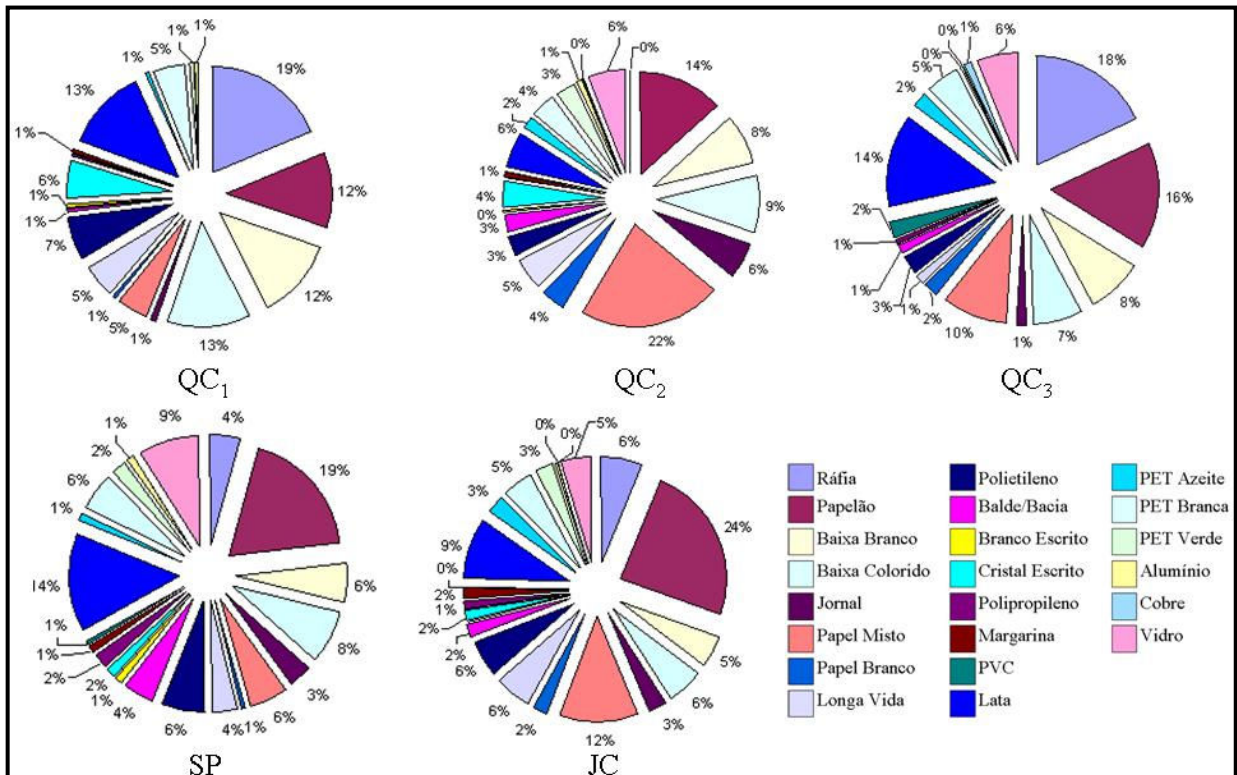


Figura 5.4: Percentuais de materiais recicláveis selecionados pela esteira de triagem em julho de 2007.

A Figura 5.4 apresenta os percentuais de cada tipo de material reciclável separado pela esteira de triagem, e a Tabela 5.2 lista os dados obtidos. A análise dos gráficos permite observar que, em geral, as maiores quantidades são de papel misto, ráfia, papelão, lata e polietileno. As ráfias são grandes sacos de material plástico, muito usados no armazenamento de adubos e fertilizantes. A região estudada tem a maior parte da população na área rural, o que explica o alto percentual deste material no resíduo. Papel misto e papelão são materiais que fazem parte do cotidiano da população, sendo normal encontrá-los em grandes quantidades no resíduo. A região QC<sub>1</sub> apresentou os menores percentuais destes materiais devido à umidade causada pela chuva, responsável pela desintegração do material e pela sua incorporação aos rejeitos. Os materiais encontrados em menores quantidades são: cobre, alumínio e PVC. Como o cobre e o alumínio têm altos valores comerciais (nove e três reais por quilo, respectivamente) estes

materiais são selecionados por catadores de rua antes de serem recolhidos pelos caminhões de coleta.

Tabela 5.2: Dados referentes à coleta na esteira de triagem no mês de julho.

	QC <sub>1</sub>		QC <sub>2</sub>		QC <sub>3</sub>		SP		JC	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
<b>Ráfia</b>	3,10	18,78	0,00	0,00	3,00	18,13	0,80	4,44	1,40	6,50
<b>Papelão</b>	1,90	11,51	2,80	21,31	2,60	15,71	3,40	18,88	5,20	24,13
<b>Baixa branco</b>	2,00	12,12	1,60	12,18	1,40	8,46	1,00	5,55	1,00	4,64
<b>Baixa colorido</b>	2,10	12,72	1,80	13,70	1,20	7,25	1,40	7,77	1,20	5,57
<b>Jornal</b>	0,10	0,61	1,20	9,13	0,20	1,21	0,60	3,33	0,60	2,78
<b>Papel Misto</b>	0,80	4,85	4,60	35,01	1,60	9,67	1,00	5,55	2,60	12,06
<b>Papel Branco</b>	0,10	0,59	0,80	6,09	0,40	2,42	0,10	0,56	0,45	2,09
<b>Longa Vida</b>	0,80	4,85	1,00	7,61	0,20	1,21	0,65	3,61	1,20	5,57
<b>Polietileno</b>	1,10	6,66	0,64	4,87	0,50	3,02	1,10	6,11	1,20	5,57
<b>Balde/Bacia</b>	0,10	0,58	0,56	4,26	0,20	1,21	0,80	4,44	0,40	1,86
<b>Branco Escrito</b>	0,10	0,61	0,06	0,46	0,00	0,00	0,20	1,11	0,00	0,00
<b>Cristal Escrito</b>	0,95	5,75	0,85	6,47	0,00	0,00	0,28	1,55	0,40	1,86
<b>Polipropileno</b>	0,06	0,33	0,00	0,00	0,10	0,60	0,40	2,22	0,20	0,93
<b>Margarina</b>	0,10	0,61	0,20	1,52	0,00	0,00	0,20	1,11	0,40	1,86
<b>PVC</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	2,42	0,10	0,56	0,00	0,00
<b>Lata</b>	2,10	12,72	1,20	9,13	2,30	13,90	2,60	14,44	2,00	9,28
<b>PET Azeite</b>	0,11	0,67	0,40	3,04	0,40	2,42	0,18	1,00	0,60	2,78
<b>PET Branca</b>	0,80	4,85	0,80	6,09	0,80	4,83	1,00	5,55	1,00	4,64
<b>PET Verde</b>	0,10	0,61	0,60	4,57	0,05	0,30	0,40	2,22	0,60	2,78
<b>Alumínio</b>	0,10	0,61	0,20	1,52	0,00	0,00	0,20	1,11	0,10	0,46
<b>Cobre</b>	0,00	0,00	0,03	0,23	0,20	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Vidro</b>	0,00	0,00	1,20	9,13	1,00	6,04	1,60	8,88	1,00	4,64

O material descartado como rejeito pela esteira de triagem também foi caracterizado, e os resultados estão ilustrados pelos gráficos da Figura 5.5. Com base nestes gráficos é possível



afirmar que o material melhor selecionado foi o referente à região QC2, aonde 98% do material descartado foi confirmado como rejeito. Com relação às outras regiões, a maior parte do material descartado é composta por matéria orgânica, seguido de plásticos, papéis e papelão. Novamente deve-se destacar o problema do excesso de umidade nos resíduos que cria dificuldades na separação dos materiais, especialmente papéis e papelão do material de rejeito.

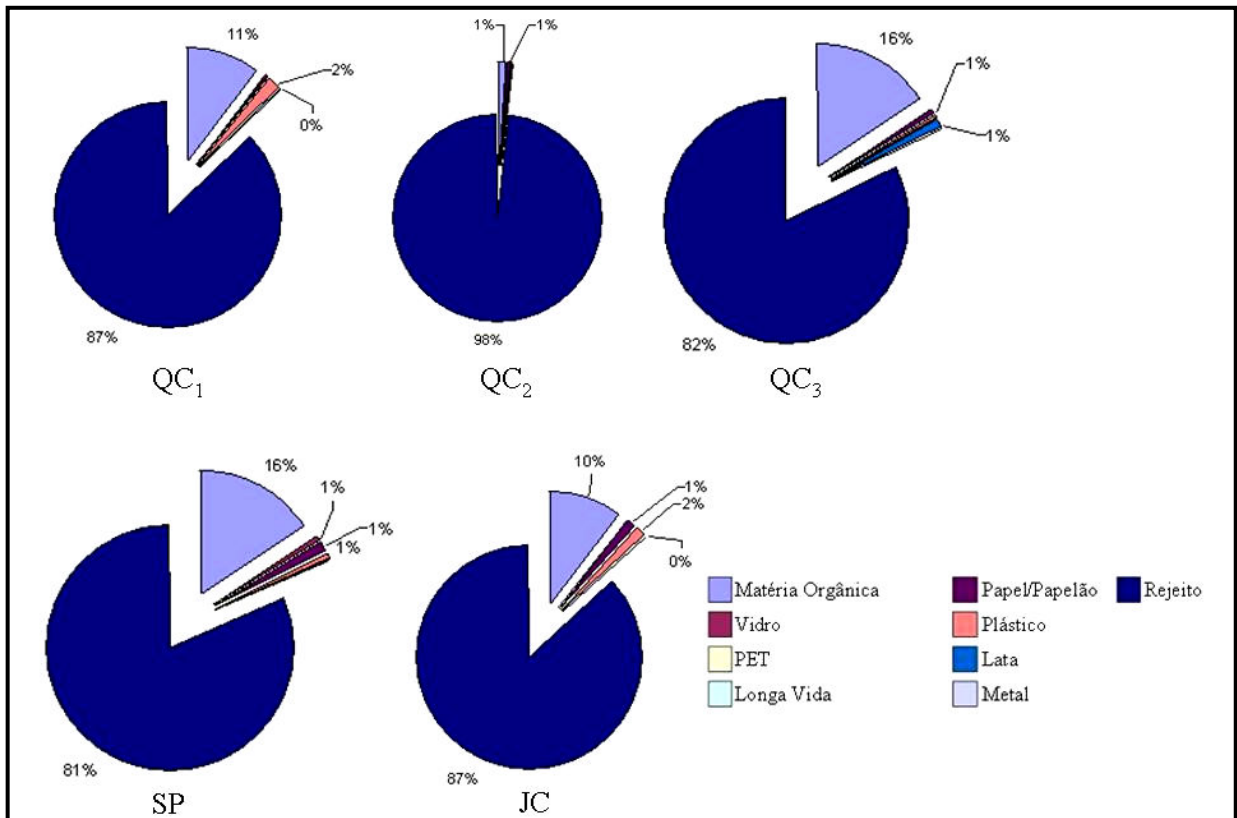


Figura 5.5: Resultado da caracterização gravimétrica do material descartado pela esteira de triagem em julho de 2007.

Anteriormente foi citado que é comum a transferência de massa nas diferentes etapas acarretando em perdas e ganhos de material nas amostras, como mostra a Tabela 5.3. Nesta tabela os dados estão organizados em relação às etapas de caracterização, aonde a pré-triagem corresponde à primeira fase, a Etapa 2 à triagem e a Etapa 3 à caracterização pós-triagem. Na Etapa 1, o valor P1 corresponde à massa da amostra medida logo após o quarteamento, e o valor P2 corresponde à soma das massas dos componentes resultantes da caracterização nesta fase. As diferenças podem ser devidas aos problemas de incorporação de solo ou outros fatores, como já relatado. Na Fase 2 o valor P3 corresponde à soma dos componentes resultantes da separação na esteira, e a diferença é em relação ao valor P2. Na última fase,

Etapa 3, o valor P4 corresponde à massa do material que sai da esteira e é classificado como rejeito, e o valor P5 é a soma dos materiais resultantes da caracterização deste rejeito. Nas diferenças os sinais negativos e positivos representam as perdas e ganhos de material na amostra.

Tabela 5.3: Transferência de massa durante as três etapas da caracterização gravimétrica em julho de 2007.

	Transferência de Massa											
	Pré-triagem				Triagem				Pós-triagem			
	P1 (kg)	P2 (kg)	Diferença		P3 (kg)	Diferença		P4 (kg)	P5 (kg)	Diferença		
			kg	%		Kg	%			kg	%	
<b>QC1</b>	112,5	115,4	2,9	2,57	97,61	-17,79	-15,42	47,50	45,38	-2,12	-4,46	
<b>QC2</b>	99,5	91	-8,5	-8,54	78,34	-12,66	-13,91	38,70	38,50	-0,20	-0,52	
<b>QC3</b>	100	92,28	-7,72	-7,72	90,55	-1,73	-1,87	31,00	32,70	1,70	5,48	
<b>SP</b>	100,1	97,6	-2,5	-2,49	92,51	-5,09	-5,22	31,60	31,85	0,25	0,79	
<b>JC</b>	119	115,05	-3,95	-3,32	107,05	-8,00	-6,95	43,90	43,10	-0,80	-1,82	

A análise da Tabela 5.3 permite afirmar que a perda de material durante os processos foi mais freqüente, mas ganhos foram registrados na Fase 1 da região QC<sub>1</sub> e na Fase 3 das regiões QC<sub>3</sub> e SP. A maior perda ocorreu na Triagem (Fase 2) da região QC<sub>1</sub> (15%). As menores variações aconteceram na Fase 3 (Pós-triagem), e isto pode ser explicado pelo fato das amostras serem menores, em média 38 kg, o que facilita o controle da entrada e saída de material. Em todas as etapas as maiores diferenças foram encontradas nas regiões da Quarta Colônia, as primeiras a serem analisadas. Nas outras duas regiões, SP e JC, houve uma diminuição na transferência de massa, indicando que a experiência das pessoas que executam a tarefa contribui para que haja um maior controle.

### 5.1.2. Agosto de 2007

No mês de agosto os ensaios foram executados entre os dias 29 e 30, nos quais três amostras foram analisadas. Como foi dito anteriormente, a incerteza no conteúdo das cargas provenientes da região da Quarta Colônia resultou na decisão de analisar apenas uma carga desta região, independente dos municípios de origem. No dia 29/08 foram amostradas as cargas JC e QC, e no dia 30/08 a carga SP. A Figura 5.6 apresenta os resultados da caracterização gravimétrica pré-triagem das regiões citadas.

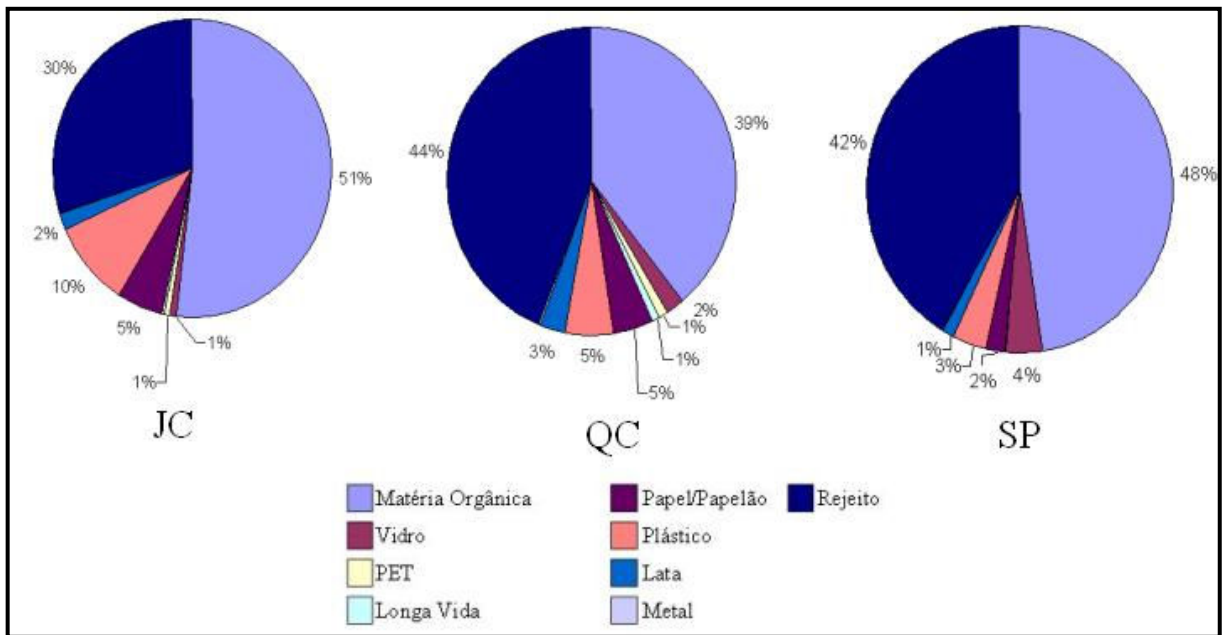


Figura 5.6: Resultados da caracterização gravimétrica pré-triagem de agosto de 2007.

A influência direta do clima na coleta dos dados foi registrada apenas nos dados referentes à região JC. Para esta região, a amostra foi coletada em uma segunda-feira após um final de semana muito chuvoso, resultado em uma amostra muito úmida. Em casos como este, espera-se grande transferência de material orgânico pela incorporação de papéis e papelão. A matéria orgânica desta amostra foi difícil de ser separada, pois além de apresentar-se muito úmida devido à chuva, a análise da composição gravimétrica pôde ser executada apenas 36 horas depois da coleta, proporcionando o início da degradação. A amostra QC foi analisada no mesmo dia que a amostra JC, porém a coleta foi realizada na terça-feira (um dia depois), e o tempo mais seco foi responsável por uma pequena secagem natural do material. Já o dia em que a análise da região SP foi realizada estava quente e seco, porém com fortes rajadas de vento, propiciando a transferência de materiais leves.

Com base na Figura 5.6 é possível observar que as regiões JC e SP apresentam um maior percentual em matéria orgânica em comparação ao percentual registrado na região QC. Este fato já havia sido observado nos dados coletados em julho, indicando um padrão de menor destinação de matéria orgânica pela população dos municípios da Quarta Colônia. O maior percentual de plástico foi registrado na região JC, e pode ser sido influenciado pela umidade da massa, que proporciona o envolvimento do material por barro. O teor de papel e papelão da região SP foi mais de 50% menor que o encontrado nas outras duas regiões, e este fato pode

ser explicado pelas fortes rajadas de vento, que permitiam a transferência de massa desses materiais mais leves.

A Figura 5.7 apresenta os gráficos referentes aos percentuais dos três grandes grupos de materiais encontrados na caracterização executada pela esteira de triagem: matéria orgânica, recicláveis e rejeitos. O valor mais marcante apresentado pela figura é um percentual de apenas 9% no teor de matéria orgânica na região QC. Este valor é muito menor ao encontrado pela caracterização manual pré-triagem (39%). Esta grande diferença indica a possibilidade de falha humana na operação da esteira. Registrou-se neste dia a ausência de três catadores na esteira e o resíduo também se encontrava úmido. Mas como a caracterização do resíduo QC foi realizada no mesmo dia que o resíduo JC, e este último não apresentou tal diferença, a ausência dos catadores e a umidade não podem ser consideradas como as únicas responsáveis pela disparidade dos dados. Ressalta-se que o gráfico desta região mostra um percentual de rejeito 21% maior àquele encontrado pela caracterização manual, indicando que parte desta disparidade pode ser atribuída à má separação entre rejeito e material orgânico. Acredita-se que o baixo teor de material reciclável encontrado para a região SP pode estar associado às rajadas de vento presentes no dia da caracterização. O galpão onde localiza-se a esteira é aberto nas laterais, e o lento movimento da esteira permite a perda de muito material leve, como plásticos e papéis.

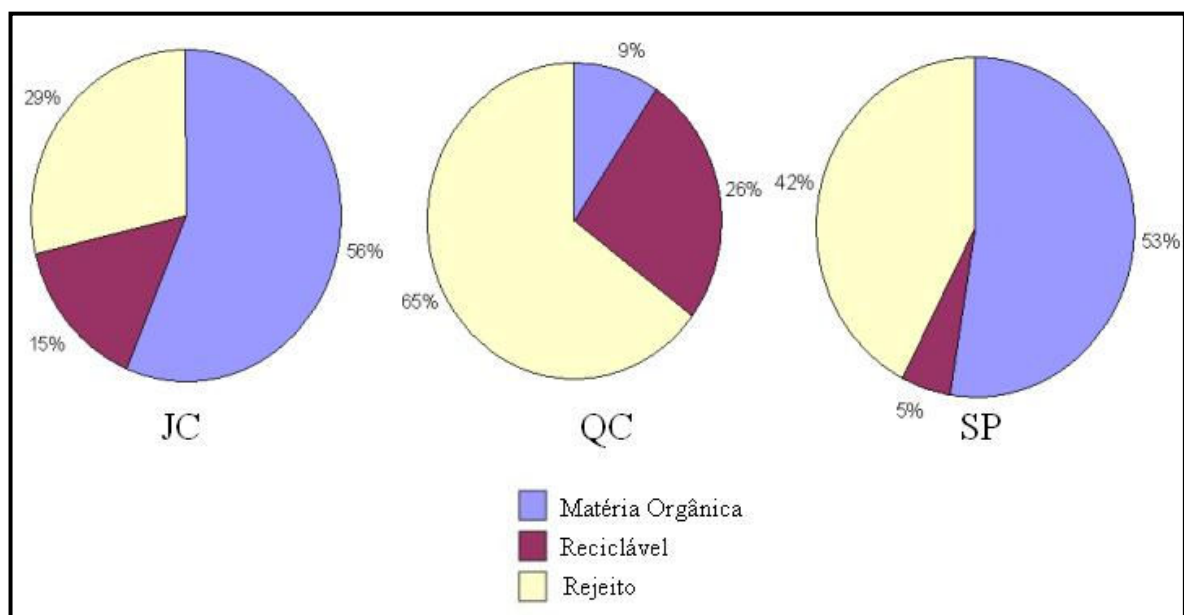


Figura 5.7: Resultados do material selecionado pela esteira de triagem em agosto de 2007.

Na Figura 5.8 apresentam-se os gráficos referentes aos materiais recicláveis coletados pela esteira de triagem. Através dos gráficos é possível observar que os maiores percentuais são de papelão, polietileno, rafia e lata. Estes mesmos materiais foram encontrados em maiores quantidades também no mês de julho, com exceção do papel misto que não foi observado em grandes percentuais em agosto. Nas regiões JC e SP os baixos teores de papel misto podem ser explicados pela umidade do resíduo e pelos ventos nos respectivos dias de análise. Em QC a influência pode ser atribuída à umidade, porém em menor proporção em relação ao resíduo JC. O Tabela 5.4 lista os dados a partir dos quais os gráficos da Figura 5.8 foram gerados.

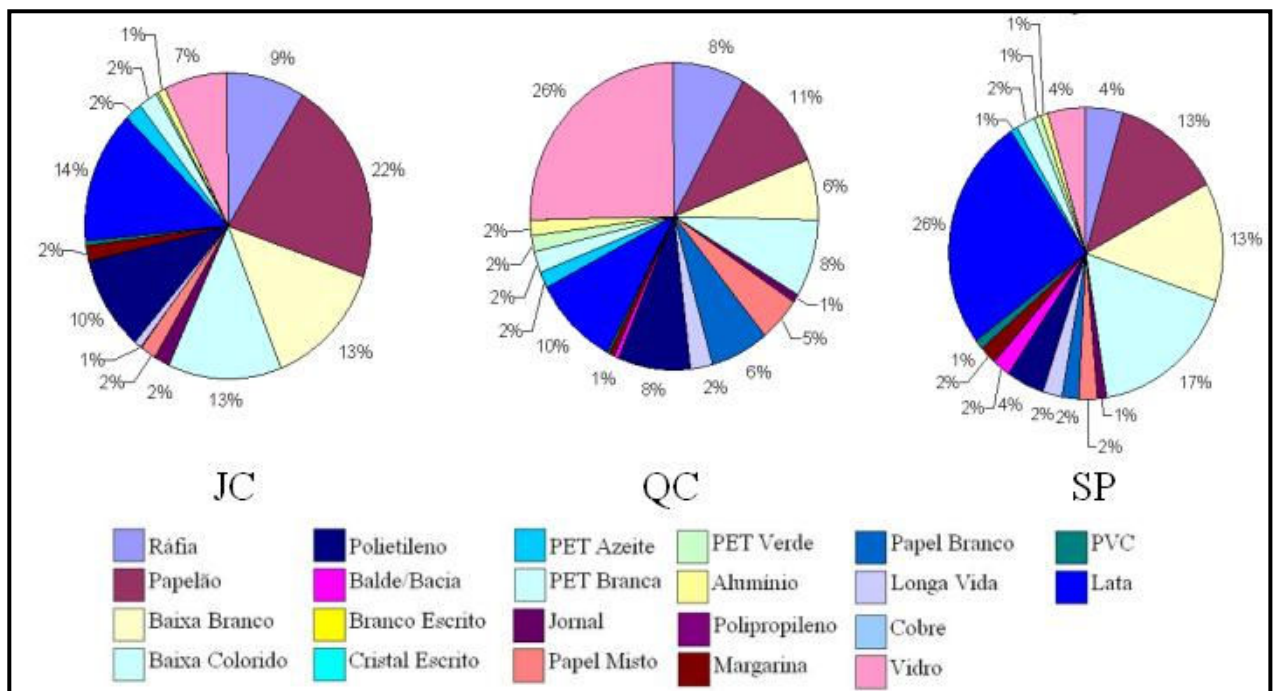


Figura 5.8: Percentuais de materiais recicláveis selecionados pela esteira de triagem em agosto de 2007.

A caracterização pós-triagem, realizada no material descartado pela esteira, está ilustrada através dos gráficos da Figura 5.9. Os gráficos revelam que a região QC apresentou o material descartado com maior quantidade de rejeito, apresentando apenas 1% de material plástico sua composição. Isto reforça a possibilidade de falha humana na triagem e aquisição de dados na análise desta região, pois não foram identificados os 21% de material orgânico esperado nos rejeitos. Já nas outras regiões, houve percentual significativo de matéria orgânica na composição do rejeito, e pequena fração de outro tipo de material, reforçando a boa qualidade do sistema de triagem, e a dificuldade da separação da fração orgânica do resíduo. Os ensaios de caracterização realizados no mês de agosto apresentaram, de maneira geral, elevados

valores de perda de material, como pode ser constatado através do Tabela 5.5. A região com maior perda foi QC, apresentando valores de até 41,39% e perdas mínimas na faixa dos 17%.

Tabela 5.4: Dados referentes à coleta na esteira de triagem no mês de agosto.

	QC		SP		JC	
	kg	%	kg	%	kg	%
<b>Ráfia</b>	1,00	8,00	0,20	4,32	1,00	8,98
<b>Papelão</b>	1,40	11,20	0,60	12,96	2,40	21,56
<b>Baixa branco</b>	0,80	6,40	0,60	12,96	1,50	13,48
<b>Baixa colorido</b>	1,00	8,00	0,80	17,28	1,40	12,58
<b>Jornal</b>	0,10	0,80	0,05	1,08	0,20	1,80
<b>Papel Misto</b>	0,60	4,80	0,10	2,16	0,20	1,80
<b>Papel Branco</b>	0,80	6,40	0,10	2,16	0,00	0,00
<b>Longa Vida</b>	0,30	2,40	0,10	2,16	0,10	0,90
<b>Polietileno</b>	1,00	8,00	0,20	4,32	1,10	9,88
<b>Balde/Bacia</b>	0,10	0,80	0,10	2,16	0,00	0,00
<b>Branco Escrito</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Cristal Escrito</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Polipropileno</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Margarina</b>	0,05	0,40	0,10	2,16	0,20	1,80
<b>PVC</b>	0,05	0,40	0,05	1,08	0,05	0,45
<b>Lata</b>	1,20	9,60	1,20	25,92	1,60	14,38
<b>PET Azeite</b>	0,20	1,60	0,05	1,08	0,20	1,80
<b>PET Branca</b>	0,30	2,40	0,10	2,16	0,25	2,25
<b>PET Verde</b>	0,20	1,60	0,03	0,65	0,03	0,27
<b>Alumínio</b>	0,20	1,60	0,05	1,08	0,10	0,90
<b>Cobre</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Vidro</b>	3,20	25,60	0,20	4,32	0,80	7,19

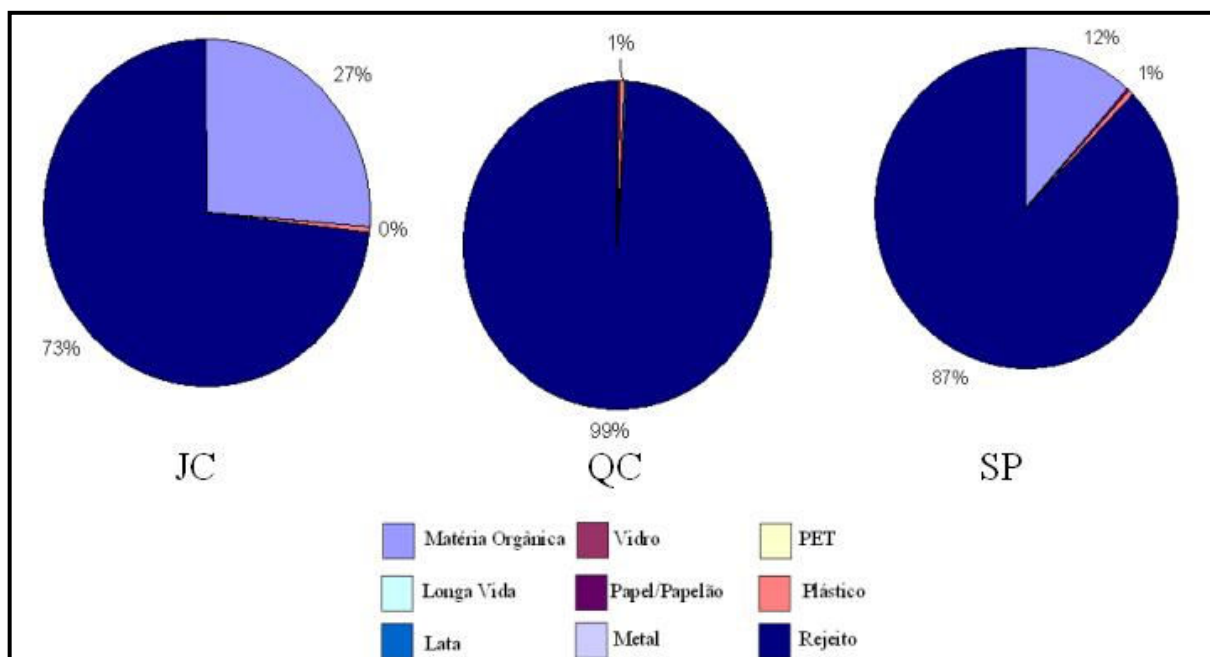


Figura 5.9: Resultado da caracterização gravimétrica do material descartado pela esteira de triagem em agosto de 2007.

Tabela 5.5: Transferência de massa durante as três etapas da caracterização gravimétrica em julho de 2007.

	Transferência de Massa										
	Pré-triagem				Triagem			Pós-triagem			
	P1 (kg)	P2 (kg)	Diferença		P3 (kg)	Diferença		P4 (kg)	P5 (kg)	Diferença	
			kg	%		Kg	%			kg	%
<b>QC</b>	99,50	81,90	-17,60	-17,69	48,00	-33,90	-41,39	31,00	19,50	-11,50	-37,10
<b>SP</b>	104,50	103,28	-1,22	-1,17	90,63	-12,65	-12,25	38,40	22,08	-16,32	-42,50
<b>JC</b>	114,50	104,65	-9,85	-8,60	73,76	-30,89	-29,52	21,20	26,40	5,20	24,53

### 5.1.3. Setembro de 2007

Em setembro todos os ensaios foram executados em um único dia (27/09/07). A semana que antecedeu os ensaios foi muito chuvosa e mais uma vez a umidade foi um fator determinante na caracterização do resíduo. O dia 27/09 propriamente dito foi seco, com poucos ventos. O ensaio executado pela manhã sofreu influência do solo barrento, já os ensaios executados na parte da tarde contaram com o solo mais seco. A amostra do município de Júlio de Castilhos (JC) foi analisada durante a manhã, e as amostras da Quarta Colônia (QC) e São Pedro (SP)

foram analisadas na parte da tarde. A Figura 5.10 apresenta os resultados obtidos para a caracterização gravimétrica das amostras antes da triagem.

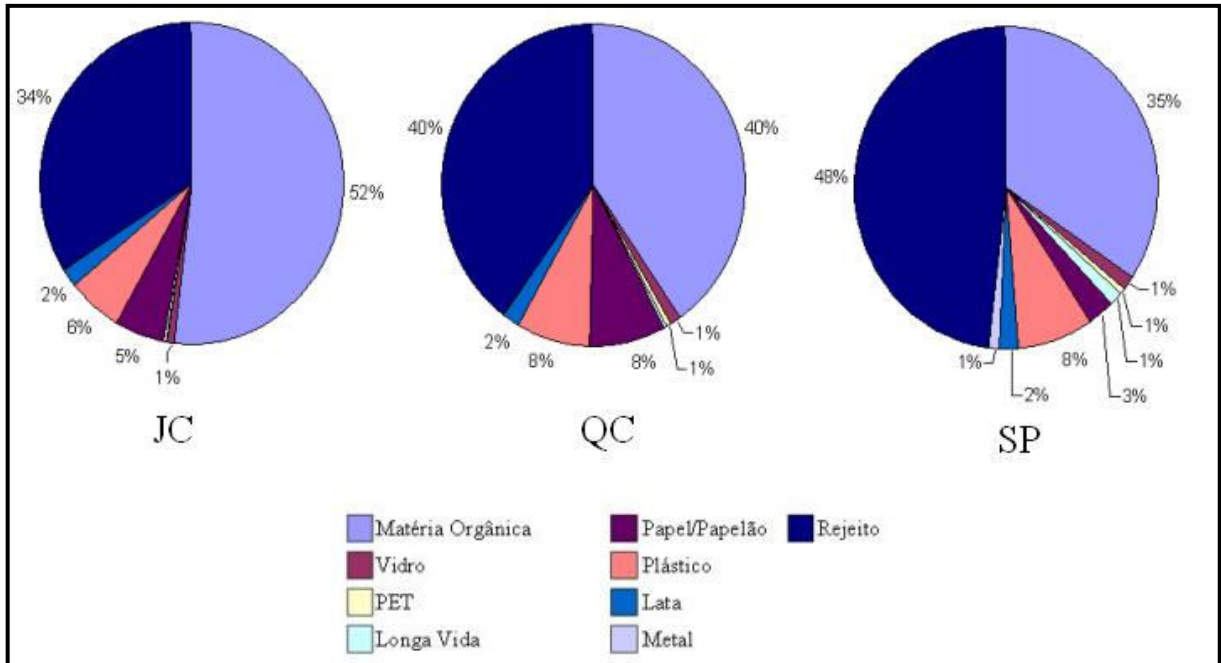


Figura 5.10: Resultado da caracterização gravimétrica pré triagem em setembro de 2007.

A Figura 5.10 mostra que o menor percentual de matéria orgânica encontrado para setembro foi apresentado pela região SP (35%), ao contrário dos meses anteriores, nos quais os menores valores de material orgânico eram identificados em QC. A região SP apresentou também o índice mais elevado de rejeito (48%). O plástico foi o material encontrado em maior quantidade nas três regiões, sendo que em QC esse valor empatou com o encontrado para papel/papelão. Na Figura 5.11 é possível observar as quantidades de rejeito, material orgânico e reciclável nas três amostras, enquanto que a Figura 5.12 apresenta os diferentes materiais recicláveis recolhidos pela esteira.

A Figura 5.10 indica que as regiões QC e SP apresentaram maior produtividade na seleção de materiais recicláveis, ambas com 17% de aproveitamento. Já na região JC 12% do resíduo total que entrou na esteira era composto por material reciclável, e 56% matéria orgânica (o maior percentual das três regiões). A comparação entre as Figuras 5.10 e 5.11 permite concluir que novamente houve transferência de materiais, e que os percentuais de rejeito e matéria orgânica encontrados na caracterização manual e na separação por esteira não são iguais. Quanto aos materiais recicláveis retirados pela esteira, os que aparecem em maior



quantidade são rafia, baixa branco, papel misto, lata e polietileno. A Tabela 5.6 apresenta os valores a partir dos quais os gráficos da Figura 5.12 foram gerados. Devido à mudanças na operação da UT os materiais branco e escrito e cristal escrito foram incorporados ao polietileno.

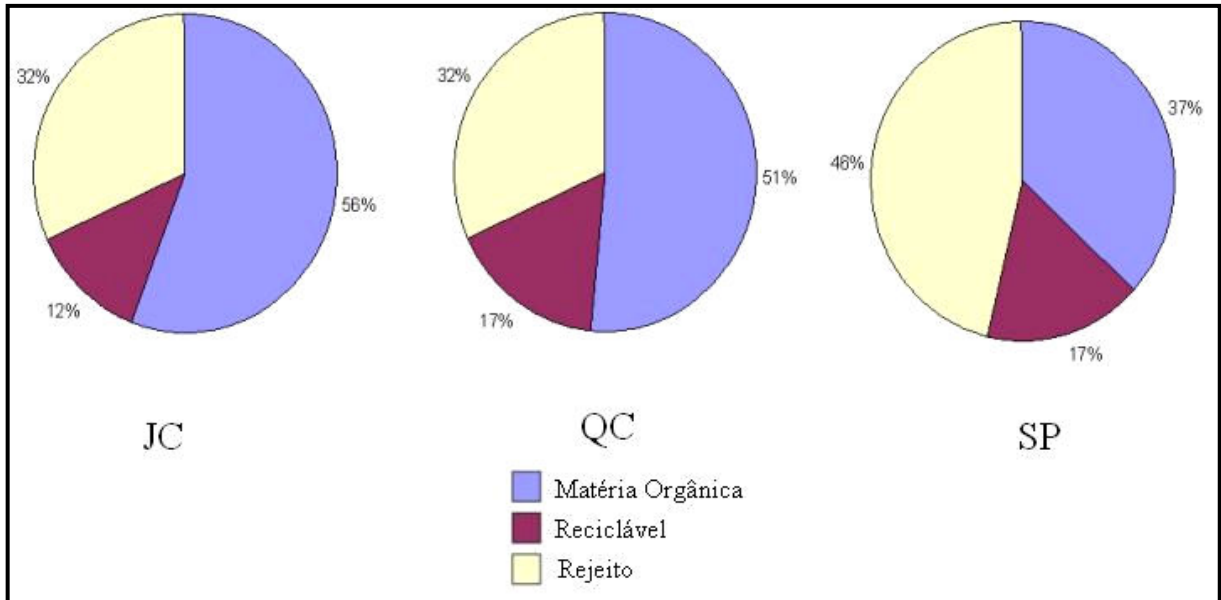


Figura 5.11: Resultados do material selecionado pela esteira de triagem em setembro de 2007.

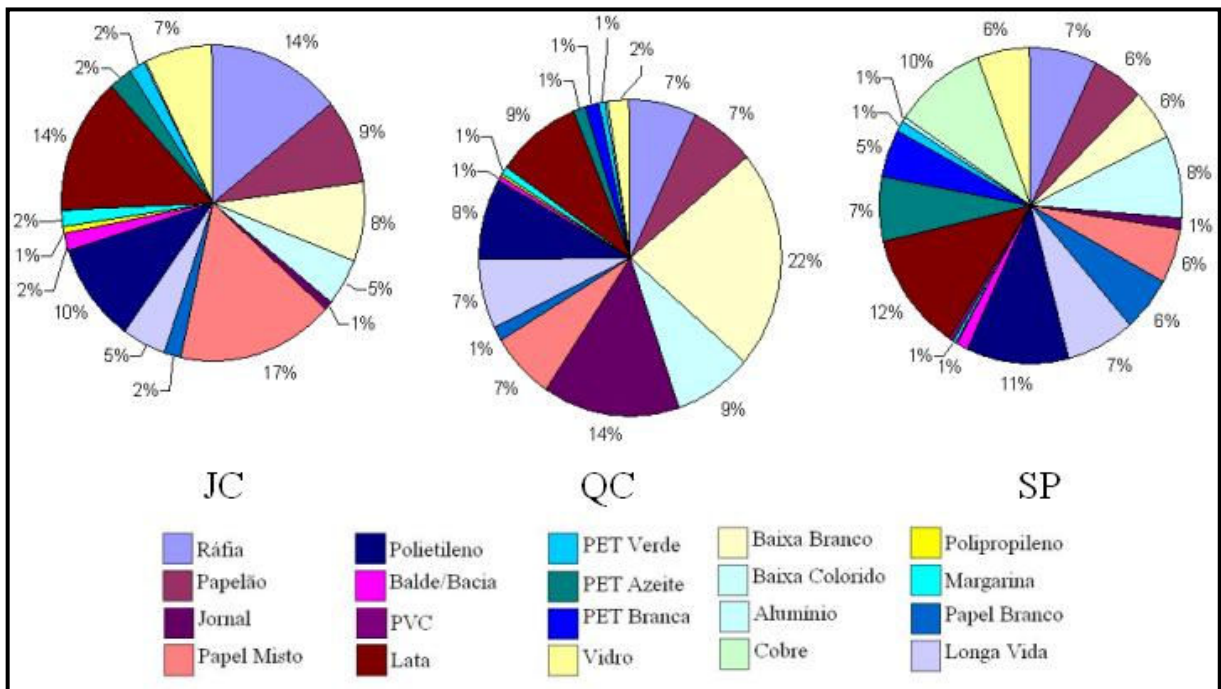


Figura 5.12: Percentuais de materiais recicláveis selecionados pela esteira de triagem em setembro de 2007.

Tabela 5.6: Dados referentes à coleta na esteira de triagem no mês de setembro.

	QC		SP		JC	
	kg	%	kg	%	kg	%
<b>Ráfia</b>	1,00	1,19	1,30	1,19	1,80	1,77
<b>Papelão</b>	1,00	1,19	1,00	0,92	1,10	1,08
<b>Baixa branco</b>	3,10	3,68	1,00	0,92	1,00	0,98
<b>Baixa colorido</b>	1,20	1,42	1,50	1,38	0,60	0,59
<b>Jornal</b>	2,00	2,37	0,20	0,18	0,10	0,10
<b>Papel Misto</b>	1,00	1,19	1,00	0,92	2,10	2,06
<b>Papel Branco</b>	0,20	0,24	1,00	0,92	0,20	0,20
<b>Longa Vida</b>	1,00	1,19	1,30	1,19	0,60	0,59
<b>Polietileno</b>	1,15	1,36	2,00	1,84	1,30	1,28
<b>Balde/Bacia</b>	0,10	0,12	0,25	0,23	0,20	0,20
<b>Polipropileno</b>	0,05	0,06	0,00	0,00	0,00	0,10
<b>Margarina</b>	0,10	0,12	0,05	0,05	1,80	0,20
<b>PVC</b>	0,00	0,00	0,10	0,09	0,30	0,00
<b>Lata</b>	1,30	1,54	2,20	2,02	0,00	1,77
<b>PET Azeite</b>	0,20	0,24	1,20	1,10	0,20	0,29
<b>PET Branca</b>	0,20	0,24	0,90	0,83	0,05	0,00
<b>PET Verde</b>	0,10	0,12	0,25	0,23	0,00	0,20
<b>Alumínio</b>	0,05	0,06	0,10	0,09	0,90	0,05
<b>Cobre</b>	0,00	0,00	1,80	1,65	0,10	0,00
<b>Vidro</b>	0,30	0,36	1,00	0,92	0,20	0,88

Os gráficos referentes à caracterização gravimétrica do material rejeitado pela esteira de triagem estão ilustrados pela Figura 5.13. Através da figura é possível observar que em QC a esteira deixou de recolher quase 5 kg de matéria orgânica, o que corresponde a 19% de todo o rejeito. Em JC o material rejeitado pela esteira apresentou 3% de plástico, enquanto que em SP e JC estes percentuais foram de 1%. As perdas associadas às três etapas do processo estão listadas no Tabela 5.7, que mostra que as maiores perdas de material aconteceram na esteira de triagem. Na última etapa da caracterização, que é a análise do material descartado pela esteira observou-se a incorporação de material para as três regiões. De maneira geral, no mês de setembro, as perdas foram pequenas em comparação aos outros meses. Isto se deve à prática na realização dos ensaios e à ausência de ventos durante o dia das análises.

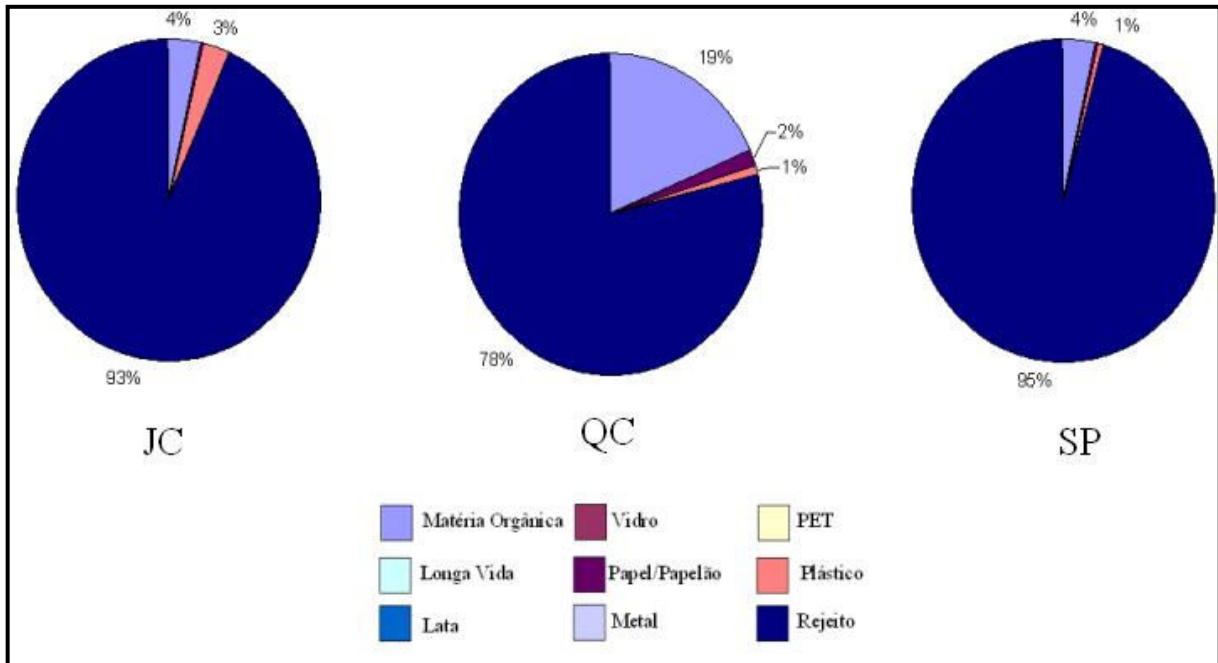


Figura 5.13.: Resultado da caracterização gravimétrica do material descartado pela esteira de triagem em setembro de 2007.

Tabela 5.7: Transferência de massa durante as três etapas da caracterização gravimétrica em setembro de 2007.

	Transferência de Massa										
	Pré-triagem				Triagem			Pós-triagem			
	P1 (kg)	P2 (kg)	Diferença		P3 (kg)	Diferença		P4 (kg)	P5 (kg)	Diferença	
			kg	%		Kg	%			kg	%
QC	97,50	103,00	5,50	5,64	84,35	-18,65	-18,11	27,00	25,70	1,30	4,81
SP	114,50	112,80	-1,70	-1,48	108,80	-4,00	-3,55	50,45	50,25	0,20	0,40
JC	112,50	111,40	-1,10	-0,98	101,85	-9,55	-8,57	32,60	32,40	0,20	0,61

A Figura 5.14 apresenta os dados médios obtidos para cada região durante o período de amostragem. A Figura 5.14 (a) refere-se aos dados médios da caracterização gravimétrica pré-triagem, e através da análise do gráfico é possível afirmar que a matéria orgânica é o material com maior percentual em peso na composição dos resíduos, exceto para a região da Quarta Colônia, onde o maior percentual em peso é de rejeito. Este fato pode ser explicado devido ao perfil da população da região, que por ser em sua grande maioria agrícola, utiliza a matéria orgânica gerada no dia a dia como adubo para suas próprias plantações. O município com o maior percentual de matéria orgânica é Júlio de Castilhos (50,6%). Dentre os materiais recicláveis, que somam em média 19%, os que mais contribuem para a massa de resíduo são

papéis, papelão e plástico, e os que menos aparecem são metais e embalagens longa vida. A Quarta Colônia é a região com maior percentual de material reciclável em sua composição (21%). Ressalta-se que a Quarta Colônia possui poucos catadores de recicláveis na rua, o que pode impactar no alto percentual de material reciclável encontrado no resíduo. Os dados médios indicam que de toda a massa de resíduo da região de Santa Maria, cerca de 30% foi caracterizado como rejeito, o que implica em um potencial de aproveitamento de 62% do resíduo, seja através da reciclagem ou através da compostagem da matéria orgânica. A Figura 5.14 (b) representa os dados médios da caracterização pós-triagem, mostrando um baixo percentual de materiais recicláveis presente no rejeito. Isto indica a boa eficiência da triagem de recicláveis executada através da esteira. Em contrapartida, os significativos percentuais de matéria orgânica encontrados nos rejeitos, demonstra a dificuldade em separar este tipo de material.

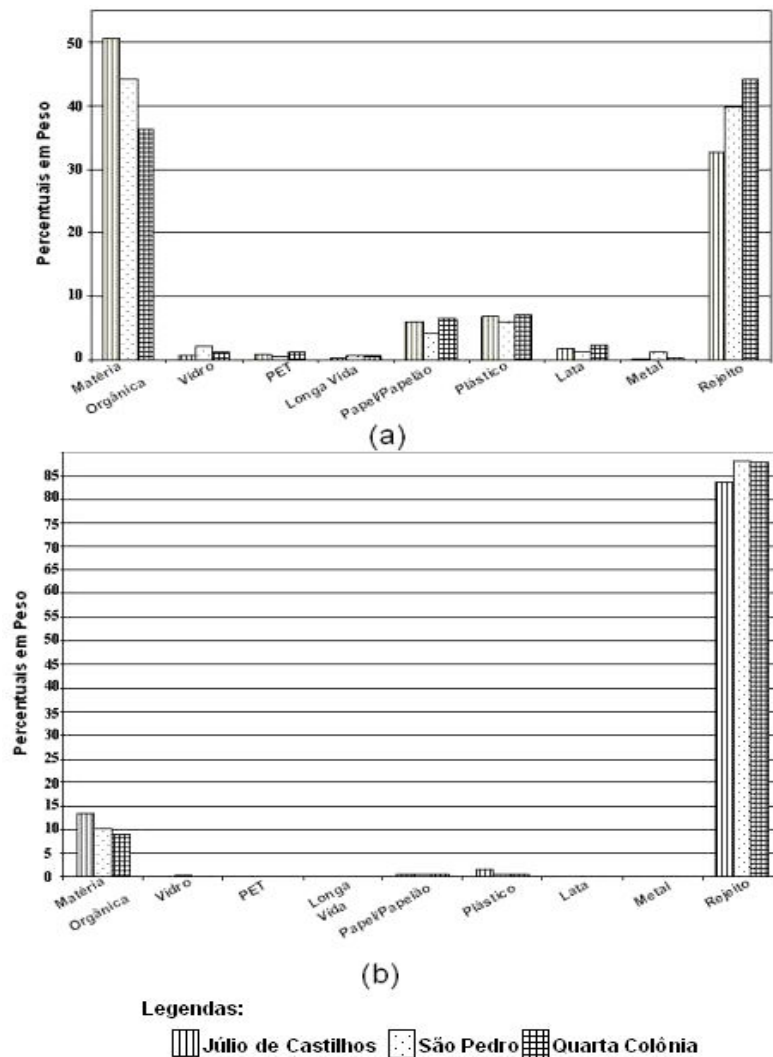


Figura 5.14: Dados médios de caracterização (a) pré e (b) pós-triagem nas regiões estudadas.

### 5.3. COMPACTAÇÃO

A compactação do material foi realizada em duas etapas distintas: a primeira etapa realizada em laboratório, e a seguinte realizada em campo. Os ensaios laboratoriais foram realizados com o objetivo de aferir a pressão de trabalho da prensa estática existente na usina, uma vez que a mesma é muito antiga e não possui manual com os dados técnicos. Para isso, em campo foi medida a densidade de fardos de diferentes materiais compactados pela prensa. Estes mesmos materiais foram levados ao laboratório e submetidos a ensaios de compactação em uma prensa utilizada para ensaios do tipo CBR (ensaios de compactação), conforme apresentado no Cap. 4. A partir destes ensaios foi possível traçar as curvas de compactação destes materiais e determinar aproximadamente a pressão necessária para alcançar a densidade observada em campo. Para aferir a pressão da prensa utilizando este processo foram realizados ensaios com três diferentes materiais, a saber: garrafas de polietileno brancas, plástico resistente (balde/bacia) e polietileno de baixa densidade transparente. O ensaio consistiu basicamente na aplicação de um movimento de ascensão da base da prensa, por controle manual, pressionando os materiais a testar dentro de um cilindro metálico de dimensões padrão contra um pistão de carga.

A partir de uma curva de calibração e das medidas do anel, é possível associar os valores marcados por um dos dois defletômetros do equipamento, à pressão aplicada. Com estes dados foi possível obter a curva de compactação dos materiais quando submetidos a um ciclo de carga, ilustrada pela Figura 5.15. A curva de calibração do anel dinamométrico está representada no Anexo A.

A partir da análise da figura é possível determinar sob quais pressões os materiais testados alcançaram as densidades observadas nos fardos presentes em campo. A densidade do fardo de polietileno branco é de  $173 \text{ kg/m}^3$ , este valor foi alcançado em laboratório com uma pressão de 275 kPa. Já o plástico resistente atingiu a densidade de campo ( $183 \text{ kg/m}^3$ ) com uma pressão de 180 kPa. No ensaio com o polietileno de baixa densidade transparente a densidade de campo, equivalente a  $321,8 \text{ kg/m}^3$  não foi atingida no ensaio a não ser em pressões muito elevadas (Figura 5.16). Este material apresentou uma curva de compactação com grande compressibilidade inicial e, a partir de uma pressão de cerca de 250 kPa, passou a apresentar um enrijecimento muito acentuado. Neste material, a densidade de campo só foi atingida com pressões verticais da ordem de 2000 kPa. A análise da curva parece indicar que pequenas diferenças iniciais de preparação podem levar a grandes diferenças de

comportamento. No caso deste material há também a influência do manuseio, já que, por problemas de transporte, a amostra de laboratório foi reunida a partir de materiais coletados em Porto Alegre. Isto visualmente levou a um material mais limpo do que o material reciclado em campo, o que pode ter contribuído para uma diferença de comportamento em compressão. Assim, em face deste comportamento de grande rigidez à compressão deste ensaio e a resultante grande variação na definição da pressão equivalente de compactação, somente os valores anteriores foram considerados.

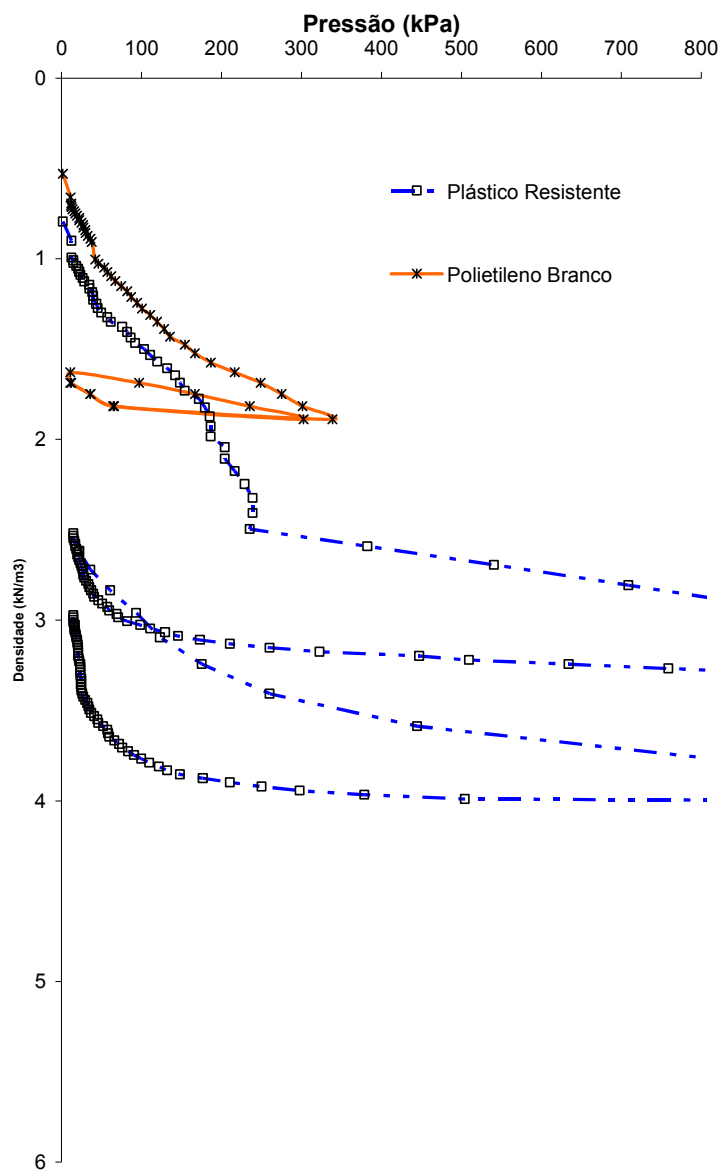


Figura 5.15: Curvas de compactação estática obtida em laboratório para dois tipos de resíduos.

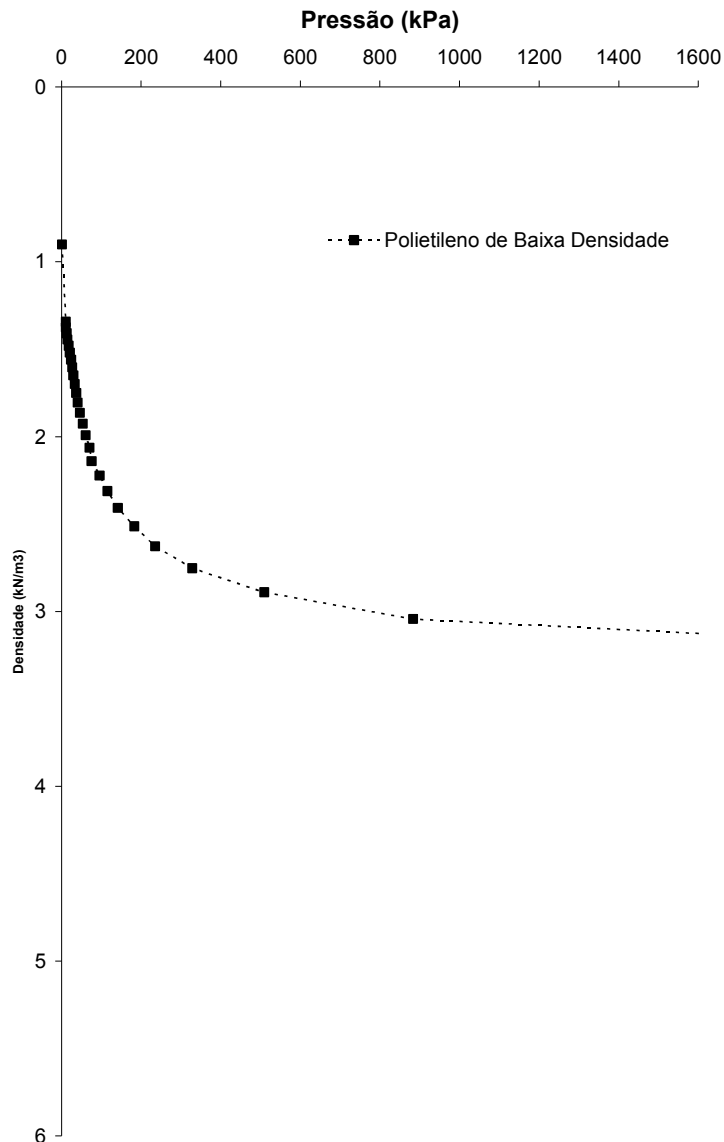


Figura 5.16: Curvas de compactação estática obtida em laboratório para polietileno de baixa densidade.

O resultado das duas medidas de pressão equivalente resultou em uma faixa de pressões entre 180 kPa e 280 kPa. Como a curva de compactação do polietileno de baixa densidade também indica um valor mínimo da ordem de 250-300 kPa, o valor de referência adotado foi de 250 kPa. É interessante que no futuro este valor seja melhor aferido com ensaios específicos ou medição direta na prensa da UT de Paraíso do Sul.

Após a realização destes ensaios de controle em laboratório para determinação da pressão da prensa estática, foi realizado um ensaio de compactação no rejeito da triagem na Unidade de Triagem de Paraíso do Sul. Este ensaio foi realizado objetivando definir qual a diminuição

volumétrica provocada pela compactação, a densidade de um fardo de rejeito compactado e o aspecto físico deste fardo, analisando a viabilidade de manejo e transporte do mesmo.

Um fardo de rejeito solto apresenta densidade de  $233 \text{ kg/m}^3$ . Na prensa foram colocados dois fardos de rejeito, com uma massa total de 361 kg, somando um volume total de  $1,55 \text{ m}^3$ . Após a compactação, o fardo resultante apresentou densidade de  $752 \text{ kg/m}^3$ , indicando uma redução volumétrica de 3,2 vezes, para a pressão estimada de 250 kPa.

Durante o ensaio uma quantidade muito pequena de líquido vazou pela prensa, não prejudicando a realização do mesmo. Em usinas em que a matéria orgânica não é triada espera-se que, com a aplicação da pressão, uma grande quantidade de chorume seja desprendida do material, exigindo que algum sistema de coleta deste líquido seja incorporado à prensa. O fardo de rejeito apresentou uma consistência adequada para seu manuseio, porém as dimensões do bloco e seu peso (cerca de 360kgf), dificultaram a movimentação. Foram necessários três homens para rolar o fardo até a pá do trator, para que então ele pudesse ser transportado à área de destino. A Figura 5.17 mostra uma foto do fardo de rejeito compactado obtido ao final do ensaio.



Figura 5.17: Foto do fardo de rejeito compactado ao final do ensaio.



## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A realização deste trabalho baseou-se no estudo da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos urbanos e no estudo das características de compactação dos rejeitos provenientes da região de Santa Maria. Ao fim do estudo foi possível concluir que:

- A massa de resíduos sólidos urbanos da macro-região de Santa Maria é bastante heterogênea, e apresenta variações de acordo com as características sócio econômicas das regiões. De maneira geral os dados se enquadram aos dados de literatura, ficando próximos da média do Brasil (57% de matéria orgânica), tendo menos matéria orgânica do que a Índia (78%), e com muita diferença em relação aos dados de EUA e Japão, os quais têm diminuta parcela de matéria orgânica e grande parcela de papel, papelão e plásticos (54% e 47%, respectivamente).
- Os resultados da caracterização gravimétrica dos resíduos urbanos realizados nesta dissertação apresentaram uma significativa influência de fatores externos, tais como a presença de umidade devido ao nível pluviométrico e a ação dos ventos na UT de Paraíso do Sul . Isto é devido ao fato que materiais como papel e papelão são descaracterizados em presença de umidade e misturam-se às porções de rejeito e matéria orgânica e materiais leves como folhas de papel seco e plásticos leves são carregados pelo vento.
- A realização da caracterização gravimétrica pré e pós-triagem permitiu uma análise da eficiência da caracterização (ou triagem) feita pela esteira, e a verificação do potencial de aproveitamento dos resíduos. A média dos dados analisados indica uma eficiência de cerca de 86% na triagem efetuada pela esteira, sendo que grande parte do material caracterizado erroneamente é matéria orgânica, um material difícil de ser triado e que muitas vezes incorpora-se a outros materiais. O resíduo da região de Santa Maria apresenta um potencial de aproveitamento de 62 %, seja com a triagem de recicláveis, seja com a compostagem da matéria orgânica.

- Os dados médios indicam que a região com maior percentual de matéria orgânica é o município Júlio de Castilhos (50%). A Quarta Colônia ainda é a região com o menor percentual de matéria orgânica (36,3%), e maior percentual de recicláveis (20%). Estes valores podem ser explicados pelo aspecto mais rural da região o que permite o uso da matéria orgânica nas plantações, e devido ao fato de que na região não é comum a prática de coleta de recicláveis por catadores de rua. Estas particularidades resultam em um resíduo com menos material orgânico e mais material reciclável.

- Através de ensaios de compactação de materiais recicláveis em laboratório foi possível inferir indiretamente a pressão equivalente de uma prensa estática de compactação da UT de Paraíso do Sul, na qual realizou-se um ensaio de compactação de rejeito. Três materiais foram testados conduzindo a um valor de pressão equivalente de cerca de 250 kPa.

- Foi feito um ensaio de compactação no material de rejeito da esteira, o qual foi compactado na prensa estática com pressão equivalente de 250 kPa, obtendo-se um fardo com densidade de 7,66 kN/m<sup>3</sup> (ou cerca de 752 kgf/m<sup>3</sup>). Este fardo de rejeito apresentou uma consistência firme que permitiu seu manuseio sem necessidade de reforços, mas seu elevado peso dificultou as operações de transporte.

- O rejeito compactado não tinha uma significativa presença de material orgânico, e por isso, a compactação não gerou líquido (chorume) em quantidade significativa. A compactação do rejeito proporcionou uma redução volumétrica da ordem de 3,2 vezes. Se esta técnica for utilizada em escala industrial, certamente ampliará a vida útil do aterro utilizado. Embora estas conclusões só possam ser aplicadas ao rejeito produzido nas condições descritas neste trabalho, o processo de compactação mostrou-se viável como alternativa técnica utilizando-se esta pressão de compactação.

Como continuação deste estudo, sugere-se a avaliação criteriosa dos processos de recalque de um aterro constituído por fardos de rejeito compactado. Uma análise preliminar poderá ser feita em pequena escala permitindo avaliar o impacto da compactação dos rejeitos nos recalques, que devem ser reduzidos significativamente pela redução da matéria orgânica e, principalmente, pela redução da porosidade inicial da massa de rejeitos.

Sugere-se também a avaliação das características de resistência de um aterro construído com o material compactado, para que seja possível analisar a estabilidade dos taludes formados e alternativas de disposição.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 8419 (1992). **Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos**. 7p.
- ABNT NBR 10004/2004 (2004). **Resíduos Sólidos – Classificação**. 71p.
- ABNT NBR 10007/2004 (2004) **Amostragem de Resíduos Sólidos**.
- ABRALATAS (2007). Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alta Reciclabilidade. Disponível em: <http://www.abralatas.org.br>. Acesso em 24/04/2007.
- ASTM International (1992): ASTM D 5231-92. **Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocess Municipal Solid Waste**. 5p.
- AZAMBUJA, E. (2006). **O Projeto de Aterro de Resíduos Sólidos**. V Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, GEOSUL'2006. Porto Alegre, RS. Anais pp 261-275.
- BIDONE, F.R.A., POVINELLI, J. (1999). **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. EESC-USP, São Carlos, SP. Pp 109.
- BOSCOV, Ma. E. G. (2006). **Desafios Geotécnicos no Projeto e Construção de Aterros de Resíduos**. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG 2006. Curitiba, PR. Volume de Palestras, pp 145-174.
- BRAGA, B., HESPANHOL, I., CONEJ, J.G.L., BARROS, M.T.L., SPENCER, M., PORTO, M., NUCCI, N., JULIANO, N., EIGER, S. (2002). **Introdução à Engenharia Ambiental**. Prentice Hall, São Paulo, SP. 305p.
- CALLE, J. A. C. (2007). **Comportamento Geomecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. 178p..
- CASTILHOS Jr, <sup>a</sup>B., MEDEIROS, P.<sup>a</sup>, FIRTA, I.N., LUPATINI G., SILVA, J.D. (2003). Principais Processos de Degradação de Resíduos Sólidos Urbanos. **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte**. Cap. 2. PROSAB, Florianópolis, SC. 280p.

---

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1993) **Resíduos Sólidos Industriais**.

CIVIL ENGINEERING (2006). Plasma to Vaporize Florida Landfill Waste. **Civil Engineering – The Magazine of the American Society of Civil Engineers**. Vol. 16, nº 11, pp 32-33.

CIWMB (1990). **General Guidelines for Sampling When Performing a Quantitative Field Analysis for a Solid Waste Generation Study**. Chapter 9, Appendix 1.

COMOULOS, D.G., KORYALOS, T.P. (1997). **Predict of Attenuation of Landfill Settlement Rates With Time**. XIVth. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Hamburg. Proceedings, V.3, pp 1807-1811.

GIDARAKOS, E., HAVAS, G., NTZAMILIS, P. (2006). Municipal Solid Waste Composition Determination Supporting the Integrated Solid Waste Management System in the Island of Crete. **Waste Management**. Vol. 26, pp 668-679.

GOMES, L.P., MARTINS, F.B. (2003). Projeto, Implantação e Operação de Aterros Sustentáveis de Resíduos Sólidos Urbanos para Municípios de Pequeno Porte. **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte**. Cap. 2. PROSAB, Florianópolis, SC. 280p.

GUYONNET, D., GAUCHER, E., GABORIAU, H., PONS, C., CLINARD, C., NOROTTE, V., DIDIER, G. (2005). Geosynthetic Clay Liner Interaction with Leachate: Correlation Between Permeability, Microstructure and Surface Chemistry. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. Vol. 131, nº 6, pp 740-749.

HOWSTUFFWORKS, 2007. Disponível em: <http://pessoas.hsw.uol.com.br/aterros6.htm>. Acessado em: 12/jul/2001.

HRISTOVSKI, K., OLSON, L., HILD, N., PETERSON, D., BURGE, S. (2006). The Municipal Solid Waste System and Solid Waste Characterization at the Municipality of Vales, Macedonia. **Waste Management**. doi:10.1016/j.wasman.2006.09.003.

JEESBERGER, H.L. (1994). **Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction. Part 1: principles and requirements, Part 2: material parameters and test methods; Part 3: selected calculation methods for Geotechnical landfill design**. Proc. Institution of Civil Engineering – Geotechnical Engineering, London, England. V. 107, nº 4, pp 99-113.

JIANGYING, L., DIMIN, X., YOUCAI, Z., SHAOWEI, C., GUOJIAN, L., QI, Z. (2004). Long-term Monitoring and Prediction for Settlement and Composition of Refuse in Shanghai Laogang Municipal Landfill. **Environmental Management**, v. 34, nº 3, pp 441-448.

JUCÁ, J. F. T. (2003). **Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**. V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGeo'2003, Porto Alegre-RS. Anais, pp 443-470.

KLEE, A. J. (1993). New Approaches to Estimation of Solid-Waste Quantity and Composition. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 119, nº 2.

KNOCHENMUS, G., WOJNAROWICZ, M., VAN IMPE, W.F. (1998). **Stability of Municipal Solid Wastes**. Third International Congress on Environmental Geotechnics, v. 3, pp 977-1000.

IPT/CEMPRE (2000). **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 2º Edição. São Paulo, SP. 370p.

LIMA, L.M.Q., (1995). **Lixo: Tratamento e Biorremediação**. 3º Edição. Ed. Hemus. São Paulo, SP. 265p.

LIMA, J. D. (2001). **Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**. João Pessoa, PB. 267p.

MACHADO, S.L., CARVALHO, M.F., NASCIMENTO, J.C.F. (2006). **Estudo do Efeito do Envelhecimento na Resistência ao Cisalhamento de Amostras de Resíduo Sólido Urbano**. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG 2006. Curitiba, PR. Anais, v.3, pp1419-1424.

MANASSERO, M., VAN IMPE, W. F., BOUAZZA, A. (1996). **Waste Disposal and Containment**. Second International Congress on Environmental Geotechnics. Osaka, Japão. Proceedings. Vol. 3, pp 1425-1474.

MARQUES, A.C.M. (2001). **Compactação e Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, SP. 407p.

McCAULEY-BELL, P., REINHART, D. R., SFEIR, H., RYAN, B. O. (1997). Municipal Solid Waste Composition Studies. **Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management**. Vol. 1, nº 4, pp 158-163.

MOTA, S. (2000). **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2a. Ed. ABES, Rio de Janeiro, RJ. 416p.

OLIVEIRA, F.J.P. (1994). **Características Geotécnicas de Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos**. Simpósio Internacional de Destinação do Lixo. Anais, pp 106-141. Salvador, Bahia.

ONDARPC (2006). Disponível em:

<<http://canais.ondarpc.com.br/fotografia/foto.phtml?secao=fotografos&id=55&offset=4>>.

Acesso em 03/02/2007.

PARK, H.I., LEE, S.R., DO, N.Y. (2002). Evaluation of Decomposition Effect on Long-Term Settlement Prediction for Fresh Municipal Solid Waste Landfills *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

- 
- SHARMA, M., McBEAN, E. (2007). A Methodology for Solid Waste Characterization Based on Diminishing Marginal Returns. **Waste Management**. Vol. 27, pp 337-344.
- SHARMA, H.D., LEWIS, S.P. (1994). **Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfills: Design and Evaluation**. Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY. 588p.
- SHARMA, M., McBEAN, E. (2007). A Methodology for Solid Waste Characterization Based on Diminishing Marginal Returns. **Waste Management**. Vol. 27, pp 337-344.
- SILVEIRA, A.M.M. (2004). **Estudo do Peso Específico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação de mestrado. Dep. De Engenharia Civil, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 112p.
- SIMÕES, G.F., CAMPOS, T.M.P. (1998). **Modelos de Previsão de Recalques em Aterros Sanitários**. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica. Anais V. 3, pp 1679-1686. Brasília.
- SORMUNEN, K., ETTALA, M., RINTALA, J. (2007). Detailed Internal Characterization of two Finnish Landfills by Waste Sampling. **Waste Management**. doi:10.106/j.wasman.2007.01.003.
- SPIEGEL, M. R. (1971). **Estatística: Resumo da Teoria, 875 Problemas Resolvidos, 619 Problemas Propostos**. 11ª Edição. Ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo. 580p.
- TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN H., VIGIL, S.A. (1993). **Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues**. McGraw-Hill Book Co. Singapore. 978p.
- TEIXEIRA, R.S., LOPES, D.D., SILVA, S.M., FERNANDES, F., CELLIOGLI, A., DELL'ANTONIA, L.H., FURLAN, F. (2006). **Investigação Preliminar da área de Disposição de Resíduos Sólidos do Município de Londrina PR**. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG 2006. Curitiba, PR. Anais, Volume 3, pp 138891394.
- USP (2006). Disponível em <[http://www.cdcc.usp.br/ciencia/artigos/art\\_28/agua8.html](http://www.cdcc.usp.br/ciencia/artigos/art_28/agua8.html)>. Acesso em 03/02/2007.
- WALL, D.K., ZEISS, C. (1995). Municipal Landfill Biodegradation and Settlement. **Journal of Environmental Engineering**, v. 121, n° 3, pp 214-224.
- ZENG, Y., TRAUTH, K. M., PEYTON, R. L., BANERJI, S. K. (2005). Characterization of Solid Waste Disposed at Columbia Sanitary Landfill in Missouri. **Waste Management & Research**. Vol. 23, pp 62-71.

## **ANEXO A – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ANEL DINAMOMÉTRICO**

