

UM NOVO EQUIPAMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

New equipment for the determination of geotechnical parameters

Cláudio Fernando Mahler*

Amaury Resende Carvalho**

Ana Maria Miranda da Silveira***

RESUMO – Este trabalho apresenta um equipamento desenvolvido para obter parâmetros fundamentais do comportamento geotécnico de resíduos sólidos dispostos em aterros, os quais compreendem o peso específico, teor de umidade, capacidade de campo, peso específico médio dos sólidos e porosidade. Todos os componentes foram projetados para coletar amostras de resíduos sólidos no campo com o mínimo de perturbação. Com o objetivo de aferir o equipamento foram feitas diversas coletas de amostras, sendo os resultados comparados com valores determinados através do ensaio de cava *in situ* e da determinação do peso específico através do controle da pesagem na entrada do aterro e de medidas topográficas das células de resíduos. Os parâmetros geotécnicos obtidos com o novo equipamento apresentaram resultados bastante satisfatórios.

SYNOPSIS – This paper describes an equipment developed for obtaining of basic parameters of geotechnical behavior of solid waste in landfills which include specific weight, moisture content, on-site capacity, average specific weight of solids, and porosity. All parts of the equipment were designed to collect solid waste samples in the field with minimal disturbance of the sample. In order to check the equipment several samples were collected and the results compared with values from a slot test and *in situ* determination of the weight by control of the weighing of trucks at the entrance of the landfill and topographic measures of waste cells. The geotechnical parameters obtained from the new equipment showed quite satisfactory results.

PALAVRAS CHAVE – Equipamento, peso específico, resíduos sólidos, amostragem.

1 – INTRODUÇÃO

Para projetar um aterro sanitário diversas informações geotécnicas dos resíduos sólidos e dos solos são necessárias. Para obtê-las investigações geológicas, hidrogeológicas, meteorológicas e geotécnicas são essenciais. O projeto de um aterro sanitário exige procedimentos geotécnicos para análise da sua estabilidade, deformações e vida útil. Dentre os parâmetros cuja determinação é relevante, tem-se o peso específico, o qual é dependente das características dos resíduos, da compactação, da degradação, do gerenciamento dos gases e líquidos produzidos no aterro e da tensão confinante. É usado na análise de estabilidade e na previsão de vida útil do aterro. O teor de umidade, por sua vez, tem uma relação com o estado inicial, o percentual de matéria orgânica, procedimentos da sociedade na disposição dos resíduos, clima e, por fim, com a biodegradação e conseqüentemente com a produção de gás e lixiviado. Tanto o peso específico como a umidade são relevantes para o projeto dos sistemas de gás e drenagem. Por sua vez, a determinação da capacidade de campo e permeabilidade também são importantes para a obtenção do balanço hídrico, tendo, pois, influência no dimensionamento da cober-

* D.Sc., L.D. – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

** D.Sc – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

*** M.Sc. – Co-autora falecida em 2006. Homenagem dos outros autores à sua colaboração aos estudos de peso específico em aterros de resíduos sólidos.

tura e no sistema de impermeabilização do aterro. Também a porosidade é relevante pois está diretamente ligada à capacidade dos solos e dos resíduos reterem água. Assim, todos estes parâmetros são importantes no projeto e readaptação dos aterros sanitários durante a operação.

Para projetar corretamente um aterro sanitário, é importante e necessário conhecer as propriedades geotécnicas dos resíduos, as quais também variam de região para região e com o tempo, em função das modificações nos produtos e hábitos. Por exemplo, no Rio de Janeiro, o consumo de cerveja no verão é muito maior proporcionalmente ao inverno, quando se consome mais vinho. Desta forma, resíduos de vidro, crescem proporcionalmente no inverno. Mas no verão não há crescimento significativo de metais, tendo em vista que o Brasil é um dos países com maior percentual de reaproveitamento de alumínio.

Apresenta-se neste trabalho um equipamento relativamente simples, de fácil transporte e utilização. Este equipamento permite coletar amostras praticamente indeformadas, as quais podem ser posteriormente manipuladas de forma a fornecer valores de peso específico, capacidade de campo, peso específico médio dos grãos, umidade e porosidade, com boa precisão. A ideia central foi desenvolver um equipamento otimizando o processo de cravação do amostrador e sua retirada. No processo de cravação tornou-se possível controlar a verticalidade do sistema, usando um macaco hidráulico disposto numa estrutura apropriada para esse fim. É também importante controlar a deformação da amostra na extração simplificada. O procedimento permitiu assim obter, com rapidez, amostras pouco deformadas. Resultados dos ensaios realizados no Aterro Sanitário de Santo André e na lixeira de Paracambi são apresentados e discutidos neste trabalho, mostrando a boa exequibilidade e qualidade do equipamento aqui descrito.

2 – ATERROS ESTUDADOS

2.1 – Aterro Sanitário de Santo André / SP

Em 1987 se iniciou a segunda etapa do aterro que ocupava uma área de 217000 m². A altura de cada berma varia em torno de 5,0m, sendo fechada por camadas compactadas de espessura não inferior a 0,30m e não superior a 0,60m, dispostas em taludes com inclinação máxima de 1V:2H. Em cada camada, os resíduos sólidos são descarregados no pé do talude, empurrados de baixo para cima e compactados, primeiro, com 3 a 5 passadas de trator de esteiras tipo AT D8 e após, com 3 a 5 passadas de Rolo Compactador Pé de Carneiro pesando 20 t (somente no platô), operando com a capacidade de recepção de aproximadamente 20000 toneladas/mês de resíduos sólidos.

A cidade de Santo André tem uma população de 648443 habitantes (IBGE-2000) e fica na área metropolitana da Cidade de São Paulo.

Diversas composições gravimétricas dos resíduos sólidos dispostos no Aterro Sanitário de Santo André são apresentadas no Quadro 1 a seguir:

Quadro 1 – Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos
– Município de Santo André/SEMASA (2001, 2006).

Tipo de Material	1992	1999	2004	2005
Papel e Papelão	7,6	17,4	9,0	7,0
Plástico	12,2	13,1	17,0	14,0
Vidro	2,3	1,9	1,0	1,0
Metal e Alumínio	3,8	3,6	1,0	1,5
Matéria Orgânica	71,0	56,8	58,0	67,0
Outros	3,1	7,2	14,0	9,5

O elevado teor de material orgânica apresentado em 2005 é causado pela evolução do programa de coleta seletiva. Isto significa que uma grande parte do lixo reciclável é coletado na cidade e não é mais disposto no aterro sanitário.

2.2 – Lixeira Municipal de Paracambi / RJ

A cidade de Paracambi tem uma população em torno de 30000 habitantes (IBGE, 2000). Os resíduos sólidos foram dispostos nos últimos 36 anos em uma área de 30000m². Sob o ponto de vista ambiental o local é inadequado, praticamente dentro da área urbana da cidade (Silveira, 2004). Os resultados da caracterização gravimétrica são apresentados no Quadro 2. Não há um programa implementado de coleta seletiva na cidade.

Quadro 2 – Composição gravimétrica dos resíduos sólidos de Paracambi (Silveira 2004).

Tipo de Material	2004
Papel e Papelão	14,0
Plástico	20,0
Vidro	1,0
Metal e Alumínio	0,0
Matéria Orgânica	63,0
Outros	1,0

A compactação é realizada de forma irregular com um trator de esteira CATD6E.

3 – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Tendo em vista a particularidade da determinação dos parâmetros geotécnicos apresentados neste trabalho apresentam-se a seguir os procedimentos adotados:

3.1 – Peso específico (γ_{nat})

$$\gamma_{nat} = P / V \quad (1)$$

3.1.1 – Amostrador tipo percâmetro

No caso do amostrador proposto neste artigo o peso da amostra (P) é dado por:

$$P = (M_{t_{cil}} - T_{cil}) \times g \quad (2)$$

g – aceleração da gravidade e que vale em torno de 9,81 m/s²;

M_{t_{cil}} – massa do cilindro cheio;

T_{cil} – massa do cilindro vazio (tara);

V – Volume da amostra que é igual ao volume interno do cilindro.

3.1.2 – Ensaio de vala

No caso do ensaio de vala, P é o peso do volume de resíduos e solo retirado da cava e V é o volume de água colocada dentro da manta, a qual impermeabiliza a vala, até atingir o nível de resíduos que havia antes. Vale observar que deve haver uma raspagem da capa do solo. A cava é feita com o auxílio da pá de uma retroescavadeira devendo ter dimensões de aproximadamente 2×1×1 m.

3.1.3 – Controle de caminhões de resíduos e topografia

No caso da determinação do peso específico pelo controle do peso do caminhão e pela medida de volume por topografia mede-se o peso do caminhão na entrada e na saída do aterro, inclusive dos caminhões de terra. A diferença de peso entre a entrada e a saída fornece o quanto está sendo colocado na célula. Idealmente deve haver uma balança rodoviária dentro do aterro para o controle do peso dos resíduos e de terra dispostos para confecção e cobertura da célula a qual é usada para determinação de peso específico. O volume é determinado por medida antes e depois da construção da célula e uso de algum software de topografia.

Em todos os casos o peso específico é definido pela equação 1.

3.2 – Teor de umidade (w_{nat})

O teor de umidade natural foi obtido, em base seca, a partir da diferença entre a massa úmida " M_{nat} " da amostra e a massa seca " M_s ", que é igual a massa de água " M_w ", dividida pela massa seca. Essa massa seca é obtida por secagens e medições sucessivas das massas dos resíduos das amostras, em estufa na temperatura de 65 °C, até que as massas entre duas medições se tornem constantes. O conjunto amostrador possui um anel de cravação onde há um reservatório para a coleta de material fora do cilindro, usado para a determinação do teor de umidade.

3.3 – Capacidade de campo (θ)

A capacidade de campo é obtida a partir da drenagem da amostra até o ponto que, praticamente, termina a drenagem ou a amostra para de pingar por, pelo menos uma hora.

Isto significa que a vazão, normalmente, atingiu o limite adotado de, no mínimo, 0,01 cm³/s quando o ensaio é dado como terminado. Em seguida, se determina a massa do cilindro com a amostra, e a massa na capacidade de campo " M_{cc} ". Com a massa seca determinada, calcula-se a massa de água na capacidade de campo " M_{wcc} " que é igual ao " V_{wcc} " (considerando-se a densidade da água, numericamente, igual a 1), pela diferença entre a massa da amostra na capacidade de campo e a massa seca. São retiradas três amostras em cápsulas de alumínio para a determinação do teor de umidade na capacidade de campo.

Com este volume se calcula a capacidade de campo " θ " a partir de:

$$\theta = V_w / V \quad (3)$$

3.4 – Porosidade (n)

A partir do momento que a amostra se encontra saturada se obtém o peso saturado da amostra " P_{sat} ". Tendo-se esse peso, por diferença, com o peso seco, calcula-se o peso da água na saturação " P_{wsat} ", que é, numericamente, igual ao volume de água que preenche os vazios (V_v) da amostra vezes o " γ_w ". Considerando-se o " γ_w " igual a 10kN/m³, calcula-se a porosidade:

$$n = V_v / V \quad (4)$$

3.5 – Peso específico médio dos sólidos (γ_{ms})

Tendo-se o volume de vazios e o volume total da amostra se chega ao volume seco " V_s " ou volume dos sólidos. Assim, de posse dos valores da massa seca e do volume seco se determina o peso específico médio dos sólidos:

$$\gamma_{ms} = M_s / V_s \quad (5)$$

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – Desenvolvimento do equipamento percâmetro

Inicialmente foi usado um amostrador do ensaio CBR para coletar a amostra no aterro. Na evolução do equipamento (Fase I) o extrator ou amostrador foi modificado e o ângulo de contato com a amostra foi alterado de 50° para 30°. Esta alteração foi implementada para diminuir a deformação da amostra coletada. Foi também implementado um rebaixo na extremidade superior do cilindro. Este rebaixo teve por finalidade facilitar a colocação de colares de aço tipo CBR para facilitar a cravação no final da amostragem. O equipamento foi executado em aço 1010-1020. Foram, inicialmente, executados 6 cilindros amostradores com um tratamento denominado de galvanização eletrolítica, com a finalidade de se conseguir proteção contra a corrosão provocada pelos resíduos sólidos. Nas peças finais, optou-se pelo tratamento denominado oxidação, que é um tratamento térmico comum no setor da mecânica de usinagem, para a proteção de peças contra a oxidação e corrosão. Além disso, é de simples aplicação, de baixo custo e não causa deformações nas dimensões das peças.

A fim de se facilitar o manuseio do equipamento e aumentar o controle da qualidade das amostras, foram feitas alterações de projeto inicial. Para aumentar a vedação do equipamento foi aperfeiçoada, na Fase II, a forma de impermeabilização que se dá por meio de anéis *O'ring* e anéis especiais (Figuras 1 e 2). No que diz respeito à cravação e à extração, o cilindro amostrador (Figura 3) ficou sem o bisel e passou a ter roscas nas duas extremidades para permitir a fixação de peças de diferentes funções. Desse modo, executaram-se anéis de aço roscados, especialmente projetados, sendo que o superior, anel de extração (Figuras 2 e 3) facilita o controle da verticalidade na cravação e na extração, e o inferior, anel de cravação (Figuras 2 e 3), facilita a penetração na cravação e a manutenção da qualidade da amostra.

Foram projetadas ainda três pares de tampas roscadas especiais em aço, alumínio e PVC com a finalidade de se testar a viabilidade dos materiais quanto à resistência, diminuição do peso, facilidade de manuseio, vedação e custo.

As tampas servem para vedar o amostrador inferiormente (Figura 4) e para a fixação de um registro de controle de fluxo no ensaio de permeabilidade e drenagem do percolado, além de ser utilizada na determinação da capacidade de campo. A outra tampa é utilizada como vedação superior (Figura 4) e fixação de um espigão e de outro registro de controle da passagem de ar e água (Figura 4), tanto na drenagem do percolado, como no ensaio para determinação da capacidade de campo. Essas peças permitem a determinação dos índices físicos. A Figura 5 apresenta uma estrutura simples constituída de um tripé, especialmente desenvolvido para apoio da amostra no amostrador para saturação e drenagem do percolado, conforme programado.

Foi projetada e executada uma estrutura metálica que permite a fixação de um macaco hidráulico com manômetro, para o controle da pressão de cravação, e de uma travessa-guia que tem por finalidade a manutenção da verticalidade na cravação. Essa estrutura metálica serve também como estrutura de reação (Figura 6).

No caso do anel de cravação foram introduzidos pequenos dentes e um pequeno ângulo negativo interno, para aliviar a pressão na amostra e dificultar a sua saída, facilitando a cravação (Figura 1). Além disso, devido às dificuldades na cravação em resíduos plásticos e com o intuito de melhorar a sensibilidade, no caso de se encontrar materiais muito duros, e assim poder parar a cravação, foi feito um dispositivo que permite um giro de 60° (Figura 6), com movimento de subida e descida do amostrador por meio de alavancas manuais de controle do macaco hidráulico e do próprio amostrador.

Por fim, uma grande dificuldade ocorria no momento da extração da amostra. Assim, chegou-se a uma forma de retirada da amostra, por meio de um enxadão e cavadeira especiais, com ganchos e corrente (Figura 7), que facilitam e agilizam a extração na amostragem.

Uma sequência de fotos elucidativas das peças e do funcionamento do equipamento é apresentada nas Figuras 1 a 10 e nos Quadros 3 a 7 com a relação de peças.



Fig. 1 – Amostrador (Carvalho, 2006).

A Figura 2 apresenta detalhes do amostrador e o Quadro 3 a relação das peças.



a) Amostrador e anéis de cravação e extração

b) O'rings, tampas e chave de unha

Fig. 2 – Amostrador e peças de trabalho do mesmo (Carvalho, 2006).

Quadro 3 – Relação das peças do amostrador.

Nº	PEÇA
06	Anel de extração
07	Amostrador
08	Anel de cravação
10	Tampa superior
11	Tampa inferior
12	Chave de unha para fixação e desmontagem
13	O'ring de vedação

A Figura 3 apresenta outros detalhes do amostrador e o Quadro 4 a relação de peças.



a) Conjunto amostrador e tampas de ensaio



b) Conjunto de ensaio e anéis de cravação

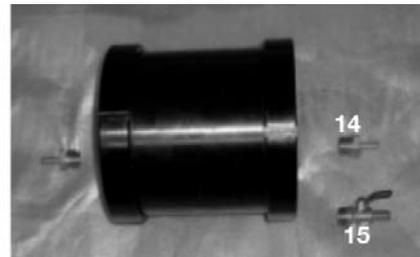
Fig. 3 – Amostrador e peças (Carvalho, 2006).

Quadro 4 – Relação das peças das fotos.

Nº	PEÇA
06	Anel de extração
07	Amostrador
08	Anel de cravação
10	Tampa superior de ensaio
11	Tampa inferior de ensaio



a) Conjunto de ensaio montado com espigões e válvula.



b) Conjunto de ensaio separado dos espigões e válvula.

Fig. 4 – Amostrador com espigões e válvulas (Carvalho, 2006).

Quadro 5 – Relação das peças das fotos.

Nº	PEÇA
14	Espigão de fluxo de 5/8"
15	Válvula de fluxo de 1/2"



Fig. 5 – Montagem do equipamento em tripé para saturação e drenagem do percolado.

Tal como pode observar-se nas fotos da Figura 6, coloca-se solo sobre os resíduos com a finalidade de se diminuir o odor exalado pelo material em decomposição.



Fig. 6 – Foto superior: em destaque o dispositivo de giro e o apoio de reação superior (pneu)
Foto inferior: as alavancas de giro e os prolongadores colocados.



Fig. 7 – Foto à esquerda: em destaque a cavadeira especial de extração;
Foto à direita: o enxadão corrente e ganchos de extração.

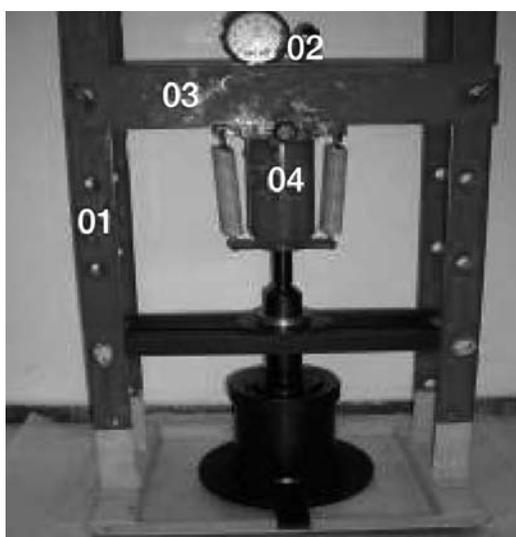


Fig. 8 – Foto a esquerda: equipamento mais conjunto amostrador;
Foto a direita: equipamento montado para a coleta de amostras.

Quadro 6 – Relação das peças do equipamento.

Nº	PEÇA
01	Estrutura suporte
02	Manômetro
03	Travessa principal
04	Pistão hidráulico de 15t



Fig. 9 – Foto a esquerda: peças de extração da amostra; Foto a direita: ferramental auxiliar de extração.

Quadro 7 – Relação das peças de extração.

Nº	PEÇA
22	Corrente
23	Gancho de 1"
24	Colchete do extrator
25	Enxadão
26	Alavanca



Fig. 10 – Vista do equipamento em uso em aterro sanitário.

4.2 – Método da Vala

O Método da Vala não é um ensaio padronizado, apesar de ser utilizado com frequência para determinar o peso específico dos resíduos sólidos em aterros.

Para a determinação do peso específico optou-se pela execução de uma cava, com a posterior pesagem do material escavado e cubagem do volume encontrado. A cava tinha dimensões aproximadas de $2 \times 1 \times 1$ m.

Em função da dificuldade de escavação em aterros de lixo para a obtenção de um polígono regular, devido à presença de madeiras, plásticos, vidros, embalagens PET, não é possível a escavação de uma cava com dimensões bem definidas. Outro ponto importante é quando surge percolado durante a escavação da vala, neste caso a sua profundidade será limitada pela altura do nível de líquido percolado em seu interior. A partir da presença de percolado no fundo da cava, o serviço de escavação era paralisado. Em seguida se procedia à pesagem de todo o material escavado. Para fazer a cubagem da cava, colocava-se uma lona plástica para a impermeabilização da vala e enchia-se a mesma com água.

Obtidos os valores de material escavado e volume de água para o preenchimento da cava podia-se finalmente determinar o peso específico da massa de lixo depositada, a partir da fórmula:

$$\gamma = \frac{\text{peso do material úmido escavado}}{\text{volume da cava}} \quad (6)$$

Para tanto, alguns cuidados devem ser tomados na determinação do peso específico por esse método.

4.3 – Escolha dos locais para a execução das valas

Na escolha das áreas a serem ensaiadas, foram consideradas as informações dos técnicos da Prefeitura, que identificaram a direção de expansão do despejo de lixo, permitindo a escolha de amostras com presumíveis idades e graus de compactação diferenciados, o que foi considerado na análise do peso específico e do tempo de disposição.

4.4 – Preparação do local

Escolhidas as áreas para locação das cavas, retirou-se a camada de solo superficial, com o emprego de um trator de esteiras (Figura 11).



Fig. 11 – Preparo local com trator de esteiras (Silveira, 2004).

4.5 – Escavação

Junto à área determinada para execução da primeira cava, é estendida a lona plástica onde são acomodados os latões usados na pesagem do material escavado, dá-se início à escavação, colocando-se todo o material escavado nos latões (Figura 12).



Fig. 12 – Retirada do material com a retro (Silveira, 2004).

4.6 – Pesagem do material escavado

Todo o material escavado é colocado nos latões selecionados e pesados. O peso do material é a diferença entre o peso total e a tara dos latões. Após a pesagem, o material é despejado próximo a cava, de onde é removido, para recolocação na cava após o término do ensaio (Figura 13).



Fig. 13 – Equipamentos de pesagem e medição de volume (Silveira, 2004).

4.7 – Cubagem da cava

O volume de água necessário ao preenchimento das cavas foi medido com o emprego de latões previamente calibrados para esta etapa do ensaio (Figura 14).



Fig. 14 – Vala impermeabilizada e cheia de água (Silveira, 2004).

Os resultados obtidos para o peso específico em aterros sanitários foram menores do que os observados em aterros controlados e não controlados (lixreira). Vale lembrar que os aterros sanitários tem, essencialmente, uma melhor organização operacional, uso de equipamentos de compactação em melhores condições, controle da compactação de forma a se obter um valor adequado, com regularidade na operação. No caso do aterro de Santo André, a empresa que o administra tem desde 2003 o certificado de qualidade ISO 9000/2000, o que garante uma qualidade mínima na operação e a não disposição no aterro de resíduos da construção civil, proibidos de serem dispostos em aterros por resolução do CONAMA² de 2002. Os valores de peso específico elevados, por exemplo, 19,74 kN/m³, foram devido ao uso de entulho como material de cobertura no lixeira, o que acabou por interferir no valor obtido. Ressaltem-se ainda algumas dificuldades de realização dos ensaios em cava com qualidade, tendo em vista:

- alívio de tensões provocado pela escavação do material, que provoca movimentos laterais e de fundo em direção à abertura, diminuindo o seu volume;
- movimentos de equipamentos pesados e pessoas nas bordas da cava, que também contribuem para a diminuição da mesma;
- dificuldades na preparação da cava com regularidade e ao se cortar certos materiais resistentes constituintes dos resíduos, tendo em vista a sua heterogeneidade;
- dificuldades na colocação da manta plástica e sua adaptação à cava de forma a realmente ocupar as superfícies de todo o volume de resíduo escavado;
- problemas com a calibração dos equipamentos, inclusive com os recipientes usados para a adução da água.

* CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução no. 307 de 2002

Em razão desses cuidados deduz-se que existe a possibilidade dos resultados, com esse método, redundarem em valores com certo incremento. Isto não invalida o método, mas leva a se tomar as precauções que contornem as questões elencadas no sentido de se ter resultados com maior confiabilidade.

5 – MEDIDAS DE PESO E CONTROLE TOPOGRÁFICO

Medidas de peso dos caminhões de lixo, bem com do solo usado permitem estimar o peso total depositado numa determinada célula. Com o controle topográfico é possível estimar com precisão o volume correspondente e com isso determinar com certa precisão o peso específico médio dos materiais dispostos naquele local. Este método fornece uma estimativa global aproximada do peso específico dos resíduos sólidos dispostos naquela célula. No caso específico do aterro sanitário de Santo André, a determinação do peso específico por este procedimento foi feita fazendo uso ainda do *software* “Topograph”. No Quadro 8 são apresentados os resultados obtidos no Aterro Sanitário de Santo André.

Quadro 8 – Peso específico médio obtido com Controle de Peso e Medidas Topográficas (SEMASA, 2006).

Peso Específico (kN/m ³)				
Camada	5	7	9	11
Média	5,99 – 8,01	7,19 – 10,85	8,56 – 11,69	10,11 – 14,42

6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Quadro 9 apresenta os resultados de pesos específicos obtidos na primeira etapa desta pesquisa (Fase I).

Nesta etapa, foram realizados os ensaios da Fase I, em conjunto com o Método da Vala, nos aterros de Paracambi e Santo André.

Quadro 9 – Resumo comparativo de todos os valores de pesos específicos amostrados na Fase I e com o Método da Vala.

Ensaio	Data	Aterros	Peso Específico Obtido		Obs.
Paracambi/RJ	05/08/02	Lixão	Método da Vala	Fase I	Cava 1 Cava 2 Cava 3
			13,45 kN/m ³		
			16,50 kN/m ³		
			13,96 kN/m ³		
			15,38 kN/m ³		
	25/02/03			10,65 kN/m ³	
	05/09/02			12,82 kN/m ³	
	20/09/02			16,37 kN/m ³	
				9,47 kN/m ³	
				11,10 kN/m ³	
				14,21 kN/m ³	
Santo André	13/03/03	Aterro Sanitário	10,90 kN/m ³	10,95 kN/m ³	Berma 01 Berma 18 Berma 17
			9,89 kN/m ³	10,00 kN/m ³	
				11,76 kN/m ³	
			*19,56 kN/m ³	10,17 kN/m ³	

* Excesso de resíduos da construção civil e excessivamente compactado quando comparado com outros pontos. Além de haver muita mistura de solo com resíduos.

O Quadro 10 apresenta os parâmetros geotécnicos obtidos nas bermas 3, 5, 7, 9 e 11 do Aterro Sanitário de Santo André, em amostragens realizadas com o procedimento apresentado neste trabalho, chamado aqui de Fase II. A composição de cada amostra foi determinada e isto foi considerado na análise dos resultados observados na determinação do peso específico.

Quadro 10 – Resumo dos parâmetros geotécnicos obtidos com o uso do percâmetro no Aterro Sanitário de Santo André, nas bermas 3, 5, 7, 9 e 11.

Nº	γ_{nat} (kN/m ³)	w_{nat} (%)	θ (%)	n (%)	γ_{ms} (kN/m ³)
1	5,36	71,95	25,16	75,37	12,65
2	7,47	71,78	39,73	68,44	13,73
3	8,93	51,60	41,16	67,72	18,25
4	9,65	41,52	40,17	66,77	20,50
5	10,83	30,40	38,31	58,80	20,11
6	10,88	41,31	45,14	62,52	20,50
7	11,07	34,84	36,75	50,68	16,68
8	11,89	40,06	38,92	59,05	20,70
9	12,14	28,64	42,08	58,20	22,56
10	12,30	48,07	36,69	65,41	24,03
11	13,65	20,95	22,71	46,42	21,09
12	13,71	21,13	38,71	44,28	20,31
13	14,62	32,10	40,94	49,32	21,88
14	14,81	21,39	37,26	48,53	23,74

As figuras 15, 16 e 17 apresentam os resultados de peso específico natural (γ_{nat}) comparado com o teor de umidade base seca (w_{nat}), porosidade (n) e peso específico médio dos sólidos (γ_{ms}).

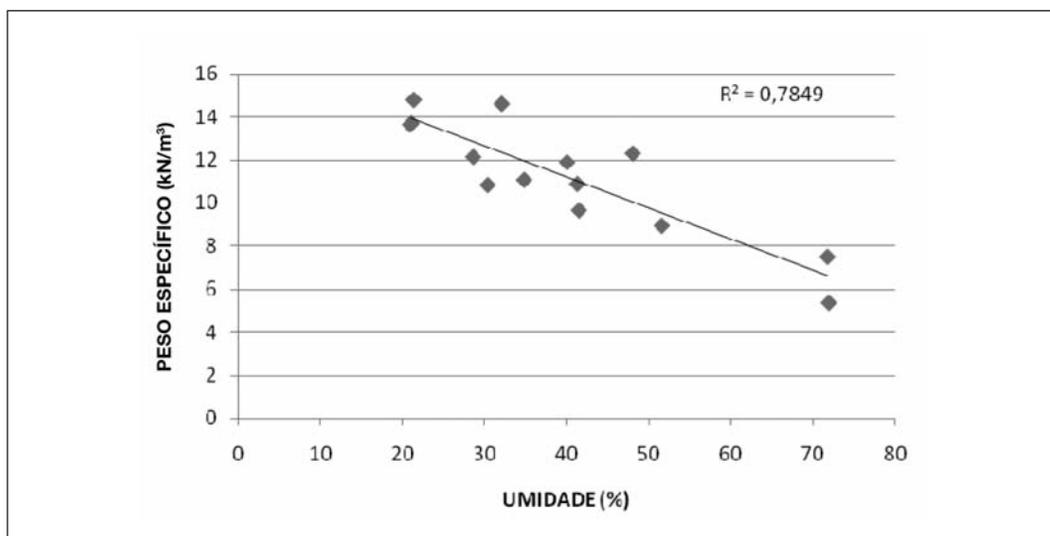


Fig. 15 – Variação do peso específico natural com o teor de umidade.

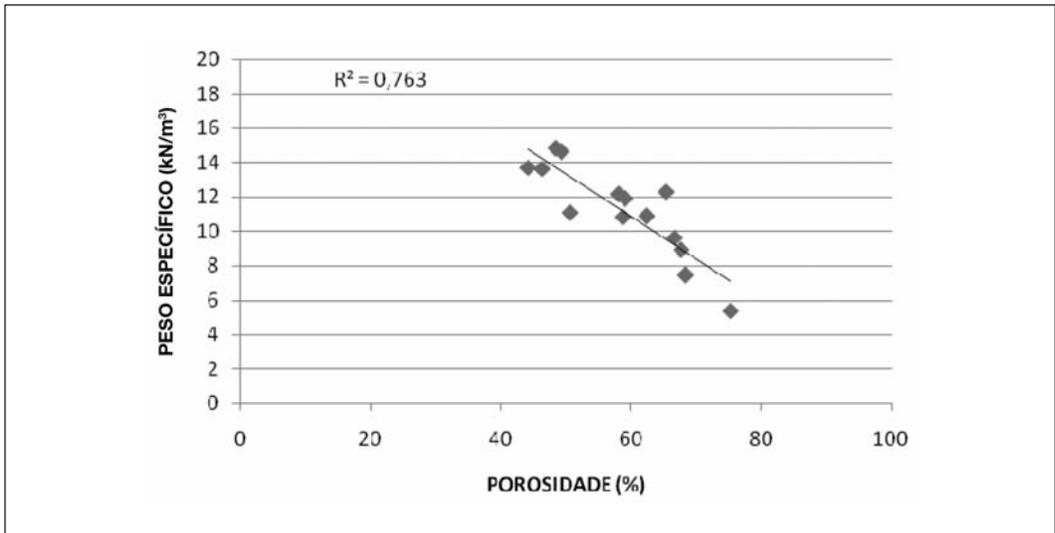


Fig. 16 – Variação do peso específico natural com a porosidade.

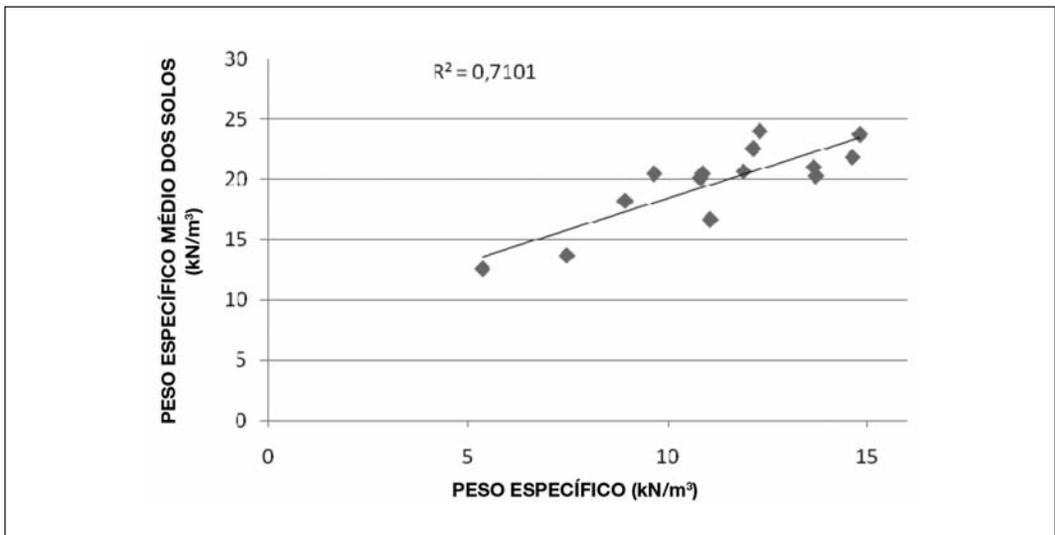


Fig. 17 – Relação entre o peso específico natural e o peso específico médio dos sólidos.

Vale observar que comparando os resultados do Aterro Sanitário de Santo André com o novo equipamento com as medidas determinadas pelo controle de peso e topografia, observa-se boa concordância dos resultados, bem como com os resultados dos ensaios iniciais com cilindros tipo CBR modificados da Fase I e os valores do Método da Vala.

No Aterro Sanitário de Santo André o valor médio do método da vala foi 10,39 kN/m³ sendo que com o cilindro na Fase I a média foi de 10,72 kN/m³. No caso da lixeira de Paracambi, o valor médio dos resultados com o Método da Vala foi de 14,82 kN/m³ e para os cilindros da Fase I foi de 12,44 kN/m³. Assim, os valores pelo Método da Vala foram em torno de 19% maiores. Tais resultados são satisfatórios considerando que na lixeira de Paracambi há muitas irregularidades causadas por irregularidades na compactação, além da grande variação da composição dos resíduos.

Do Quadro 10 e da Figura 15 pode-se concluir que a uma diminuição do teor de umidade corresponde um aumento do peso específico natural. No que se refere à capacidade de campo, há grande variedade de resultados, não sendo possível estabelecer qualquer tendência. Pela Figura 16 pode-se concluir que a porosidade tende a ser menor com o aumento do peso específico natural, bem como o peso específico médio dos sólidos o que pode ser observado nas Figuras 16 e 17.

Vale observar por fim que os valores determinados para o peso específico natural estão dentro da faixa de valores observados por Zekkos *et al.* (2006) para resíduos até três metros de profundidade.

7 – CONCLUSÕES

Apresentam-se neste artigo resultados obtidos com um novo equipamento desenvolvido para obter amostras indeformadas de resíduos sólidos e, a partir destas amostras, obter uma série relevante de parâmetros geotécnicos em procedimentos de laboratório aqui descritos. Os parâmetros obtidos foram o peso específico natural, o teor de umidade, a capacidade de campo e o peso específico médio dos sólidos. A operação é simples, podendo ser realizada por dois técnicos, e as amostras são de boa qualidade. A operação respeita os aspectos ergonômicos dos operadores e faz uso da retroescavadeira para o transporte e a movimentação de equipamentos e amostras de forma a proteger os operadores. Os resultados obtidos foram comparados com resultados dos Métodos da Vala e de Controle de Peso e Topografia, tendo mostrado uma boa similaridade no caso do peso específico natural.

No projeto do amostrador e do equipamento como um todo a enorme diversidade de componentes dos resíduos sólidos foi considerada, como facilidade de corte, dureza e rigidez.

O amostrador foi projetado com um anexo na parte superior e um na parte inferior de forma que a amostra ficava totalmente protegida até sua chegada ao laboratório. As dimensões foram projetadas considerando o peso do amostrador mais material, de forma a permitir a operação por um técnico e um ajudante. Tanto na cravação quanto na retirada da amostra todos os cuidados para a manutenção da verticalidade foram mantidos.

Finalmente, pode-se afirmar, considerando a grande quantidade de informações obtidas com cada amostra extraída e os resultados obtidos comparados com outros procedimentos e com a bibliografia, que o equipamento mostrou-se confiável para sua utilização em aterros de resíduos sólidos.

8 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à SEMASA e às prefeituras de Santo André e Paracambi. Também agradecem à CAPES, ao CNPq, à FAPERJ e FINEP e à Eng.^a Danielle Nova Brum de Castro pela revisão final.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carvalho, A. R. (2006). *Desenvolvimento de equipamento de determinação de parâmetros geotécnicos de resíduos sólidos*. Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 160 p.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (2000). Censo Demográfico.

SEMASA, Secretaria Municipal de Saneamento Ambiental (2001). Aterro de Santo André/DRS.

- SEMASA, Secretaria Municipal de Saneamento Ambiental (2006). Aterro de Santo André/DRS.
- Silveira, A. M. M. (2004). *Estudo do Peso Específico de Resíduos Sólidos Urbanos*. COPPE/UFRJ, Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 106 p.
- Zekkos, D.; Bray, J.D.; Kavazanjian, E.; Matasovic, N.; Rathje, E.M.; Riemer, M.F.; Stokoe, K.H. (2006). *Unit weight of Municipal Solid Waste*, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 132, n.º 10, pp. 1250-1261.