

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS MECÂNICOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS POR MEIO DE ENSAIOS REALIZADOS EM LABORATÓRIO

Determination of municipal solid waste mechanical parameters using laboratory tests

André Geraldo Cornelio Ribeiro*

Roberto Francisco de Azevedo**

Eliane Ferreira da Rocha***

Izabel Christina Duarte Azevedo****

Alessandro Saraiva Loreto*****

RESUMO – O objetivo deste trabalho foi determinar a resistência, a compressibilidade, a condutividade hidráulica e a capacidade de campo de resíduos sólidos urbanos (RSU), em função do peso específico e do teor de umidade dos resíduos, utilizando equipamentos de grandes dimensões. Amostras de RSU foram coletadas nos aterros controlados das cidades de Viçosa e Ponte Nova, no estado de Minas Gerais, no Brasil. O artigo apresenta detalhes dos equipamentos desenvolvidos, bem como da metodologia usada e os resultados encontrados. As conclusões apontam que os equipamentos mostraram-se adequados e os resultados obtidos forneceram valores coerentes com os encontrados na literatura.

ABSTRACT – The objective of this work was to determine strength, compressibility, hydraulic conductivity and field capacity of municipal solid waste (MSW) as functions of the specific weight and the moisture content of the waste, using equipments of large dimensions. MSW samples were collected in controlled landfills of Ponte Nova and Viçosa cities located in the State of Minas Gerais, Brazil. The article presents details of the equipments developed, as well as of the methodology used and the results obtained. The conclusions point out that the equipments were appropriate and the results obtained were coherent with the ones found in the literature.

PALAVRAS CHAVE – Resíduos sólidos urbanos, parâmetros mecânicos, ensaios de laboratório.

* Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia Civil, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia, Setor de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Lavras. E-mail: andreribeiro@deg.ufla.br

** Engenheiro Civil, PhD em Engenharia Civil, Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa. E-mail: razevedo@ufv.br

*** Engenheira Civil. Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Geotecnia Ambiental, pela Universidade Federal de Viçosa. E-mail: eferocha@bol.com.br

**** Engenheira Civil. Doutora em Engenharia Civil. Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa. E-mail: iazevedo@ufv.br

***** Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Geotecnia Ambiental, pela Universidade Federal de Viçosa. E-mail: aloreto@funec.br

1 – INTRODUÇÃO

A escassez de áreas tem-se constituído em um dos maiores problemas na disposição de resíduos sólidos urbanos nos últimos anos em razão, principalmente, do crescente volume de resíduos gerado diariamente. Devido às regulamentações ambientais restritivas para esse tipo de obra é cada vez mais difícil encontrar novas áreas adequadas e próximas aos centros geradores e, além disso, existe grande resistência por parte da população na aceitação de depósitos na vizinhança de suas propriedades, o que leva à necessidade de otimizar a capacidade dos depósitos em operação (Oliveira, 2002). Para tentar solucionar esse problema tem-se construído aterros cada vez mais altos, o que, se por um lado ameniza o problema da escassez de áreas, por outro gera uma preocupação maior dos projetistas em relação a problemas com a estabilidade dos taludes e com recalques cada vez maiores. Portanto, a obtenção de propriedades dos RSU, como resistência e compressibilidade, tem importância fundamental na elaboração e execução de projetos de aterros sanitários.

Além dos parâmetros de resistência e de compressibilidade, o coeficiente de permeabilidade e a capacidade de campo são, também, parâmetros relevantes por serem necessários no estudo do balanço hídrico do aterro sanitário e, conseqüentemente, no dimensionamento dos sistemas de drenagem e tratamento dos percolados (Carvalho, 2002).

Ribeiro (2007) ressalta que os projetos de aterros sanitários no Brasil têm sido caracterizados pela adoção de critérios e parâmetros baseados na literatura internacional. Torna-se necessário, portanto, validar esses parâmetros para o tipo de resíduo local, já que suas propriedades mecânicas variam com a composição, teor de umidade e peso específico, dentre outros.

O comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos tem por base as teorias da mecânica dos solos (Dixon e Jones, 2005). No entanto, devido à grande diversidade, degradabilidade e tamanho dos materiais que compõem os RSU, ainda não há ensaios padronizados para a determinação de suas propriedades mecânicas, diferentemente do que acontece com os solos (Durmusoglu *et al.*, 2006). Torna-se, portanto, necessário desenvolver equipamentos próprios para o estudo desses materiais.

Tendo em vista esses aspectos, o objetivo desse trabalho foi desenvolver equipamentos novos e de grandes dimensões para determinar parâmetros mecânicos de RSU oriundos dos aterros controlados de Viçosa-MG e Ponte Nova-MG. Foram realizados ensaios de resistência, compressibilidade, permeabilidade e capacidade de campo nos quais se buscou variar, além do peso específico, o teor de umidade dos resíduos.

Apresentam-se, em seguida, os materiais e os métodos usados nos ensaios, os resultados obtidos e as principais conclusões extraídas desse trabalho.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 – Coleta e caracterização das amostras

Para determinação dos parâmetros de resistência, foram coletados 12 tambores de 200 litros, aproximadamente 900 kg, de RSU da cidade de Viçosa-MG, antes de serem dispostos no aterro controlado do município. Nos ensaios de compressão confinada utilizaram-se os resíduos recém-coletados em bairros diversos da mesma cidade, aproximadamente 760 kg em 10 tambores de 200 litros. Para a determinação da condutividade hidráulica e da capacidade de campo, coletaram-se aproximadamente 155 kg de RSU em dois tambores de 200 litros no lixão do município de Ponte Nova-MG, imediatamente após serem descarregados pelos caminhões coletores.

Em todos os ensaios, o material coletado foi inicialmente homogeneizado. Em seguida fez-se seu quarteamento com o propósito de separar uma parte representativa para ser usada nos ensaios e na determinação da composição gravimétrica dos RSU (Figuras 1 e 2).



Fig. 1 – Espalhamento da amostra de RSU.



Fig. 2 – Processo de quarteamento dos RSU para ser feita a gravimetria.

2.2 – Determinação dos parâmetros de resistência

2.2.1 – Descrição do equipamento desenvolvido

O equipamento é constituído por uma caixa de madeira de $0,80 \times 0,80 \times 0,80$ m na qual a amostra de resíduos é compactada, e por um sistema de carga, que consiste, basicamente, em um atuador de pressão, com um pistão de 12 cm de curso, que aplica carga nos RSU através de uma sapata rígida de madeira de 0,70 m de comprimento por 0,10 m de largura e 0,10 m de altura (Figura 3) (Ribeiro, 2007).

Uma das paredes laterais da caixa de madeira é removível, de modo que, após a compactação dos resíduos e a retirada dessa parede, forma-se um talude vertical de lixo.

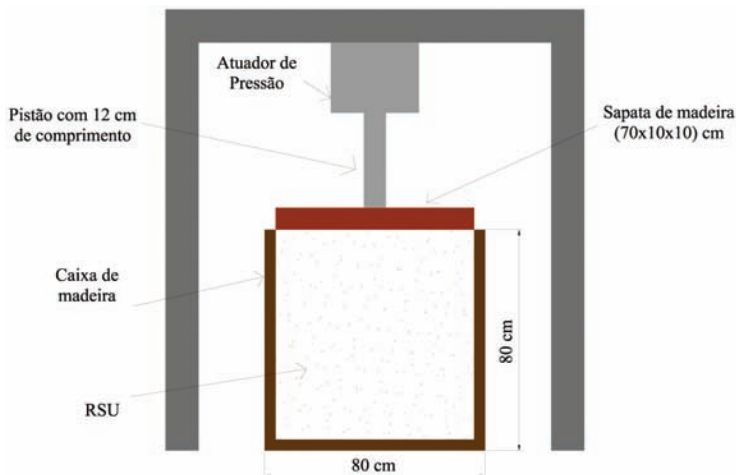


Fig. 3 – Esquema do equipamento desenvolvido para realização do ensaio de resistência de um talude de RSU.

O atuador de pressão com pistão é fixado a uma viga de 1,0 m de comprimento apoiada em canaletas soldadas em duas colunas de aço, como pode ser observado na Figura 4.

O pistão é acionado através da aplicação de pressão de ar regulada por uma válvula e por um manômetro localizados em um painel.

Além do painel para regular a pressão, o equipamento inclui outro painel, fixo no pilar ao lado da caixa, com quatro válvulas que servem para aplicação e liberação do ar no atuador de pressão, podendo-se assim realizar o carregamento e o descarregamento durante o ensaio.

Para monitorar os recalques dos resíduos foram adaptados ao equipamento dois relógios medidores de deslocamentos, como pode ser observado na Figura 4, com precisão de 0,01 mm e capacidade de medir até 0,1 m de deslocamento.

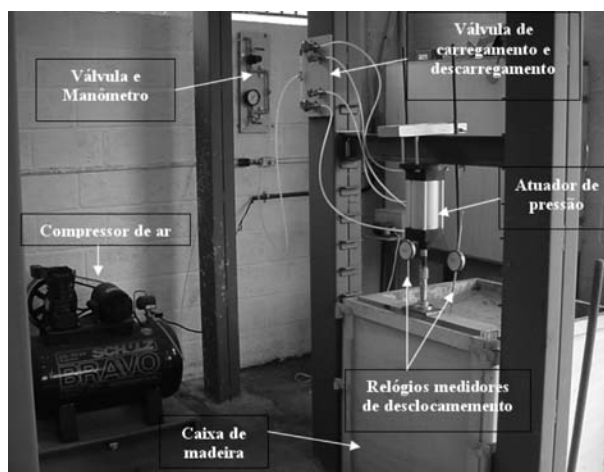


Fig. 4 – Vista geral do equipamento desenvolvido.

2.2.2 – Metodologia utilizada no ensaio

Foram realizados seis ensaios com resíduos com diferentes teores de umidade e pesos específicos. Primeiramente, ensaiaram-se três amostras de RSU, com peso específico de 7 kN/m^3 e diferentes teores de umidade. Posteriormente, ensaiaram-se outras três amostras com peso específico menor, 5 kN/m^3 , buscando-se alcançar, em cada um deles, os mesmos valores de teor de umidade usados nos ensaios anteriores. Em todos os ensaios seguiram-se as etapas descritas a seguir.

2.2.2.1 – Compactação dos RSU na caixa de madeira

Compactaram-se, manualmente, os RSU na caixa de madeira de modo a se alcançar os pesos específicos desejados de 7 kN/m^3 e 5 kN/m^3 , conforme pode ser observado na Figura 5. Para controlar a compactação marcou-se o interior da caixa, a partir do fundo, com oito linhas, distantes $0,10 \text{ m}$ umas das outras. Entre duas linhas, do fundo para o topo, compactaram-se 44 kg de resíduos para atingir o peso específico de 7 kN/m^3 e $31,5 \text{ kg}$ para 5 kN/m^3 . Após compactação da última camada, cobriram-se os resíduos com uma fina camada de areia, para evitar a presença de vetores e mau cheiro.

2.2.2.2 – Aplicação das cargas

Após a compactação dos resíduos, retirou-se a parede removível, posicionaram-se a peça rígida de madeira (sapata), o atuador de pressão e os medidores de deslocamento e iniciou-se a etapa de carregamento vertical da amostra (Figura 6). Para facilitar a ruptura colocou-se a sapata na extremidade do talude. Os estágios de carregamento foram executados de 20 em 20 minutos, medindo-se o recalque obtido ao final de cada estágio. No início do ensaio, os acréscimos de tensão foram de $5,5 \text{ kPa}$ e nos estágios finais, os acréscimos foram menores para permitir melhor definição da tensão de ruptura.

Os recalques foram monitorados por meio de dois relógios medidores de deslocamentos (deflectômetros), um em cada lado da sapata, conforme pode ser visto nas Figuras 4 e 6.



Fig. 5 – Compactação dos RSU em camadas.



Fig. 6 – Detalhe do equipamento depois da compactação dos RSU.

2.2.2.3 – Determinação do teor de umidade da amostra

Ao fim de cada ensaio, retirou-se do centro da caixa de madeira uma amostra com aproximadamente 6 kg de RSU para a determinação do teor de umidade. Utilizaram-se cinco recipientes para colocar os RSU em uma estufa, especialmente construída para esse propósito, onde ficaram a secar, a uma temperatura média de 68°C (Figura 7), até que atingissem peso constante. As pesagens para determinação das massas brutas úmida e seca foram realizadas em balança com precisão de 0,01 g.



Fig. 7 – Amostras na estufa para determinação do teor de umidade dos RSU.

2.2.3 – Cálculo dos parâmetros de resistência dos RSU

O cálculo dos parâmetros de resistência foi realizado por retro-análise da superfície de ruptura, usando-se o método de equilíbrio limite de Bishop Simplificado implementado no programa computacional SLOPE/W[®]. A carga de ruptura aplicada pela sapata entrou na análise como uma sobrecarga uniformemente distribuída na superfície do talude de RSU. Além disso, consideraram-se nulas as poro-pressões, ou seja, ruptura drenada.

A partir dessas premissas, arbitrou-se um valor de coesão (c) e determinou-se o ângulo de atrito (ϕ) correspondente ao fator de segurança $F=1$ para a superfície de ruptura observada no ensaio, para sobrecarga máxima (ruptura).

O cálculo dos parâmetros seguiu as seguintes etapas:

- Após cada ensaio, mediram-se os comprimentos da cunha de ruptura na superfície ($L1$) e no talude frontal vertical ($L2$) dos resíduos. Em seguida, desenhou-se no AutoCAD, o talude de lixo em escala, e determinaram-se as coordenadas do centro e o raio do círculo que passa pelos pontos **a** e **b** indicados na Figura 8.
- No programa GEO-SLOPE representou-se o talude de lixo, especificando-se, além das coordenadas do centro e o raio do círculo, o valor da tensão de ruptura representada por uma sobrecarga uniformemente distribuída nos 0,10 m de largura da sapata (Figura 9).
- Arbitraram-se valores de coesão entre 5 e 40 kPa e determinou-se, por tentativas, o valor do ângulo de atrito para cada valor de coesão arbitrada, de modo que o fator de segurança (F) pelo método de Bishop Simplificado fosse igual a 1 (Figura 9).

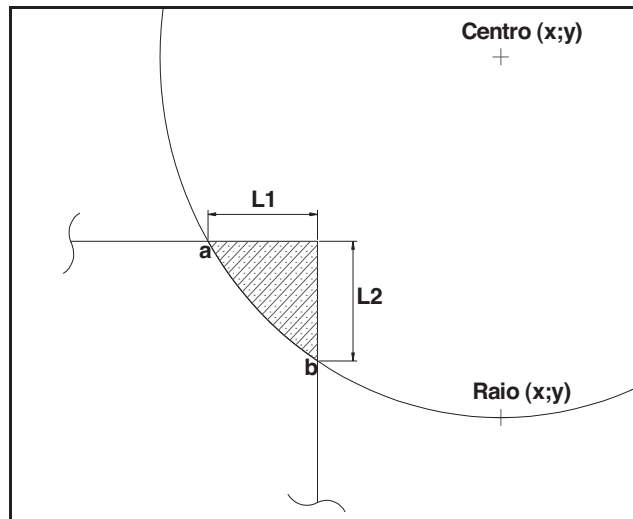


Fig. 8 – Esquema para calcular a superfície de ruptura.

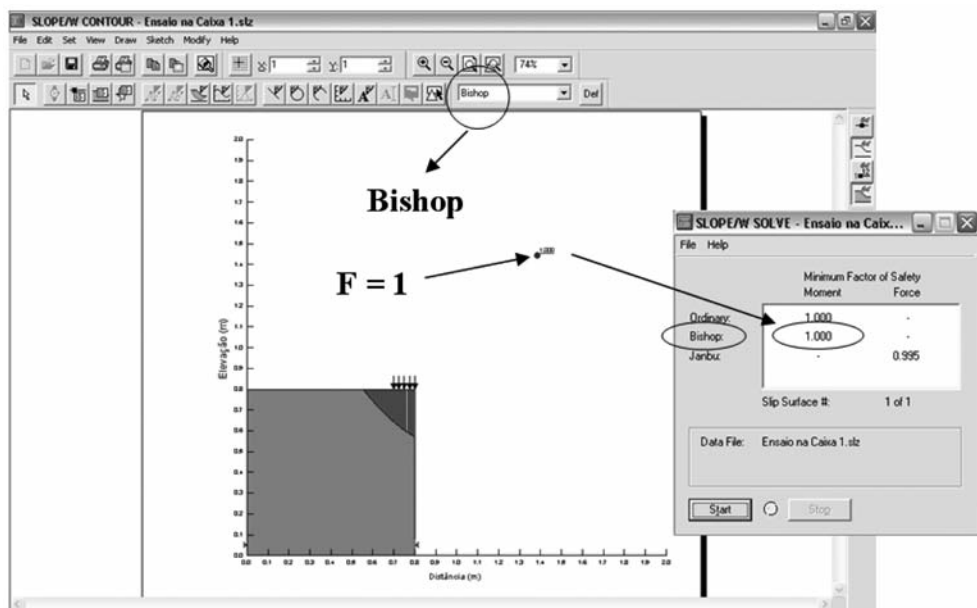


Fig. 9 – Superfície de ruptura para fator de segurança $F = 1$.

2.3 – Determinação dos parâmetros de compressibilidade

2.3.1 – Descrição do equipamento desenvolvido

Na Figura 10 apresenta-se um desenho esquemático do equipamento de grandes dimensões construído para realizar ensaios de compressão confinada em amostras de RSU (Loreto, 2003).

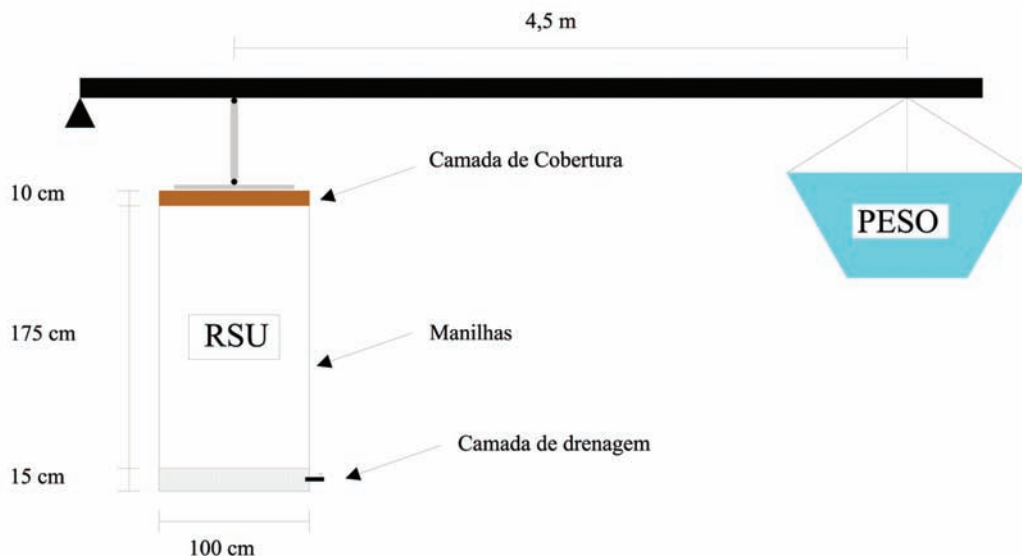


Fig. 10 – Vista esquemática do equipamento de grandes dimensões para realização de ensaios de compressão confinada em amostras de RSU.

O equipamento é composto de uma célula cilíndrica de paredes rígidas na qual a amostra é compactada e ensaiada, um sistema de aplicação de carga e um sistema de medição de deslocamento.

A célula cilíndrica consiste de duas manilhas sobrepostas de concreto armado reforçado, cada uma com diâmetro interno e altura de 1,0 m.

O sistema de aplicação de carga consiste de uma placa rígida, de 0,80 m de diâmetro e 0,03 m de espessura, ligada a uma haste rígida através de uma rótula, as três peças de aço de grande resistência. A haste rígida, em sua extremidade superior, é conectada a uma viga metálica que amplifica o carregamento por meio de um sistema de alavanca. A força aplicada na amostra de RSU origina-se do enchimento de uma caixa d'água de 500 litros e é amplificada cerca de quatro vezes e meia pelo sistema de alavanca.

O sistema de medição de deslocamento consiste de um nível topográfico de placas planas paralelas e duas referências: uma móvel, na haste de carregamento, e outra fixa na parede, atrás das manilhas.

A Figura 11 apresenta o equipamento durante a realização de um ensaio.



Fig. 11 – Visão geral do equipamento durante a realização de um ensaio.

2.3.2 – Metodologia utilizada no ensaio

Os ensaios foram realizados de acordo com a seguinte sequência.

2.3.2.1 – Compactação das amostras de RSU

Os resíduos foram dispostos nas manilhas em camadas compactadas de aproximadamente 15 cm de espessura, visando obter-se um peso específico inicial de 7 kN/m³. Cada camada de resíduo pesou, aproximadamente, 88 kg (Figura 12).

2.3.2.2 – Carregamento em etapas

Nesta fase, aplicaram-se vários estágios de carregamento vertical na amostra de RSU, procurando-se sempre aumentar a carga anterior em incrementos constantes iguais a 10,51 kPa. Iniciou-se com 10,51 kPa e carregou-se até 63,06 kPa (tensão máxima que pode ser usada com segurança, para 500 litros de água). Cada estágio de carregamento durou um dia.

2.3.2.3 – Medição dos deslocamentos

Durante o ensaio, os deslocamentos foram medidos por diferença, visando-se, com o nível topográfico, uma marca no pistão de carregamento e, em seguida, uma marca fixa na parede, atrás do experimento.

2.3.2.4 – Descarregamento

Após a aplicação do último estágio de carregamento, a amostra foi descarregada, também em etapas.



Fig. 12 – Representação da disposição do RSU em camadas.

2.4 – Determinação da condutividade hidráulica e da capacidade de campo dos RSU

2.4.1 – Descrição do equipamento desenvolvido

O permeâmetro de carga constante consiste de um reservatório de água no qual se mantém uma carga constante por meio do princípio de Mariotte, uma célula cilíndrica (permeâmetro) na qual se coloca a amostra e um painel de leitura (Figura 13) (Rocha, 2008).

O reservatório de água consiste de um recipiente de plástico, com capacidade de 200 litros, ao qual se adaptou uma tampa com dois registros e um furo central para passagem de um tubo. A posição da extremidade inferior desse tubo é ajustável e define a posição da pressão atmosférica dentro do reservatório.

O permeâmetro consiste de um tubo de PVC rígido com 0,30 m de diâmetro, 0,80 m de comprimento e paredes com 0,01 m de espessura, e de duas tampas, também em PVC, com 0,40 m de diâmetro e 0,02 m de espessura. Optou-se por usar PVC para evitar qualquer tipo de reação química com os RSU. As duas tampas fecham a peça cilíndrica por meio de quatro longos parafusos de rosca sem fim e porcas (Figura 13a). Dois anéis do tipo *O ring*, um em cada tampa, facilitam o encaixe e a vedação das tampas com a célula. No centro dessas tampas existem registros que possibilitam

a entrada e saída de água durante os ensaios. Na parte lateral da célula cilíndrica, ao longo da sua altura, existem quatro orifícios que são conectados por meio de tubulações ao painel de leitura.

O painel de leitura é feito de madeira e tubos de plástico. A madeira é revestida com fórmica branca para facilitar a leitura visual dos níveis de água nos tubos que permitem determinar as cargas piezométricas em quatro pontos da amostra. Na Figura 13b apresenta-se uma visão geral do equipamento.

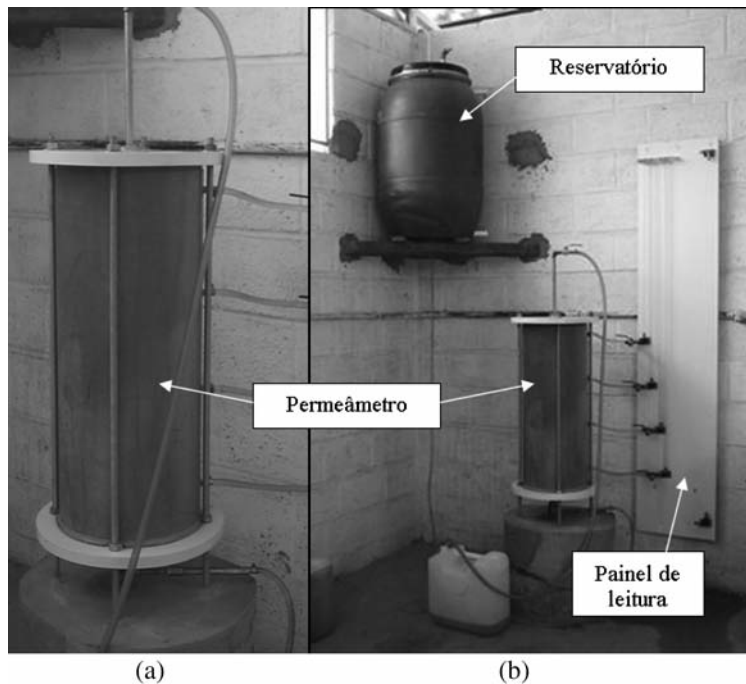


Fig. 13 – (a) Permeâmetro; (b) Vista geral do equipamento completo: reservatório, célula e painel piezométrico.

2.4.2 – Metodologia utilizada no ensaio

2.4.2.1 – Condutividade hidráulica

Para a determinação da condutividade hidráulica realizaram-se ensaios nas amostras de RSU compactadas dentro da célula cilíndrica, com diferentes pesos específicos. No início de cada ensaio, os RSU foram devidamente pesados e compactados em camadas de 0,10 m, até que se alcançasse o peso específico total desejado (γ_t). O teor de umidade gravimétrico inicial da amostra (w_i) foi determinado de tal forma que seu peso específico seco (γ_d) era calculado por meio da Equação 1:

$$\gamma_d = \gamma_t (1 + w_i) \quad (1)$$

Durante o enchimento do reservatório de água, um registro da tampa superior foi conectado à linha de abastecimento, enquanto o outro ficou aberto para a atmosfera. O registro existente na parte inferior do reservatório e conectado à base do permeâmetro permaneceu fechado até o reservatório estar suficientemente cheio. Quando isso ocorreu, os registros da tampa superior foram fechados para garantir, pelo princípio de Mariotte, carga constante durante a realização do ensaio. Os registros do permeâmetro e da parte inferior do reservatório eram abertos, liberando-se o fluxo

d'água do reservatório para o permeâmetro. À medida que a amostra era saturada, os níveis das colunas do painel piezométrico subiam, indicando a carga de pressão em pontos específicos do permeâmetro. Quando esses níveis estabilizavam, considerava-se que a amostra estava “saturada” e um fluxo permanente estava estabelecido através da amostra. Nessa altura, faziam-se as leituras das cargas piezométricas que eram utilizadas para o cálculo do gradiente hidráulico.

Foram calculados os gradientes entre os diferentes pontos do permeâmetro. Para dar confiabilidade aos resultados, foi utilizada a metodologia do “Intervalo de Confiança”, após o cálculo da média e desvio padrão do conjunto, de acordo com Gomes (1987). Só os valores de gradientes hidráulicos que estavam dentro do limite determinado pelo intervalo de confiança (99%) foram utilizados para o cálculo do gradiente hidráulico médio.

Além da determinação do gradiente, durante o regime permanente de fluxo, o volume de líquido percolado (ΔV) em um determinado intervalo de tempo (Δt) era medido.

Conhecidos o gradiente (i) e a vazão ($Q = \Delta V / \Delta t$), o coeficiente de permeabilidade era calculado pela Lei de Darcy (Equações 2 e 3):

$$Q = k.i.A \quad (2)$$

$$k = \Delta V / (\Delta t.i.A) \quad (3)$$

em que A é a área da seção transversal da amostra.

2.4.2.2 – Capacidade de campo

Após a determinação da condutividade hidráulica dos RSU, realizava-se o ensaio para determinação da capacidade de campo dos mesmos. Para isso, os registros superior e inferior do permeâmetro eram fechados, e a mangueira que liga o reservatório ao permeâmetro desconectada. Em seguida, os registros eram abertos e o percolado que drenava pela saída inferior era coletado, enquanto que os registros do painel piezométrico permaneciam fechados.

Inicialmente, a vazão de percolado era grande, sendo, por esse motivo, medida em curtos intervalos de tempo. Com o passar das horas a vazão ia diminuindo, e passava a ser medida em intervalos de tempo maiores. De acordo com a sugestão de Carvalho (2002), as leituras eram interrompidas quando a vazão fosse igual ou menor que $0,01 \text{ cm}^3/\text{s}$, fazendo com que os ensaios durassem, em média, 2 dias.

Terminado o ensaio, o permeâmetro era aberto e amostras, com cerca de 2 kg, eram retiradas do topo, do meio e da base do corpo de prova para determinação da umidade gravimétrica correspondente à capacidade de campo (w_θ).

Para determinação da capacidade de campo (θ_c), a seguinte relação (Equação 4) era utilizada:

$$\theta_c = \gamma_d * w_\theta / \gamma_w \quad (4)$$

em que, γ_d é o peso específico seco da amostra calculado pela Equação 1.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 – Caracterização física dos RSU

A caracterização física dos resíduos envolveu a composição gravimétrica e a composição volumétrica solta dos RSU ensaiados.

3.1.1 – Composição gravimétrica

No Quadro 1 apresentam-se as composições gravimétricas das amostras de RSU usadas nos ensaios de resistência, compressão confinada, permeabilidade saturada e capacidade de campo. Observa-se que a quantidade de matéria orgânica, próxima ou superior a 60%, é típica de resíduos brasileiros e, além disso, que as porcentagens dos diversos componentes das três amostras de resíduos são parecidas, principalmente quando se comparam os dados da cidade de Viçosa.

Quadro 1 – Composição gravimétrica (% em peso) das amostras de RSU ensaiadas.

Material	RSU de Viçosa				RSU de Ponte Nova	
	Resistência		Compressibilidade		Permeabilidade e Capacidade de Campo	
	Peso (kg)	Peso (%)	Peso (kg)	Peso (%)	Peso (kg)	Peso (%)
Matéria orgânica putrescível*	544,32	60,48	494,15	65,02	88,10	56,84
Papel e papelão	112,95	12,55	107,85	14,19	28,40	18,32
Plásticos	119,43	13,27	64,52	8,49	25,88	16,7
Vídrós	18,18	2,02	7,90	1,04	1,26	0,81
Metais	16,65	1,85	12,01	1,58	2,65	1,71
Material particulado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Madeira	5,94	0,66	3,42	0,45	1,64	1,06
Trapo e fraldas	26,55	2,95	16,49	2,17	5,81	3,75
Outros**	55,98	6,22	53,66	7,06	1,26	0,81
TOTAL	900,00	100,00	760,00	100,00	155,00	100,00

*Restos de alimentos (frutas, verduras, folhas etc.);

**Materiais de difícil classificação.

3.1.2 – Composição volumétrica

Para a determinação da composição volumétrica dos RSU, utilizou-se os valores de peso específico das frações constituintes dos resíduos propostos por Tchobanoglous *et al.* (1993) e adaptados para as frações constituintes dos resíduos considerados no presente trabalho. No Quadro 2 apresentam-se as composições volumétricas das amostras de RSU usadas nos ensaios de resistência, compressão confinada, permeabilidade saturada e capacidade de campo.

Quadro 2 – Composição volumétrica (% em volume) das amostras de RSU ensaiadas.

Material	Peso específico adaptado de Tchobanoglous <i>et al.</i> (1993) (kgf/m³)	RSU de Viçosa				RSU de Ponte Nova	
		Resistência		Compressibilidade		Permeabilidade e Capacidade de Campo	
		Volume (m³)	Volume (%)	Volume (m³)	Volume (%)	Volume (m³)	Volume (%)
Matéria orgânica putrescível*	290,62	1,87	29,55	1,70	34,00	0,30	24,65
Papel e papelão	69,34	1,63	25,70	1,56	31,10	0,41	33,31
Plásticos	65,26	1,83	28,88	0,99	19,77	0,40	32,26
Vidros	195,79	0,09	1,47	0,04	0,81	0,00	0,52
Metais	320,19	0,05	0,82	0,04	0,75	0,01	0,67
Material particulado	480,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Madeira	237,59	0,03	0,39	0,01	0,29	0,01	0,56
Trapo e Fraldas	65,26	0,41	6,42	0,25	5,06	0,09	7,25
Outros**	130,52	0,43	6,77	0,41	8,22	0,01	0,78
TOTAL	—	6,34	100,00	5,00	100,00	1,23	100,00

*Restos de alimentos (frutas, verduras, folhas etc.);

**Materiais de difícil classificação.

3.2 – Parâmetros de resistência

No Quadro 3 apresenta-se, além dos teores de umidade gravimétricos e do peso específico total das amostras, os valores dos comprimentos L1 e L2 que definem as superfícies de ruptura (Figura 8). Pode-se observar que, ainda que sucintamente, os comprimentos encontrados nos ensaios com peso específico igual a 5 kN/m³ foram maiores do que os resíduos compactados com o peso específico igual a 7 kN/m³.

Quadro 3 – Comprimentos L1 e L2 medidos nos ensaios.

Ensaio	w (%)	γ (kN/m³)	L1 (m)	L2 (m)
1	63,52	7,00	0,25	0,24
2	80,87	7,00	0,26	0,25
3	41,75	7,00	0,27	0,27
4	41,75	5,00	0,30	0,32
5	62,40	5,00	0,26	0,28
6	78,62	5,00	0,29	0,30

Na Figura 14 encontram-se curvas tensão *versus* deslocamento, obtidas nos ensaios. Observa-se que as tensões de ruptura foram menores para os resíduos com maior teor de umidade e com menor peso específico, como era de se esperar.

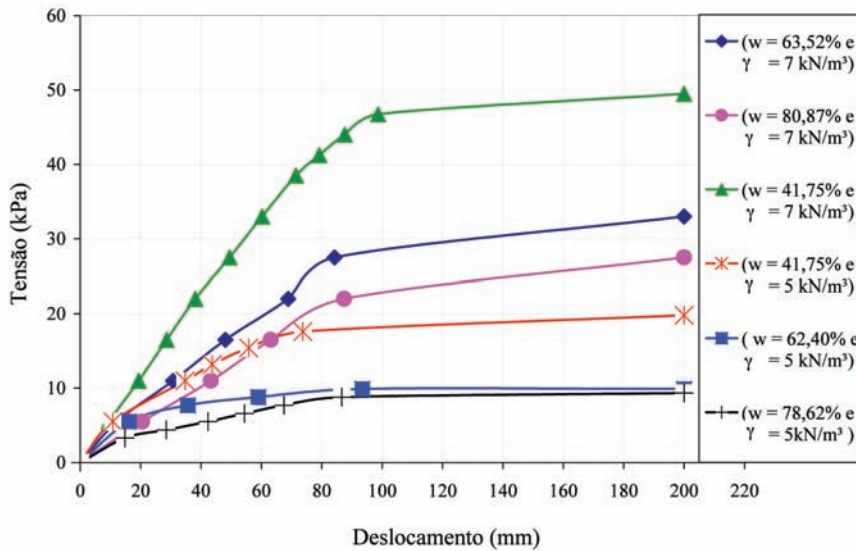


Fig. 14 – Curvas tensão *vs.* deslocamento em função do teor de umidade e peso específico.

Na Figura 15 apresentam-se os parâmetros de resistência encontrados de acordo com a metodologia descrita anteriormente. Algumas observações podem ser feitas.

Primeiro, os RSU são mais resistentes à medida que ficam mais densos e mais secos. Segundo, nota-se que os valores de coesão interferem mais significativamente nos valores dos ângulos de atrito para os RSU menos densos. Por fim observa-se que a envoltória proposta por Kavazanjian *et al.*

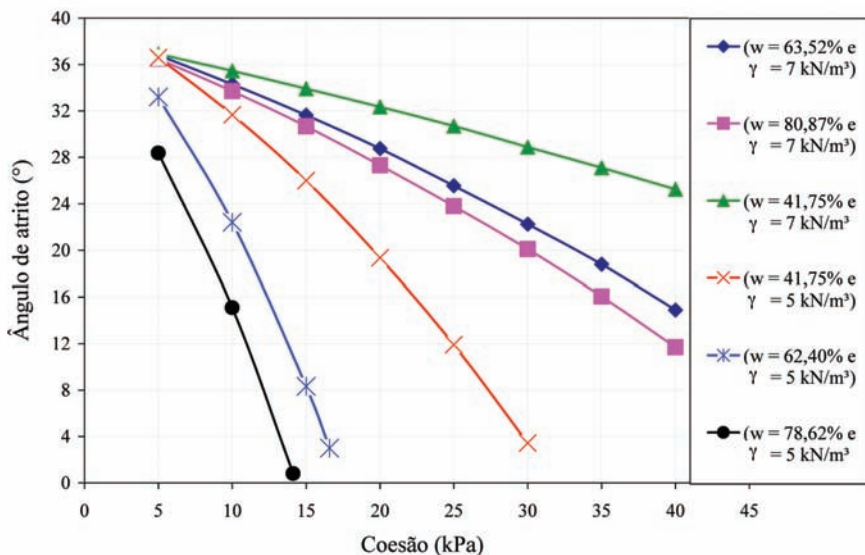


Fig. 15 – Parâmetros de resistência em função do teor de umidade.

(1995) que pode ser aproximada por uma reta com coesão e ângulo de atrito iguais a 10 kPa e 28°, respectivamente, corresponde a RSU com peso específico igual a 5 kN/m³ e teor de umidade em torno de 50%. Como nos aterros brasileiros procura-se compactar os RSU com peso específico igual a pelo menos 7 kN/m³, conclui-se que para uma coesão de 10 kPa corresponderia a um ângulo de atrito de 32°. Ou para um ângulo de atrito de 28° corresponderia a uma coesão pelo menos igual a 20 kPa.

3.3 – Parâmetros de compressibilidade

Na Figura 16 apresenta-se a curva recalque *versus* tempo das seis etapas de carregamento do ensaio de compressão confinada. Segundo Coduto e Huitric (1990), os recalques que ocorrem em RSU são habitualmente divididos em três partes: os recalques instantâneos, que ocorrem imediatamente após a aplicação do carregamento; os recalques ao longo do tempo, que ocorrem devido à dissipação do excesso de pressão gerada nos poros da massa de RSU em função do carregamento (adensamento primário); e os recalques ao longo do tempo devido à decomposição da matéria orgânica, normalmente bem mais demorados. Na mesma figura observa-se que 24 horas após a aplicação da carga, em todas as etapas de carregamento, os deslocamentos ainda não haviam cessado. Entretanto, como não se pretendeu estudar o recalque devido à decomposição da matéria orgânica, padronizou-se este tempo como o necessário para se atingir o fim do adensamento primário, como é habitual na Mecânica dos Solos.

Na Figura 17 encontra-se a curva tensão *versus* deformação vertical (recalque/altura inicial da amostra) correspondente ao recalque final (24 horas) de todas as etapas do ensaio de compressão confinada. A inclinação dessa reta corresponde ao módulo de compressão confinada (M) dos RSU. Da figura obtém-se o valor de M igual a 346,7 kPa.

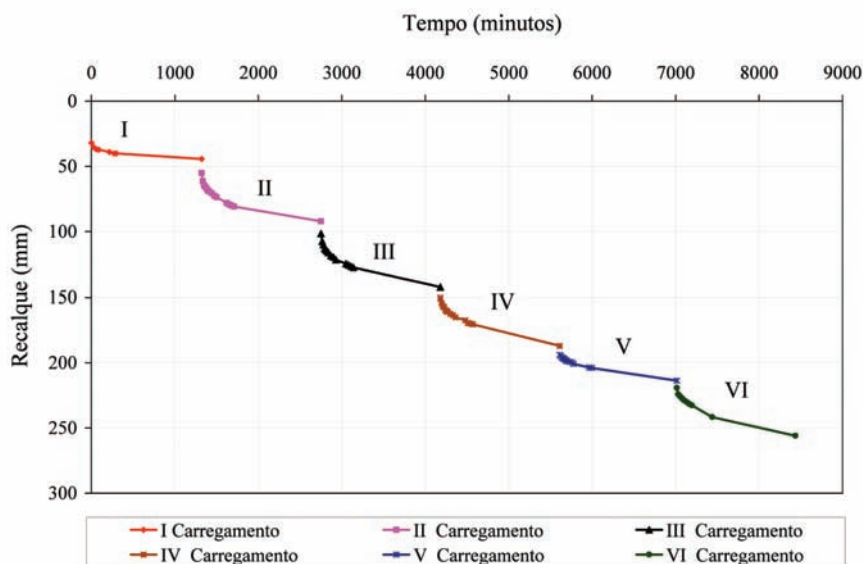


Fig. 16 – Curva recalque vs. tempo.

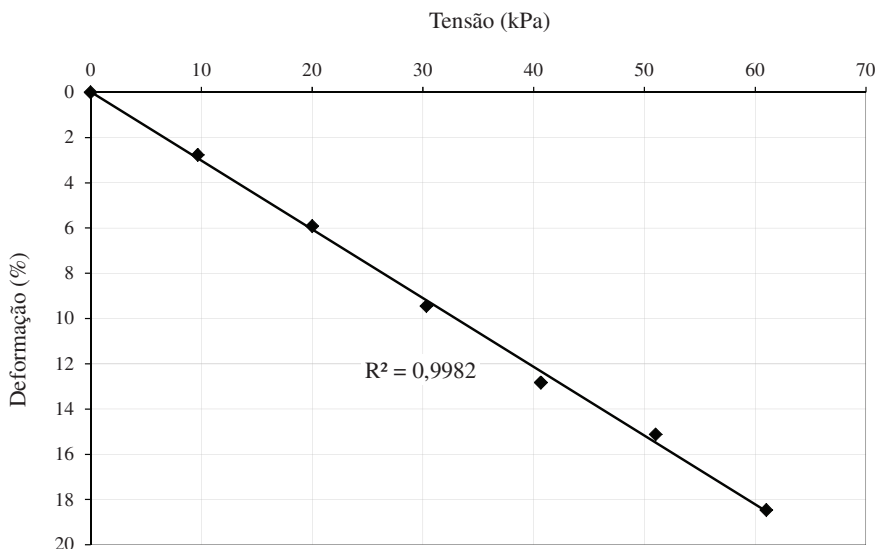


Fig. 17 – Determinação do módulo de compressão confinada (M).

A partir do valor de M calcula-se o módulo de elasticidade (E) através da Equação 5 tendo-se arbitrado um valor igual a 0,2 para o coeficiente de Poisson (ν) (Jessberger e Kockel, 1993):

$$E = M \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} = 312,34 \text{ kPa} \quad (5)$$

Para os valores de tensão vertical usados no ensaio, o valor do módulo de elasticidade calculado por meio da Equação 5 é compatível com os valores apresentados por Van Impe (1998).

Na Figura 18 apresenta-se, em escala logarítmica, a relação entre a deformação vertical e a tensão vertical correspondentes aos valores finais de todas as etapas do ensaio de compressão confinada. Na Mecânica dos Solos, essa relação é normalmente denominada curva de compressibilidade do material.

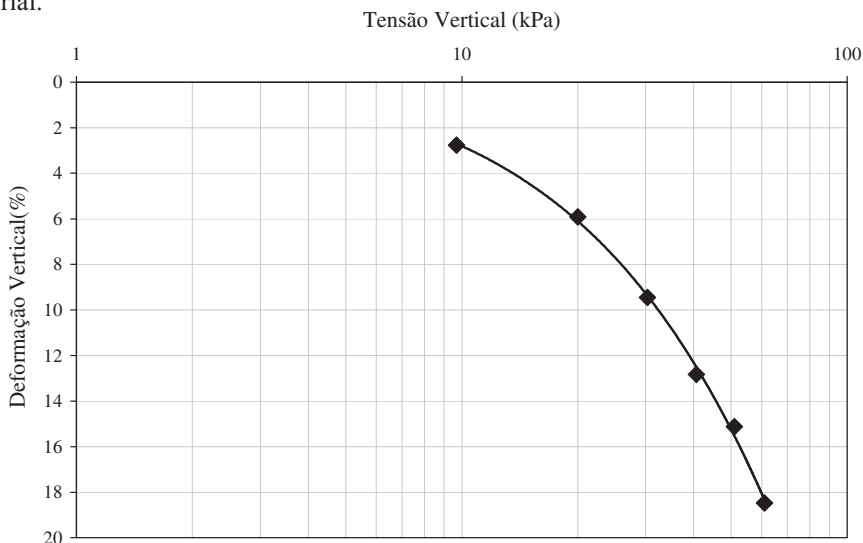


Fig. 18 – Curva de compressibilidade obtida no ensaio.

De acordo com Sowers (1973), o recalque primário de RSU pode ser expresso através da Equação 6:

$$\frac{\rho}{H_0}=C_c \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'}{\sigma'_0} \right) \tag{6}$$

em que ρ é o recalque, H_0 é a altura correspondente a σ'_0 , σ'_0 é a tensão antes do acréscimo de tensão $\Delta \sigma$ e C_c é o índice de compressibilidade.

A partir da curva de compressibilidade, determinou-se o valor de índice de compressibilidade, C_c , igual a 0,24, bem de acordo com valores encontrados em outros trabalhos (Bosco e Abreu, 2000).

3.4 – Condutividade hidráulica

Na Figura 19 apresentam-se os valores de condutividade hidráulica, $k(m/s)$, obtidos nos ensaios. Como pode ser observado, $k(m/s)$ varia sensivelmente com o peso específico, sendo que a faixa de valores encontrada (10^{-6} a $10^{-4}m/s$) é condizente com a relatada por Durmusoglu *et al.* (2006). No entanto, essa faixa de valores é um pouco mais elevada das encontradas nas literaturas nacionais, talvez isto se deva pelo fato que neste trabalho os resíduos usados são muito recentes, ou seja, mais "granulares".

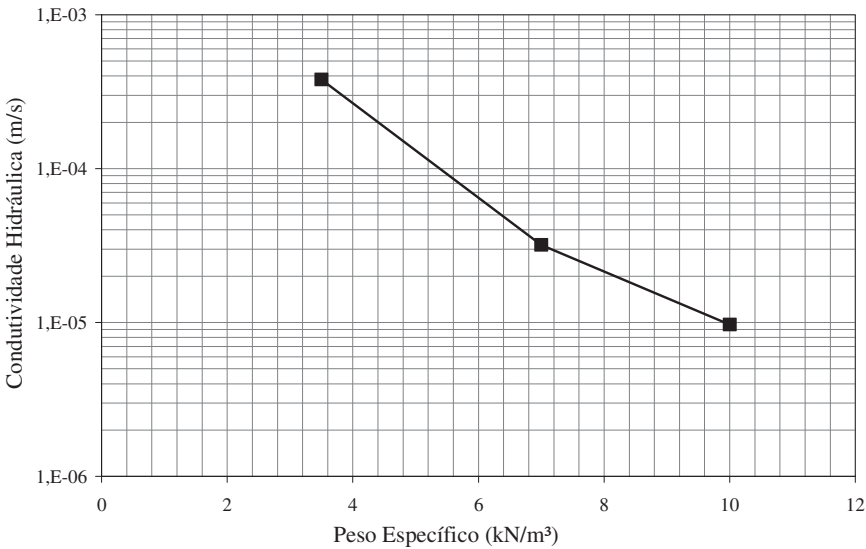


Fig. 19 – Comportamento da condutividade hidráulica em função do peso específico.

3.5 – Capacidade de campo

Na Figura 20 representa-se o comportamento da vazão em função do tempo para a determinação da capacidade de campo de RSU, para os respectivos valores dos pesos específicos. Observa-se que, apesar de alguma discrepância inicial, as vazões de saída diminuem consideravelmente com o tempo e após cerca de um dia são praticamente nulas, indicando que os resíduos, em média, praticamente atingiram a capacidade de campo.

Na Figura 21 apresentam-se os valores obtidos. Observa-se que a capacidade de campo aumenta à medida que o peso específico dos RSU é maior.

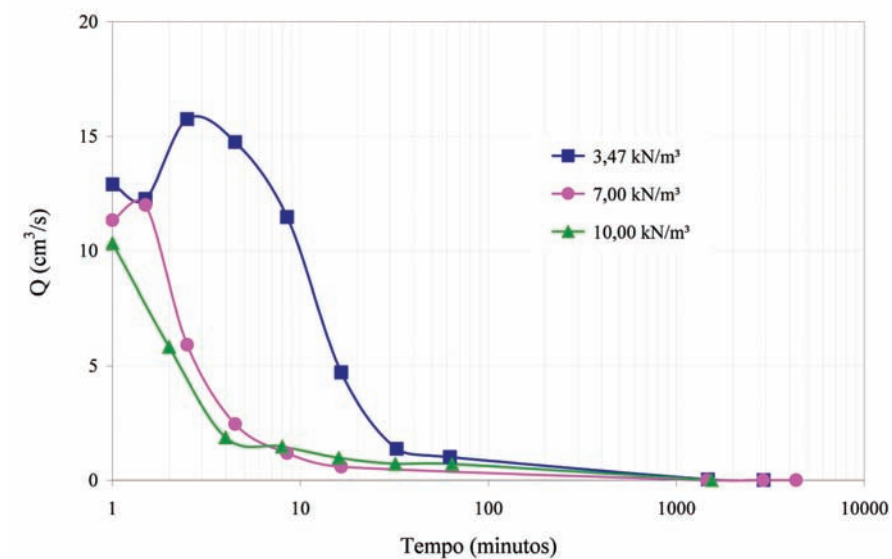


Fig. 20 – Variação da vazão de saída em função do tempo para determinação da capacidade de campo dos resíduos sólidos.

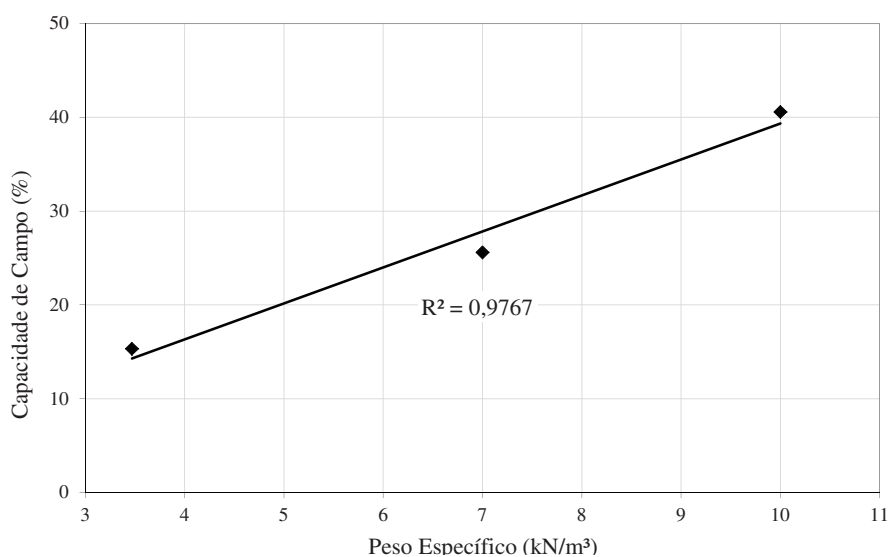


Fig. 21 – Comportamento da capacidade de campo em função do peso específico.

4 – CONCLUSÕES

Nesse trabalho foram desenvolvidos equipamentos de grandes dimensões para realizar ensaios de resistência, compressibilidade, permeabilidade e capacidade de campo de RSU. Nos ensaios variou-se tanto o peso específico quanto o teor de umidade das amostras de resíduos. Com base nos resultados encontrados chegou-se às seguintes conclusões:

- Os equipamentos desenvolvidos para a determinação da resistência, compressibilidade, condutividade hidráulica e capacidade de campo mostraram-se adequados e forneceram valores coerentes com os encontrados na literatura.
- Nos ensaios de resistência observou-se que, para RSU compactados com peso específico igual a 7 kN/m^3 , a envoltória de ruptura pode ter ângulo de atrito e coesão na faixa de, respectivamente, 28° a 32° e 10 kPa a 20 kPa.
- Nos ensaios de compressibilidade realizados em RSU com peso específico de 7 kN/m^3 encontraram-se valores de módulo de compressão confinada, módulo de elasticidade e índice de compressibilidade respectivamente iguais a 345 kPa, 312 kPa e 0,24.
- A condutividade hidráulica varia sensivelmente com o peso específico. Quanto menor é o peso específico, maior é a condutividade hidráulica e *vice-versa*. Foram obtidos valores de condutividade hidráulica de 4×10^{-4} a 10^{-5} m/s para pesos específicos variando de $3,5 \text{ kN/m}^3$ a $10,0 \text{ kN/m}^3$.
- A capacidade de campo aumenta à medida que o peso específico dos RSU é maior. Foram obtidos valores de capacidade de campo de 15 a 40% para pesos específicos variando de $3,5 \text{ kN/m}^3$ a $10,0 \text{ kN/m}^3$.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor e a FAPEMIG pelo financiamento do projeto do qual originou o presente trabalho.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boscov, M. E. G.; Abreu, R. C. (2000). *Aterros Sanitários*. In: Previsão de desempenho – comportamento real – aterros sanitários, taludes, túneis, fundações, aterros sobre solos moles, pp. 7-44, São Paulo: ABMS/NRSP.
- Carvalho, A. R. (2002). *Percâmetro: um novo equipamento para medidas de parâmetros geotécnicos de resíduos sólidos. Desenvolvimento e aplicação no aterro sanitário de Santo André – São Paulo*. Dissertação de Mestrado, UFV, Viçosa-MG, 120 p.
- Coduto, D. P.; Huitric, R. (1990). *Monitoring Landfill Movements Using Precise Instruments*. In: Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice. A. Landva e D. Knowles (Eds.). ASTM STP 1070, pp. 358-370.
- Dixon, N.; Jones, D. R. V. (2005). *Engineering properties of municipal solid waste*. Geotextiles and Geomembranes, vol. 25, nº 3, pp. 205-212.
- Durmusoglu, E.; Sanchez, I. M.; Corapcioglu, M. Y. (2006). *Permeability and compression characteristics of municipal solid waste samples*. Environmental Geology. vol. 50, nº 6, pp. 773-786.

- Gomes, F. P. (1987). *Curso de Estatística Experimental*. 12^a edição.
- Jessberger, H.L.; Kockel, R. (1993). *Determination and assessment of the mechanical properties of waste*. In: Proceedings of the Symposium Green'93 – Geotechnics Related to the Environment, pp. 313-322, Bolton, UK.
- Kavazanjian, E.; Matasovic, N.; Bonaparte, R.; Schmertmam, G. R. (1995). *Evaluation of MSW properties for seismic analysis*. Geoenvironment 2000: Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics, ASCE GSP 46, Y. B. Acar e D. E. Daniel (eds.), vol. 2, pp. 1126-1142, New Orleans.
- Loreto, A. S. (2003). *Desenvolvimento de um Equipamento para Avaliação da Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso do Aterro Sanitário de Viçosa-MG*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 84 p.
- Oliveira, D. A. F. (2002). *Estabilidade de Taludes de Maciços de Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação de Mestrado, G.DM-095^a/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 155 p.
- Ribeiro, A. G. C. (2007). *Determinação de parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de retro-análises de testes em laboratório*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 100 p.
- Rocha, E. F. (2008). *Determinação da Condutividade Hidráulica e da Capacidade de Campo de Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 73 p.
- Sowers, G. F. (1973). *Settlement of Waste Disposal Fills*, In: VIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 2, pp. 207-210, Moscow, URSS.
- Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill Inc., 978 p.
- Van Impe, W. F. (1998). *Environmental geotechnics: ITC 5 activities. State of the art*. Proc. 3rd International Congress on Environmental Geotechnics, pp. 1163-1187, Lisbon, Portugal.