

CARACTERIZAÇÃO E COMPORTAMENTO MECÂNICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PRÉ-TRATADOS

Geotechnical characterization and shear resistance behavior of pre-treated solid wastes

José Antonio Cancino Calle*

Maurício Ehrlich**

Claudio Fernando Mahler***

RESUMO – Foram conduzidos ensaios para caracterização e análise do comportamento mecânico de resíduos sólidos pré-tratados provenientes das cidades brasileiras de São Sebastião/SP e em Novo Hamburgo/RGS. Verificou-se que os elementos fibrosos (plásticos, madeira, etc.) são preponderantes na parcela mais grosseira desses resíduos (superior a 2 mm). Na parcela fibrosa tem-se a presença majoritária de elementos alongados tipo “1D”. Ensaios de cisalhamento efetuados em amostras nos estados fofo e compacto não evidenciaram picos de resistência. Todos os ensaios apresentaram resistências crescentes com a deformação. Envoltórias de resistência tri-lineares foram constatadas em ambos os resíduos. Os ensaios evidenciaram uma significativa variação no valor da coesão efetiva aparente com a compactação e quantidade de fibras. Já o ângulo de atrito não apresentou variações significativas. Tais comportamentos originam-se da presença de plásticos (efeito fibra) e apresentam-se consistentes com o modelo proposto por Kolsch (1995).

SYNOPSIS – Tests were performed to characterize and to determine the mechanical properties of biologic pre-treated solid wastes collected from the cities of São Sebastião/SP and Novo Hamburgo/RGS, Brazil. High fiber content (plastics, wood, etc.) in the coarse part of the waste was verified (larger than 2 mm). In the fibrous material it was observed a larger amount 1D shape elements. Direct shear tests were performed in samples in dense and loose state and no peak shear resistance were observed. All performed tests show increasing shear resistance with deformation. Tri-linear shear resistance envelopes for both wastes were observed. Increase amount of fibers and waste compaction promote an effective apparent cohesion increase, but no significant variation of values of waste friction angle was observed. This mechanical behavior is mainly due to the content of fibrous materials and consistent with the proposed model by Kolsch (1995).

PALAVRAS CHAVE – Resíduos Sólidos Urbanos, Pré-tratamento mecânico biológico, Resistência ao cisalhamento, Efeito fibra.

1 – INTRODUÇÃO

Em linhas gerais, em todo mundo verificam-se dificuldades crescentes na disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU). RSU são produzidos em grandes quantidades e com composição

* Engenheiro Geotécnico (DSc), Geomecânica Ltda. Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

E-mail: antonio.calle@geomecanica.com.br.

** Professor Permanente (DSc), Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro-RJ, Brasil. E-mail: me@coc.ufrj.br.

*** Professor Permanente (DSc), Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro-RJ, Brasil. E-mail: mahler0503@yahoo.com.

variada, não sendo recomendável a disposição ao ar livre sem tratamento prévio. Em países mais desenvolvidos, como Alemanha, o pré-tratamento é obrigatório. No Brasil as ações de pré-tratamento mecânico biológico ou compostagem são ainda bastante incipientes, limitando-se a experiências interrompidas em São Sebastião (SP), Blumenau (Sta. Catarina) e Novo Hamburgo (Rio Grande do Sul). A experiência em Novo Hamburgo, por compreender uma separação mais acurada foi mais semelhante a uma compostagem.

Neste trabalho apresentam-se resultados de pesquisas efetuadas em resíduos provenientes de São Sebastião e de Novo Hamburgo objetivando caracterizá-lo e verificar seu comportamento mecânico quanto à resistência ao cisalhamento.

2 – METODOS DE PRÉ-TRATAMENTO E MATERIAL UTILIZADO

O pré-tratamento mecânico biológico originado na Alemanha é uma variante da compostagem que ao longo dos anos apresentou significativa evolução com inúmeros procedimentos visando diminuir ao máximo a contaminação ambiental, seja do solo, da água e do ar, e ao mesmo tempo diminuir os custos por tonelada de resíduos tratados. Um dos projetos pioneiros envolvendo esta técnica no Brasil foi realizado na Usina de Compostagem da COMLURB, situada em Jacarepaguá no Rio de Janeiro (Munnich *et al.*, 2006). Nessa pesquisa acompanhou-se durante os anos de 2000, 2001 e 2002 o processo de pré-tratamento mecânico biológico de duas leiras de lixo de aproximadamente 1000 m² cada uma e alturas variando de 2,5 a 3,5 m (Mahler, 2002). O processo se mostrou eficaz na redução do volume de lixo, em torno de 60%. O procedimento compreende triagem, trituração e homogeneização dos resíduos, com adição de água ou esgoto. A trituração pode ser feita de diversas maneiras, inclusive com o uso de um caminhão compactador especialmente adaptado o que tem vantagens pela mobilidade, mas desvantagens pela lentidão do processo. Em seguida o resíduo foi disposto em leiras durante 9 meses. Eventualmente após esta estabilização o processo pode sofrer um peneiramento para reaproveitamento de parte do resíduo inertizado. Em São Sebastião (SP) empregou-se este procedimento, sendo o resíduo utilizado nesta pesquisa colhido nas leiras sob tratamento naquela cidade.

A metodologia empregada em Novo Hamburgo é mais semelhante a uma compostagem, frisando-se os processos de separação de resíduos antes da fase biológica e depois da maturação, com um peneiramento bem coordenado. O material utilizado na presente pesquisa foi o composto passante na peneira de 20 mm.

3 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.1 – Gravimetria

Na Figura 1 observa-se a gravimetria de RSU, sem pré-tratamento, provenientes de aterros sanitários brasileiros: Belo Horizonte, Barros *et al.* (2000); Bandeirantes, Machado *et al.* (2000); Muribeca, Monteiro *et al.* (2001); Olinda e Salvador, de Melo & Juca (2001); Brasília, Junqueira (2000); Jacarepagua, Borgatto (2006); São Sebastião, Calle *et al.* (2005); Paracambi, Schueler (2005); São Gonçalo, Silveira (2004).

Antes do pré-tratamento, o RSU proveniente de São Sebastião apresentou um total de 26% de fibras (plástico, papel, madeira, têxtil). Esse valor é próximo ao usualmente encontrado na literatura (25 %) e menor do que o verificado em Jacarepaguá (RJ), 33,8 % (Izzo *et al.*, 2006).

Observa-se que, em linhas gerais, os resultados encontrados nesses diferentes aterros são similares. Tem-se uma massa orgânica média de 58 % e um total de fibras médio de 29 %. Esses números são superiores aos usualmente observados em aterros de países desenvolvidos (Izzo *et al.*, 2006).

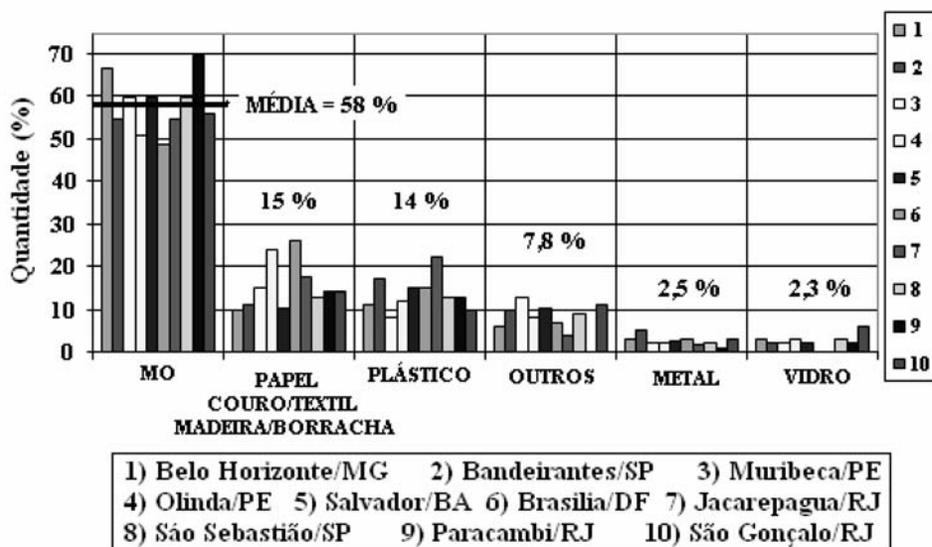


Fig. 1 – Comparação gravimétrica de alguns aterros sanitários de Brasil.

O RSU de São Sebastião antes do pré-tratamento apresentou 60 % de matéria orgânica e depois do pré-tratamento 13,2 %. Pode-se observar que a matéria orgânica encontra-se na parte fina do resíduo pré-tratado, provavelmente em vista da decomposição ocorrida durante o processo de estabilização. Compreende-se como parte fina o material passante da peneira de 50,8 mm. Em Novo Hamburgo os resíduos pré-tratados apresentaram 41,5 % de massa orgânica.

No RSU de São Sebastião as fibras, principalmente plásticos, são encontradas depois do pré-tratamento em maior proporção na parte grossa, 22,4 %. Já na parte fina o plástico apresenta-se em pequena quantidade, 2,5 % (fração menor que 50,8 mm). No caso do RSU proveniente de Novo Hamburgo, verificou-se a presença de 1,2 % de plástico após o pré-tratamento (fração menor que 20 mm).

3.2 – Granulometria

Na Figura 2 apresenta-se a curva granulométrica do RSU estabilizado correspondente ao aterro de São Sebastião. Este material tem 60,2 % em peso de material passante da peneira de 50,8 mm. Pode-se observar que os valores apresentam-se similares aos verificados por Manassero *et al.* (1996) para resíduos de 15 anos de idade e dentro da faixa sugerida por Jessberger (1994), que é bem ampla.

Por se tratar de um material natural as dimensões e formatos das partículas são bastantes variáveis. Não foi possível quantificar com precisão os diversos formatos dos materiais fibrosos, mas, visualmente se verificou maior quantidade de elementos alongados tipo “1D”.

3.3 – Propriedades físicas e ensaios de compactação

No quadro 1 apresentam-se propriedades físicas e ensaios de compactação efetuados nos resíduos pretratados de São Sebastião (SS) e Novo Hamburgo (NH).

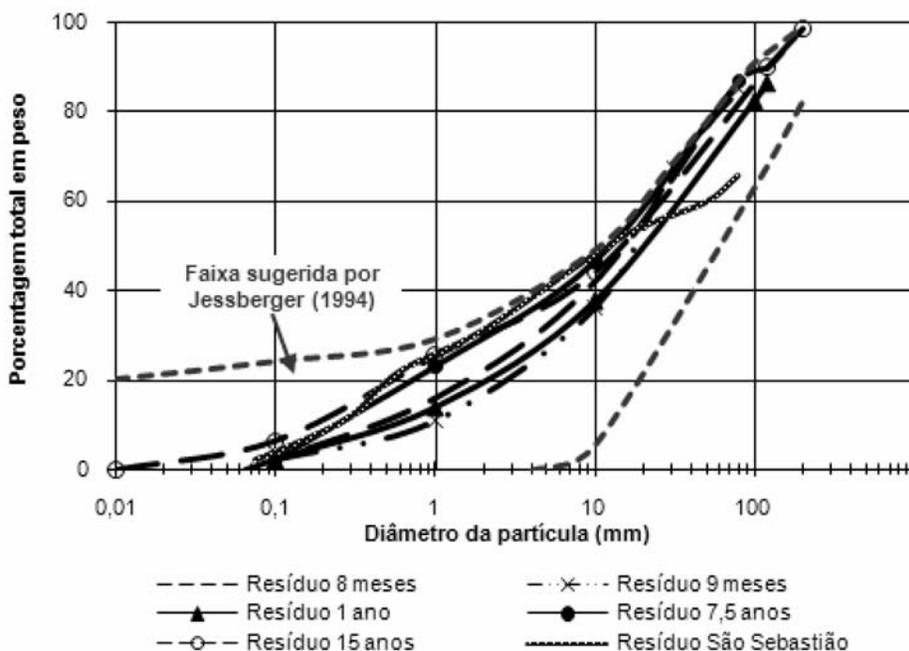


Fig. 2 – Granulometria do RSU de São Sebastião.

Através de ensaios em amostras indeformadas retiradas *in situ* com o Percâmetro (Carvalho, 2006) obteve-se para o RSU de Sebastião também a capacidade de campo, θ_{med} , em termos gravimétricos, massa específica, γ , e umidade, w

Quadro 1 – Propriedades físicas e ensaio de compactação.

| local | γ_s g/cm ³ | w_{ot} % | γd_{max} g/cm ³ | γ g/cm ³ | w % | k_{20} g/cm ³ | θ_{med} % |
|-------|---------------------------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|---------------------|
| SS | 2,4 | 30 | 1,2 | 0,9 | 55 | 1,60E-03 | 85 |

A capacidade de campo do aterro de São Sebastião, 85 %, apresenta-se muito superior à umidade de campo, 55 % o que indica uma elevada capacidade de retenção de água. A umidade de campo do resíduo apresenta-se maior que a umidade ótima de compactação, 30 %. Tal fato parece indicar uma provável ineficiência no processo de compactação. No entanto, tal resultado não pode ser considerado conclusivo, visto que o material utilizado no ensaio compreende a fração inferior a 4,8 mm. Esta fração representa 40 % do observado na granulometria original do resíduo.

3.4 – Verificação do grau de contaminação do resíduo

Efetuar-se ensaios de Solubilização e Lixiviação na parte fina dos resíduos (inferior a 2 mm). No quadro 2 apresentam-se os resultados e comparam-se com os limites definidos na norma NBR 10004. No resíduo proveniente de São Sebastião verificaram-se em ensaio de solubilização valores de concentração de Mn e Fe superiores aos permitidos. Nos resíduos provenientes de Novo Hamburgo também foram observados em ensaio de solubilização valores superiores aos limites de norma para o Mn, Fe, Cu, Cr, Ni, Al e Pb.

Ensaio de Carbono Total, TOC, efetuados na parte fina dos resíduos, apresentaram valores de 3,53% e 5,41% para São Sebastião e Novo Hamburgo, respectivamente. Esses valores são superiores ao limite máximo permitido na Alemanha (TOC máximo 3% - Mahler, 2002).

Quadro 2 – Ensaio de contaminação dos resíduos de São Sebastião e Novo Hamburgo.

| Ensaio | Lixiviação (mg/L) | | | Solubilização (mg/L) | | |
|---------------|-------------------|-----|------|----------------------|--------|--------|
| Local | Metais | VM | AM 1 | VM | AM 1 | AM 2 |
| São Sebastião | Mn | ni | 1,18 | 0,1 | 0,866 | 0,446 |
| | Fe | ni | 0,16 | 0,3 | 1,610 | 0,551 |
| | Zn | ni | 0,75 | 5 | nd | nd |
| | Cu | ni | 0,03 | 2 | nd | nd |
| | Cr | 5,0 | nd | 0,05 | nd | nd |
| | Co | ni | nd | 0,03 | nd | nd |
| | Ni | ni | 0,06 | 0,05 | nd | nd |
| | Al | ni | nd | 0,2 | nd | 0,081 |
| | Cd | 0,5 | nd | 0,005 | nd | nd |
| | Pb | 1,0 | nd | 0,01 | nd | nd |
| Novo Hamburgo | Mn | ni | 1,79 | 0,1 | 0,570 | 0,529 |
| | Fe | ni | 0,30 | 0,3 | 10,500 | 15,300 |
| | Zn | ni | 1,67 | 5 | 1,170 | 2,300 |
| | Cu | ni | 0,19 | 2 | 1,270 | 2,730 |
| | Cr | 5,0 | 0,02 | 0,05 | 0,211 | 0,208 |
| | Co | ni | nd | 0,03 | 0,019 | 0,023 |
| | Ni | ni | 0,04 | 0,05 | 0,222 | 0,245 |
| | Al | ni | 0,17 | 0,2 | 1,340 | 1,410 |
| | Cd | 0,5 | nd | 0,005 | nd | nd |
| | Pb | 1,0 | nd | 0,01 | 0,182 | 0,448 |

nd = Não detectado

VM = Valor Máximo segundo norme brasileira NBR 10004

ni = Não indicado

Os ensaios de coliformes totais e fecais da parte fina do resíduo indicaram valores superiores aos usualmente encontrados em esgoto. Os valores observados em São Sebastião (2,4 E+08 NMP/100 ml) estão condizentes com a elevada quantidade de fraldas observadas no aterro. Os valores de Novo Hamburgo (2,4 E+05 NMP/100 ml), se bem que muito inferiores, também podem ser considerados elevados.

3.5 – Resistência ao cisalhamento

Ensaio de cisalhamento direto foram efetuados em equipamento de 60mmx60mmx41,6mm no laboratório da geotecnia da COPPE em material previamente seco ao ar. No RSU de São Sebastião os corpos de prova foram ensaiados nos estados fofo ($\gamma = 0,68 \text{ g/cm}^3$) e compacto ($\gamma = 0,92 \text{ g/cm}^3$). Para o RSU de Novo Hamburgo também foram conduzidos ensaios na condição fofo ($\gamma = 0,53 \text{ g/cm}^3$) e compacta ($\gamma = 0,71 \text{ g/cm}^3$).

O primeiro grupo de ensaios efetuados compreendeu ao material passante na peneira de 2,0 mm e o segundo o correspondente à peneira 9,5 mm. Adicionalmente foram efetuados ensaios de cisalhamento utilizando equipamento de grandes dimensões 400mmx250mmx100mm disponível no laboratório de geotecnia do Instituto Tecnológico da Areonática (Gomes, 1993). Esses ensaios

em material passante na peneira de 19 mm, foram conduzidos nas compacidades: $\gamma = 0,85 \text{ g/cm}^3$ e $\gamma = 0,66 \text{ g/cm}^3$ respectivamente para São Sebastião e Novo Hamburgo.

Nas Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam-se resultados de ensaios de cisalhamento efetuados com o material no estado fofo e compacto. A deformação horizontal, ϵ , foi obtida pela razão entre o deslocamento horizontal e a altura do corpo de prova.

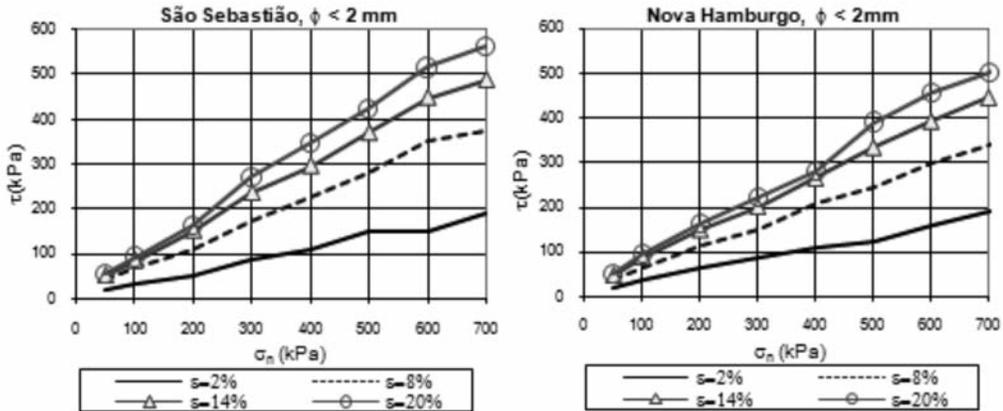


Fig. 3 – Cisalhamento direto material fofo passante peneira 2 mm (amostra 60x60).

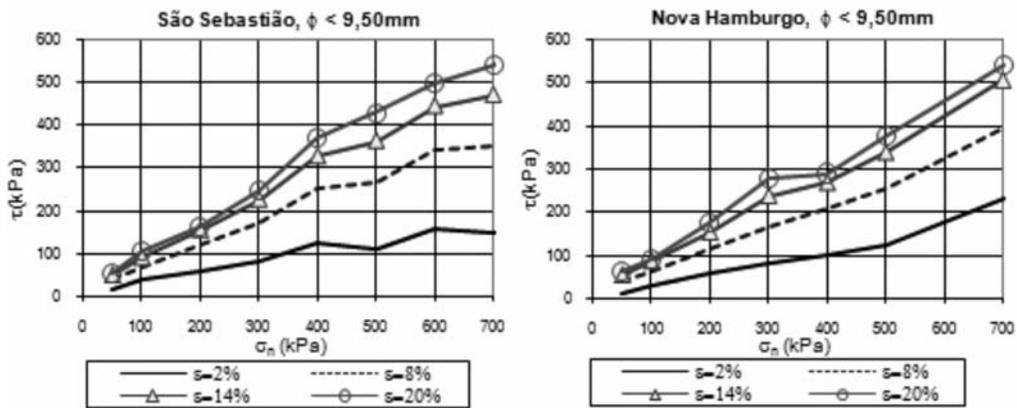


Fig. 4 – Cisalhamento direto material fofo passante peneira 9,5 mm (amostra 60x60).

Nas Figuras 7 e 8 apresentam-se curvas tensão cisalhante versus deformação e variação de volume versus deformação dos ensaios de cisalhamento direto em material nos estados fofo e compacto passante na peneira 9,5 mm proveniente de São Sebastião e Novo Hamburgo. Tanto no estado fofo como no compacto os materiais não apresentaram picos de resistência, observam-se contínuos aumentos da resistência com a deformação. Tal comportamento deve ter origem na mobilização crescente das fibras ao longo do ensaio. O trabalho de reorientação, alongamento e deslizamento das fibras deve predominar no processo. Observa-se também que, tal como esperado, os ensaios efetuados no estado compacto apresentaram um comportamento dilatante para baixas tensões confinantes, enquanto no estado fofo verificou-se um comportamento contrátil independentemente do confinamento.

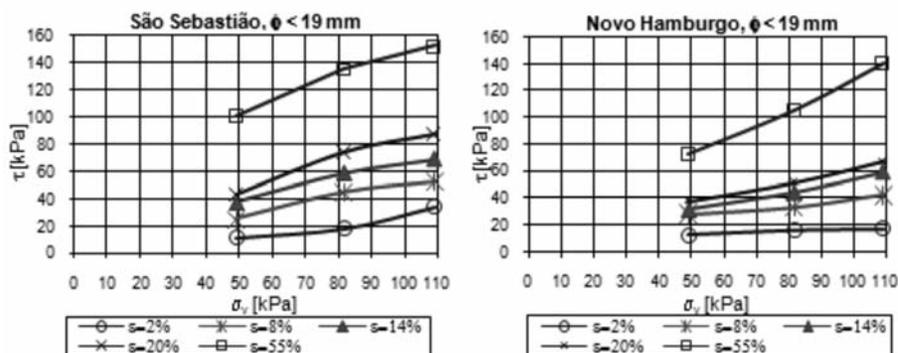


Fig. 5 – Cisalhamento direto material fofo passante peneira 19 mm (amostra 400x250).

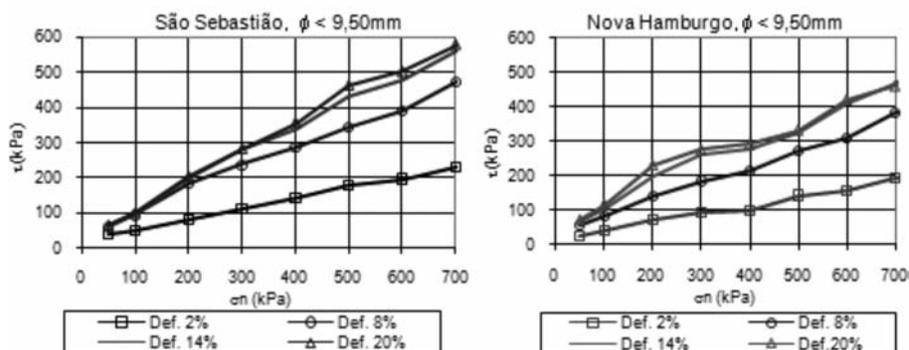


Fig. 6 – Cisalhamento direto material compacto passante peneira 9,50 mm (amostra 60x60).

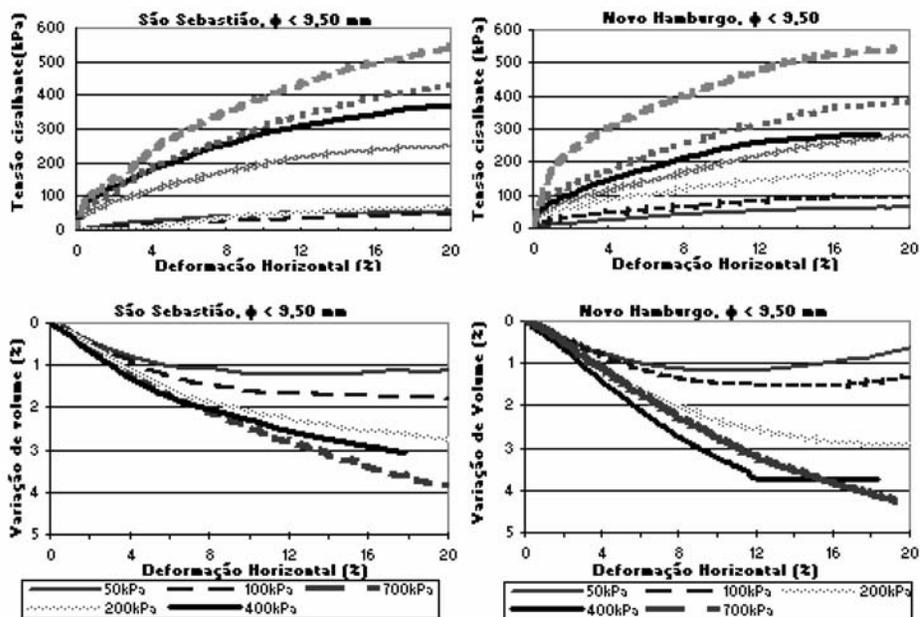


Fig. 7 – Tensão cisalhante e variação volumétrica vs. deformação (material fofo).

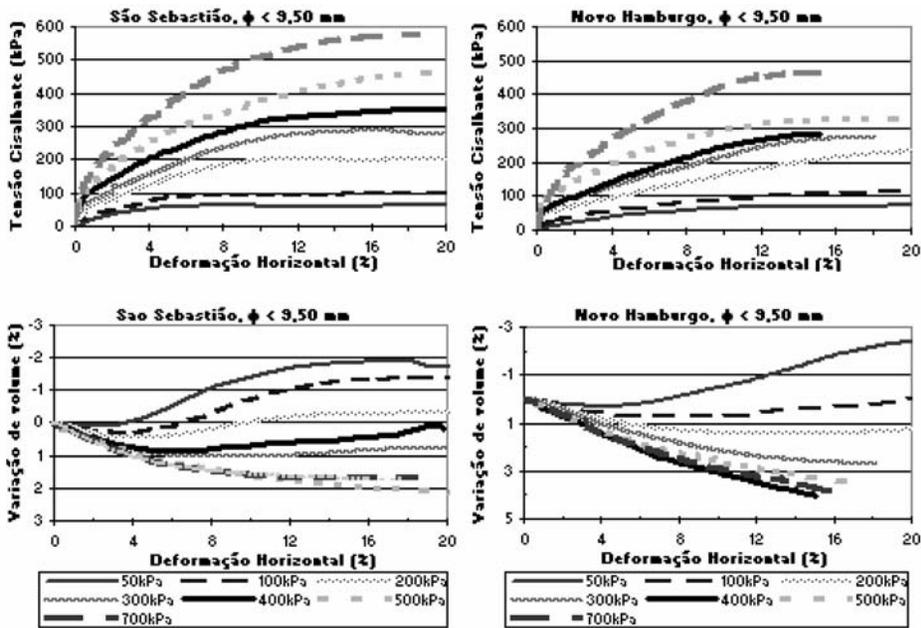


Fig. 8 – Tensão cisalhante e variação volumétrica vs. deformação (material compacto).

Nas Figura 9 e Figura 10 apresentam-se envoltórias de resistência para 14 % e 20 % de deformação horizontal considerando material no estado fofo e compacto, respectivamente. As envoltórias de resistência de ambos os resíduos apresentaram comportamento tri-linear. Na primeira fase um comportamento razoavelmente linear e na segunda verifica-se um patamar na envoltória de resistência. Em seguida uma terceira etapa, na qual a curva apresenta-se similar à primeira etapa.

No estado fofo a não linearidade da envoltória de resistência nos resíduos provenientes de São Sebastião ocorre entre pressões confinantes de 300 kPa e 500 kPa, e entre 200 kPa e 400 kPa para os resíduos de Novo Hamburgo. No estado compacto verifica-se a não linearidade entre 400 kPa a 600 kPa e 100 kPa a 400 kPa para o resíduo proveniente de São Sebastião e de Novo Hamburgo, respectivamente.

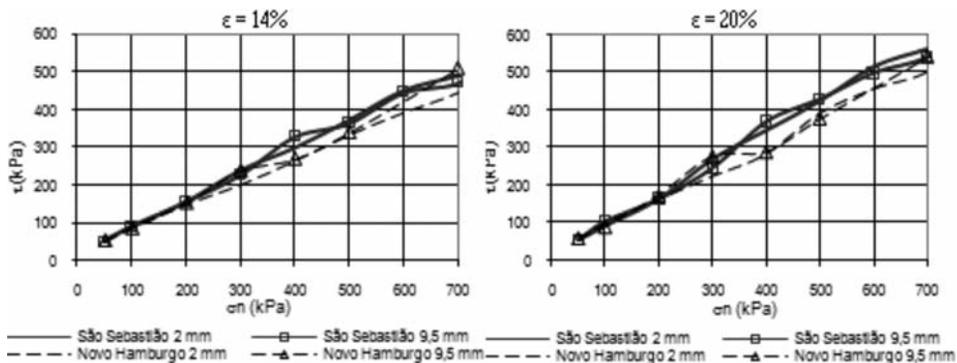


Fig. 9 – Envoltória de resistência para 14 e 20 % de deformação horizontal, material fofo.

Na Figura 11 apresenta-se o modelo do comportamento de massas de resíduos sólidos levadas à rotura sob tensão confinante constante (Kolsch, 1995). Durante a deformação, no início as forças cisalhantes na massa não fibrosa crescem (i); após certa deformação as fibras passam também a

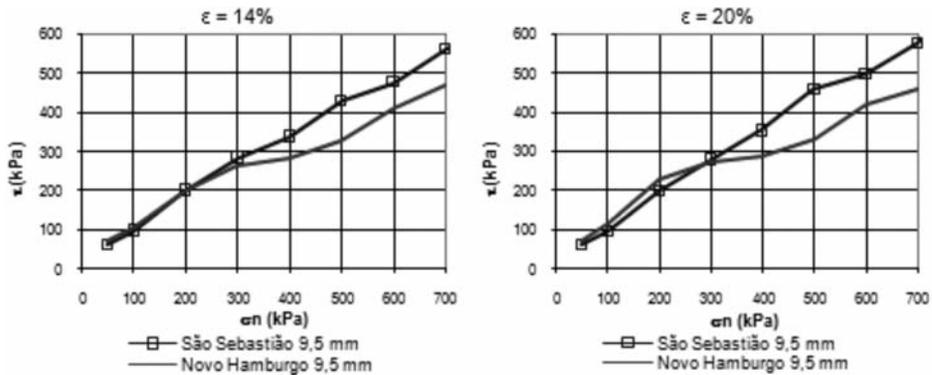


Fig. 10 – Envoltória de resistência para 14 e 20 % de deformação horizontal, material compacto.

serem tracionadas, provocando um efeito de reforço no resíduo (ii). Excedida a resistência à tração ou de aderência, as fibras rompem ou deslizam (iii). A partir de então as forças cisalhantes mobilizadas na massa não fibrosa voltam a prevalecer (iv).

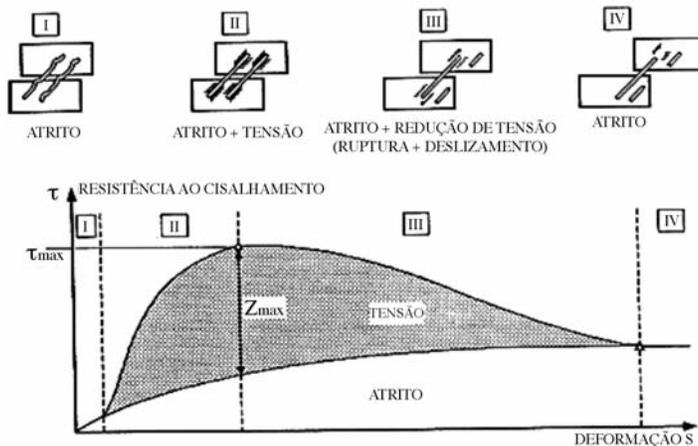


Fig. 11 – Tensões mobilizadas na parcela fibrosa e não fibrosa (Kolsch, 1995).

Na Figura 12 apresenta-se esquematicamente a mobilização de tensões na parcela fibrosa e não fibrosa considerando diferentes tensões confinantes (Kolsch, 1995). Os pequenos círculos nas curvas indicam a condição de máxima mobilização da resistência das fibras e os triângulos indicam o atrito máximo mobilizado na parcela não fibrosa, para uma determinada tensão normal. Sob baixa tensão confinante, σ_1 , as forças de tração mobilizadas nas fibras apresentar-se-ão baixas (baixa aderência), com o incremento de tensão normal as forças de tração nas fibras podem vir a crescer, visto a maior aderência plausível de ser mobilizada no contato das fibras com os demais componentes do resíduo. Para tensões normais mais elevadas ($\sigma > \sigma_2$) pode se observar ruptura nas fibras e daí só a componente de atrito assume papel de relevância na resistência ao cisalhamento.

O comportamento observado nos ensaios da presente pesquisa mostrou-se consistente com o modelo sugerido por Kolsch (1995). Na Figura 4 pode-se verificar os incrementos de resistência proporcionados pelas fibras entre valores de 300 à 500 kPa e 200 à 400 kPa para São Sebastião e Novo Hamburgo respectivamente. Com base no modelo apresentado na Figura 12 tem-se $\sigma_1=300$ kPa, $\sigma_2=400$ kPa e $\sigma_3=500$ kPa para os ensaios correspondentes ao resíduo de São Sebastião.

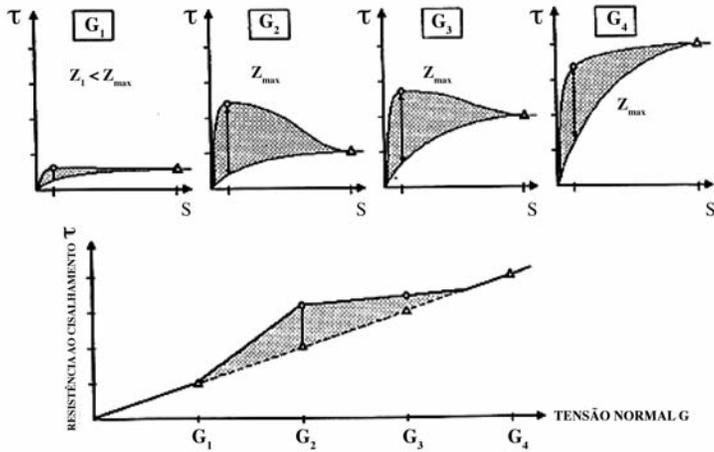


Fig. 12 – Mobilização de tensões na parcela fibrosa e não fibrosa considerando diferentes tensões confinantes (Kolsch, 1995).

Nas Figuras 13 e 14 apresentam-se valores de coesão efetiva aparente, c , e ângulo de atrito, ϕ , correspondentes aos ensaios de cisalhamento direto efetuados nos dois resíduos. Observa-se na Figura 13 que no RSU de São Sebastião a coesão efetiva aparente aumenta de 20 kPa para 28 kPa com o incremento do tamanho das partículas de 2 mm a 9,5 mm (valores máximos, $\epsilon = 14\%$). Já o ângulo de atrito não apresentou variações expressivas com a granulometria. Verifica-se também o incremento da coesão efetiva aparente com a compactação. O valor máximo mobilizado apresentou-se igual a 50 kPa, para uma deformação horizontal de 8%. A partir daí a coesão diminuiu atingindo 25 kPa para uma deformação de 20%.

Tais efeitos são promovidos principalmente pela presença de plásticos, como discutido anteriormente (efeito fibra). As fibras levam a um incremento na resistência a tração da massa de resíduo, gerando uma coesão aparente efetiva. Frações granulométricas maiores têm maior percentual de plásticos, daí o aumento da coesão efetiva observado nos ensaios com o incremento do tamanho das partículas de 2 mm a 9,5 mm. Tem-se também a potencialização desse processo com o aumento da compactação, pelo maior embricamento das fibras e partículas.

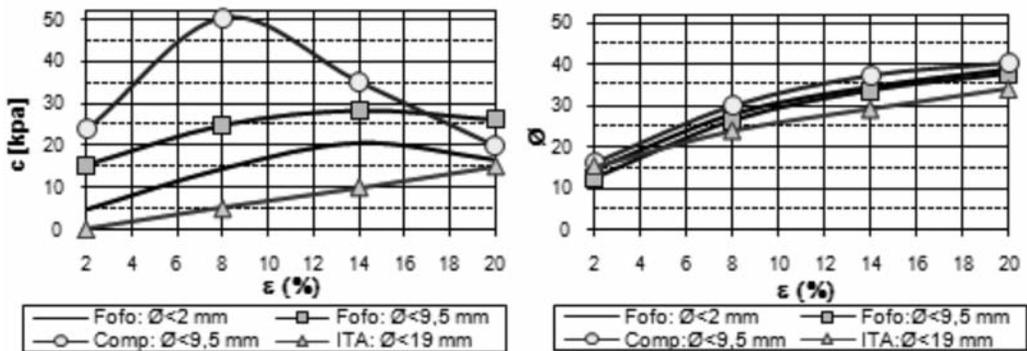


Fig. 13 – Parâmetros de resistência do RSU de São Sebastião.

Os ensaios no equipamento de grandes dimensões com amostras passantes na peneira 19 mm (Fig. 13), resultaram em valores mais baixos para o ângulo de atrito e a coesão efetiva aparente, 35° e 15 kPa, respectivamente. Deve-se atentar que esses ensaios foram conduzidos sob baixas

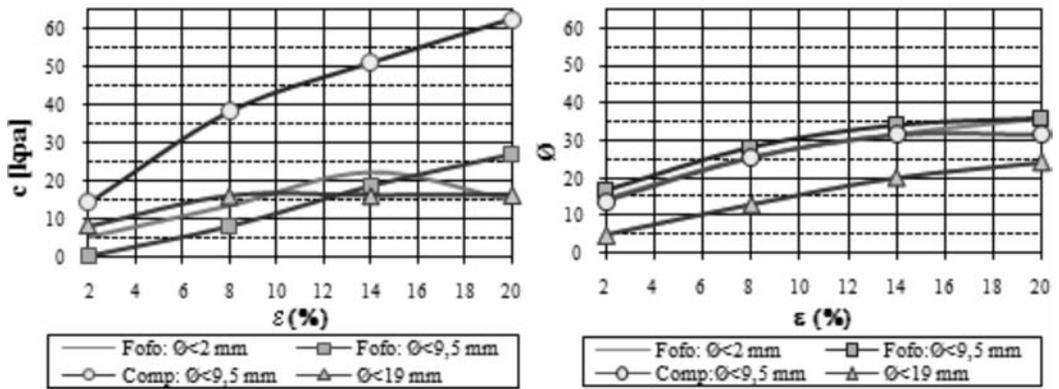


Fig. 14 – Parâmetros de resistência do RSU de Novo Hamburgo.

pressões de confinamento (<108 kPa). Tal comportamento é consistente com o modelo sugerido por Kolsch, (1995). A reação às deformações depende da própria fibra (resistência à tração e rigidez desta) e do comportamento da interface com o restante do material. A redução das tensões confinantes leva à diminuição de resistência da interface e conseqüentemente na resposta do material como um todo (coesão e ângulo de atrito aparentes).

Para o RSU proveniente de Novo Hamburgo (Figura 14) a coesão efetiva aparente não apresentou uma tendência de variação bem definida com o tamanho de partícula. Este comportamento é consistente com o menor percentual de plásticos presente nesse resíduo. O máximo valor observado para a coesão efetiva aparente foi 25 kPa, no solo fofo. Verificou-se também nesse resíduo um significativo acréscimo da coesão efetiva aparente com a compactação. No estado compacto atingiram-se valores de coesão efetiva aparente superiores a 60 kPa. Tal como ocorreu no RSU de São Sebastião o ângulo de atrito não foi significativamente influenciado pelo tamanho de partícula, atingindo um valor máximo de 35° .

Da mesma forma que se verificou nos ensaios efetuados no resíduo de São Sebastião com o material passante na peneira 19 mm, observou-se para Novo Hamburgo valores mais baixos de ângulo de atrito, 25° , e coesão efetiva aparente, 15 kPa (também efetuados sob baixas pressões confinantes).

4 – CONCLUSÕES

A proporção total de plásticos (principal elemento “fibra”) presente no resíduo pré-tratado de São Sebastião apresentou-se igual a 24,9 %. Na parcela mais grosseira dos resíduos verifica-se uma maior presença de materiais fibrosos. A parcela que passou na peneira 50,8 mm apresenta-se em pequena quantidade, 2,5 %. Novo Hamburgo apresentou ainda menor quantidade de plásticos após pré-tratamento (fração < 20 mm), 1,2 %. As dimensões e formatos das partículas são bastantes variáveis. Nos dois resíduos não foi possível quantificar com precisão os diversos formatos dos materiais fibrosos, mas, visualmente se verificou maior quantidade de elementos alongados tipo “1D”.

A umidade de campo obtida no resíduo de São Sebastião foi de 55 %, superior à umidade ótima de compactação, 30 % o que pode indicar uma ineficiência no processo de compactação do aterro. No entanto, esta assertiva deve ser considerada com cautela, visto que o ensaio foi efetuado na parcela do resíduo que passou na peneira 4,8 mm (representa 40 % do material total). A umidade de campo apresenta-se inferior ao valor determinado para a capacidade de campo, 85 %. Tal fato pode indicar que o resíduo tem elevada capacidade de reter água por tempos prolongados.

Ensaio de cisalhamento efetuados em amostras tanto no estado fofo como no compacto, não assinalaram picos de resistência. Observou-se em todos os ensaios efetuados uma resistência crescente com a deformação. Tal comportamento deve ter origem na mobilização crescente das fibras durante o cisalhamento do material. Reorientação e deslizamento das fibras devem predominar à rotura destas durante a mobilização da resistência do resíduo. Tal como esperado os ensaios efetuados no estado compacto apresentam um comportamento dilatante para baixas tensões confinantes, enquanto no estado fofo verificou-se um comportamento contrátil independentemente do confinamento.

As envoltórias de resistência de ambos os resíduos apresentaram comportamento tri-linear. Na primeira fase um comportamento razoavelmente linear e na segunda verificou-se um patamar de resistência, provavelmente oriundo do tracionamento das fibras. A seguir uma terceira etapa, na qual a curva apresentou-se similar à primeira. Este comportamento apresenta-se consistente ao modelo proposto por Kolsch (1995).

Ensaio de cisalhamento não evidenciaram uma significativa variação do ângulo de atrito com a compactidade. A quantidade de fibras também não alterou substancialmente o valor do ângulo de atrito. Tal foi observado em ensaios efetuados em amostras com partículas inferiores a 2 mm e 19 mm.

Já a coesão efetiva aparente apresentou variações com a granulometria e a compactidade do resíduo. No RSU de São Sebastião a coesão efetiva aparente aumentou de 20 kPa para 28 kPa com o incremento do tamanho das partículas de 2 mm para 9,5 mm. A coesão efetiva aparente apresentou considerável aumento com a compactidade. Nas amostras compactadas o valor máximo mobilizado apresentou-se igual a 50 kPa. Tais efeitos são promovidos principalmente pela presença de plásticos (efeito fibra). As fibras promovem a um incremento na resistência a tração da massa de resíduo, gerando uma coesão aparente efetiva. Como já apresentado frações granulométricas maiores tem maior percentual de plásticos: daí, consistentemente com os resultados dos ensaios, observou-se um aumento da coesão efetiva com o incremento nas amostras do tamanho máximo das partículas de 2 mm para 9,5 mm. Por outro lado a compactidade representa um fator potencializador nesse processo pelo maior embricamento das fibras e partículas.

Nos RSU de Novo Hamburgo a coesão efetiva aparente não apresentou tendência bem definida de variação de valores com o tamanho máximo das partículas, o que provavelmente tem relação com o menor percentual de plásticos presentes nesse resíduo. O valor máximo verificado no estado fofo para a coesão efetiva aparente foi de 25 kPa. Verificou-se nesses resíduos um significativo acréscimo da coesão efetiva aparente com a compactidade. No estado compacto observou-se para a coesão efetiva aparente valores superiores a 60 kPa.

5 – AGRADECIMENTOS

À FABER do BRASIL Ltda. e ao Leichtweiss Institute da Universidade Técnica de Braunschweig, pelo apoio nos trabalhos de campo em São Sebastião e Nova Hamburgo, além do fornecimento dos resíduos usados na pesquisa. À Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias, ao Conselho Nacional de Pesquisas, DAAD e Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro pelo suporte dado à pesquisa.

6 – REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). *Resíduos sólidos – classificação: NBR 10004*. Rio de Janeiro, Brasil, 71p.
- Barros, R.T., Gariglio, L.P., Keller, W., Loureiro, C. de O., Melo, G.C.B. de, Batista, H. e Goulart, A.F. (2000). *Landfill monitoring methodology the experience of Belo Horizonte (MG)*. 5th

International Symposium on Global Sustainable Development Environmental Geotechnology. Belo Horizonte, MG.

- Borgatto, A.V.A. (2006). *Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, Curso de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE-UFRJ, 157p.
- Calle, J.A., Ehrlich, M. e Mahler, C. (2005). *Geotechnical behavior of mechanically biologically pretreated residual waste*. International Conference on Energy, Environment and Disasters, INCEED 2005. Bridging the gaps for global sustainable development (UNESCO ISEG GADR). Charlotte, North Carolina, Estados Unidos.
- Carvalho, A.R. (2006). *Desenvolvimento de um equipamento para a determinação de parâmetros geotécnicos de resíduos sólidos*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, Curso de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE-UFRJ, 160p.
- de Melo, V.L. e Juca, J.F. (2001). *Diagnostico ambiental em aterros de resíduos sólidos a partir de estudos de referencia*. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, pp 16-21.
- Gomes, R.C. (1993). *Interação solo-reforço e mecanismos de ruptura em solos reforçados com geotextil*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, 270p.
- IPT, CEMPRE (2000). *Lixo municipal-manual de gerenciamento integrado*. São Paulo, 246p.
- Izzo, R.L. dos S., Borgatto, A.V.A. e Mahler, C.F. (2006). *Classificação de resíduos sólidos urbanos da Cidade do Rio de Janeiro utilizando a norma alemã E1-7 GDA*. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG.
- Jessberger, H.L. (1994). *Geotechnical aspects of landfill design and construction. part 1: principles and requirements*. Proc. Instn Civ. Engrs Geotechnical. Engineering, v.107, apr. 99 - 104.
- Junqueira, F.F. (2000). *Análise de comportamento de resíduos urbanos e sistemas dreno-filtrantes em diferentes escalas, com referência ao aterro do Jôquei Clube*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 283 p.
- Kolsch, F. (1995). *Material values for some mechanical properties of domestic waste*. Proceedings of the 5th Sardinia International Landfill Symposium, S Margherita Di Pula, Cagliari, vol II.
- Machado, S.L., Carvalho, M.F. e Vilar, O.M. (2000). *Towards modelling municipal solid waste mechanical behaviour*. International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Geoen2000, Melbourne.
- Mahler, C. F. (2002). *Proposed Scientific follow-up of the Project of Mechanical Biological Treatment of Urban Solid Waste*. Final Report. Fundação COPPETEC, for Faber Recycling and the German Ministry of Education and Research.
- Manassero, M.; Van Impe, W. F. e Bouazza, A. (1996). *Waste disposal and containment*. In proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, preprint of special lectures, Osaka, Japan, Balkema, vol.3, pp 1425-1474.
- Monteiro, V. E., Juca, J. F. e Rego, C. (2001). *Influência das condições climáticas no comportamento do aterro de resíduos sólidos da Muribeca*. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, pp 16-21.

- Münnich, K.; Mahler, C. F. e Fricke, K. (2006). *Pilot project of mechanical-biological treatment of waste in Brazil*. Waste management (Elmsford), vol. 26, n.º 2, pp 150-157.
- Schueler, A. S. de (2005). *Estudo de caso e proposta para classificação de áreas degradadas por disposição de resíduos sólidos urbanos*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, Curso de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE-UFRJ, 223 p.
- Silveira, A. M. (2004). *Estudo do peso específico de RSU*. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, Curso de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE-UFRJ, 106 p.