

INFLUÊNCIA DO MATERIAL PLÁSTICO MOLE NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PRÉ-TRATADOS

The influence of soft plastic material in the shear strength parameters of pre-treated municipal solid waste

Andre Vinicius de Azevedo Borgatto*

Cláudio Fernando Mahler*

Kai Münnich**

RESUMO – A estabilidade de aterros sanitários de RSU pré-tratados ou não é um tópico relevante tendo em vista os diversos escorregamentos e acidentes observados em todo o mundo. Para uma apropriada análise de estabilidade, os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos (RSU) devem ser bem definidos a fim de representar seu verdadeiro comportamento mecânico. A resistência mecânica dos RSU é determinada por duas componentes distintas: atrito (partículas granulares) e coesão aparente das fibras. Em relação à coesão aparente das fibras, esta é originada por um grande grupo de substâncias (materiais fibrosos) como papel/papelão, plástico mole, plástico duro e madeira. A concentração volumétrica do material plástico mole na composição de RSU é elevada e tem crescido significativamente nos últimos anos. Sua influência nos parâmetros de resistência é relevante. No presente trabalho, busca-se avançar na compreensão da influência do plástico mole nos parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos, considerando resíduos sólidos urbanos pré-tratados, ou seja, que sofreram algum processo de degradação anterior à disposição final, procedimento esse já obrigatório em países como a Alemanha e a Áustria.

SYNOPSIS – Nowadays the stability of MSW landfills with or without pre-treated waste has become one of the most challenging topics in geotechnical engineering. For an appropriate analysis of stability, the shear strength parameters of MSW should be well-defined in order to give a more realistic assessment of its mechanical behaviour. The mechanical strength of municipal solid waste is determined by two different components: friction (between granular particles) and apparent fibrous cohesion. Concerning apparent fibrous cohesion, it consists typically of a large group of substances (fibres and foil matter): paper/cardboard, soft plastic, hard plastic and wood. The high volumetric concentration of the soft plastic material in the MSW composition has increased considerably in recent years and its influence on the shear strength parameters is considerable. This study intends to give a better understanding of the influence of the soft plastic matter on the urban solid waste shear strength parameters, considering pre-treated municipal solid waste. In other words, it underwent some degradation process prior to final disposal, which is an already mandatory procedure in countries such as Germany and Austria.

PALAVRAS CHAVE – Plástico mole, resistência, resíduos sólidos urbanos pré-tratados, aterros sanitários.

1 – INTRODUÇÃO

Atualmente, a estabilidade de aterros sanitários de RSU tornou-se um dos mais importantes tópicos de estudo da área de geotecnia ambiental. Paralelo a isso, para uma apropriada análise de

* COPPE/UFRJ (Programa de Engenharia Civil), Brasil, E-mail: cfmahler@acd.ufrj.br

** LWI/TU-Braunschweig, Braunschweig, Alemanha

estabilidade, os parâmetros de resistência dos RSU devem ser bem definidos a fim de representar seu verdadeiro comportamento mecânico. Análises de estabilidade de aterros de RSU usando métodos da mecânica dos solos podem incorrer em resultados equivocados devido à diferença entre as propriedades mecânicas dos solos e RSU (Kölsch, 1993).

Como é de conhecimento, a resistência mecânica dos RSU é determinada por duas componentes distintas: atrito (partículas granulares) e coesão aparente das fibras. Em relação à coesão aparente das fibras, esta é originada de um grande grupo de substâncias (materiais fibrosos) como papel/papelão, plástico mole, plástico duro e madeira (Bauer *et al.*, 2007). Porém, cada um destes materiais possui diferentes propriedades físicas e mecânicas. Em outras palavras, cada um dos tipos de substância afeta o reforço em diferentes maneiras.

Por causa da alta concentração volumétrica do material plástico mole na composição mundial de RSU e conseqüente, sua influência nas propriedades mecânicas (parâmetros de resistência), este material foi escolhido como objeto de estudo deste trabalho. Plástico mole é uma película plástica normalmente usada como sacolas de supermercados, sacos de lixo, embalagens de leite, proteção de alimentos na geladeira ou microondas. O material constitui 42,5% das embalagens plásticas em geral nos Estados Unidos. No Brasil, por exemplo, o percentual em peso de plástico mole na composição dos RSU pode atingir valores maiores que 30%.

Desta forma, o principal objetivo deste trabalho é a investigação da influência do material plástico mole nos parâmetros de resistência dos RSU (ângulo de atrito e coesão aparente) através de ensaios de cisalhamento direto.

Importante esclarecer que o trabalho aqui desenvolvido buscava atender critérios de aterros sanitários atualmente oficiais na Alemanha e na Áustria que são bem mais rígidos do que os critérios vigentes em outros países, em especial do mundo em desenvolvimento e subdesenvolvido. Assim, os resíduos precisam antes de serem depositados no aterro sofrer um processo de degradação que pode ser por via térmica, aeróbia ou anaeróbia, com inclusão ou não de processos mecânicos (trituração) na parte inicial. O processo mecânico biológico contém essa trituração na parte inicial, podendo depois sofrer um processo aeróbio ou anaeróbio na assim chamada etapa biológica do processo. Poderíamos definir este como o aterro sanitário verdadeiro e o outro como o falso, o que certamente provocará muita confusão. De qualquer forma, é importante que se esclareça que o estudo foi feito para o assim aqui chamado de aterro sanitário verdadeiro, onde os resíduos não sofrem mais degradação significativa depois de dispostos.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 – Resíduo sólido urbano (RSU)

As amostras do RSU utilizadas nesta pesquisa foram obtidas no aterro sanitário de Blankenhagen, localizado no distrito de Northeim, Alemanha. Trata-se de um resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente (MBT) com tamanho máximo de partícula de 60 mm devido ao tratamento mecânico.

As amostras foram retiradas de uma leira no final do período de estabilização biológica (leiras estáticas aeradas). Aproximadamente 300 kg do resíduo foram coletados, armazenados em contêineres plásticos e levados para o laboratório do Departamento de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, da Universidade Técnica de Braunschweig, Alemanha.

2.2 – Ensaios de caracterização do RSU

Os ensaios de caracterização do RSU foram realizados seguindo as recomendações técnicas alemãs apresentadas no documento “Geotecnia de Aterros e Áreas Contaminadas” editado pela

Sociedade Alemã para Geotecnia (DGGT, 1997; GDA, 1997; Jessberger, 1994). Esta recomendação possibilita a definição das propriedades dos RSU que são relevantes para o estudo da resistência deste material. Desta forma a caracterização do RSU é feita conforme os tópicos listados a seguir.

2.3 – Distribuição dos grupos de substâncias

A distribuição dos grupos de substâncias consiste na separação das amostras de RSU conforme definido na recomendação técnica alemã GDA E 1-7 (GDA, 1997). Estes são escolhidos de tal maneira que cada grupo de substâncias apresente características de materiais similares com referência ao comportamento mecânico e estabilidade bioquímica.

Em acordo com o procedimento apresentado por Borgatto *et al.* (2007), foram estabelecidos 10 grupos de substâncias: peças grandes - substâncias de grande porte compostas por diversos componentes como móveis, colchões, etc.; papel/papelão - substâncias residuais compostas basicamente de papel ou fibras semelhantes ao papel, como papelão, embalagens de papel, impressos, tapetes, fraldas, etc.; plásticos macios - despejos que se componham basicamente de substâncias sintéticas macias ou cujas características sejam dominadas por tais substâncias, como embalagens plásticas macias, lâminas, têxteis, borracha macia, couro macio, etc.; plásticos duros - despejos que se componham basicamente de substâncias sintéticas duras, como embalagens plásticas rígidas, copos de iogurte, garrafa PET, plásticos rígidos, couro duro, borracha rígida, etc.; metais - ferrosos e não ferrosos; minerais - despejos que se componham basicamente de substâncias minerais ou que apresentem um comportamento mecânico ou biológico similar (inertes) como vidro, cerâmica, solo, etc.; madeira e material orgânico - despejos que sejam de origem natural, orgânica, vegetais e aparas de capim, plantas, folhas secas, etc.

A especificação das frações de um grupo de substância foi realizada em porcentagem de peso em relação à massa total úmida.

2.4 – Classificação morfológica

A classificação morfológica dos RSU foi realizada baseada na recomendação técnica alemã GDA E 1-7 (GDA, 1997) tendo como intuito classificar os resíduos quanto à sua forma e medida no tocante às características relevantes para a mecânica dos resíduos. Cada grupo de substâncias foi submetido a esta descrição geométrica considerando-se as dimensões abaixo estabelecidas:

- DIM 0: Grão (nenhum comprimento);
- DIM 1: Fibra (um lado significativo comparado aos outros lados);
- DIM 2: Folha (dois lados significativos comparados ao terceiro lado);
- DIM 3: Volume (três lados significativos).

A classificação morfológica foi realizada através da separação manual do resíduo. A fração de uma determinada dimensão foi feita com base no seu peso total em termos de substância seca.

2.5 – Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação foram executados baseados na norma técnica alemã DIN 18127 (1997). Para os ensaios em amostras de RSU foi utilizado um cilindro de compactação de grande porte ($\varnothing = 250$ mm) apropriado para ensaios com amostra de RSU.

Aproximadamente foram utilizados 12 kg de amostra de RSU (peso úmido) sendo os corpos de prova utilizados uma única vez a fim de evitar uma superestimação do peso específico do material. Para cada ensaio foram realizadas, pelo menos, cinco determinações de pontos na curva

de compactação em diferentes teores de umidade. Desta forma, o peso específico seco das amostras, como preconizado na norma técnica, foi determinado em termos de base úmida do material.

Foram realizados ensaios de compactação com amostras de RSU em sua composição original e também com amostras onde o grupo de substância plástico mole foi totalmente retirado.

2.6 – Ensaio de cisalhamento direto

Para o estudo da resistência ao cisalhamento do resíduo em análise nesta pesquisa foram realizados ensaios de cisalhamento direto. Para isso utilizou-se um equipamento de média escala desenvolvido no departamento de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, da Universidade Técnica de Braunschweig, Alemanha, para realização de testes em resíduos com dimensão de partícula máxima de 60 mm.

O equipamento de cisalhamento direto possui as dimensões $300 \times 300 \times 150$ mm (comprimento $\times$ largura $\times$ altura total). É composto por duas caixas metálicas sobrepostas: caixa inferior com altura de 60 mm e a superior com altura de 90 mm. A força vertical é aplicada através de um cilindro hidráulico localizado acima da caixa metálica (receptáculo da amostra) com capacidade máxima de aplicação de tensão de 1000 kN/m^2 . A força cisalhante é medida através de uma célula de carga com capacidade máxima de 500 kN. Os deslocamentos, tanto horizontais quanto verticais, são medidos e armazenados através de um conjunto de extensômetros automáticos acoplados a um sistema de aquisição automática de dados, *Datenlogger*. A Figura 1 apresenta o equipamento de cisalhamento direto de média escala.

Para cada ensaio foram necessários aproximadamente 14 kg de resíduo (peso úmido) com utilização de uma única vez. As amostras foram colocadas dentro do receptáculo (caixa de cisalhamento) e compactadas com a ajuda de um martelo de compactação tipo Proctor (15 kg) em três camadas até atingirem a altura final desejada. Antes de serem executados os ensaios de cisalhamento direto as amostras de RSU foram deixadas por um período de 48 horas em fase de adensamento sendo os recalques medidos pelos extensômetros. Após o término do adensamento as amostras foram ensaiadas a velocidade de cisalhamento constante de 0,05 mm/min. A fim de se investigar a influência do material plástico mole na resistência ao cisalhamento dos RSU foram conduzidos ensaios com amostras do RSU nas seguintes configurações:

- Amostra do RSU com composição original e compactado no peso específico seco máximo determinado pelo ensaio de compactação: Amostra A;
- Amostra do RSU com composição alterada (sem o grupo de substância plástico mole) e compactado no peso específico seco máximo determinado pelo ensaio de compactação: Amostra B;

O Quadro 1 apresenta um resumo dos ensaios realizados.

Quadro 1 – Ensaio de cisalhamento direto.

Amostra	Tensão Normal (kN/m^2)	Quantidade de Ensaios
A	25 / 50 / 100 / 200 / 300	5
B	25 / 50 / 100 / 200 / 300	5



Fig. 1 – Equipamento de cisalhamento direto.

3 – RESULTADOS

3.1 – Ensaio de caracterização do RSU

3.1.1 – Distribuição dos grupos de substâncias

A distribuição segundo os grupos de substâncias dos RSU foi realizada a partir dos procedimentos especificados no item 2.3. A Figura 2 apresenta os resultados obtidos com a distribuição dos grupos de substâncias das amostras de RSU em estudo.

Os resultados encontrados são típicos de um resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente com predominância de material com tamanho de partícula inferior a 40 mm, representando 83% em peso da amostra. Em seguida, com 6% temos o grupo de substância plástico mole, representando aqui o material de reforço.

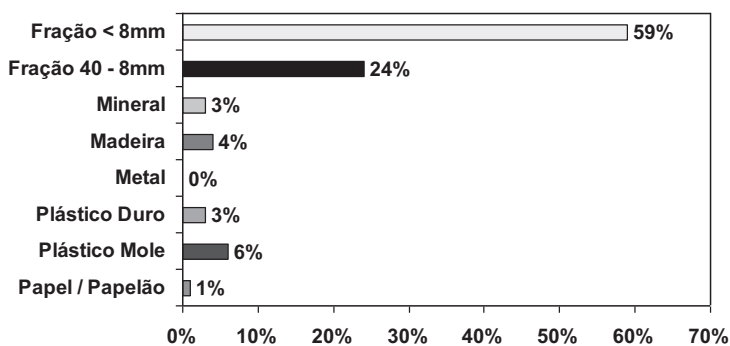


Fig. 2 – Distribuição dos grupos de substâncias – RSU após pré-tratamento mecânico biológico.

3.1.2 – Classificação morfológica

A classificação morfológica dos RSU em estudo está apresentada na Figura 3. A parcela considerada como material de reforço, dimensões DIM 1 e DIM 2 totaliza 14% em peso em termos de substância seca.

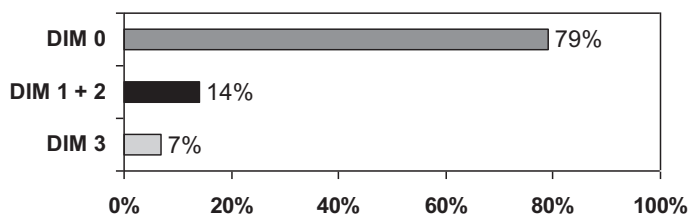


Fig. 3 – Classificação morfológica – RSU após pré-tratamento mecânico biológico.

3.2 – Ensaio de compactação

O peso específico máximo, úmido e seco, está apresentado no Quadro 2. A Figura 4 apresenta a curva de compactação das amostras de RSU pré-tratados em sua composição original e também, em sua composição alterada (sem o grupo de substância plástico mole).

Quadro 2 – Resultados do ensaio de compactação.

Amostra	Teor de Umidade (%)	P. Específico Seco (kN/m³)	P. Específico Úmido (kN/m³)
A	34,00	9,20	14,10
B	33,00	9,90	14,80

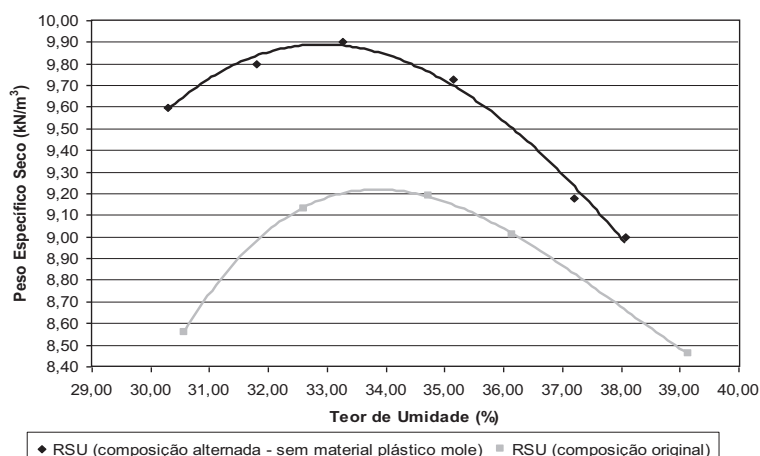


Fig. 4 – Curva de compactação das amostras A e B..

3.3 – Ensaio de cisalhamento direto

Os resultados obtidos no estudo da resistência ao cisalhamento em ensaios de cisalhamento direto de média escala (30 × 30 cm) em termos da curva de tensão cisalhante vs. deslocamento horizontal, para as amostras A e B, estão apresentados na Figura 5. Observa-se que a mobilização da tensão cisalhante com o aumento do deslocamento horizontal atinge valores maiores na amostra A (composição original) quando comparada a amostra B (composição alterada – sem o grupo de substância plástico mole), para todos os níveis de tensão vertical. Este comportamento evidencia a

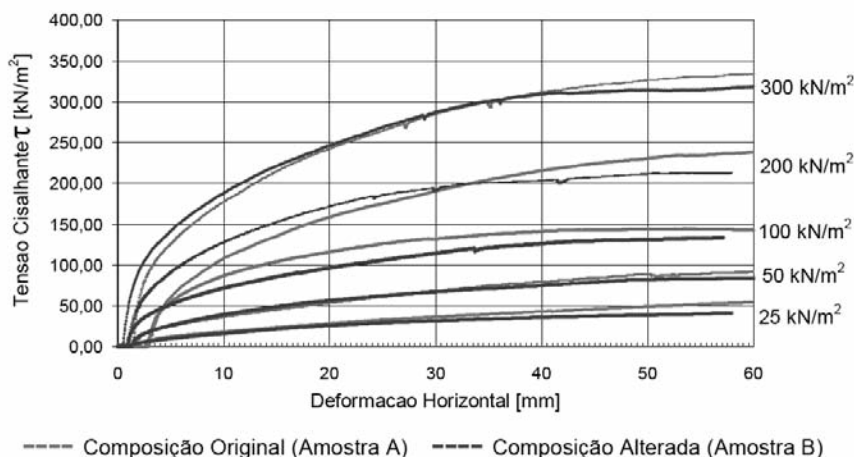


Fig. 5 – Curva tensão cisalhante *versus* deformação horizontal para as amostras A e B.

influência do grupo plástico mole na resistência dos RSU, principalmente na região de maior deformação horizontal, onde a componente de reforço é mobilizada.

Assumindo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, a Figura 6 apresenta a mobilização dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão aparente e ângulo interno de atrito, com a deformação horizontal, em ensaios de cisalhamento direto. Os resultados mostram que o grupo de substância plástico mole tem maior influência no parâmetro coesão aparente. Em especial, com o crescimento do deslocamento horizontal, em todos os casos, o material A, com substância de plástico mole, apresentou maiores valores de tensão cisalhante, o que levará a maiores parâmetros de resistência. Interessante, ainda, observar que em todos os casos o comportamento observado pode ser associado a um *strain hardening* uma vez que gradativamente conforme pode ser visto na Figura 6, há uma crescente solicitação em termos de coesão aparente e ângulo de atrito.

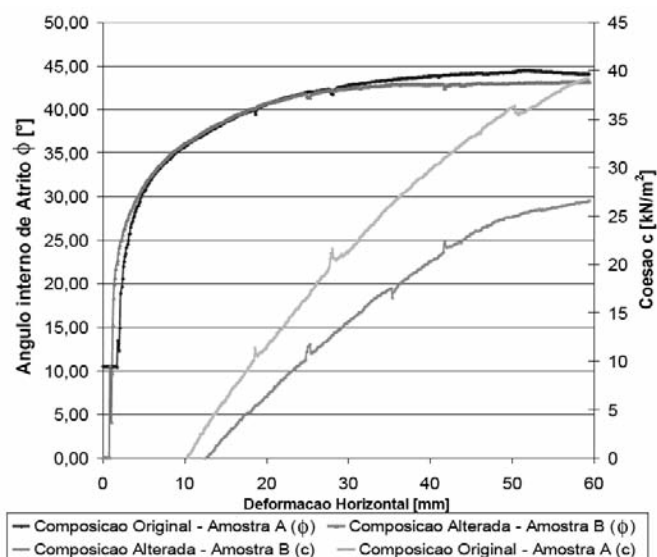


Fig. 6 – Mobilização dos parâmetros de resistência ao cisalhamento nas amostras A e B.

A Figura 7 apresenta as envoltórias de resistência segundo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb para as amostras A e B. Como já apresentado anteriormente, a retirada do grupo de substância plástico mole causou uma redução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

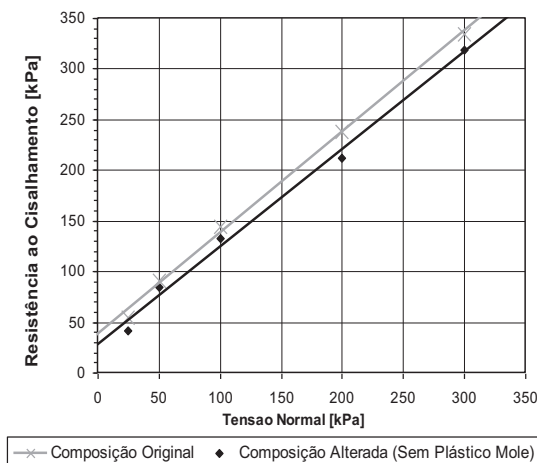


Fig. 7 – Envoltórias de resistência para as amostras A e B.

4 – CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados o grupo de substância plástico mole (embalagens plásticas macias, lâminas, têxteis, borracha macia, couro macio, etc.) representando 6% do peso total das amostras aqui estudadas, influencia a mobilização dos parâmetros de resistência dos RSU em ensaios de cisalhamento direto, mais evidenciado no parâmetro coesão aparente para altos níveis de deformação. O parâmetro coesão aparente apresentou uma redução de aproximadamente 17% entre a amostra com composição original (Amostra A) e a amostra com composição alterada – sem o grupo de substância plástico mole (Amostra B). Já o parâmetro ângulo interno de atrito apresentou uma redução menos significativa, na ordem de 2%. Estes resultados vêm enfatizar que a resistência mecânica dos RSU é determinada por duas componentes, atrito (partículas granulares) e coesão aparente das fibras. Com a retirada do grupo de substância mais representativo dos materiais fibrosos, o parâmetro coesão aparente sofreu maior influência e redução.

Também, ficou evidenciada, através dos ensaios de compactação, a influência do grupo de substância plástico mole, causando uma redução do peso específico na ordem de 8% entre as amostra A e B. Vale lembrar que o peso específico é um fator de grande influência nos cálculos de estabilidade e na operação de aterros de RSU devido à dificuldade de compactação em campo e a influência deste na estabilidade geral dos aterros.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CAPES, CNPq, DAAD, FAPERJ e German Research Foundation (DFG) pelo suporte financeiro durante este trabalho. Também ao Leichtweiss Institute da Universidade Técnica de Braunschweig e seu Diretor, Prof. Klaus Fricke, por disponibilizar seu laboratório e os equipamentos para a pesquisa. Agradecemos ainda à Eng.^a Danielle Brum Nova de Castro pela revisão final.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bauer, J; Münnich, K.; Fricke, K. (2007). *Influence of Hydraulic Properties on the stability of landfills*. Proceedings of Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- Borgatto, A.V.A.; Izzo, R.L.S.; Mahler, C.F. (2007). *Classification of the Municipal Solid Waste from Rio de Janeiro/RJ*. 2nd International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills", Southampton, UK.
- DGGT, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (1997). *Geotechnik der Deponien und Altlasten. GDA-Empfehlungen*, 3 Auflage, Ernst & Sohn, Berlin.
- DIN 18127 (1997). *Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch*. Deutsches Institut für Normung e. V.
- GDA (1997). *E 1-7 Identifizierung von Abfällen und Stoffgruppen*, www.gdaonline.de/pdf/E1-07.pdf
- Jessberger, H.L. (1994). Empfehlungen der Arbeitskreises “Geotechnik der Deponien und Altlasten” der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V., Bautechnik 71, Helf 9, pp. 527-552, Ernst & Sohn, Berlin.
- Kölsch, F. (1993). *The bearing bhaviour of domestic waste and related consequences for stability*. Proceedings of Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, pp.1393 - 1410.