

### III-005 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO DEVIDO A PRESENÇA DE PLÁSTICO MOLE

**Ronaldo L. dos Santos Izzo** <sup>(1)</sup>

Engenheiro Civil pela Universidade de Marília. Mestre em Engenharia Industrial pela Universidade Estadual Paulista (UNESP-Bauru). Doutor em Geotecnia pela COPPE-UFRJ. Professor adjunto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-Curitiba).

**Francismara Martins Gawlik** <sup>(2)</sup>

Engenheira Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheira de Segurança do Trabalho pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

**Endereço** <sup>(1)</sup>: Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900, Bloco IJ/PPGEC - Ecoville - Curitiba - PR - CEP: 81280-340 - Brasil - Tel: (41) 3279-4577 - e-mail: [izzo@utfpr.edu.br](mailto:izzo@utfpr.edu.br)

**Endereço** <sup>(2)</sup>: Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900, Bloco IJ/PPGEC - Ecoville - Curitiba - PR - CEP: 81280-340 - Brasil - Tel: (41) 3279-4577 - e-mail: [fmaramartins@hotmail.com.br](mailto:fmaramartins@hotmail.com.br)

#### RESUMO

A influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento do resíduo sólido urbano (RSU) vem sendo alvo constante de estudo em virtude da sua enorme relevância nesta questão. No entanto, trata-se de um tema complexo, visto que, são muitas as variáveis relacionadas ao problema, tais como, a quantidade de plástico, influência do chorume em contato com o plástico, inclinação do plástico em relação aos esforços normais e cisalhantes, resistência à tração do plástico, questões relacionadas à mobilização de esforços resistentes pelo plástico, etc. O presente trabalho visa estudar as variáveis envolvidas em relação à contribuição do plástico mole na resistência ao cisalhamento do resíduo sólido urbano. Para esta pesquisa, utilizou-se um solo granular simulando o comportamento do RSU contendo, ou não, plástico mole. A influência do chorume na contribuição de resistência devido a presença de plástico mole também foi analisada. Ensaios de cisalhamento direto foram realizados para todos os casos. Foi observado que há um aumento em média de 15% na resistência do solo granular na presença do plástico mole. Isto indica que há uma contribuição do plástico mole em relação aos esforços normais e cisalhantes na resistência ao cisalhamento do RSU, e que este estudo é importante para o melhor entendimento dos parâmetros de resistência de aterros sanitários de RSU.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos Sólidos Urbanos, Resistência ao Cisalhamento, Plástico Mole, Chorume.

#### INTRODUÇÃO

Um dos principais métodos de eliminação dos resíduos sólidos urbanos em todo mundo ainda é a disposição em aterros. Embora existam grandes esforços em muitos países para minimizar, reutilizando e reciclando os resíduos materiais, o descarte em aterros deve continuar em um futuro previsível.

Pesquisas relacionadas aos efeitos da composição do resíduo sólido urbano (RSU) na sua resistência ao cisalhamento tem sido objeto de estudo nos últimos anos. Pois, uma vez conhecendo-se a contribuição do plástico mole na resistência ao cisalhamento do RSU, os aterros poderão ter sua inclinação otimizada, de modo a haver um melhor aproveitamento das áreas destinadas aos aterros sanitários.

No entanto, trata-se de um tema complexo, visto que, são muitas as variáveis relacionadas ao problema, tais como, a influência do chorume junto ao plástico, a quantidade de plástico, a inclinação do plástico em relação aos esforços normais e cisalhantes, a resistência à tração do plástico e questões relacionadas à mobilização de esforços resistentes pelo plástico.

Dessa forma, o estudo de todos esses enfoques constituem uma contribuição importante para os parâmetros relacionados ao prolongamento da vida útil e ampliação da capacidade dos aterros sanitários.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Quando um elemento de solo é cortado por um elemento de reforço que forma um ângulo  $\theta$  com a superfície de cisalhamento (Figura 1), o estado de tensões é modificado porque uma tensão  $T$  gera uma tensão cisalhante produzida pela componente tangencial  $T \cdot \sin\theta$ , enquanto a componente normal  $T \cdot \cos\theta$  ocasiona um acréscimo de resistência ao cisalhamento devido ao ângulo de atrito do solo (Jewell, 1980). Assim:

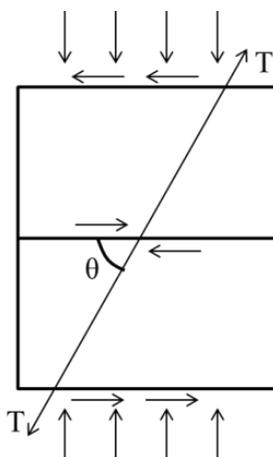
$$\tau_{Total} = \sigma_{normal} \cdot \tan\phi + \left(\frac{T}{A_s}\right) \cdot \cos\theta \cdot \tan\phi + \left(\frac{T}{A_s}\right) \cdot \sin\theta \quad (1)$$

Onde:

$\phi$  – ângulo de atrito interno;

$\theta$  – ângulo entre o reforço e a superfície de cisalhamento;

$A_s$  – Área do elemento de solo.



**Figura 1: Tensão cisalhante em um solo reforçado.**

O mesmo princípio pode ser aplicado em relação ao RSU. Zekkos et al. (2007) ensaiaram a cisalhamento direto espécimes constituídos de material coletado no aterro Tri-Cities, situado na Baía de São Francisco, com diferentes porcentagens de materiais com partículas menores do que 20mm (solo e partículas finas de lixo) e também com partículas maiores do que 20mm (materiais fibrosos). As partículas menores do que 20mm foram orientadas horizontalmente e também a 90° com relação ao plano cisalhante em ensaios de cisalhamento direto. Foram feitos ensaios com várias tensões normais e as taxas de deslocamento utilizadas foram de 0,1 mm/min e 5 mm/min. Apontou-se neste estudo que as fibras orientadas horizontalmente pouco contribuíam para a resistência ao cisalhamento dos espécimes ensaiados, diferentemente das fibras alinhadas perpendicularmente com relação ao plano cisalhante.

Athanasopoulos et al. (2008) fizeram ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova de resíduo sintético, cujas partículas menores do que 20mm utilizadas foram obtidas do aterro Xerolaka, na Grécia, e as partículas maiores do que 20mm basicamente eram papelão, lâminas de madeira e sacolas plásticas. Cada material fibroso foi orientado em diferentes inclinações em relação ao plano de cisalhamento (0°, 30°, 60° e 90°). O estudo concluiu que a maior resistência ao cisalhamento dos corpos de prova ocorre quando as fibras estão orientadas a 60° em relação ao plano cisalhante. Os autores concluíram também que a tensão de cisalhamento mobilizada é maior para corpos de prova reforçados com fibras de madeira do que os reforçados com plástico, sendo que os reforçados com papel apresentaram valores mais baixos de resistência ao cisalhamento.

Machado e Karimpour-Fard (2011) realizaram ensaios triaxiais CD e CU para avaliar o efeito das fibras no comportamento mecânico de RSU e, além disso, analisaram a influência das fibras no coeficiente de segurança de aterros. As amostras ensaiadas são compostas de material coletado no Aterro Metropolitano Centro, situado a cerca de 20km de Salvador. Foram confeccionados corpos de prova com diferentes porcentagens de fibras (25%, 12,5%, 6,5% e 0%) existentes no próprio resíduo coletado, as quais constituem em sua maioria de plásticos e tecidos. Nesse estudo, elementos planares, como papel e papelão tiveram sua influência no reforço do RSU negligenciada, uma vez que os materiais coletados possuíam um alto teor de água, que leva a uma

diminuição na resistência à tração de tais resíduos. Os resultados por eles encontrados mostraram que as curvas do gráfico da tensão versus deformação axial apresentam uma concavidade para cima, sem apresentar evidências de um patamar de ruptura. Além disso, os autores demonstraram que o aumento da porcentagem de fibras, leva a um conseqüente aumento na resistência ao cisalhamento do RSU. Outro aspecto apontado através de suas análises da estabilidade de aterros é que a redução da porcentagem de material fibroso no RSU leva a um decréscimo no fator de segurança dos aterros.

## OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estudar as variáveis envolvidas em relação à contribuição do plástico mole na resistência ao cisalhamento do RSU, visando quantificar a influência desse material incorporado ao maciço de RSU.

## METODOLOGIA

Para o estudo da influência das fibras plásticas nos resíduos sólidos urbanos serão apresentados resultados de ensaios de resistência à tração de tiras de plástico mole e serão feitos ensaios de cisalhamento direto com incorporação destas tiras plásticas imersas em chorume durante 2, 4 e 6 semanas com diversas inclinações.

### Ensaio de Tração

Tiras de sacolas plásticas de mercado de 5mm de largura, foram cortadas e ensaiadas à tração. Optou-se por utilizar este material, pois constitui grande porção da quantidade de plástico mole no RSU.

O ensaio de tração foi feito utilizando-se duas taxas de deslocamento (1 mm/min e 5 mm/min) e variando-se a distância entre as ancoragens das fibras. Foram ensaiadas três diferentes distâncias entre as ancoragens, 0 (zero), 7 e 21cm.

As diferentes distâncias entre as ancoragens foram testadas, visando tentar simular e entender o que acontece na massa de RSU. Os equipamentos utilizados nos ensaios de tração foram uma prensa EMIC – DL – 10.000 (cap. máx. = 100KN) e uma célula de carga EMIC (capacidade Máxima = 500,0N) (Figura 2). O gerenciamento da aquisição de dados foi feito com o Software Tesc 3.04.

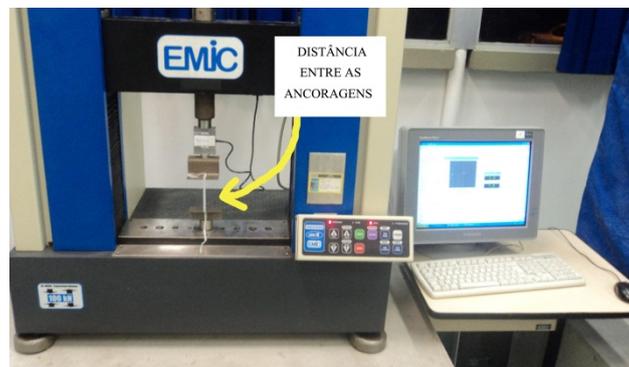
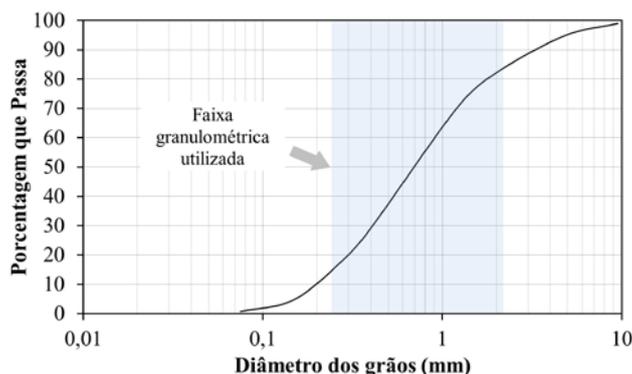


Figura 2: Vista do equipamento utilizado para a realização dos ensaios de tração.

Tomou-se o cuidado de que um mesmo lote de amostras de sacolas plásticas fosse utilizado nos ensaios deste estudo, visando minimizar eventuais diferenças entre amostras de plástico.

### Ensaio de Cisalhamento Direto

Para os ensaios de cisalhamento direto foi utilizada uma areia, cuja curva granulométrica é apresentada na Figura 3.



**Figura 3: Curva granulométrica da areia utilizada nos ensaios de cisalhamento direto.**

Areia já foi utilizada em pesquisas sobre a resistência ao cisalhamento de solos reforçados, assim como o que foi feito por Michalowski e Cermak (2002), Shewbridge e Sitar (1989), Jewell e Wroth (1987) e Gray e Orashi (1983). Segundo Athanasopoulos et al. (2008), também é possível uma analogia entre o comportamento do RSU e materiais granulares com reforço de fibras.

De Lamare Neto (2004), realizou ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova de areia, com a adição de diferentes quantidades de tiras plásticas misturadas aleatoriamente, visando estudar a resistência ao cisalhamento do RSU.

O corpo de prova utilizado nos ensaios de cisalhamento direto possui 10 cm de largura, 10 cm de profundidade e 2,6 cm de altura. Cada corpo de prova foi moldado com 340g de areia com um teor de umidade de 7,58%.

A curva granulométrica da areia utilizada nos corpos de prova é apresentada conforme ilustrado Figura 3, sendo que a faixa granulométrica efetivamente utilizada corresponde à área hachurada do gráfico.

No caso dos corpos de prova reforçados com tiras plásticas, foram adicionadas à areia 4 fileiras contendo 8 tiras plásticas, com 0,5 cm de largura e 7,5 cm de comprimento, inclinadas a 30, 60 e 90 graus em relação à superfície de cisalhamento, como pode ser observado na Figura 4.



**Figura 4: Vista da montagem do corpo de prova e do posicionamento das tiras plásticas.**  
As fibras plásticas foram imersas no chorume durante 2, 4 e 6 semanas, conforme Figura 5.



**Figura 5: Imersão das fibras plásticas no chorume.**

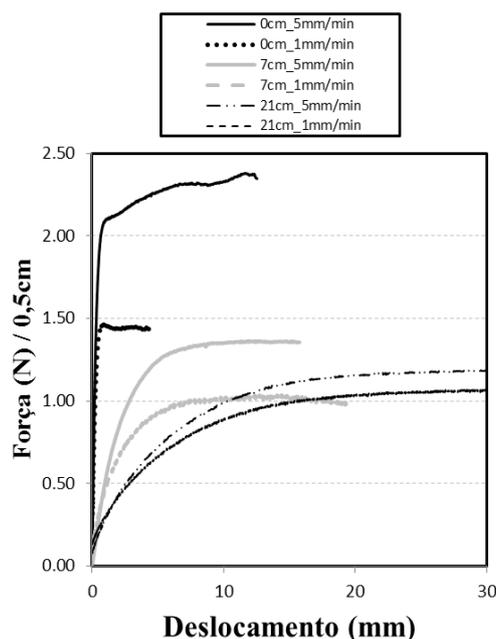
Os ensaios de cisalhamento direto foram feitos de acordo com o esquema da Figura 6. Os anéis dinamométricos utilizados nesse ensaio foram calibrados utilizando-se a prensa EMIC - DL-10.000 e uma célula de carga previamente calibrada.



**Figura 6: Esquema de montagem do equipamento utilizado para os ensaios de cisalhamento direto.**

## RESULTADOS

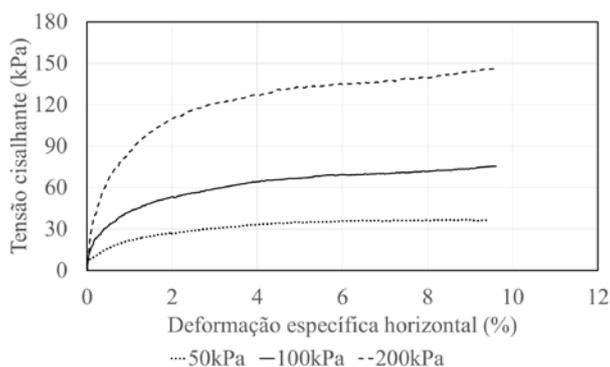
As médias dos resultados obtidos nos ensaios de tração das tiras plásticas, para as diferentes distâncias entre as ancoragens e para as diferentes taxas de deslocamento são apresentadas na Figura 7. Observa-se com os resultados, que uma maior força é mobilizada quanto menor é a distância entre as ancoragens e quanto maior é a taxa de deslocamento.



**Figura 7: Resultados dos ensaios de tração feitos em tiras plásticas com diferentes distâncias entre as ancoragens.**

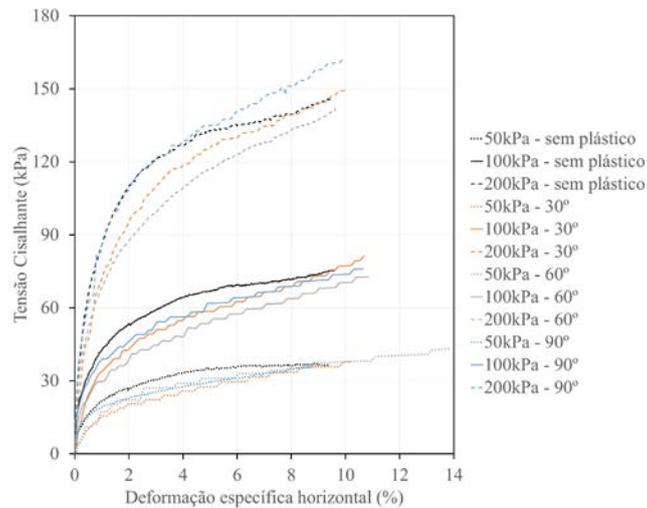
Para os ensaios de cisalhamento direto moldados com o material arenoso, foram realizados ensaios com corpo de prova moldados apenas com areia, areia com inserção de plástico e areia com inserção de plástico imersos no chorume, durante 2, 4 e 6 semanas. Todos os corpos de prova foram moldados contendo 4 fileiras com 8 tiras plásticas formando ângulos de 30, 60 e 90 graus em relação à superfície de cisalhamento

Na Figura 8 são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para corpos de prova de areia sem plástico.



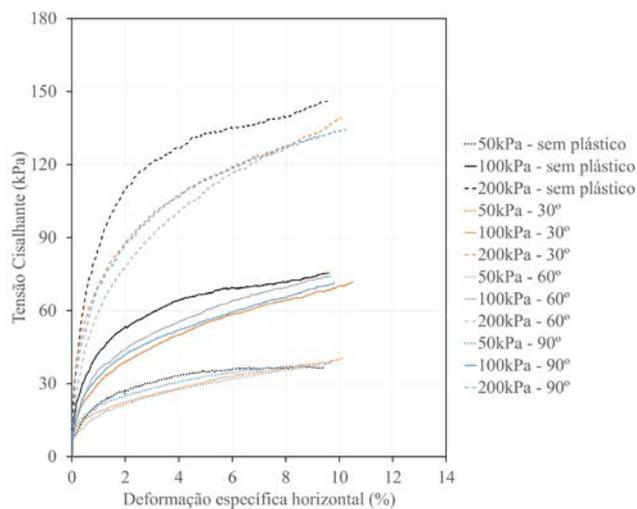
**Figura 8: Tensão cisalhante x deformação específica horizontal.**

Na Figura 9 podemos observar a comparação entre os resultados dos corpos de prova moldados sem plástico e os corpos de prova contendo as tiras plásticas inclinadas a 30, 60 e 90 graus em relação à superfície de cisalhamento, para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

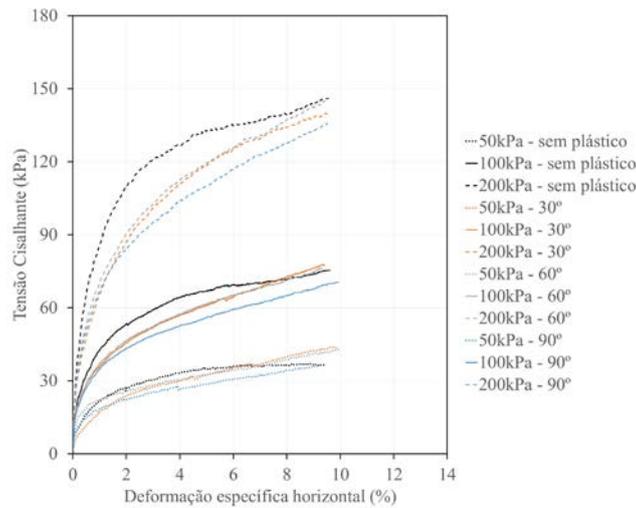


**Figura 9: Comparação entre as tensões cisalhantes e as deformações específicas horizontais na presença e na ausência das tiras plástico, em diferentes angulações.**

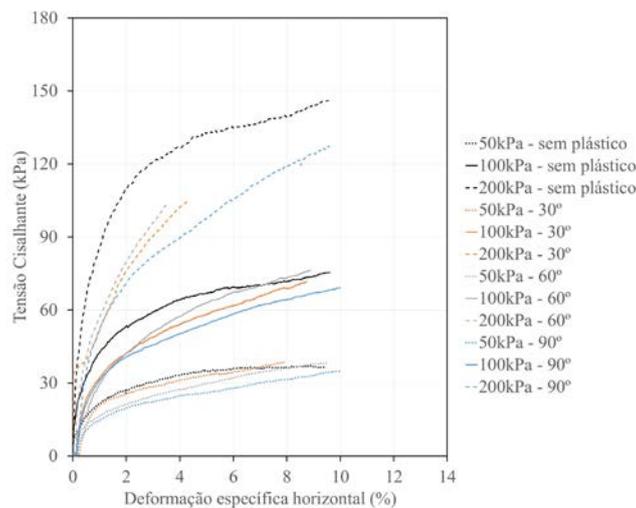
Na Figura 10, 11 e 12 são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para corpos de prova de areia sem plástico comparando com os resultados dos corpos de prova moldados contendo as tiras plásticas imersas no chorume durante 2, 4 e 6 semanas respectivamente e inclinadas a 30, 60 e 90 graus em relação à superfície de cisalhamento, para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.



**Figura 10: Comparação entre as tensões cisalhantes e as deformações específicas horizontais na presença e na ausência das tiras plástico imersas no chorume durante 2 semanas, em diferentes angulações.**



**Figura 11: Comparação entre as tensões cisalhantes e as deformações específicas horizontais na presença e na ausência das tiras plástico imersas no chorume durante 4 semanas, em diferentes angulações.**



**Figura 12: Comparação entre as tensões cisalhantes e as deformações específicas horizontais na presença e na ausência das tiras plástico imersas no chorume durante 6 semanas, em diferentes angulações.**

## CONCLUSÕES

Os resultados apresentados indicam que:

A 90 e a 30 graus o ganho de resistência ao cisalhamento foi maior para as tensões normais de 100 e 200 kPa para os corpos de prova moldados apenas com a fibra plástica “in natura” e areia. No caso dos ensaios realizados com as fitas previamente imersas em chorume, houve um ganho mais uniforme da resistência ao cisalhamento. Contudo, a 90 graus ocorreu não houve ganho da resistência ao cisalhamento para a tensão normal de 200 kPa das fitas imersas no chorume durante 6 semanas;

Houve um aumento na resistência ao cisalhamento dos corpos de prova moldados com reforço de tiras plásticas tanto para as tiras “in natura” quanto para as tiras imersas no chorume. De acordo com os ensaios realizados nas duas etapas com as tiras plásticas sem serem imersas em chorume, foi observado um aumento em média de 15% na resistência ao cisalhamento;

O chorume aparentemente afeta a resistência do plástico a longo prazo, o que resultou numa menor mobilização das tensões cisalhantes para os plásticos imersos em chorume durante 6 semanas para a inclinação de 90 graus e tensão normal de 200kPa. Em contrapartida, o chorume também parece afetar a capacidade de deformação do plástico, o que resultou numa maior mobilização de tensões no caso dos ensaios realizados a tensões normais de 50 e 100kPa, mas isso pode indicar que o plástico, em contato com chorume, irá romper com uma menor deformação do que no caso do plástico sem contato com chorume.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ATHANASOPOULOS, G.; GRIZI, A.; ZEKOS, D.; FOUNTA, P.; ZISIMATOU, E. (2008). Municipal Solid Waste as a Reinforced Soil: Investigation Using Synthetic Waste. In: *Geocongress: Geotechnics of Waste Management And Remediation*, 2008.
2. DE LAMARE NETO, A. (2004) Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Materiais, Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 190 p.
3. GRAY, D. H.; ORASHI, H. (1983). Mechanics of fiber reinforcement in sand. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109 (3): 335-353.
4. JEWELL, R. A. (1980). Some effects of reinforcement on the mechanical behaviour of soils, PhD Thesis, University of Cambridge.
5. JEWELL, R. A.; WROTH, C. P. (1987). Direct shear tests on reinforcement sand. *Geotechnique*, Vol. 37 (1): 53-68.
6. MACHADO, S. L.; KARIMPOUR-FARD, M. A. Study on the Effects of MSW Fiber Content and Solid Particles Compressibility on its Shear Strength Using a Triaxial Apparatus. *Soils and Rocks*, São Paulo, 34 (2): 115-127, May-August, 2011.
7. MICHALOWSKI, R. L.; CERMAK, J. (2002). Strength anisotropy of fiber-reinforced sand in direct shear. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 29: 279-299.
8. SHEWBRIDGE, S. E.; SITAR, N. (1989). Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115 (8): 1134-1147.
9. ZEKOS, D.; BRAY, J. D.; ATHASOPOULOS, G. A.; RIEMER, M. F.; KAVAZANJIAN JR., E.; FOUNTA, P. A.; GRIZI, A. F. (2007). Compositional and loading rate effects on the shear strength of Municipal Solid Waste. In: *International Conference Of Earthquake Geotechnical Engineering*, 4., 2007, Thessaloniki.