

Avaliação do Comportamento Hidromecânico de Liners Executados com Misturas de Solo e Fibras de PET

Allan Adjuto Chaves Sousa

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, eng.allanchaves@gmail.com

Cláudia Marcia Coutinho Gurjão

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, cgurjao@unb.br

Luis Fernando Martins Ribeiro

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, lmartins@unb.br

Conceição de Maria Cardoso Costa

Instituto Federal de Brasília, Brasília, Brasil, ceicecardoso@hotmail.com

RESUMO: A produção de resíduos sólidos urbanos tem relação direta com o desenvolvimento econômico e cultural das populações. Neste sentido, tem sido uma preocupação atual a disposição segura e adequada dos resíduos sólidos urbanos, sendo os aterros sanitários a tecnologia mais recomendada devido ao seu maior controle construtivo e, conseqüentemente, a minimização dos impactos ambientais. Para garantir esta eficiência estes aterros devem contar com um bom sistema de impermeabilização. Desta forma, é de fundamental importância que as camadas impermeabilizantes, utilizadas na base e cobertura final apresentem baixa permeabilidade e resistência aos esforços mecânicos e às intempéries. Os efeitos devido ao processo de secagem e umedecimento, aos quais estão submetidas estas estruturas, no entanto, podem gerar fissuras e criar caminhos preferências de fluxo prejudicando a selagem do aterro. Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento hidráulico e mecânico de misturas de solo com incorporação de fibras de PET, visando diminuir o efeito de retração e da formação de fissuras. Para avaliação do efeito da inclusão de fibras na condutividade hidráulica e resistência mecânica do solo foram utilizadas amostras com inclusão aleatória de fibras obtidas do filetagem de garrafas usadas de Politereftalato de Etileno (PET), com comprimentos de 1 e 2 cm, nas proporções de 0,2%, 0,4% e 0,6%, em relação à massa de solo seco. O programa experimental constou de ensaios de caracterização, compactação, resistência a compressão simples e permeabilidade no solo natural normalmente utilizado neste tipo de aplicação e nas misturas solo e fibra de PET. Como base nos resultados obtidos foi possível observar que a adição de fibras de PET melhorou a resistência e, embora tendo aumentado a permeabilidade do solo em relação a condição natural, não ultrapassou a faixa aceitável para a utilização como camada de cobertura de aterros sanitários.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros Sanitários, *Liners*, Permeabilidade, fibras, PET.

1 INTRODUÇÃO

O grau de produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) em cada país relaciona-se diretamente com seu grau de desenvolvimento econômico e cultural. Geralmente, quanto maior o grau de desenvolvimento, maior a produção de RSU.

Para que o armazenamento de resíduos

sólidos urbanos seja feito de forma segura e adequada, o aterro sanitário deve apresentar boa funcionalidade e durabilidade. Logo, é de fundamental importância um bom sistema de impermeabilização, uma vez que a infiltração de água para dentro do aterro pode acarretar em trágicos impactos ambientais pela maior geração de lixiviado. Assim, é necessário que os

liners, camadas impermeabilizantes, utilizadas na base e cobertura destes aterros, apresentem durabilidade, baixa permeabilidade e resistência mecânica e às intempéries, além de apresentar compatibilidade com os resíduos estocados.

Os sistemas de cobertura normalmente são construídos com solos argilosos de alta plasticidade e baixa condutividade hidráulica e, quando submetidos, a repetidos ciclos de umedecimento e secagem, tendem a retrair e fissurar aumentando a permeabilidade e criando fluxos preferenciais que podem comprometer o funcionamento de todo o sistema de cobertura.

A partir desta análise e visando o objetivo de garantir a impermeabilidade das camadas de cobertura de aterros sanitários, tem-se buscado melhorar suas características com a adição de fibras de PET ou outros materiais alternativos ao solo natural tendo em vista a diminuição do efeito de formação de fissuras por ressecamento. Logo, este trabalho teve como enfoque a análise do comportamento hidráulico e mecânico de *liners* de cobertura. Além disso, teve como objetivo geral a utilização de material compósito para compor o *liner* de cobertura, material este composto de solo argiloso e fibras de PET, visando a melhoria do sistema de impermeabilização da camada de cobertura de aterros sanitários.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os resíduos sólidos são partes de resíduos que são gerados após a produção, utilização ou transformação de bens de consumos. Grande parte destes resíduos é produzida nos grandes centros urbanos e parte desses resíduos são depositados nos aterros sanitários. A norma brasileira NBR 8419 (ABNT, 1996) define aterro sanitário como a técnica de disposição de resíduos sólidos no solo sem causar danos à saúde pública e a sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos à menor área possível e ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de solo na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores.

Em um aterro sanitário (Figura 1), pode-se destacar os seguintes sistemas:

- impermeabilização inferior: evita a troca de líquidos e percolados entre a massa de resíduos e o meio externo/solo, garantindo assim a estanqueidade do aterro;
- camada de cobertura: revestimento instalado na última camada de resíduos na célula, a fim de isolar a massa de resíduos do meio exterior e minimizar a infiltração de água e minimizar a saída do gás;
- sistema de drenagem e tratamento de gás: coleta dos gases gerados pela degradação dos resíduos;
- sistema de drenagem e remoção do lixiviado: drenagem e remoção dos líquidos que percolam através dos resíduos, como o lixiviado;
- sistema de drenagem superficial: coleta do escoamento superficial de águas;
- sistema de tratamento do lixiviado: tratamento para o líquido percolado coletado, evitando que o mesmo contamine o subsolo ou mananciais.

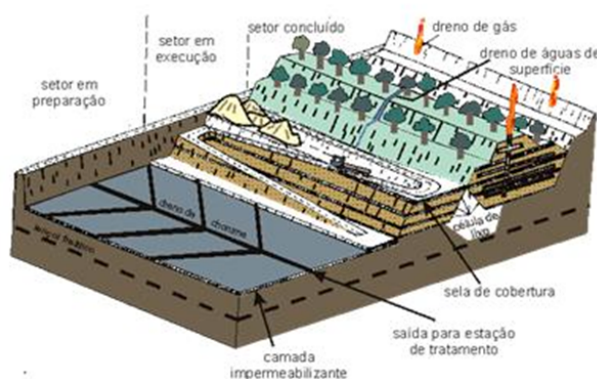


Figura 1. Esquema do Aterro Sanitário

O revestimento superior ou de cobertura de aterros de resíduos, executado sobre a última camada de resíduos disposta, tem como funções: isolar os resíduos do meio ambiente ao redor, controlar a entrada e saída de gases (gases gerados pela decomposição de RSU ou entrada de oxigênio em resíduos sulfetados de mineração) e limitar a infiltração de água na massa de resíduos, diminuindo a quantidade de percolado gerada (BOSCOV, 2008).

Recomenda-se que o coeficiente de permeabilidade (k) seja menor que 10^{-8} m/s. A cobertura é formada pelas camadas ilustradas na Figura 2.



Figura 2. Estrutura convencional da camada de cobertura de um aterro sanitário (MARINHO, 2006).

3. METODOLOGIA

3.1 Caracterização do Solo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado na região onde está sendo implantado o novo aterro sanitário oeste de Brasília, localizado em Samambaia (entre o córrego Melchior e a Rodovia DF -180 km 52).

Foi realizada caracterização do solo local por meio dos seguintes ensaios, seguindo as normas da ABNT:

- Análise granulométrica (NBR 7181/ ABNT, 1984-a);;
- Massa específica dos grãos (NBR 6508 / ABNT, 1984-b);
- Determinação do Limite de Liquidez de Solos (NBR 6459/ ABNT, 1984-c).
- Determinação do Limite de Plasticidade de Solos (NBR 7180/ ABNT, 1986).

3.2 Caracterização das Fibras de PET

Para a produção das fibras a partir do corte de garrafas foi utilizado o equipamento produzido para esta pesquisa , que tem por função formar um longo filete de PET (Figura 3). Após o corte, os filetes foram cortados ao longo de seu comprimento em tamanhos de 1 cm e 2 cm. A opção pela escolha de dois comprimentos diferentes foi importante para analisar e quantificar a influência do comprimento da fibra no desempenho do solo.



Figura 3. Equipamento para filetar garrafas PET.

3.3 Ensaios realizados no Material Compósito

Foram realizados ensaios de compactação, permeabilidade e resistência à compressão simples para as diferentes associações a seguir:

- Solo puro;
- Solo + 0,2% de fibras de 1cm de PET;
- Solo + 0,4% de fibras de 1cm de PET;
- Solo + 0,6% de fibras de 1cm de PET;
- Solo + 0,2% de fibras de 2cm de PET;
- Solo + 0,4% de fibras de 2cm de PET;
- Solo + 0,6% de fibras de 2cm de PET;

3.3.1 Compactação

A compactação se dá através de energia mecânica aplicada em diversas camadas de solo, com o objetivo de diminuir seus vazios e aumentar a interação entre suas partículas. Uma boa compactação é essencial para que o solo apresente baixa permeabilidade, característica importante no desempenho dos sistemas de cobertura em aterros sanitários, além de conferir ao solo maior resistência mecânica.

Para realização deste ensaio, foram adotados os procedimentos descritos na norma NBR 7182 (ABNT, 1988).

3.3.2 Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo o grau de permeabilidade expresso numericamente pelo “coeficiente de permeabilidade”.

Para solos argilosos, que costumam apresentar baixa condutividade hidráulica, o ensaio com permeâmetro de carga variável é o

mais indicado para determinação do coeficiente de permeabilidade. Como o solo utilizado nos ensaios é argiloso, foi utilizado o permeâmetro de carga variável. Este ensaio seguiu integralmente os procedimentos descritos na norma NBR 14545 (ABNT, 2000).

3.3.3 Resistência à Compressão Simples

A compressão ocorre quando cargas externas são aplicadas sobre determinado material, reduzindo o volume do mesmo.

O ensaio de resistência a compressão simples está especificado na norma NBR 12770 (ABNT, 1992).

Foram moldados três corpos de prova cilíndricos, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para cada associação, sendo o ensaio realizado em três situações: imediatamente após sua moldagem e sucessivamente, 15 e 30 dias após a moldagem.

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização do Solo e das Fibras de PET

A Figura 4 apresenta o gráfico das curvas granulométricas do solo puro com e sem defloculante. Pode-se observar que o solo é composto basicamente por areia fina, silte e argila. Trata-se de um solo com alto teor de partículas finas e na situação sem defloculante com um alto teor de agregações de partículas.

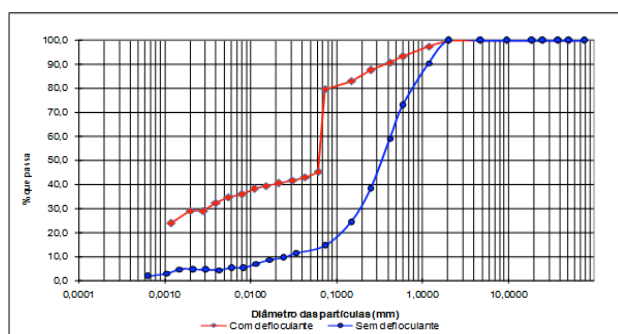


Figura 4. Curva granulométrica do solo com defloculante e sem defloculante.

Os ensaios de limites de liquidez e plasticidade indicaram um solo com baixa plasticidade ($IP = 15\%$) e alto valor de w_L de acordo com a classificação do sistema unificado

classificado com um solo ML (Figura 5)

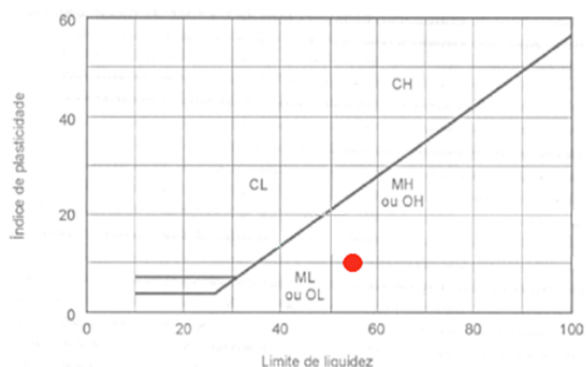


Figura 5. Localização dos pontos correspondentes aos pares de valores IP e LL do solo natural.

Os ensaio de massa específica das partículas foi realizado no solo natural e nas fibras PET. As massas específicas do solo e das fibras de PET encontram-se apresentados na Tabela 1:

Tabela 1. Massa específica dos grãos de solo e das fibras de PET.

	Solo	PET
G_s (g/cm^3)	2,79	1,4

4.2 Compactação

Os valores relativos ao teor de umidade ótima e ao peso específico seco máximo das diferentes associações de solo natural e fibras de PET obtidos nos ensaios de compactação estão ilustrados nas Figuras 6 e 7. A Figura 8 ilustra a curva de compactação obtida para o solo puro.

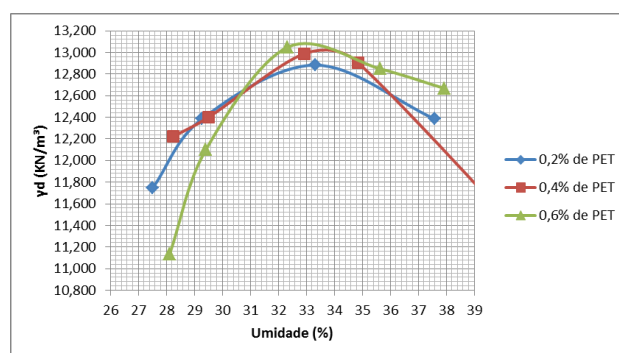


Figura 6. Famílias de curvas - Solo + PET (1cm)

Analisando os gráficos ilustrados nas Figuras 6, 7 e 8, observa-se que o peso específico pouco varia com a adição de PET, assim como a umidade ótima. Para todos os casos os valores de umidade ótima variam entre 33% e 33,5% e o peso específico seco entre 12,8 e 13,1 kN/m^3 .

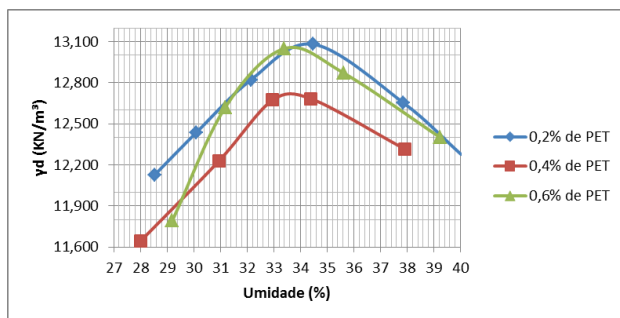


Figura 7. Famílias de curvas - Solo + PET (2cm)

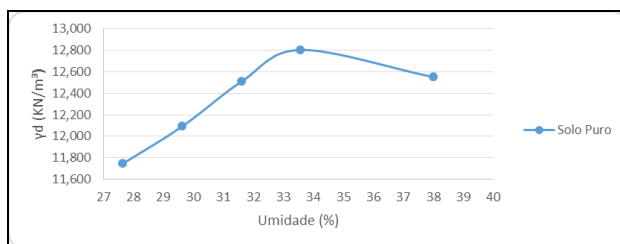


Figura 8. Curva de compactação do solo puro

4.3 Permeabilidade

Ao serem avaliados quanto à permeabilidade, os corpos de prova nas diferentes percentagens e comprimentos de fibras PET associados ao solo foram compactados na umidade ótima. O valor médio de umidade adotado para cada corpo de prova foi de 33% e peso específico seco da ordem de $12,95 \text{ kN/m}^3$. A Tabela 2 apresenta os resultados relativos à permeabilidade média obtida para cada associação de solo e fibra PET.

Tabela 2. Permeabilidade média das amostras.

Amostra	Permeabilidade Média (cm/s)
Solo	2×10^{-9}
1 cm - 0,2 %	3×10^{-8}
1 cm - 0,4 %	3×10^{-8}
1 cm - 0,6 %	4×10^{-8}
2 cm - 0,2 %	3×10^{-8}
2 cm - 0,4 %	5×10^{-8}
2 cm - 0,6 %	6×10^{-8}

Para elaboração dos gráficos, optou-se por eliminar o valor da permeabilidade referente à amostra de solo misturada a fibras de PET de 2 cm a 0,2%. Ressalta-se que este ensaio apresentou um comportamento bastante diferenciado em relação aos outros corpos de prova submetidos ao ensaio de permeabilidade.

A diferença observada ocorreu ainda na fase de saturação, cujo tempo de saturação foi de apenas um dia, sendo admitida neste caso a

existência de algum caminho preferencial de fluxo o que poderia ter influenciado nos resultados.

Analisando os gráficos das Figuras 9 e 10, constata-se que quanto maior o teor e o comprimento de fibras, maior a condutividade hidráulica.

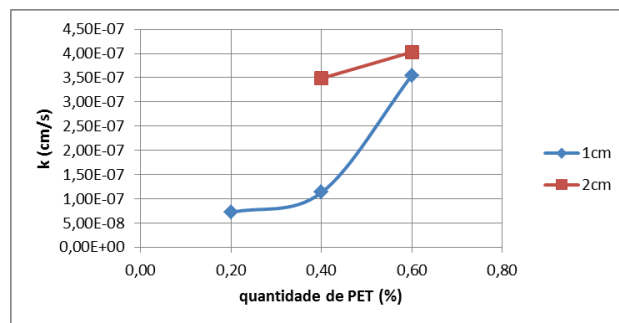


Figura 9. Permeabilidade x % de PET.

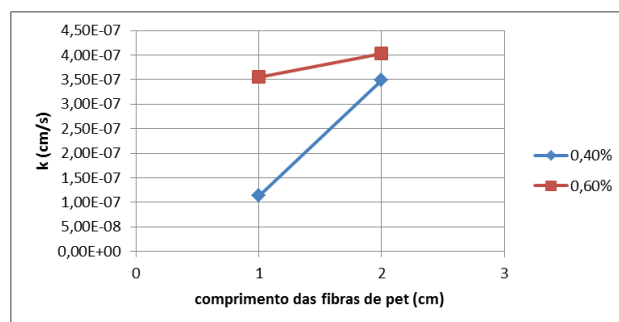


Figura 10. Permeabilidade x comprimento das fibras.

4.4 Resistência à Compressão Simples

A Tabela 3 apresenta as informações relativas a cada corpo de prova durante os ensaios de compressão simples, como resistência, deformação máxima específica e as condições do corpos de prova no momento dos ensaios, tempo de cura.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de compressão simples.

	Imediato		15 dias		30 dias	
	Def (%)	Tensão (kPa)	Def (%)	Tensão (kPa)	Def (%)	Tensão (kPa)
1 cm - 0,2%	3,9	235,08	2,9	358,44	2,8	694,31
1 cm - 0,4%	3,5	284,70	2,7	389,15	2,9	742,78
1 cm - 0,6%	2,9	220,66	3,1	355,41	3,2	535,44
2 cm - 0,2%	3,5	178,72	2,6	300,24	1,8	480,59
2 cm - 0,4%	3,7	249,65	3,1	388,87	2,6	465,24
2 cm - 0,6%	3,6	233,90	2,8	388,51	2,9	479,85

As Figuras 11 a 25 ilustram comportamento da tensão em relação a deformação de cada

amostra. Como se pode observar, após a ruptura à compressão, a tensão tende a se estabilizar e, posteriormente, diminuir. O efeito do tempo se mostra evidente no comportamento de todas as amostras, aumentando de forma significativa a resistência do material. Observa-se ainda o efeito do tempo no aspecto da curva tensão-deformação. O tempo de cura acarretou em algumas associações um relativo aumento na rigidez do material.

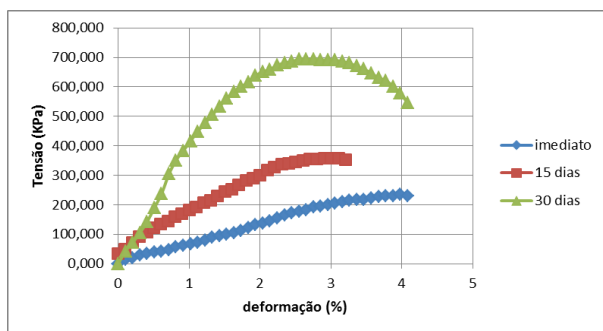


Figura 11. Tensão x Deformação (1cm - 0,2%)

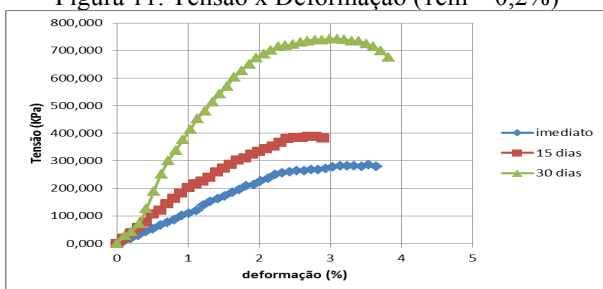


Figura 12. Tensão x Deformação (1cm - 0,4%)

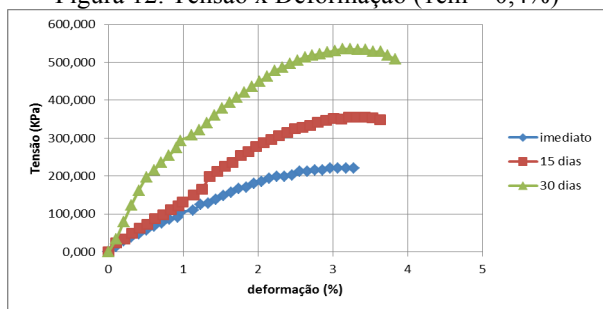


Figura 13. Tensão x Deformação (1cm - 0,6%)

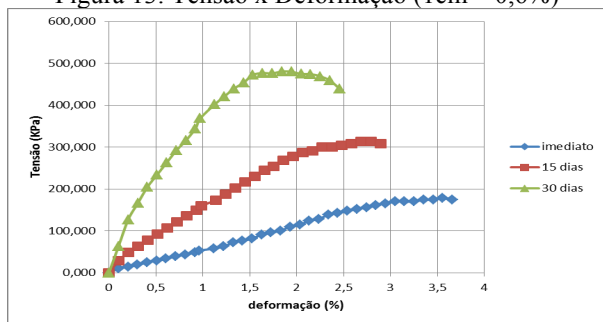


Figura 14. Tensão x Deformação (2cm - 0,2%)

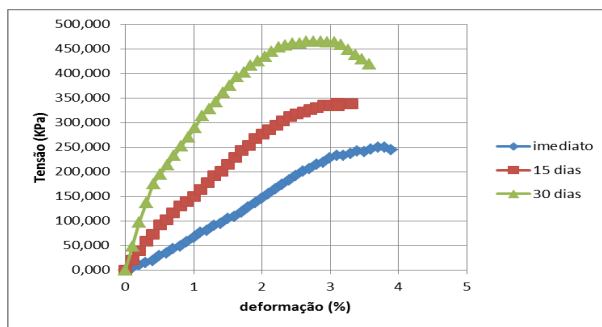


Figura 15. Tensão x Deformação (2cm - 0,4%)

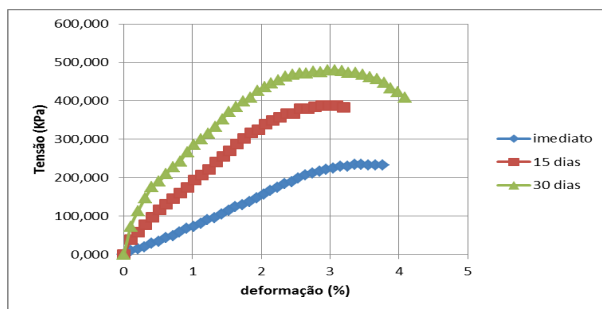


Figura 16. Tensão x Deformação (2cm - 0,6%)

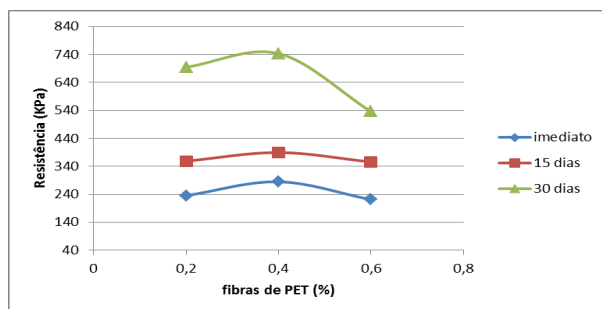


Figura 17. Resistência x % de PET (1cm)

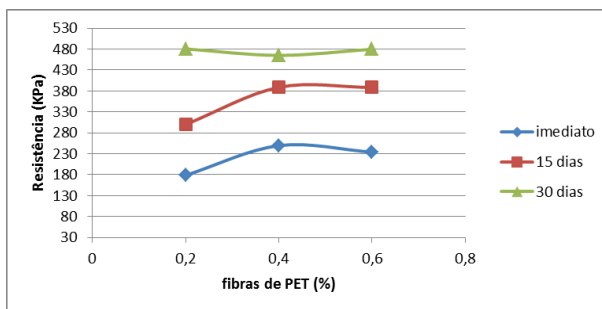


Figura 18. Resistência x % de PET (2cm)

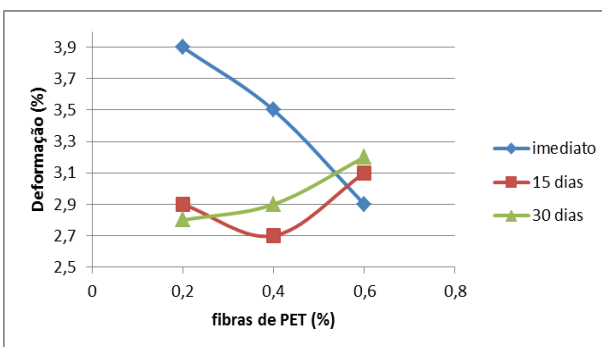


Figura 19. Deformação x % de PET (1cm)

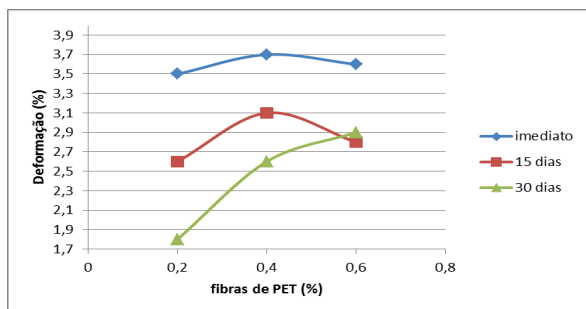


Figura 20. Deformação x % de PET (2cm)

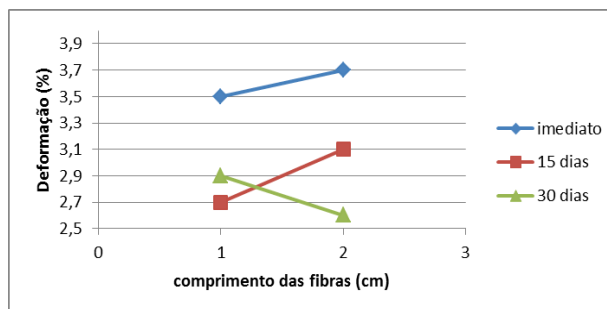


Figura 25. Deformação x tamanho da fibra (0,4%)

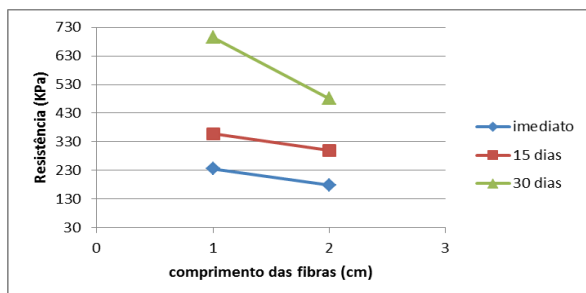


Figura 21. Resistência x tamanho da fibra (0,2%)

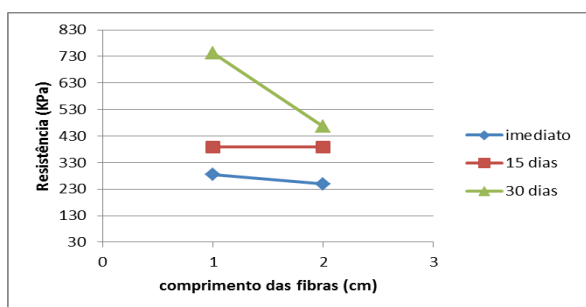


Figura 22. Resistência x tamanho da fibra (0,4%)

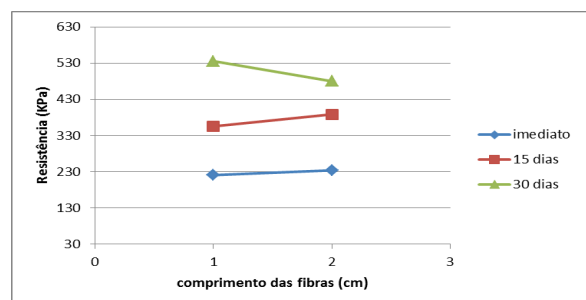


Figura 23. Resistência x tamanho da fibra (0,6%)

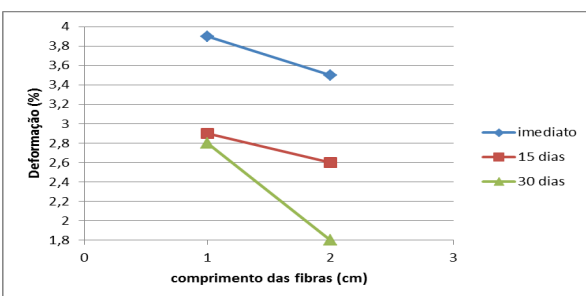


Figura 24. Deformação x tamanho da fibra (0,2%)

Observa-se que a quantidade de PET teve pouca influência sobre os parâmetros assim como o tamanho das fibras. Não foi possível fazer alguma relação entre a inserção de PET e alterações na resistência e na deformação. O fato de as fibras terem sido dispostas aleatoriamente também pode ser determinante no resultado final, tendo que ser, portanto, levado em conta. A deformação, além de não sofrer influência do comprimento e do percentual das fibras, não sofreu influência do tempo. De certo, tem-se que a resistência aumentou com o tempo para todos os casos.

CONCLUSÕES

Analisando o comportamento mecânico das misturas, percebe-se que a inclusão das fibras de PET pouco influenciaram na resistência a compressão do material. Assim, não foi possível traçar uma relação direta entre percentual ou comprimento de fibras e possível alteração no comportamento mecânico.

Foi observado que tanto o aumento no teor de fibras quanto o aumento no comprimento das mesmas aumentam a permeabilidade. Mesmo assim, os resultados de permeabilidade apresentados variaram na ordem de 10^{-8} m/s, o que, segundo Marinho (2006), é um valor dentro do limite permitido para funcionamento de liners de cobertura de aterros sanitários. Portanto, o material é satisfatório para utilização em aterros.

Para uma análise completa do desempenho do compósito solo-fibra, é importante a realização de ensaios de ressecamento, de forma a analisar se há diminuição da propagação de fissuras no solo com diferentes teores de fibras de PET. Entretanto, alguns destes estudos em continuidade deste trabalho já apontam a

eficiência da inclusão das fibras na redução da fissuração bem como no padrão das trincas devido ao ressecamento (Mendes *et al*, 2013)

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar os agradecimentos ao CNPq e CAPES pelo apoio financeiro, a UnB pela infra-estrutura o IFB pela participação da professora Conceição e a todos os alunos que ajudaram neste trabalho.

REFERENCIAS

- ABNT (1984-a). Norma NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 12p.
- ABNT (1984-b). Norma NBR 6508 Solo – Determinação da Massa Específica dos Grãos, 8p.
- ABNT (1984-c). Norma NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 6p.
- ABNT (1986). Norma NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro,
- ABNT (1988). Norma NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. 6 p.
- ABNT (1992) - NBR 12770. Solo coesivo – determinação da resistência à compressão não confinada, 8p.
- ABNT (1996). NBR 8419 Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.
- ABNT (2000). NBR 1545 Solo Ensaio de Permeabilidade – Carga Variável, Rio de Janeiro, 10p.
- BOSCOV, M. E. G (2008). Geotecnia Ambiental, São Paulo: Oficina de Textos.
- MARINHO, F. A. Cobertura de Aterro – Requerimento, definições e visão geral dos sistemas. Notas de aula. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo: 2006.
- MENDES, L. O. ; COSTA, C. M. C. ; RIBEIRO, L. F. M. ; GURJAO, C. M. C. . Evaluación de la Formación de Grietas por Secado en Capas Impermeabilizantes Ejecutadas con Suelo Mezclado con Residuos de Construcción Civil (RCC). In: II Congreso Internacional de Ingeniería Civil / 17 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, 2014, Havana. II Congreso Internacional de Ingeniería Civil / 17 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. Havana: CUJAE, 2014. v. unico.