

 10.46943/VII.CONAPESC.2022.01.052

# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO EM DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS DE ATERROS SANITÁRIOS

## PABLO DA SILVA ARAUJO

Doutorando do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, pabllosa@gmail.com;

## CLÁUDIO LUIS DE ARAÚJO NETO

Professor Adjunto da Universidade Federal do Maranhão - UFMA, claudio.neto@ufma.br;

## JEFFERSON ROCHA TRINDADE

Graduado pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, jeffersonrchtrindade@gmail.com;

## MÁRCIO CAMARGO DE MELO

Professor Adjunto da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, melomc90@gmail.com.

## RESUMO

Os deslocamentos horizontais e a estabilidade de taludes são parâmetros de maior impacto na segurança de aterros sanitários. Porém, os ensaios que subsidiam essas análises são complexos, onerosos ou susceptíveis a erros. Como alternativa, o ensaio in situ do Cone de Penetração Dinâmica fornece parâmetros que subsidiam estudos de estabilidade e pode indicar a suscetibilidade de deslocamentos horizontais do maciço sanitário. Porém, estas investigações, em aterros sanitários, não foram devidamente exploradas. Assim, esse trabalho tem como objetivo analisar a influência da resistência à penetração do solo da camada de cobertura final de um aterro sanitário sobre a intensidade dos deslocamentos horizontais. Como metodologia, tomou-se como base experimental o Aterro Sanitário localizado no município de Campina Grande-PB. Realizou-se a caracterização geotécnica do solo da camada de

cobertura; analisou-se a resistência do solo em campo e em laboratório; e foram aferidos os deslocamentos horizontais dos taludes, em marcos superficiais, por meio do levantamento topográfico. Os deslocamentos horizontais acumulados máximos na área de estudo ocorreram no sentido da topografia natural do terreno, deslocando-se da maior para menor cota. Na região de maiores deslocamentos estão localizados os maiores valores de resistência à penetração, indicando uma associação entre os parâmetros analisados. Com isso, pode-se concluir que, os aspectos verificados nessa pesquisa indicam, em uma perspectiva geral, que quanto menores os valores da resistência à penetração do solo da camada de cobertura de um aterro sanitário menor será a intensidade dos deslocamentos horizontais.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos, Estabilidade de taludes, Monitoramento.

## INTRODUÇÃO

A camada de cobertura final de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) consiste num sistema de proteção superficial executado com solo argiloso compactado e/ou material sintético que serve para isolar os resíduos do contato direto com o ambiente externo, dificultar a entrada descontrolada de água para o interior do maciço sanitário, o escape de gases para atmosfera e a proliferação e vetores de doença.

A estabilidade de um talude, em seu estado natural, é condicionada simultaneamente por três fatores principais: por suas características geométricas, por suas características geológicas (tipos de solos e composição das rochas) e pelo ambiente fisiográfico em que se insere o clima, cobertura vegetal, drenagens naturais, entre outros (TABALIPA e FIORI, 2008). Para contenção e estabilidade dos taludes, são utilizadas técnicas de bioengenharia, utilizando o sistema radicular e o caule de vegetais em diferentes arranjos geométricos dos taludes, sendo importantes como elementos estruturais e mecânicos para contenção e proteção do solo, melhorando as condições de drenagem e retenção das movimentações dos rejeitos (COUTO et al., 2010).

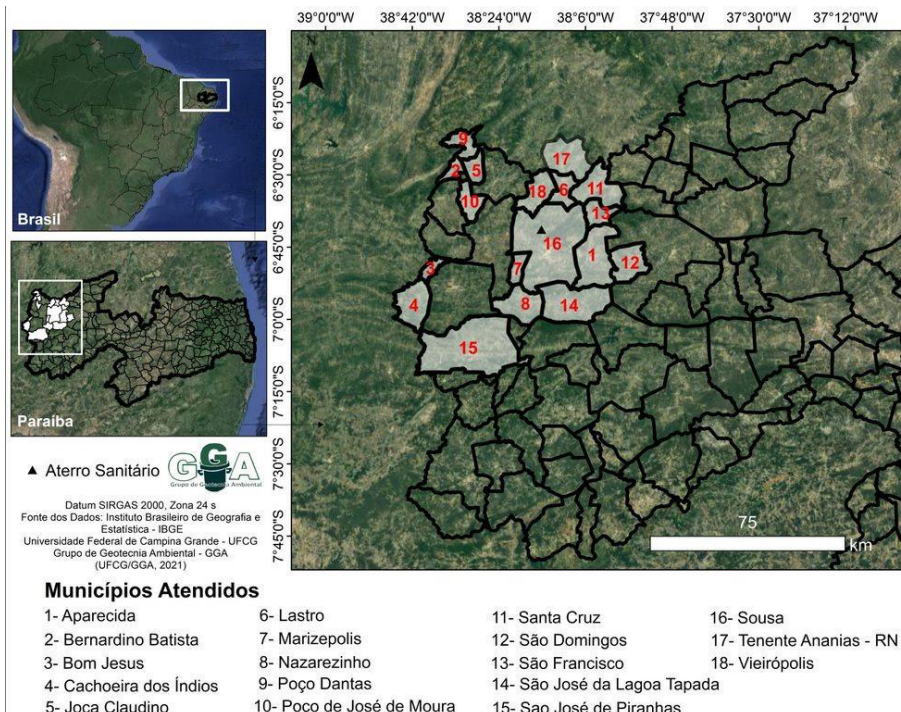
A estabilidade de um aterro sanitário pode ser avaliada por meio do acompanhamento da velocidade e intensidade dos deslocamentos horizontais. Sua interpretação, quando realizada em conjunto de outros parâmetros possibilita a gestão e implementação de medidas que visem a manutenção do aterro na melhor performance possível, como é o caso da vegetação de cobertura. Diante disso, o objetivo desse trabalho é analisar a influência da resistência à penetração do solo de um aterro sanitário sobre a intensidade dos deslocamentos horizontais.

## METODOLOGIA

### Área de pesquisa

O campo experimental está localizado no Aterro Sanitário em Campina Grande-PB (ASCG). Recebe, resíduos dos municípios de Campina Grande e cidades, conforme ilustrado na Figura 1, onde, aproximadamente, 500 toneladas/dia de resíduos são depositados.

**Figura 1** – Localização do Aterro Sanitário e dos municípios que depositam resíduos



Fonte: GGA (2021).

O Aterro possui uma área total de 64 ha e previsão de execução de 20 (vinte) células de RSU. Cada célula possui uma área da base de 100x100 m (10.000 m<sup>2</sup>) e altura de projeto de 20 m. A geometria definida estabelece a execução de platôs de resíduos com 5 m de altura e bermas com 6 m de largura, com inclinação máxima de taludes externos de 1:2. Com o fim da execução de quatro células, estas foram unidas, assumindo uma nova área de base de 220 x 220 m.

### Caracterização física do solo

Para a caracterização do solo, foram coletadas amostras de um talude sem incidência vegetal, que depois foi comparada aos resultados dos ensaios de solo de outro talude, com incidência vegetal. As amostras foram coletadas na condição deformada seguindo a recomendação da NBR 6457 (ABNT, 2016), e realizados os ensaios seguindo os procedimentos descritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): umidade em estufa, massa específica dos grãos de solo, limite de liquidez, limite de plasticidade, compactação,

granulometria por peneiramento e permeabilidade saturada do solo à água por meio do permeâmetro de parede rígida, conforme especificado na Quadro 1.

**Quadro 1** – Tipos de ensaios realizados com as respectivas normas

Ensaio	Norma
Umidade	NBR 6457 – Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (ABNT, 2016a).
Massa específica dos grãos de solo	NBR 6458 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica (ABNT, 2016b).
Limite de plasticidade	NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016c).
Limite de liquidez	NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez (ABNT, 2016 d).
Granulometria por peneiramento	NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica (ABNT, 2016e).

## Avaliação da resistência do solo da camada de cobertura

A metodologia do ensaio de resistência ao cisalhamento foi baseada na descrita por Badillo & Rodríguez (2005). Os ensaios foram realizados com amostras deformadas moldadas na umidade ótima de compactação. Realizou-se também o ensaio in situ de Cone de Penetração Dinâmica (Figura 2), D6951/D6951M (ASTM, 2015), em bermas com e sem a incidência de vegetação superficial para obtenção dos parâmetros de resistência da camada de cobertura de solo na condição real de campo. Estabeleceu-se uma profundidade de penetração de aproximadamente 0,60 m, que equivale à espessura máxima recomendada pela FEAM (2006) para a camada de coberturas de aterros sanitários.

**Figura 2** - Ensaio de Cone de Penetração Dinâmica (CPD)



A identificação das espécies vegetais foi realizada por meio da utilização do manual de Moreira e Bragança (2011), e constatou as espécies: *Bromus catharticus Vahl* (Figura 3b), *Urochloa plantaginea* (Link) R. D. Webster (Figura 3c) e *Acanthospermum australe* (Loefl.) Kuntze (Figura 3d). Na Figura 3a estão dispostas as espécies vegetais observadas no campo de estudo.

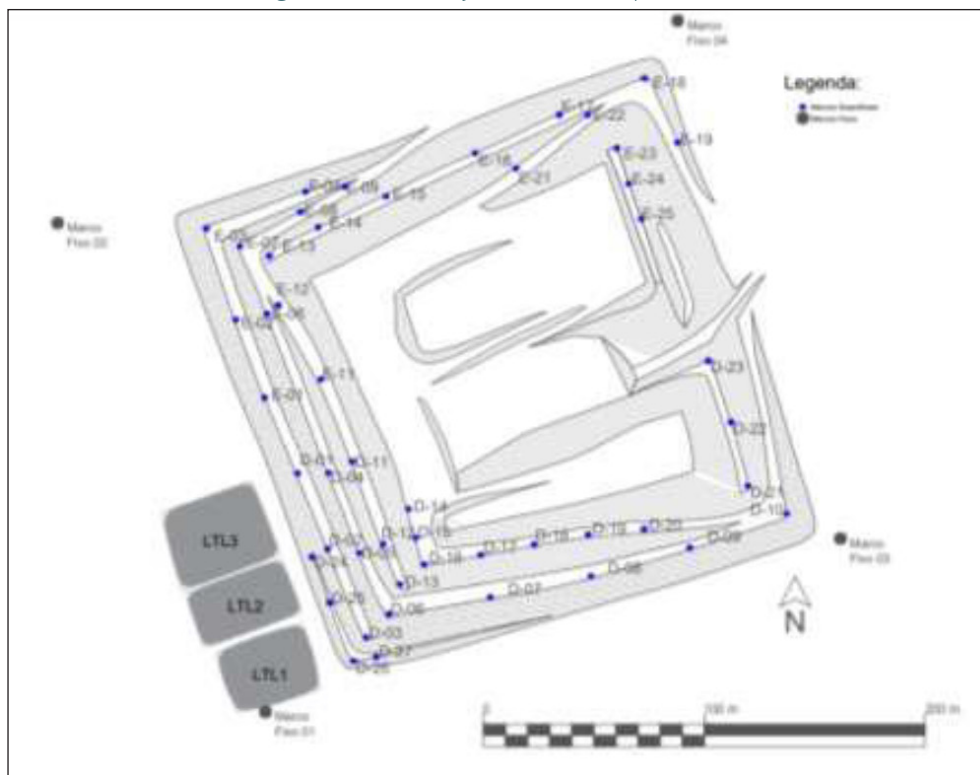
**Figura 3** - Espécies vegetais



### Monitoramento dos deslocamentos horizontais

O monitoramento dos deslocamentos superficiais horizontais do talude do Aterro Sanitário foi baseado na NBR 11682 (ABNT, 2009) realizado com uma periodicidade semanal em 49 marcos topográficos de concreto (0,30 m de comprimento e 0,15 m de diâmetro). A medição dos deslocamentos foi realizada por meio de monitoramento topográfico composto por uma estação total e por 4 pontos de controle superficiais (pontos fixos que não sofrem deslocamentos). Na Figura 4 é possível observar a distribuição dos marcos topográficos no ASCG.

**Figura 4** - Distribuição dos marcos pelo ASCG



A coleta de solo ocorreu em duas regiões distintas do aterro: uma com cobertura vegetal, próxima ao marco D-09, e a outra sem cobertura vegetal, próxima ao marco E-15. Para a análise dos deslocamentos, foram escolhidos os marcos D-08, D-09 e D-20 para representarem os deslocamentos sofridos pelo maciço de solo com vegetação e os marcos E-09, E-14 e E-15 para representar a região sem vegetação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização do solo

Os resultados da caracterização dos solos coletados podem ser observados no Quadro 2.

**Quadro 2** - Caracterização do solo estudado

<b>Caracterização</b>	<b>Solo sem vegetação</b>	<b>Solo com vegetação</b>
Umidade higroscópica	0,76%	2,13%
Peso específico dos grãos de solo	26,3 kN.m <sup>-3</sup>	24,9 kN.m <sup>-3</sup>
Limite de Plasticidade	Não plástico (NP)	Não plástico (NP)
Permeabilidade à água	1,01 x 10 <sup>-6</sup> m.s <sup>-1</sup>	3,73 x 10 <sup>-7</sup> m.s <sup>-1</sup>
Classificação SUCS	Areia argilosa (SC)	Areia argilosa (SC)
Compactação	Umid. ótima = 12,0%	Umid. ótima = 12,5%
	γ máximo = 18 kN.m <sup>-3</sup>	γ máximo = 19 kN.m <sup>-3</sup>

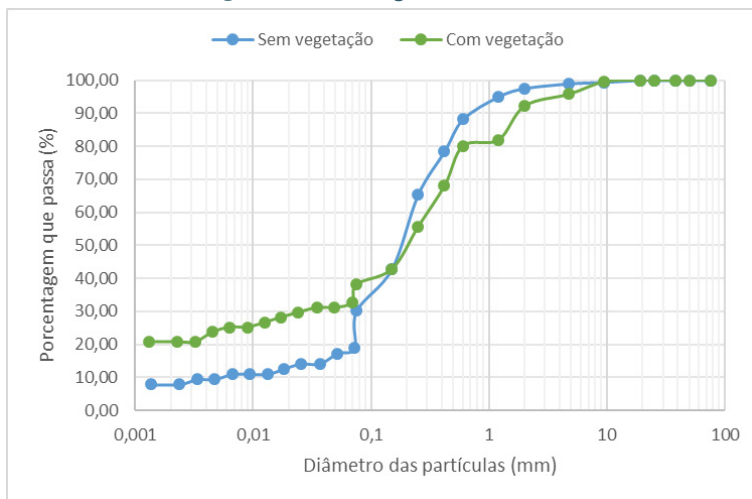
Os valores detectados para umidade higroscópica (0,76% e 2,13%) estão abaixo do encontrado por ARAUJO (2017), que ficou entre 3 e 6%; indicando que os solos estudados são muito secos, como é característico para solos da região semiárida brasileira, onde se encontra o campo de estudo.

Para o peso específico dos grãos de solo, o valor de 26,3 kN.m<sup>-3</sup> encontrado na amostra sem vegetação representa uma densidade de grãos em torno de 2,68 kN.m<sup>-3</sup>, número que se aproxima bastante da densidade do quartzo, equivalente a 2,67 kN.m<sup>-3</sup>. De acordo com CARVALHO (2004), a densidade dos grãos representa a predominância do mineral existente. Ademais, a massa específica mais baixa da amostra para a área vegetada evidencia a presença de minerais leves na composição desse solo.

Após a determinação da granulometria dos solos, chegou-se ao resultado de que os dois solos estudados são, de acordo com a classificação da SUCS, areias argilosas (SC); e possuem distribuição do tipo não uniforme e mal graduada. Suas curvas granulométricas foram representadas de forma simultânea na Figura 5, bem como seus resumos percentuais, no Quadro 3.



**Figura 5** - Curvas granulométricas



**Quadro 3.** Resumo das distribuições granulométricas

Solo	Porcentagem retida (%) (sem vegetação)	Porcentagem retida (%) (com vegetação)
Pedregulho (acima de 4,8 mm)	1,00	4,22
Areia grossa (0,84 - 4,8 mm)	7,00	14,58
Areia média (0,25 - 0,84 mm)	26,64	25,56
Areia fina (0,05 - 0,25 mm)	48,36	24,49
Silte (0,005-0,05 mm)	7,25	6,75
Argila (< 0,005 mm)	9,75	24,40
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>100</b>

A partir da análise das curvas granulométricas presentes na Figura 5, é possível observar que os solos possuem fração grossa predominante. Além disso, verifica-se que há uma ausência de material entre 0,08 e 0,6 mm em comum entre as duas amostras. Esse aspecto representa uma má graduação, e pode estar associado à incúria no processo de seleção e mistura do solo a ser utilizado no Aterro.

Percebe-se uma considerável porção de finos não detectáveis nos processos de peneiramento e sedimentação. Essa quantidade expressiva, principalmente no solo da região com presença de vegetação, pode indicar um bom preenchimento de vazios, e resistência elevada. No Quadro 3, é possível perceber que a areia predomina a composição de ambos os solos, mas a argila vem logo em seguida, nos dois casos. A CETESB (1993) recomenda que seja utilizada

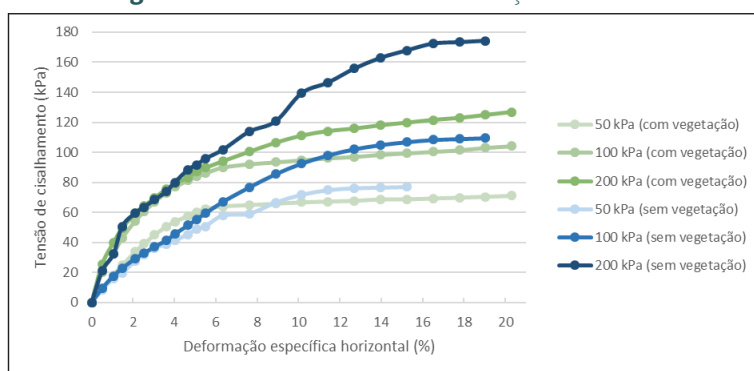
uma razão de finos superior a 30% em aterros sanitários, e esse valor é satisfeito nas análises do estudo.

Na compactação, obtiveram-se os resultados de peso específico aparente seco máximo ( $\gamma$  máximo) de 18 e 19  $\text{kN/m}^3$ , e umidade ótima de 12% e 12,5%, para o solo da área sem e com presença de vegetação, respectivamente. De acordo com Pinto (2006), valores como esses são característicos de areias finas, sendo 19  $\text{kN/m}^3$  o  $\gamma$  máximo e 12 a 14% a umidade ótima próprios desse tipo de solo. Dessa forma confirmam-se os dados dos ensaios de limites de consistência e análise granulométrica.

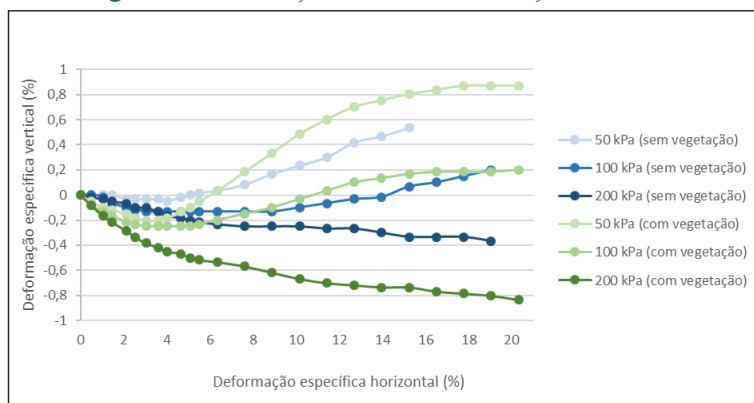
## Avaliação da resistência ao cisalhamento

Os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto dos solos estão descritos nas Figuras 6 e 7.

**Figura 6** - Análise de tensão-deformação horizontal



**Figura 7** - Deformação vertical x deformação horizontal

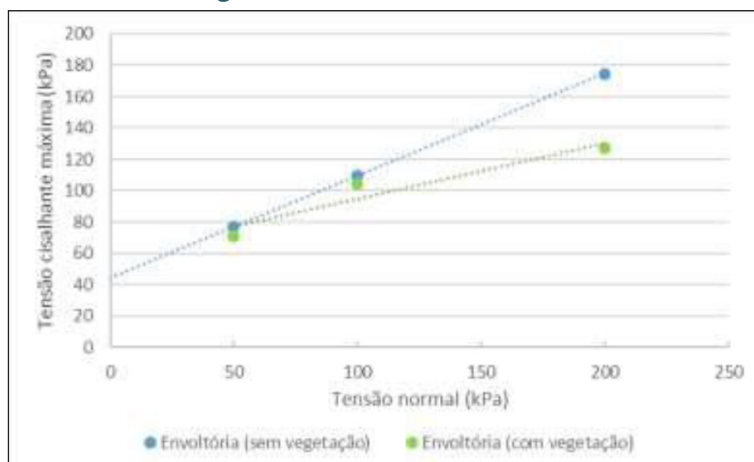


Percebe-se na Figura 6 que, apesar da deformação nos pontos finais ser superior, a uma mesma tensão, na amostra da área com cobertura vegetal, esse parâmetro tem um início invertido em relação à amostra da área sem cobertura. Ou seja, quando submetido às tensões de cisalhamento iniciais, o solo de vegetação possui uma resistência superior ao solo sem vegetação. Esse caráter também não é totalmente contrariado com o aumento das tensões de cisalhamento, uma vez que as curvas das amostras sem vegetação assumem uma condição assintótica ao fim do ensaio, enquanto as amostras de vegetação mantêm uma tendência de crescimento linear mesmo depois de serem submetidos a mais tensões de cisalhamento que a outra amostra.

Observa-se na Figura 6 que os solos possuem comportamento semelhante ao de uma areia fofa, de acordo com Pinto (2006), visto que apresentam deformação suave sem formação de picos de tensão. Na Figura 7, percebe-se que a amostra da área com vegetação sofreu uma maior deformação vertical com o aumento da deformação horizontal do que a amostra sem vegetação, indicando um coeficiente de Poisson inferior para esse solo.

A partir dos valores máximos de tensão cisalhante, obtidos para cada tensão vertical aplicada, foi possível gerar a envoltória de resistência para cada um dos solos. Elas estão expostas na Figura 8.

Figura 8 – Envoltória de resistência



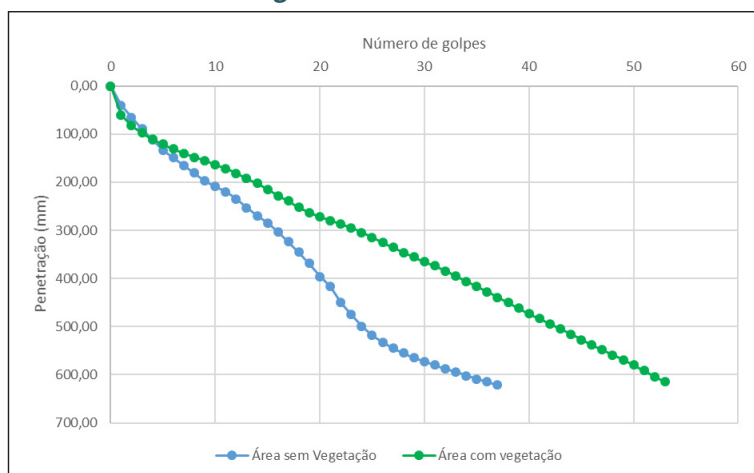
Os valores do intercepto coesivo ( $C$ ) e do ângulo de atrito ( $\phi$ ), que para o solo sem vegetação equivaleram a 44,53 kPa e  $33^\circ$  respectivamente, e para o solo com vegetação equivaleram a 59,5 kPa e  $19,4^\circ$ , respectivamente.

O valor de ângulo de atrito para a amostra sem cobertura vegetal se vincula diretamente ao destacado por Pinto (2006) como típico de areias mal graduadas

compactas e de grãos arredondados, enquanto esse parâmetro para a amostra sem cobertura vegetal se aproxima ao apontado para argilas pelo mesmo autor. Essa característica argilosa dialoga com a alta porção dessa classe granulométrica de solo em sua composição. Além disso, o valor de coesão superior observado na amostra de vegetação indica que o solo está mais agregado e unido nela do que na amostra sem vegetação. No entanto, esse valor elevado também pode dar indícios de que a umidade ótima foi superada durante o ensaio de resistência.

Na Figura 9 estão apresentados os resultados dos ensaios de CPD in situ em uma berma com e sem vegetação da célula do maciço sanitário.

**Figura 9** - Ensaio de CPD



A partir da análise dos resultados desse ensaio, percebe-se que a área com vegetação apresentou, de forma geral, uma resistência à penetração maior que a área sem vegetação, uma vez que nela, mais golpes foram necessários para atingir a penetração desejada, de 0,60 m.

No entanto, verifica-se que nos 10 primeiros centímetros do ensaio, a área com vegetação apresentou uma resistência à penetração inferior à área sem vegetação, indicando que esse trecho possui uma certa heterogeneidade em sua compactação, com áreas mais compactadas do que outras, além de apontar uma baixa representatividade de amostras retiradas dessa região, o que evidencia a problemática em utilizar mostas indeformadas de solo para caracterizar a resistência em laboratório desse campo experimental.

Nesse contexto, a vegetação demonstra ter um efeito positivo na resistência observada em camadas mais profundas do solo, e é constatada a importância

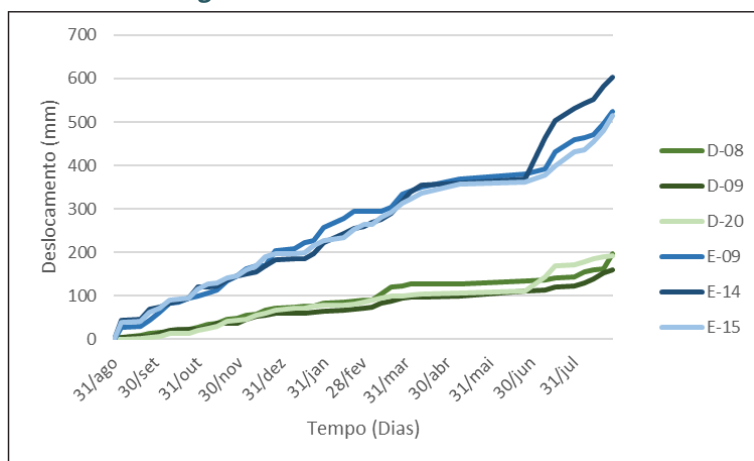
da realização de ensaios de resistência utilizando-se de amostras indeformadas de solo, bem como da realização de ensaios in situ para determinação da resistência dos solos.

Retornando à Figura 9, ainda é possível observar uma tendência linear nos dois locais de realização do ensaio, sendo essa tendência mais fortemente constatada na área com vegetação. A linearidade desse resultado sugere uma uniformidade nas características do solo utilizado para a cobertura do aterro, e também indica que durante os ensaios, a interface solo-resíduo não foi atingida. Desse modo, a camada de cobertura do ASCG possui um valor superior a 0,6 m de profundidade, valor que vai de encontro ao sugerido pela FEAM (2006), que determina a espessura de 0,60 m como a máxima indicada para camadas de cobertura de aterros sanitários; fato que revela um excesso de material e energia utilizados na camada verificada no estudo.

## Monitoramento dos deslocamentos horizontais

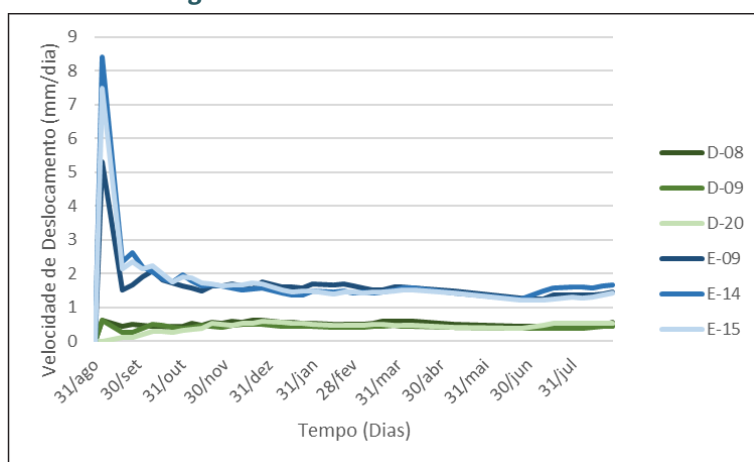
O monitoramento dos deslocamentos horizontais vem sendo realizado em todo o ASCG por meio de marcos superficiais. Os deslocamentos horizontais acumulados de três marcos selecionados para representar a área sem presença de vegetação estão apresentados em azul na Figura 10, bem como os de três outros marcos superficiais selecionados para representar a área com vegetação, em verde.

Figura 10 - Deslocamentos horizontais



A partir da análise da Figura 9, nota-se que a área selecionada para representar o trecho com vegetação apresentou deslocamentos horizontais bastante inferiores aos da área correspondente ao trecho sem vegetação, indicando uma maior estabilidade do local vegetado. Apesar dos picos iniciais, segundo o critério de estabilidade apresentado por KAIMOTO (2005), não existe comportamento crítico dos taludes do aterro sanitário, uma vez que durante o estudo, a velocidade de 10 mm/dia não foi atingida. Além disso, observando a Figura 11, é possível perceber que a velocidade de deslocamento da área sem vegetação foi superior à da área com vegetação, reafirmando a existência de relação entre presença de vegetação e estabilidade do maciço.

**Figura 11** - Velocidade de deslocamento



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a realização desse trabalho, foi possível atestar a influência da cobertura vegetal em vários parâmetros de estabilidade, resistência e comportamento geral do solo em Aterros Sanitários. Com a caracterização geotécnica, verificou-se que os solos estudados possuem semelhança em vários aspectos, dentre os quais se destacam o caráter majoritariamente arenoso e a alta porção de finos, características responsáveis por muitos elementos de suas performances.

Com o fim das análises de resistência e do monitoramento dos deslocamentos, comprovou-se que, de maneira geral, a cobertura vegetal está associada a um aumento na resistência e estabilidades de maciços sanitários.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – procedimento. Rio de Janeiro, 2016a. 9p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9813**: Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação. Rio de Janeiro, 2016b. 5p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009. 33p.

ARAUJO, P. S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário**. 2017. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2017.

**ASTM D6951 / D6951M-09(2015)**. Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2015.

BADILLO, E. J.; RODRÍGUEZ, A. R. **Mecânica de Suelos** – Tomo I: Fundamentos de la mecânica de suelos. 3. ed. 2005. México: Limusa, 2005. 644p.

CALDAS, A. S. **Geração de metano devido à digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos - estudo de caso do Aterro Sanitário Metropolitano Centro, Salvador - BA**. 2011. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2011.

CARVALHO, J. B. Q. **Fundamentos da mecânica dos solos**. 2. ed. Campina Grande: Editora Marcone, 2004. 310p.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos Sólidos Industriais**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233p.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Orientações básicas para a operação de aterro sanitário**. Belo Horizonte: FEAM, 2006. 36 p.

KAIMOTO, L.S.A., 2005, **Simpósio Internacional de Tecnologias e tratamento de Resíduos Sólidos**, RJ, Rio de Janeiro.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006. 367p.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. **Influência da vegetação na estabilidade de taludes na bacia do rio Ligeiro (PR)**. Revista Geociências, v.27, n. 3, p. 387-399, 2008.