

## UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS DE CAMPO PARA A AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM ATERRO SANITÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

USE OF FIELD TESTS TO ASSESS THE MECHANICAL RESISTANCE OF MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS (MSW)

**Roberto Antonio CORDEIRO DA SILVA<sup>1</sup>, Alfran Sampaio MOURA<sup>1</sup>, Andressa de Araújo CARNEIRO<sup>2</sup>, Claver Giovanni PINHEIRO<sup>3</sup>, Sônia Maria SILVA VASCONCELOS<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Campus do Pici. Avenida Mister Hull, s/n. Fortaleza – CE. E-mails: roberto@det.ufc.br; alfransampaio@ufc.br

<sup>2</sup>Universidade Federal do Piauí, Centro de Tecnologia. Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Avenida Universitária, s/n - Ininga, Teresina – PI. E-mail: andressa.deac@gmail.com

<sup>3</sup>CONSTRUCT-GEO, Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Porto. Rua Doutor Roberto Frias, s/n. Porto – Portugal. E-mail: clavergiovanni@gmail.com

<sup>4</sup>Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia. Avenida Mister Hull, s/n. Blocos 912/913. Fortaleza – CE. E-mail: smaria@ufc.br

Introdução  
Metodologia  
Resultados e discussão  
Conclusão  
Agradecimentos  
Referências

**RESUMO** - Nesse estudo, avalia-se o comportamento geomecânico dos resíduos sólidos urbanos (RSU), com ênfase na resistência ao cisalhamento, do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC). Foram realizados ensaios em laboratório para caracterização física dos RSU, sondagens à percussão (SPT) e ensaios de prova de carga direta (PCD) em diferentes momentos no tempo, em uma Célula Experimental e no maciço antigo do aterro já existente. Posteriormente, com base nos resultados dos ensaios PCD realizadas, determinou-se a capacidade de carga da célula experimental e do aterro antigo. A partir dos ensaios SPT realizados não foi constatado tendência de elevação ou diminuição do índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) ao longo do tempo. A partir das PCD realizadas ficou evidente, tanto na célula experimental quanto no aterro antigo, uma relação bastante linear entre a pressão aplicada e o recalque obtido com a placa, indicando ausência da ruptura física na massa de resíduos solicitada. Percebeu-se a presença do efeito fibra no comportamento dos resíduos apenas para o aterro antigo. De forma geral, o aterro antigo apresentou rigidez e capacidade de carga mais elevada que o da célula experimental.

**Palavras-chaves:** Aterro sanitário. Comportamento geomecânico. Capacidade de carga. Sondagens à percussão. Resíduo sólido urbano.

**ABSTRACT** - In this study, was evaluated the geomechanical behavior of the municipal solid waste (MSW) of the Metropolitan Sanitation Landfill of Caucaia (ASMOC), with emphasis on shear strength. Laboratory tests for the physical characterization of MSW, Standard Penetration Tests (SPT) and plate load test (PLT) were carried out in different time points, in an Experimental Cell and in the old existing landfill. Subsequently, based on the results of the PLT, the bearing capacity of the experimental cell and the old landfill was determined. The SPT did not reveal any tendency to increase or decrease in the penetration resistance index ( $N_{SPT}$ ) over time. The PLT showed a linear relationship between the applied pressure and the settling obtained with the plate was evident, in the experimental cell and in the old landfill, indicating the absence of the physical rupture in the mass of the requested waste. The effect of the fiber in the waste behavior could only be observed in the old landfill. In general, the old landfill had higher stiffness and bearing capacity than the experimental cell.

**Keywords:** Landfill. Geomechanical behavior. Bearing capacity. Standard Penetration Test. Municipal Solid Waste.

### INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários são espaços destinados à deposição final dos resíduos sólidos gerados pela atividade humana. Estes são compostos de resíduos domésticos, comerciais, de serviço de saúde, da indústria de construção, ou seja, resíduos que não foram reciclados e resíduos não aproveitados de usinas de reciclagem.

Um aterro sanitário não deve ser apenas um local de armazenamento, devendo ser com-

preendido como um empreendimento que deve ser projetado de acordo com as normas pertinentes para administração e deposição final dos resíduos sólidos (Silva, 2017). Neste contexto, tem-se observado que em muitos municípios pequenos a utilização de consórcios de municípios vizinhos para construção de aterros sanitários coletivos é uma alternativa que pode ser operacionalizada.

O aterro sanitário é uma das soluções mais indicadas para a disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no solo, tendo como vantagens o relativo baixo risco à saúde e à segurança, com impactos ambientais minimizados, já que permite o monitoramento e tratamento dos líquidos e gases gerados pela decomposição dos resíduos.

Para Silva (2017) o gerenciamento de um aterro sanitário adequado exige o cumprimento rigoroso das várias etapas da deposição dos RSU, como a impermeabilização do solo, o confinamento e a compactação do RSU com uma camada de solo, a captação e tratamento do chorume, e a extração e queima controlada dos gases gerados. Apesar da grande heterogeneidade que os RSU apresentam em sua composição, quando estão dispostos no corpo do maciço, compactados e após os recalques, com a retirada dos gases de efeito estufa (GEE) e do chorume, podem tornar-se estáveis, com caracte-

terísticas muito próximas as de materiais geotécnicos convencionais.

As principais propriedades mecânicas dos RSU relacionadas ao seu uso como suporte de pequenas obras de engenharia estão relacionadas à sua resistência ao cisalhamento, compressibilidade e a permeabilidade. Todas estas propriedades são bastante influenciadas pela composição e estado de alteração do resíduo consolidado, bem como pelos índices físicos e pelo comportamento mecânico individual de cada um de seus componentes.

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo avaliar o comportamento geomecânico dos RSU de um aterro sanitário situado na Região Metropolitana de Fortaleza (ASMOC) através da caracterização física do material em laboratório e de resultados de ensaios de campo realizados em uma célula experimental, especialmente construída, e no aterro antigo existente no interior do ASMOC.

## METODOLOGIA

A metodologia adotada para a realização da presente pesquisa tem como base a execução das seguintes etapas: escolha do local para execução do estudo, coleta de amostras deformadas de RSU (ABNT, 2010b), caracterização física em laboratório dos RSU amostrados, realização de ensaios de campo, comparação e análise dos resultados. O local escolhido para a realização do

estudo foi o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), figura 1, cuja área total equivale a 123.20 ha, sendo 78.47 h a destinados à disposição de resíduos, 32.15 ha de área de preservação ambiental, 7.04 ha de faixa de preservação de contorno, 3.19 ha de sistema viário interno e 2.35 ha de administração, urbanização e estacionamento (Santos, 2012).



Figura 1 - Fotografia aérea da localização da célula experimental.



A escolha do ASMOC partiu da necessidade de utilizar um aterro ativo, para auxílio na realização dos ensaios de campo e possibilidade de utilização de uma célula experimental de 225 m<sup>2</sup> (15 m x 15 m) que foi construída especialmente para a execução de pesquisas, principalmente, relacionadas com a produção de gases (Oliveira, 2011; Santos, 2012) e para avaliação do comportamento geomecânico de aterros sanitários (Carneiro, 2013; Carneiro & Moura, 2016). A figura 2 mostra a célula experimental construída e utilizada nesta pesquisa. O método utilizado para a escavação foi o método da trincheira.

Posteriormente à escavação, o fundo foi nivelamento com um trator de esteiras. Foi instalado ainda um sistema de drenagem de líquidos para análise de lixiviado e instalado um dreno de gás central para análise de gases.

As amostras de RSU foram coletadas e acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Os ensaios de laboratório realizados nos resíduos da célula experimental e do aterro antigo para caracterização física foram os seguintes: composição gravimétrica (ABNT, 1989), granulometria (ABNT, 1984c), densidade real dos grãos (ABNT, 1984a), limites de consistência (ABNT, 2016a; 2016b), compactação (ABNT, 1986) e Índice de Suporte Califórnia (ISC) (ABNT, 1987).

No campo realizaram-se dez sondagens à percussão – SPT, conforme a ABNT (2001) e oito provas de carga direta (ABNT, 1984b). A figura 3 ilustra a execução das sondagens à percussão (SPT) e a coleta do RSU.



**Figura 2** - Célula experimental a) Escavação utilizando uma retroescavadeira b) Escavação concluída.



**Figura 3** - Sondagens à percussão (SPT) a) Execução b) Coleta de amostra de RSU.

As provas de carga na célula experimental foram do tipo direta e realizadas a cerca de 75 cm de profundidade, com a placa posicionada diretamente no RSU e, portanto, abaixo da camada

de cobertura.

A placa utilizada foi de aço rígido, circular com 50 cm de diâmetro.

No aterro antigo, também, foram realizados os

mesmos ensaios executados na célula experimental. Neste caso, a placa foi posicionada diretamente nos resíduos e os ensaios foram realizados superficialmente em locais onde não existia camada de cobertura.

Tanto na célula experimental quanto no aterro antigo foi utilizada uma placa de aço, circular e com 50 cm de diâmetro. Os estágios de carga foram

aplicados em intervalos de 10 min, independente da estabilização dos recalques. O sistema de reação utilizado para os ensaios constou de um caminhão carregado com solo, de forma a apresentar uma reação pelo menos 20 % superior à máxima carga aplicada no ensaio. A figura 4 ilustra a execução das provas de carga direta realizadas nesta pesquisa.



Figura 4 - Prova de carga direta a) Equipamento utilizado b) Vista da execução e do sistema de reação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios em laboratório foram iniciados pela realização de ensaios de composição gravimétrica, a partir da coletada duas amostras de RSU, obtidas nas profundidades de 1 m (amostra 1) e 80 cm (amostra 2) do aterro existente (antigo) do ASMOC.

A tabela 1 mostra os resultados da composição gravimétrica, média, dos resíduos coletados a 1.0 m de profundidade do aterro antigo. Na mesma tabela comparam-se ainda os resultados obtidos com de ensaios de composição

gravimétrica realizados por Santos (2012) e Carneiro (2013) em amostras obtidas e utilizadas no aterro da mencionada célula experimental. As composições apresentadas estão expressas em peso seco.

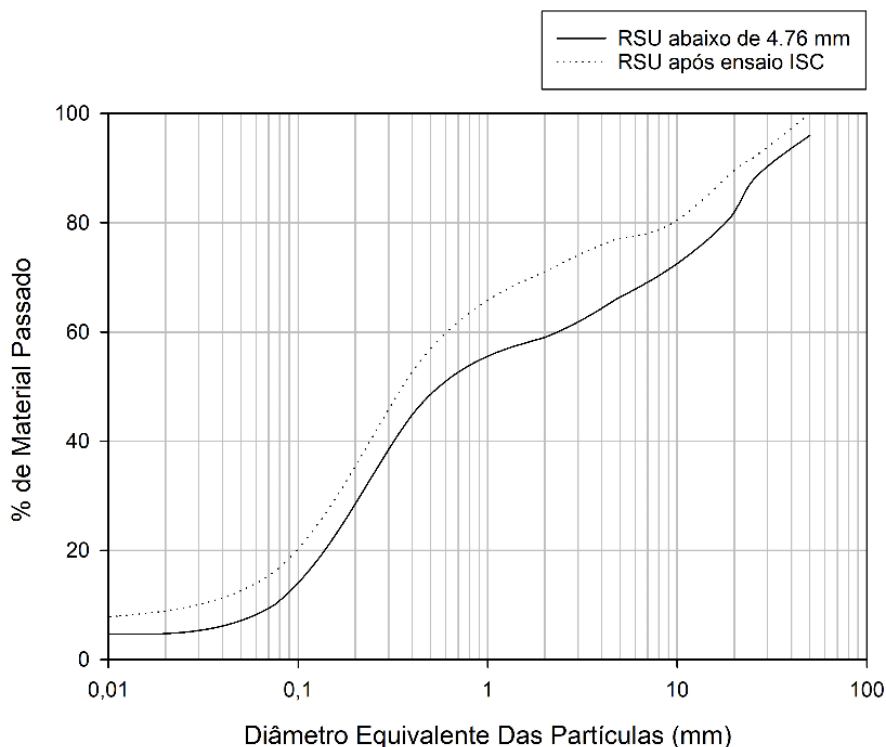
Foi observado, ao contrário dos resultados de Santos (2012) e Carneiro (2013), a presença de uma elevada quantidade de pedras e pedregulhos, tamanho maior que 4.76 mm. Para elementos acima de 4.76 mm, a separação foi efetuada visualmente.

Tabela 1 - Composição Gravimétrica dos resíduos do aterro antigo e da célula experimental.

Componentes	% em massa da amostra		
	Aterro Antigo	Santos (2012)	Carneiro (2013)
<b>Materiais Putrescíveis</b>	61.89	36.8	38.8
<b>Outros</b>	--	11.1 (areia)	12.6
<b>Plásticos</b>	0.48	15.6	15.6
<b>Fralda</b>		8.4	8.4
<b>Trapos</b>	0.07	8.3	7.7
<b>Papel</b>	0.17	5.3	8.9
<b>Resíduo de Jardim</b>	--	3.0	--
<b>PET</b>		1.5	---
<b>Vidro</b>	0.05	2.3	2.6
<b>Borracha</b>	--	0.6	1.1
<b>Alumínio</b>	--	0.7	0.8
<b>Madeira</b>	1.87	--	--
<b>Pedras e ped.</b>	34.72	--	--
<b>Metal</b>	0.75	1.3	1.3

Em comparação, a composição gravimétrica do aterro antigo com as da célula experimental, obtidas por Santos (2012) e Carneiro (2013), observa-se um maior percentual de materiais putrescíveis no aterro antigo. Nos demais componentes também há diferenças percentuais consideráveis. Deve-se mencionar ainda que, apesar dos resíduos de ambos aterros serem provenientes da mesma origem, ou seja, da coleta de RSU da região metropolitana de Fortaleza, as amostras ensaiadas foram coletadas em diferentes momentos. Além disso, no aterro antigo os resíduos já sofreram alteração da composição original devido à evolução dos processos de biodegradação.

No material restante dos ensaios de composição gravimétrica do aterro antigo, de tamanho inferior a 4,76 mm, realizaram-se ensaios de granulometria apresentado na figura 5.



**Figura 5** - Ensaio granulométrico dos ensaios de caracterização realizados no material menor que 4,76 mm e de compactação e ISC nas amostras de RSU ensaiadas.

Foram realizados ainda ensaios para determinação da densidade real utilizando-se os métodos do picnômetro (500 ml e 2000 ml) e da bomba de vácuo. Os resultados convergiram em torno de um mesmo valor, 2,58. De acordo com Terzaghi & Peck (1967), valores típicos para os solos ficam em torno de 2,7. Já Pinto (2000) afirma que valores de até 3,0 são frequentes em virtude da presença de sais de ferro.

Para determinação do teor de matéria orgânica foram realizados 2 ensaios, conforme a ABNT

Para isso, adotou-se a separação dos constituintes, em porcentagem do peso seco, através de peneiras com abertura de 19,1 mm - 12,7 mm - 9,5 mm - 4,8 mm - 2,00 mm - 0,42 mm e 0,074 mm. Dessa forma as amostras ensaiadas, e que constam de uma mistura de solo e uma certa quantidade de matéria orgânica, apresentam em média 35% de elementos do tamanho do pedregulho, 53% da areia e 12% do tamanho do silte e argila.

Assim, de acordo com a distribuição granulométrica obtida, o material que passa na peneira de 4,76 mm, contido na massa de RSU pode ser classificado com base no Sistema de Classificação Unificado de Solos – SUCS, como SM-SW (areia siltosa, bem graduada). Com base na realização de ensaios de plasticidade (WL e WP) foi observado que as amostras ensaiadas de RSU não apresentaram plasticidade.

(1996), obtendo-se os resultados de 5,29 e 6,31%. Coincidentemente esses valores situam-se na mesma ordem de grandeza dos obtidos por Rocha (2008) para o Aterro Controlado de Ponta Negra – MG.

Realizaram-se ainda ensaios de compactação no material estava presente nos resíduos coletados, de acordo com as orientações da ABNT (1982) utilizando-se as energias do Proctor normal e Proctor modificada. A curva peso específico aparente seco e teor de umidade,



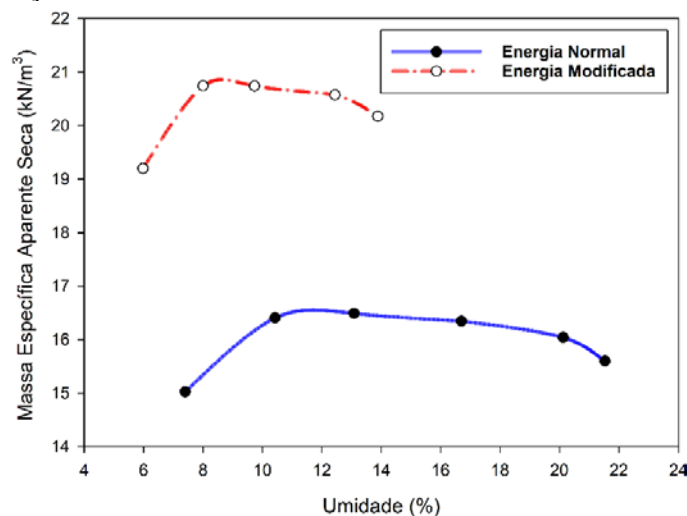
obtida para a energia do Proctor Normal, é apresentado na figura 6. Assim, determinou-se a massa específica aparente seca máxima na energia normal de 16.77 kN/m<sup>3</sup> e 15 % de umidade ótima. Já para a energia modificada determinou-se a massa específica de 21.55 kN/m<sup>3</sup> e a umidade ótima de 8.5 %.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de compactação realizados estão coerentes com os esperados, de acordo com a literatura para solos e RSU apresentados por Boscov (2008) e Pinto (2000), já que se obteve uma elevação da massa específica seca e a redução da umidade ótima

com o aumento da energia de compactação.

Por fim, realizaram ainda ensaios de índice de suporte Califórnia (ISC) e expansão nas amostras ensaiadas. Apesar de tratar-se de amostras não plásticas, obtiveram-se valores de expansão significativos de 0.79 % e 0.33 %. Já os ISCs obtidos foram de 6 % e 7 %.

A tabela 2 apresenta um resumo dos ensaios de caracterização geotécnica, realizados no material menor que 4.76 mm presente nas amostras de RSU ensaiadas e dos ensaios de compactação e ISC realizados em amostras de RSU.



**Figura 6** - Curvas de compactação do material presente nas amostras de RSU ensaiadas.

**Tabela 2** - Propriedades geotécnicas para o material menor que 4,76 (a) mm e de compactação e ISC nas amostras de RSU ensaiadas (b).

Propriedade	A	B
LP	NP	NP
LL	NP	NP
IP	NP	NP
Densidade Real	2.58	2.58
Matéria Orgânica	5.29%	6.31%
ISC	6.00%	7.00%
Expansão	0.79%	0.33%
Massa Espec. Seca (kN/m <sup>3</sup> )	16.77	
Umidade Ótima	15.00%	

Posteriormente a caracterização dos resíduos e do material menor que 4.76 mm presente, com vista à avaliação da resistência ao cisalhamento do RSU investigado, procedeu-se a realização dos ensaios de campo.

Os ensaios de campo foram iniciados a partir da realização de 10 sondagens à percussão (SPT) sem revestimento, já que não houve desmoronamento de paredes e tampouco utilização de água para lavagem. Os valores de N<sub>SPT</sub> adotados correspondem à soma dos golpes

para penetrar os 30 cm finais do amostrador.

Em 2014, na primeira campanha, foram realizadas 4 sondagens à percussão, sendo 2 na célula experimental e outros 2 no aterro antigo. Já na campanha de 2015, foram realizadas apenas 2 sondagens à percussão, sendo um na Célula Experimental e outro no Aterro Antigo. Finalmente na campanha de 2016, foram realizados outros 2 ensaios de sondagem à percussão: um na célula experimental e outro no aterro antigo.

As sondagens à percussão realizadas na Célula Experimental foram executadas até a profundidade do fundo da escavação da Célula Experimental, ou seja, 4.0 m. Durante a execução do ensaio era comum não virem amostras de RSU no amostrador padrão.

A figura 7a mostra os perfis de resistência obtidos com as 5 sondagens à percussão (SPT) realizadas no Aterro Antigo. Observava-se que não houve tendência na variação do N<sub>SPT</sub>, ao longo da profundidade e no tempo, com valores oscilando de 4 a 18 golpes. Na média, novamente obteve-se 4 golpes.

A figura 7b mostra todos os perfis de resistência obtidos com as 5 sondagens à percussão realizadas na Célula Experimental. A sondagem à percussão, realizada em 2013, foi executada por Carneiro (2013). Também é perceptível que os valores do  $N_{SPT}$  da sondagem de 2013 apresentaram uma menor variação com

a profundidade, oscilando de 5 a 12 golpes. A mesma tendência de resultados ocorreu na sondagem de 2014.2. Já pela sondagem realizada em 2014.1 ocorreu um pico no perfil a 1 m de profundidade devido a presença de um componente de maior tamanho na massa que atuou como um obstáculo.

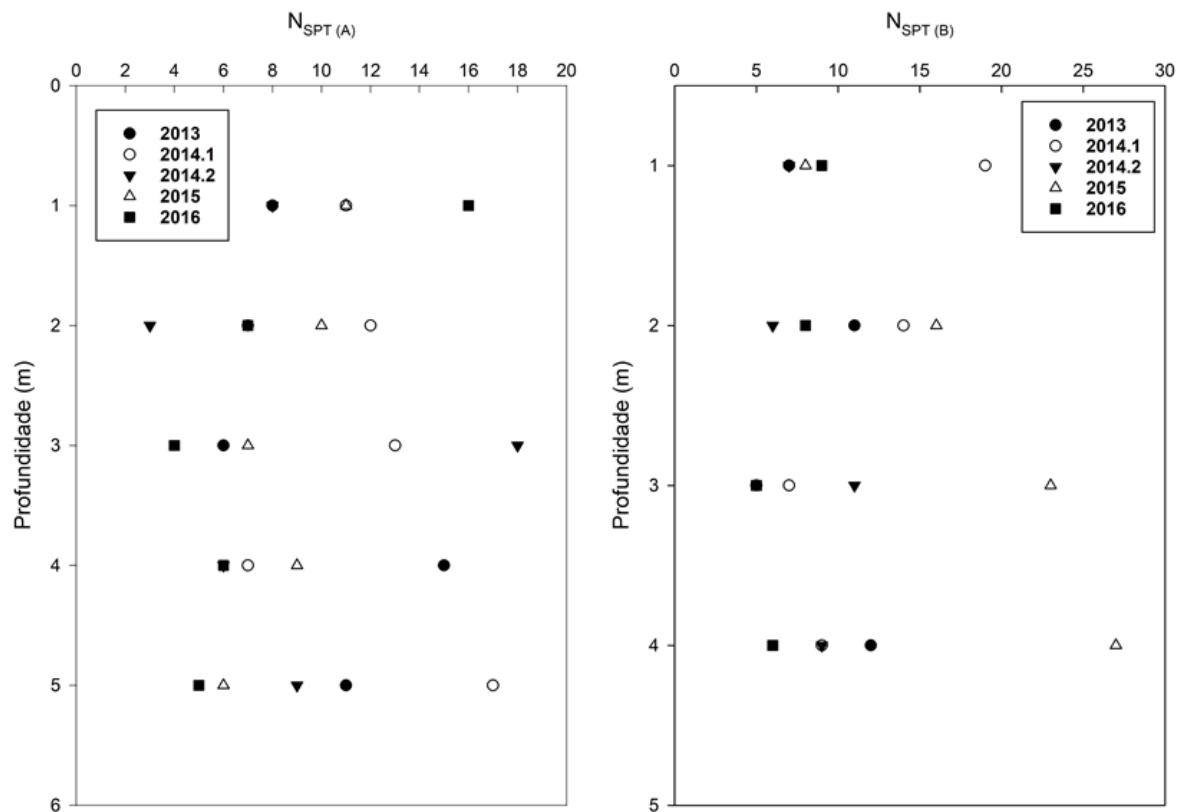


Figura 7 - Perfis de resistência no a) Aterro Antigo e b) Célula Experimental.

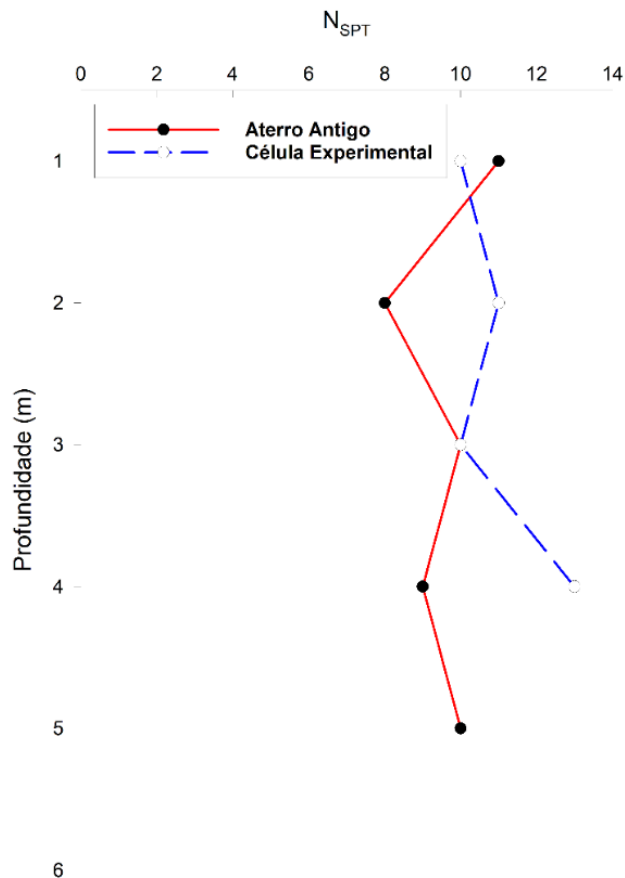
Já na sondagem de 2015 foi observado um crescimento do  $N_{SPT}$  linearmente com a profundidade, atingindo o valor máximo de 27 golpes a 4 m e pela sondagem de 2016 os valores para o índice ficaram restritos em uma faixa menor que as apresentadas pelas demais sondagens, de 5 a 9 golpes. De forma geral os valores do  $N_{SPT}$  de todas as sondagens executadas na célula experimental não apresentaram tendência, nem ao logo da profundidade tampouco no tempo, oscilando numa faixa de 5 a 19 golpes, com valor médio de 10 golpes.

Na figura 8 comparam-se os índices de resistência da célula experimental e do aterro antigo, médios ( $N_{SPT}$ ) ao longo da profundidade. É perceptível que os valores médios do  $N_{SPT}$  praticamente constantes ao longo da profundidade tanto para os resíduos da célula experimental quanto para os do aterro antigo.

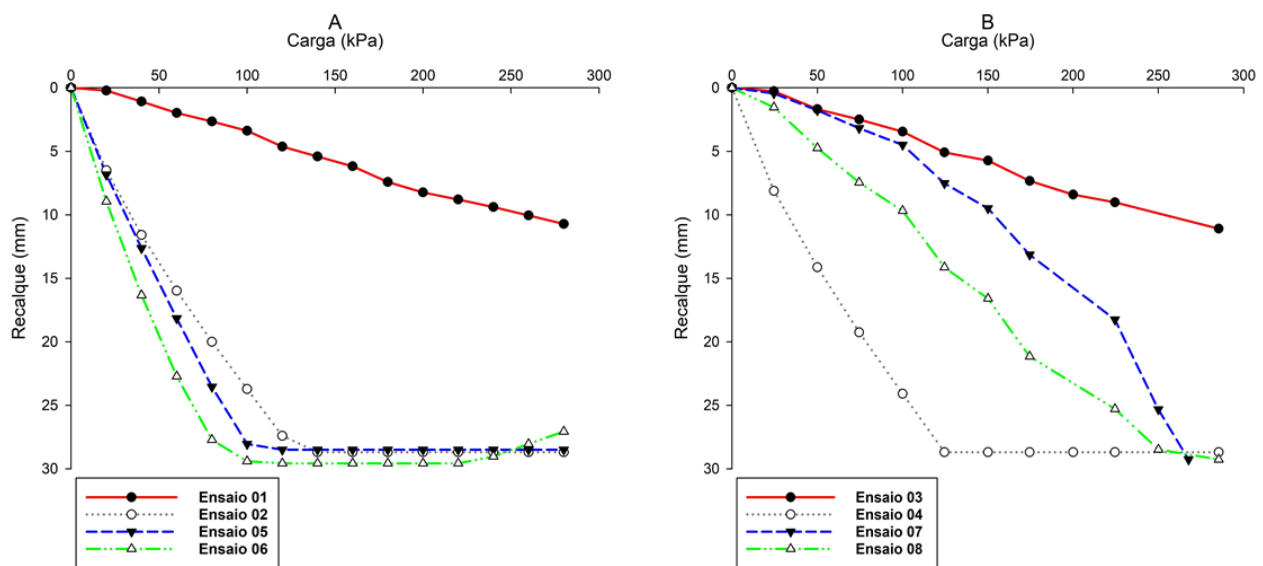
Posteriormente realizaram-se ensaios de prova de carga direta. Os ensaios na célula

experimental foram realizados em 2015 (ensaios 1 e 2) e 2016 (ensaios 5 e 6). Na figura 8 são apresentadas as curvas pressão x recalque, obtidas com a realização dos ensaios na Célula Experimental.

Pela figura 9a observam-se dois padrões de curvas. Um desses padrões, evidenciado no ensaio 1, o maciço de RSU apresentou resposta mais rígida, de forma que foi aplicado uma pressão de 291 kPa para obtenção de um recalque de apenas 11.09 mm. Nos demais ensaios (nos 2, 5 e 6) as curvas convergem e apresentam forma típica de materiais mais compressíveis. Pelo ensaio 2, aplicando-se apenas 127 kPa obteve-se um recalque de cerca de 28.7mm. A mudança de rigidez observada é atribuída a heterogeneidade da porção de RSU mobilizada nos ensaios. A partir das provas de carga realizadas na célula experimental não foi observada, assim como pelas sondagens à percussão realizadas, nenhuma tendência no comportamento dos resíduos ao longo do tempo.



**Figura 8** - Comparação do  $N_{SPT}$  médio da célula experimental e do aterro antigo ao longo da profundidade.



**Figura 9** - Provas de carga realizadas na a) Célula Experimental e b) Aterro Antigo.

No aterro antigo também foram realizados ensaios em dois momentos. Os ensaios 3 e 4 foram realizados em 2015 e os ensaios 5 e 6 em 2016. Na figura 9b apresentam-se as curvas pressão x recalque dos ensaios realizados no Aterro Antigo

As curvas obtidas com a realização desses ensaios apresentam uma curvatura mais acentuada quando comparadas às realizadas na célula experimental. Além disso, observa-se um

maior distanciamento entre as curvas dos ensaios realizados e ensaios com resultados típicos do efeito de fibras e que, segundo Marangon (2013), apresentam uma reação insuficiente.

Para tensões menores, da ordem de até 100 kPa, exceto para o ensaio 1 (célula experimental), observa-se que o aterro experimental apresenta menores deslocamentos e, portanto, maior rigidez. Na sequência foi determinada a capacidade de carga ( $q_{ult}$ ), tanto nos RSU da



Célula Experimental como do Aterro Antigo a partir das provas de carga realizadas. Para isso, utilizaram-se os métodos da ABNT (2010a). O referido método foi escolhido pelo formato das curvas que, quase sempre, apresentam formato linear e, portanto, não possibilitando a extrapolação da carga de ruptura física.

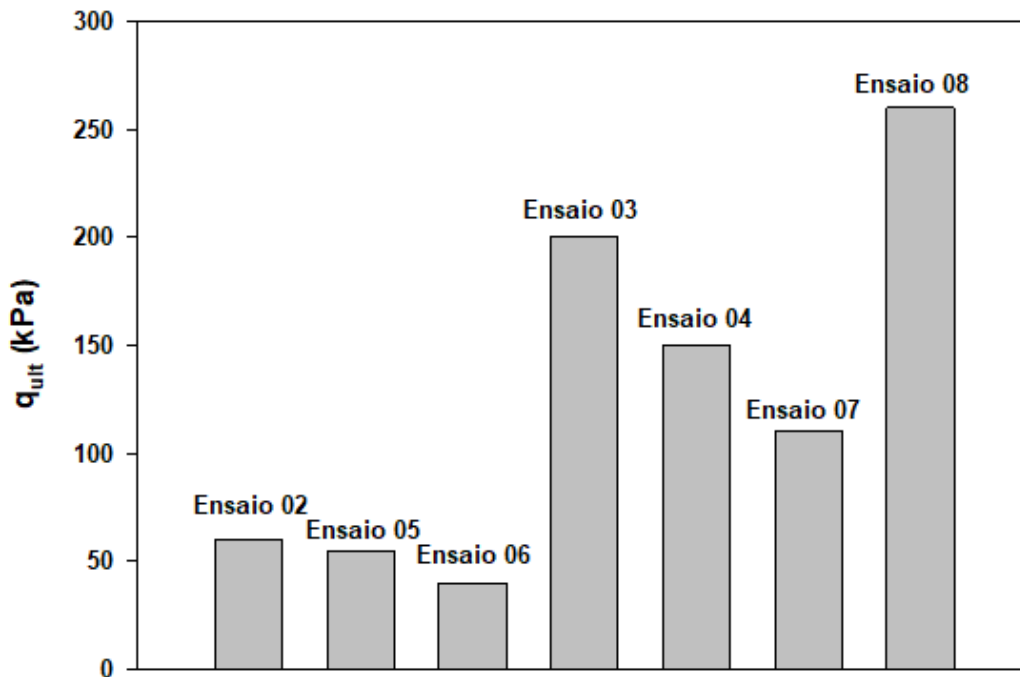
O cálculo de  $q_{ult}$  se refere a placa circular de 50 cm de diâmetro, que foi a utilizada nos ensaios, assente diretamente nos resíduos. No caso da célula experimental, as determinações se referem a profundidade de 75 cm (topo dos RSU) e, para o aterro antigo, a placa foi assente superficialmente, pois não havia solo de cobertura nos locais dos ensaios. Na tabela 3 mostra-se um resumo das determinações da capacidade de carga efetuadas a partir dos resultados dos ensaios de prova de carga direta realizadas.

**Tabela 3** - Resumo das determinações de  $q_{ult}$  da placa de 50 cm assente nos resíduos da célula experimental e do aterro antigo a partir do método da ABNT (2010a).

Ano	Ensaio	Célula Experimental	Ensaio	Aterro Antigo
		$q_{ult}$ (kPa)		$q_{ult}$ (kPa)
2015	1	Não aplicável	3	200
	2	60	4	150
2016	5	55	7	110
	6	40	8	260
	Média	52	Média	180

Para uma melhor visualização a figura 10 apresenta uma comparação entre as determinações de  $q_{ult}$  efetuadas utilizando-se um gráfico de barras.

Pela figura 10 observa-se que, considerando uma ruptura convencional, a capacidade de carga ( $q_{ult}$ ) do aterro antigo foi cerca de 3 vezes maior do que da célula experimental.



**Figura 10** - Comparação entre as determinações de  $q_{ult}$  efetuadas para a célula experimental e para o aterro Antigo.

## CONCLUSÕES

A realização desta pesquisa permitiu estabelecer as seguintes conclusões:

- Com relação à composição gravimétrica dos resíduos, tanto da célula experimental elaborada, quanto do aterro antigo, foi observada que uma grande quantidade de materiais putrescíveis é típica de aterros de regiões menos desenvolvidas;
- Pelas sondagens à percussão realizadas não foi observada tendência de elevação ou diminuição do  $N_{SPT}$  ao longo do tempo;
- Ao longo da profundidade, tanto na célula

experimental quanto no aterro antigo, não houve variação do  $N_{SPT}$ ;

- A partir das provas de cargas diretas, foi observada, em praticamente todos os ensaios realizados, tanto na Célula Experimental quanto no Aterro Antigo, uma relação bastante linear entre a pressão aplicada e o recalque obtido com a placa, isso indica ausência da ruptura física e este comportamento é típico de materiais mais compressíveis, como é o caso dos aterros sanitários;
- Nas provas de carga diretas realizadas no

aterro antigo foi observada uma descontinuidade na curva carga x recalque, evidenciando a presença do efeito fibra no comportamento dos resíduos;

- De forma geral, as provas de cargas diretas realizadas na célula experimental, apresentaram

maiores deformações do que as obtidas no aterro antigo;

Considerando uma ruptura convencionada, a capacidade de carga ( $q_{ult}$ ) do aterro antigo foi cerca de 3 vezes maior do que a da célula experimental;

## AGRADECIMENTOS

Os autores do artigo agradecem Ao Aterro Sanitário Metropolitano de Caucaia – ASMOC, pelo total apoio em todos os trabalhos de campo, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia (PPGG), ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC) pela cooperação e ao CNPQ (conselho brasileiro de desenvolvimento científico e tecnológico) pelo apoio financeiro para um dos autores com bolsa do programa “Ciência sem fronteiras” protocolo 201465 / 2015-9.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS–  
**NBR 6122: Projeto e execução de fundações.** Rio de Janeiro, 2010a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS–  
**NBR 6458: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS–  
**NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS–  
**NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT– Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS–  
**NBR 6489: Prova de carga direta sobre terreno de fundação.** Rio de Janeiro, 1984b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS–  
**NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS–  
**NBR 7181: Solo - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1984c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS–  
**NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –  
**NBR 9895: Índice de Suporte Califórnia.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –  
**NBR 10664: Águas - Determinação de resíduos (sólidos) - Método gravimétrico - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –  
**NBR 13600: Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –  
**NBR10. 007: Amostragem Resíduo Sólido.** Rio de Janeiro, ABNT, 2010b.
- BOSCOV, M.E.G. *Geotecnia ambiental.* São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248p.
- CARNEIRO, A.A. *Estudo da capacidade de carga de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos com base em ensaios de laboratório e campo.* Fortaleza, 2013. 139 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará.
- CARNEIRO, A & MOURA, A.S. Avaliação preliminar da capacidade de carga de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos com base em ensaios de laboratório e campo. *Revista DAE.* v. 64, p. 65-73, 2016.
- MARANGON, M. *Unidade 7 - Capacidade de carga dos solos. Nota de aula.* Faculdade de Engenharia. Mecânica dos solos II. UFJF. 2013.
- OLIVEIRA, C.A.A. *Análise do Fluxo de Gases na Camada de Cobertura do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (Asmoc).* Fortaleza. 2011. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento De Engenharia Hidráulica E Ambiental, Universidade Federal do Ceará.
- ROCHA, E.F. *Determinação da condutividade hidráulica e da capacidade de campo de resíduos sólidos urbanos.* Viçosa, UFV. Minas Gerais – Brasil, 2008.
- SANTOS, G.O. *Avaliação do cultivo de gramíneas na superfície de aterro sanitário, com ênfase para a redução da emissão de metano e dióxido de carbono para a atmosfera.* Fortaleza, 2012. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- SILVA, R.A.C. *Avaliação da evolução do comportamento geomecânico de aterros sanitários com base na realização de ensaios de laboratório e de campo.* Fortaleza, 2017. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia.
- PINTO, C.S. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.* São Paulo, Oficina de Textos, 2000.
- TERZAGHI, K. & PECK, R.B. *Soil mechanics in engineering practice.* 2. Ed. New York, John Wiley & Sons, 1967.

*Submetido em 5 de abril de 2019  
Aceito para publicação em 5 de agosto de 2021*