

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/531

Eficiência do Controle da Compactação de Solos de Suporte para Geomembrana em Aterro Sanitário em Campina Grande - PB

Danilo Brito da Costa

Doutorando, UFCG, Campina Grande, Brasil, danilo.bcosta@gmail.com

Wlysses Wagner Medeiros Lins da Costa

Doutorando, UFCG, Campina Grande, Brasil, wlysses06@hotmail.com

Esther Almeida Lima

Graduada, UFCG, Campina Grande, Brasil, estheralmeidalima@gmail.com

Thiago Fernandes da Silva

Professor, UFC, Crateús, Brasil, engthiagofernandes1989@gmail.com

Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Professora, UFCG, Campina Grande, Brasil, veruschkamonteiro@hotmail.com

RESUMO: As camadas de impermeabilização de base de aterros sanitários são projetadas com a finalidade de impedir o fluxo de contaminantes para o terreno natural. O controle e fiscalização para a correta execução das camadas de base dos aterros sanitários visa proporcionar uma maior segurança ambiental. O objetivo deste trabalho foi analisar a eficiência do controle de compactação do solo utilizado na camada de base do Aterro Sanitário em Campina Grande - PB (ASCG), localizado na região do semiárido. Para a caracterização do solo foram realizados ensaios em laboratório e para a determinação do grau de compactação foram realizados ensaios em campo de frasco de areia e cilindro de cravação. O solo analisado apresentou-se como de baixa plasticidade e uma permeabilidade acima do que é estabelecido pelas normas brasileiras vigentes para camadas de base de aterros sanitários. Entretanto, a camada de suporte apresentou grau de compactação médio superior a 90% pelos dois métodos analisados. O controle de compactação do solo utilizado em base de aterro sanitário pode ser monitorado por qualquer um dos dois métodos, porém o cilindro de cravação apresentou-se como uma alternativa rápida e de baixo custo. A camada de solo analisada não apresenta características que proporcionem impermeabilização, desempenhando em sua grande parte apenas o papel de suporte da geomembrana.

PALAVRAS-CHAVE: controle de compactação, camada de base, frasco de areia, cilindro de cravação.

ABSTRACT: Landfill base waterproofing layers are designed to prevent the flow of contaminants into the natural terrain. Control and inspection for the correct execution of the base layers of landfills aims to provide greater environmental safety. The objective of this work was to analyze the efficiency of soil compaction control used in the base layer of the Sanitary Landfill in Campina Grande - PB (ASCG), located in the semi-arid region. To characterize the soil, tests were carried out in the laboratory and to determine the degree of compaction, field tests were carried out using a sand bottle and a driving cylinder. The analyzed soil presented low plasticity and permeability above that established by current Brazilian standards for base layers of landfills. However, the support layer presented an average degree of compaction greater than 90% by the two methods analyzed. Soil compaction control used in landfills can be monitored using either of the two methods, but the piling cylinder is a quick and low-cost alternative. The soil layer analyzed does not present characteristics that provide waterproofing, largely playing only the role of supporting the geomembrane..

KEYWORDS: compaction control, base liner, sand bottle, driving cylinder.

1 INTRODUÇÃO

A execução de revestimento na base de aterros sanitários deve proporcionar o isolamento dos resíduos do contato direto com o terreno natural. Além disso, essa camada deve funcionar como um sistema selante à passagem de líquidos contaminantes provenientes da decomposição dos resíduos, satisfazendo condições previstas pelas normativas técnicas (ABNT, 1997). Quando bem executadas, essas camadas são capazes de reduzir o impacto ambiental decorrente do aparecimento de plumas de contaminação, que podem migrar em direção ao solo e às águas subterrâneas e superficiais (Leme e Miguel, 2018).

A utilização de solos compactados, que forneçam baixas permeabilidades à água ($< 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$), é comumente aplicado na confecção de camadas de base de aterros sanitários. Segundo Hamada et al. (2004), conhecer as condições de permeabilidade natural e do solo compactado diante do escoamento do lixiviado é imprescindível para definir a capacidade do solo de se comportar como um sistema selante e atenuador.

Muitas vezes, os solos compactados estão associados com geomembranas e/ou geotêxteis. Apesar de serem materiais de baixíssima permeabilidade, estudos comprovaram que a maior parte dos danos nas mantas ocorrem durante a deposição do solo de cobertura na geomembrana, podendo a densidade de danos variar de 4 a 22 por hectares (Zidan e Frigo, 2018). Esses danos podem estar relacionados com a presença de pedregulhos na superfície do solo de suporte da geomembrana, que acabam pressionados pela sobrecarga do solo e do maquinário utilizado na operação das células sanitárias, podendo ocasionar rasgos na manta. Em face disto, a busca por uma boa qualidade de compactação do solo de suporte, para aplicação da geomembrana, é necessária para que possam ser contidos eventuais fluxos de lixiviado, em caso de falhas na manta.

O controle de qualidade da camada de solo compactado na base de aterros sanitários envolve a verificação do Grau de Compactação (GC) alcançado após as etapas de homogeneização, umedecimento e aplicação dos rolos compactadores em campo. Em obras de aterros sanitários, não há referência normativa acerca de parâmetros ideais para controle dessa execução. Os padrões executivos para outros tipos de obras, como aterros de solos compactados e sub-base de rodovias, exigem valores de grau de compactação superiores a 95% (Pinto, 2006).

A garantia das condições técnicas ideais de execução da camada de base de aterros sanitários representa um desafio a ser alcançado, sobretudo pela vacância normativa. O monitoramento eficiente da obra torna-se essencial para evitar o comprometimento da qualidade final da compactação do solo. Situações como a má homogeneização do material, a perda de umidade do solo devido às altas taxas de evaporação, além da própria natureza heterogênea do solo, podem comprometer a qualidade final desejada para a obra.

O controle de compactação ocorre por meio da realização de sucessivos ensaios de densidade in situ nas camadas compactadas. O método do frasco de areia, descrito pela NBR 7185 (ABNT, 2016g), costuma ser o mais empregado em obras, especialmente nas de natureza rodoviária, por representar uma alternativa prática e de baixo custo. Possui como desvantagem o consumo de tempo na sua realização, quando comparado a outros métodos, o que pode acarretar elevação de custos operacionais (Vaillant et al., 2015).

Outro método bastante ágil e que fornece bons resultados é o método do cilindro de cravação, descrito pela norma NBR 9813 (ABNT, 2016h). Além dos métodos tradicionais, o estado de compactação do solo pode ser conhecido indiretamente por meio de relações com a resistividade elétrica (Kowalczyk et al. 2014; Pandey e Shukla, 2018). Ainda, equipamentos específicos que envolvem uso de sensores e densímetro eletromagnético podem ser empregados para determinação da compactação do solo; contudo, possui como principal desvantagem o maior custo de aquisição dos seus instrumentos comparado aos métodos tradicionais.

Os ensaios de densidade in situ são realizados após a compactação de um trecho da camada e seus locais são definidos estatisticamente, para garantir maior representatividade dos resultados. Como apenas uma pequena fração de toda a camada é verificada quanto ao grau de compactação do solo, quaisquer imperfeições no processo podem resultar em regiões com compactação ineficiente. Logo, o lixiviado que não foi capturado pelo sistema de drenagem poderá se espalhar em locais de danos das mantas e percolar em direção ao solo compactado, tornando iminente a contaminação do subsolo.

Considerando a insalubridade de um ambiente de aterro sanitário, aliado à necessidade de otimização do custo-benefício da obra e da sua celeridade para imediata disposição de resíduos, o controle de qualidade da compactação de solos em aterros sanitários deve demandar o menor tempo possível, diminuindo o grau de risco de exposição do operador ao ambiente degradante nas áreas de controle. Em face disso, é útil comparar a utilização dos métodos tradicionais de determinação da densidade in situ (frasco de areia e cilindro de

cravação) quanto ao tempo de ensaio e precisão dos resultados obtidos, com o intuito de definir qual o método mais adequado para o controle de qualidade da compactação em solos compactados de aterros sanitários.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a eficiência do controle de compactação do solo utilizado em camada de suporte para geomembrana de Aterro Sanitário em Campina Grande-PB (ASCG), considerando a comparação entre os métodos do frasco de areia e do cilindro de cravação.

2 METODOLOGIA

2.1 Campo experimental

O campo experimental deste trabalho está localizado no município de Campina Grande – PB, que apresenta uma população estimada de 413.830 habitantes (IBGE, 2022). O aterro sanitário deste município (ASCG) está distante 10 km do perímetro urbano da cidade sede, sendo localizado no distrito de Catolé de Boa Vista, sob as seguintes coordenadas geográficas: latitude 7° 16' 29.58" S e longitude 36° 1' 3.74" O. O aterro possui uma área total de 64 hectares para instalação de estruturas de disposição de resíduos e apoio técnico de operações.

O ASCG fica localizado no Semiárido nordestino, precisamente na região do Agreste paraibano, a 550 m de altitude sobre o Planalto da Borborema. Apresenta clima tropical chuvoso com verão seco e precipitação média anual de 600 a 800 mm. Foi localizado nível de lençol freático a 30 m de profundidade. A temperatura média anual é de 22° C, alcançando picos de máxima de 30° C e mínima de 15° C. A umidade relativa do ar na zona urbana varia de 75% a 83% (RIMA, 2010).

O ASCG recebe, em média, 850 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia, oriundo de 57 municípios dos Estados da Paraíba e de Pernambuco. Estes resíduos são dispostos em células sanitárias, nas quais os efluentes da biodegradação dos RSU são coletados. O biogás gerado é queimado em flyers, visando reduzir o impacto pelo lançamento de metano na atmosfera. No entanto, estudos estão sendo direcionados no sentido de verificar a viabilidade técnico-econômica do uso energético dos gases gerados. O lixiviado é coletado e transportado para 4 lagoas de tratamento, que se utilizam da alta taxa de evaporação desta região semiárida para redução dos volumes desse líquido.

A célula sanitária atualmente em operação no ASCG tem área de base de 350 por 220 m e aproximadamente 40 m de altura. A camada de base que foi monitorada para este trabalho trata-se da área de ampliação da referida célula, que está representada na Figura 1. A área de expansão da célula tem dimensões de 100 por 220 m, alcançando o limite direito da propriedade do empreendimento.

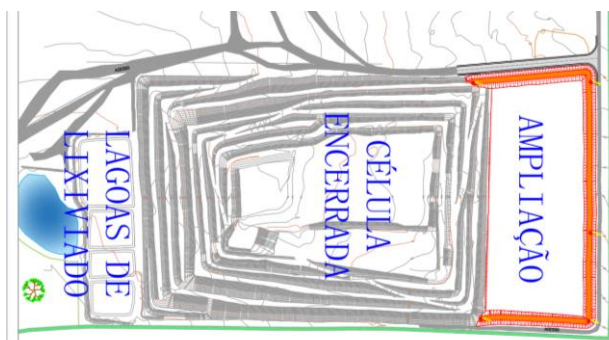


Figura 1 – Representação da célula em expansão do ASCG.
Fonte: adaptado de Benjamin (2022)

2.2 Configuração da camada de base

A camada de base monitorada foi executada com solos de jazidas da área do próprio empreendimento. Essa camada apresenta duas funções: regularização e nivelamento para suporte de geomembrana e proteção contra vazamento de lixiviado que possa ocorrer acidentalmente. Para isso, o controle de compactação é essencial para garantir capacidade de suporte e estanqueidade à camada executada.

Como pode ser verificado no detalhamento da Figura 2, a camada de suporte e regularização, objeto deste estudo, foi executada com solo compactado por processo mecanizado convencional com rolo pé-de-carneiro,

operado por etapas. As camadas finais de solo compactado apresentaram, em média, 0,30 m de espessura. Acima desta regularização, uma geomembrana de PEAD de 1,5 mm foi aplicada, tendo ainda uma camada de geotêxtil não-tecido e outra de solo compactado, para proteção dos materiais geossintéticos, com processo mecanizado em rolo vibratório.

Essas camadas são utilizadas para proteção ambiental da base da área ampliada, mostrada na Figura 1. Os materiais geossintéticos tem um alto controle tecnológico no seu processo de fabricação, garantindo desempenho satisfatório de diversas propriedades no quesito da permeabilidade (Bosco, 2008). No entanto, as camadas de solo compactados necessitam de controle de suas propriedades geomecânicas no processo de execução. Para tal, é necessário realizar a caracterização dos materiais utilizados.

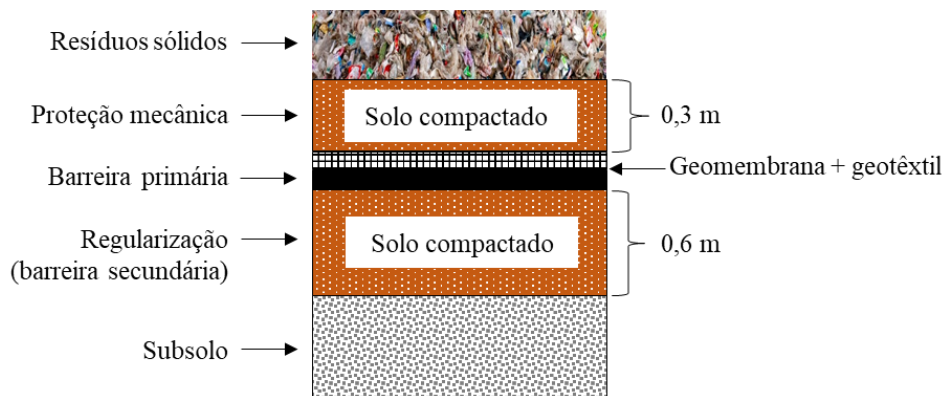


Figura 2 – Representação da composição da camada de base da célula em expansão do ASCG.
 Fonte: adaptado de Benjamin (2022)

2.3 Caracterização do solo

Amostras do solo, utilizado na execução das camadas de base descritas anteriormente, foram coletadas na área de ampliação do ASCG e levadas ao Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) para caracterização geotécnica, de acordo com os ensaios descritos na Tabela 1. Os solos coletados passaram por processos de homogeneização, quarteamento, secagem e destorroamento, seguindo as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 2016a), para cada ensaio especificado.

Ressalta-se que esta coleta e caracterização foi etapa prévia à execução da camada compactada, tendo em vista a necessidade de dados do solo para início das atividades de campo, como umidade ótima e máxima massa específica aparente do solo, por exemplo. A caracterização geotécnica foi essencial para controle da compactação do solo

Tabela 1 – Ensaios geotécnicos realizados e respectivas normas.

| Ensaio | Referência |
|-----------------------------|------------------------|
| Massa específica dos grãos | NBR 6458 (ABNT, 2016b) |
| Análise granulométrica | NBR 7181 (ABNT, 2016e) |
| Limite de liquidez (LL) | NBR 6459 (ABNT, 2016c) |
| Limite de plasticidade (LP) | NBR 7180 (ABNT, 2016d) |
| Compactação | NBR 7182 (ABNT, 2016f) |
| Permeabilidade à água | D-5084 (ASTM, 2016) |

2.4 Controle de compactação

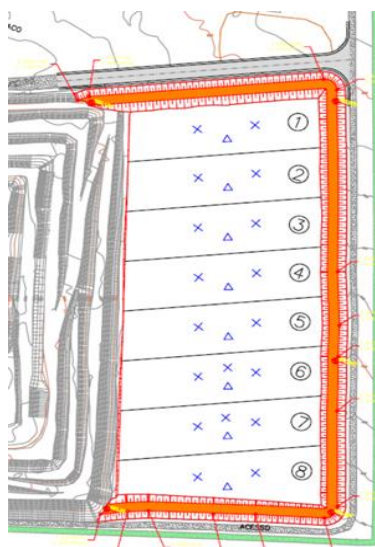
O controle de compactação da execução das camadas de solo, base da célula sanitária, foi realizado de acordo com o processo operacional da obra. Foram lançadas camadas de, no máximo, 20 cm, aradas e umedecidas, para posterior processo de compactação. O processo visou reproduzir as características de desempenho de solo compactado experimentado em laboratório.

Foram realizados ensaios de controle de compactação pelos métodos do frasco de areia e do cilindro de cravação, de acordo com a NBR 7185 (ABNT, 2016g) e a NBR 9813 (ABNT, 2016h), respectivamente. Apesar

do primeiro método ser muito utilizado em camadas de base de pavimentos rodoviários, o uso de dois métodos distintos visa comparar os dados obtidos em locais próximos no processo de execução.

Ao todo, foram realizadas 8 campanhas de ensaios de controle de compactação para a área de ampliação da célula sanitária, conforme mostra a Figura 3.

Em cada campanha foram executados, no mínimo, um ensaio de frasco de areia e dois cilindros de cravação, totalizando 8 e 18 ensaios, respectivamente, e ao todo 26 pontos de controle da camada. Os ensaios foram realizados durante os meses de abril e maio de 2022, em um período de chuvas esparsas.



Legenda: X – Cilindro de cravação Δ – Frasco de areia

Figura 3 – Representação ilustrativa da distribuição das campanhas de ensaios no solo da camada de regularização.
Fonte: adaptado de Benjamin (2022)

Os dados obtidos foram analisados com auxílio da estatística descritiva no software Excel, e posteriormente compilados e tratados para geração de um mapa de isolinhas com os valores do grau de compactação representativo da camada de solo estudada. Com isso, foi possível analisar eventuais regiões de vulnerabilidade de percolação de efluentes, direcionando cuidados na selagem das juntas dos geossintéticos e controle de rasgos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do solo

O solo empregado na execução da camada de suporte da geomembrana apresenta a composição granulométrica e índices de consistência indicados na Tabela 2.

Tabela 2 – Percentuais das frações granulométricas e índices de consistência do solo.

| Pedregulho | Areia | Silte | Argila | LL | LP |
|------------|-------|-------|--------|----|----|
| 14 | 54 | 19 | 13 | 22 | 19 |

O solo foi classificado como uma areia siltosa (SM), segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), descrito pela norma D2487 (ASTM, 2000). Nota-se que este material apresenta uma baixa plasticidade, que pode ser explicada pela predominância da fração grossa (68%) diante dos finos (32%).

A Tabela 3 apresenta os valores da massa específica dos grãos do solo, da massa específica aparente seca, da umidade ótima e do coeficiente de permeabilidade à água à temperatura de 20°C, obtidos com o solo compactado na energia de Proctor Normal. Essa mesma energia foi utilizada na compactação do solo no ASCG, e os valores citados foram tomados como referência para o controle de qualidade da compactação do solo.

Tabela 3 – Índices físicos do solo.

| γ | $\gamma_{d,máx}$ | w_{ot} | $k_{20^{\circ}C}$ |
|-------------------|-------------------|----------|----------------------|
| g/cm ³ | g/cm ³ | % | m/s |
| 2,67 | 1,96 | 11,6 | $5,97 \cdot 10^{-8}$ |

γ : massa específica dos grãos; $\gamma_{d,máx}$: massa específica aparente seca máxima, obtida pelo ensaio de compactação com Proctor Normal; w_{ot} : umidade ótima, obtida pelo ensaio de compactação com Proctor Normal; $k_{20^{\circ}C}$: coeficiente de permeabilidade à água a 20°C.

Com relação à permeabilidade à água, o solo apresentou coeficiente de $5,97 \cdot 10^{-8}$ m/s. Apesar de indicar baixa permeabilidade, o valor é superior ao limite recomendado pela NBR 13.896 (ABNT, 1997), que trata da utilização de solos para revestimento de base de aterros sanitários. Isso implica que, em um eventual escape de lixiviado através da geomembrana, o solo compactado poderá estar vulnerável ao deslocamento da pluma de contaminação pelo fluxo de lixiviado.

3.2 Controle de compactação

A maior parte dos ensaios de controle da compactação do solo foram realizados pelo método do cilindro de cravação, em razão do menor tempo de execução. Na prática, isso significou maior celeridade na tomada de decisão quanto à liberação ou não do trecho compactado.

Nos ensaios de campo com o método do frasco de areia, todos os valores de umidade obtidos estavam abaixo da umidade ótima de compactação, enquanto que nos ensaios com o cilindro de cravação apenas duas vezes a umidade obtida esteve acima do valor ótimo. Como o ASCG se localiza em região semiárida, a insolação presente influencia diretamente na retenção de umidade das camadas superficiais de solo. Além do mais, como o frasco de areia demanda mais tempo de execução, percebeu-se que isso resultou em maior perda de umidade do solo comparado com o método do cilindro de cravação, que é mais rápido. Inclusive, a predominância de solos grossos influencia também na baixa capacidade de retenção de líquidos pelo solo compactado.

A Figuras 4a e 4b mostram histogramas dos valores do grau de compactação das camadas, obtido pelos métodos de cilindro de cravação e frasco de areia, respectivamente.

De acordo com a curva de distribuição normal dos dados, mostrada no histograma da Figura 5, verifica-se que 95% dos dados estão num intervalo de GC de 89,7 a 97,0%, apresentando $GC_{médio}$ de 93,3%. Já para o método do frasco de areia (Figura 6), 95% dos dados ficam entre 90,6 e 105,66%, com $GC_{médio}$ de 98,1%.

A média dos valores foi satisfatória para os dois métodos, embora boa parte dos dados estejam abaixo do GC pretendido ($GC=95\%$). Como há considerável variabilidade espacial e temporal nos dados dos solos, percebe-se ser natural que os dados apresentem tal amplitude. Percebe-se, ainda, que o método do frasco de areia representa valores mais próximos do desempenho do GC ideal. No entanto, deve-se levar em consideração as relevantes perdas de umidade do ensaio de frasco de areia, que pode ter afetado na obtenção do peso específico aparente seco da camada por este método.

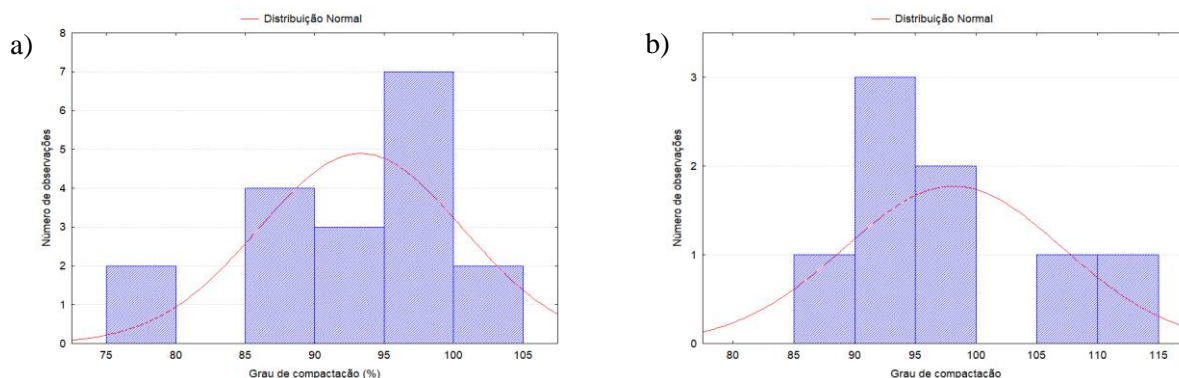


Figura 4 – Histograma dos valores do grau de compactação obtido para o método: a) do cilindro de cravação; b) do frasco de areia

A Figura 5 apresenta os valores, espacialmente distribuídos, referente ao grau de compactação da camada de regularização pelos dois métodos de ensaio (cilindro de cravação e frasco de areia).

Ao longo do período de monitoramento da camada, pode-se observar zonas de menor grau de compactação nas primeiras campanhas (1, 2, 3 e 4), com valores em torno de 90% e com zonas críticas de até 80%, como observado na Figura 6. Essas zonas com menor grau de compactação podem estar mais vulneráveis à percolação de contaminantes, pois a eficiência do grau de compactação pode reduzir a permeabilidade do solo ao lixiviado, conforme constatado por Naves (2019).

A superfície do solo compactada apresentou uma textura irregular (pedregulhos, pedriscos, entre outros), com a existência de possíveis zonas de pressão na geomembrana. Essa condição contribui para a ocorrência de furos, sendo o dano por punção como um dos mais recorrentes, conforme observado nas geomembranas do CTR (Centro de Tratamento de Resíduos)-Rio por Zidan e Frigo (2018).

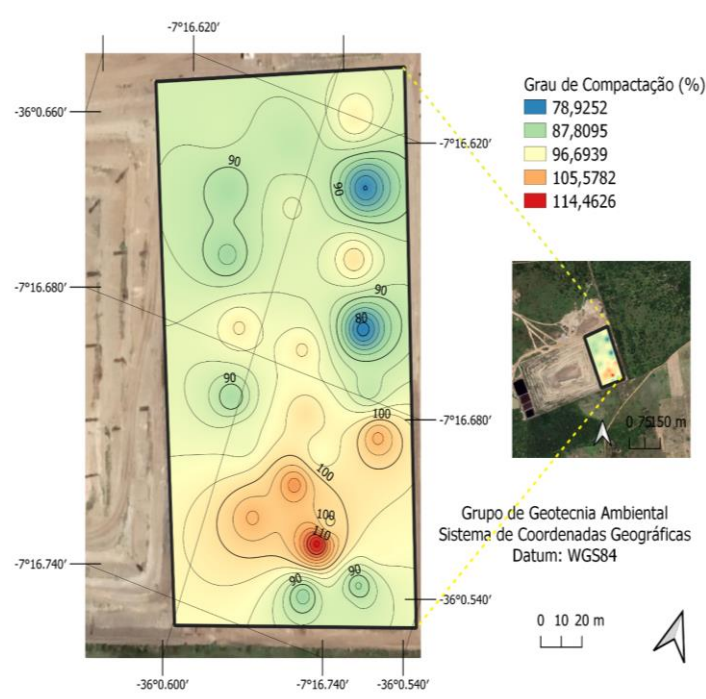


Figura 5 – Distribuição espacial dos valores do grau de compactação obtido pelos dois métodos empregados

4 CONCLUSÃO

Os métodos para verificação do controle de compactação em camada de regularização de base de aterros sanitários são essenciais para garantir capacidade de suporte e estanqueidade, caso haja rasgos nas mantas geossintéticas.

O controle de compactação da camada de regularização, utilizando o cilindro de cravação, apresentou-se como um método rápido e preciso quando comparado ao método do frasco de areia. Além disso, o método do cilindro de cravação é tido como de baixo custo e reflete também em menor custo com mão de obra especializada.

Neste trabalho, verificou-se que os dados ofertados pelo método do frasco de areia nem sempre correspondem aos valores reais, podendo superestimar o grau de compactação. O cilindro de cravação fornece bom controle da umidade, por ser um método rápido e simples.

Os métodos, apesar de distintos, podem ser utilizados de forma combinada para estimar um grau de compactação médio em cada zona compactada, sugerindo assim regiões para correções durante o processo de execução das camadas e auxiliando na tomada de decisões.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457: *Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a. 10 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6458: *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b. 10 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: *Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c. 5 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: *Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d. 3 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: *Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016e. 12 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: *Compactação -Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016f. 9 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7185: *Solo – Determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016g.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9813: *Solo – Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego do cilindro de cravação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016h.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13.896: *Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2487-00: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. 2000.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D5084-16a: *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*. 2016.
- Benjamin, C. V. *Projeto executivo – ampliação do Aterro Sanitário de Campina Grande – PB*. São Paulo, 2022.
- Boskov, M. E. G. *Geotecnia ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- Hamada, J.; Calças, D. A. N. Q. P.; Ciacheti, H. L. *Influência da compactação de um solo arenoso na infiltração e retenção de carga orgânica de chorume*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 9, n. 3, 7p., 2004.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades. 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/campina-grande/panorama>>. Acesso 21 setembro 2022.
- Kowalczyk, S.; Maslakowski, M.; Tucholka, P. *Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction*. Journal of Applied Geophysics. v. 110, 8p. 2014
- Leme, M. A. G.; Miguel, M. G. *Permeability and retention to water and leachate of a compacted soil used as liner*. Water Air Soil Pollut, v. 229, n. 374, 19p., 2018.
- Naves, L. C. *Influence of soil compaction on the production and potential pollution of leachate of urban solid waste*. Engenharia Sanitária e Ambiental. v. 24, 10p., 2019.
- Pinto, C. S. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*, 3ª ed.. São Paulo: Oficina de textos, 2006.
- Pandey, L.; Shukla, S.. *Effect of state of compaction on the electrical resistivity of sand-bentonite lining materials*. Journal of Applied Geophysics. v.155. 9p., 2018.
- RIMA - RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL. Projeto de implantação de um aterro sanitário para resíduos sólidos no município de Campina Grande – PB. 2010.
- Vaillant, J. M. M.; Silva, L. A.; Teicianelli, G. R. *Avaliação do grau de compactação de solos com uso da condutividade elétrica*. Geotecnia. n. 134, 14p., 2015.
- Zidan, P. M.; Frigo, L. P. A.. *Soil Survey: Metodologia Inovadora no Brasil, adotada pela CTR-Rio, para Controle de Qualidade da Instalação de Geomembranas*. XIX Congresso de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 2018.