DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/63

Aplicação de biocarvões de açaí e de madeira para melhoramento de características geotécnicas de camadas de cobertura de aterros sanitários

Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque Almeida1
Docente, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Brasil, alice.almeida@ufma.br

Antônio Italcy de Oliveira Júnior
Engenheiro Geotécnico, Quanta Consultoria, Fortaleza, Brasil, antonioitalcy@hotmail.com

Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz
Docente, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Brasil, priscilaluz@ufma.br

Maurício Alves da Motta Sobrinho
Docente, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, mauricio.motta@ufpe.br

José Fernando Thomé Jucá
Docente, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, jucah@ufpe.br

RESUMO: Um problema crescente em aterros sanitários em que não há um eficiente sistema de captação e drenagem é a emissão descontrolada de gases provenientes do processo de biodegradação da matéria orgânica. Estes gases na atmosfera são um dos principais fatores que contribuem para o desequilíbrio do efeito estufa. Como forma de diminuir o impacto e a emissão de gases fugitivas é necessário que as camadas de cobertura dos aterros sanitários funcionem como uma barreira protetora capazes de reter a saída destes gases. Avaliando também sobre o aproveitamento de resíduos e promoção da economia circular, o presente trabalho realizou a produção de biocarvões provenientes de biomassa de resíduos de açaí e de madeira para aplicação em solos de camadas de cobertura de aterros sanitários. Os biocarvões foram produzidos com o uso de um gaseificador e posteriormente foi realizado a mistura desses biocarvões (relação 3% em massa/massa) com solo natural (classificado como areia silto-argilosa). A aplicação dos diferentes biocarvões no solo promoveram alterações na curva granulométrica das amostras, aumentando a parcela de finos, favorecendo assim a permeabilidade das camadas de cobertura e retenção de gases. O estudo revelou que a aplicação dos biocarvões também favoreceram outras características do solo, como os índices de consistência (aumento nos limites de liquidez e de plasticidade). Ainda foi constatado a diminuição na massa específica real dos grãos das amostras com os diferentes biocarvões. Conclui-se que a aplicação dos diferentes biocarvões colaboraram para que houvesse melhoramento das características geotécnicas do solo em questão o que corrobora a sua aplicação em camadas de cobertura de aterro sanitários, garantindo assim melhoria geotécnica da camada bem como incremento da capacidade de retenção de gases assegurada pelas propriedades de adsorção dos biocarvões.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros sanitários urbanos, Emissões de biogás, Camadas de cobertura finais, Biocarvão.

ABSTRACT: Uncontrolled gas emissions from sanitary landfills lacking efficient gas collection systems represent a significant environmental challenge, contributing to greenhouse gas accumulation and climate imbalance. Landfill cover layers play a crucial role as protective barriers to mitigate fugitive gas emissions. In line with waste valorization strategies and circular economy principles, this study investigates the application of biochars produced from açaí residue biomass and wood biomass as soil amendments for landfill cover layers. Biochars were produced using a gasification process and incorporated into a natural soil classified as silty-clayey sand at a proportion of 3% (mass/mass). The effects of biochar addition on the geotechnical properties of the soil were evaluated. Results indicated modifications in the grain size distribution, with an increase in the fine fraction, enhancing permeability and gas retention potential. Improvements in soil

consistency were also observed, with increased liquid and plastic limits. Furthermore, a reduction in the real specific gravity of soil grains was identified in biochar-amended samples. The findings demonstrate that the incorporation of biochars improves the geotechnical behavior of landfill cover soils while enhancing gas retention capacity through adsorption mechanisms. Therefore, the use of biochars derived from residual biomass presents a sustainable and effective alternative for improving landfill cover systems.

KEYWORDS: Urban sanitary landfills; Biogas emissions; Final cover layers; Biochar.

1 INTRODUÇÃO

Os produtos florestais não madeireiros desempenham papel fundamental na subsistência de milhões de famílias na região amazônica brasileira, constituindo uma importante fonte de renda e desenvolvimento socioeconômico local. Estima-se que aproximadamente 6 milhões de famílias dependam diretamente da extração, do consumo e da comercialização desses produtos, dentre os quais se destacam a borracha natural, a castanha-do-Brasil e o açaí. Este último tem apresentado expressivo crescimento de produção e consumo, representando cerca de 17% da renda familiar amazônica em 2018, além de alcançar crescente popularidade e diversificação de aplicações no Brasil e no mercado internacional (Lopes et al., 2019).

O avanço da cadeia produtiva do açaí resulta, entretanto, na geração expressiva de resíduos sólidos, especialmente os caroços, cujo descarte inadequado pode ocasionar impactos ambientais e riscos à saúde pública. Para além dessa problemática, observa-se também a elevada geração de resíduos provenientes de atividades de manutenção urbana, como as podas de árvores, que produzem grandes volumes de material lignocelulósico e demandam tratamento e destinação ambientalmente adequados (Grohmann; Prosperi; Menconi, 2020). Tradicionalmente, parte desses resíduos é encaminhada para aterros sanitários, onde o tratamento busca a mitigação de danos ambientais e sanitários (Costa et al., 2018). No entanto, a tendência global tem sido a redução da disposição final, priorizando estratégias de reuso, reciclagem e valorização química, térmica ou energética, em consonância com os princípios da sustentabilidade e da economia circular.

No contexto brasileiro, embora os aterros sanitários ainda representem o principal destino dos resíduos sólidos urbanos, conforme estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei nº 12.305/2010), essa alternativa apresenta limitações, como a redução da vida útil das estruturas e a necessidade de soluções tecnicamente eficientes para o controle ambiental. Dentre os principais desafios associados aos aterros sanitários, destacam-se a geração e a emissão de gases oriundos da biodegradação da matéria orgânica, o que reforça a importância do adequado desempenho das camadas de cobertura final, responsáveis tanto pela estabilidade geotécnica quanto pela mitigação da migração de gases para a atmosfera.

Nesse cenário, a valorização de resíduos por meio da produção de biocarvão surge como uma alternativa inovadora e ambientalmente sustentável, promovendo a ressignificação do conceito de rejeito e sua inserção em novas cadeias produtivas (Matrapazi; Zabaniotou, 2020). Os biocarvões obtidos a partir de resíduos de açaí e de madeira provenientes de podas apresentam propriedades físico-químicas relevantes, como elevada porosidade e capacidade de adsorção, tornando-se materiais promissores para aplicações ambientais. A incorporação desses materiais em solos utilizados em camadas de cobertura de aterros sanitários destaca-se como uma solução que alia o aproveitamento de resíduos ao melhoramento das características geotécnicas, contribuindo para o controle de emissões gasosas e para o desempenho estrutural das camadas de cobertura.

Dessa forma, o presente estudo avalia a aplicação de biocarvões produzidos a partir de resíduos de açaí e de madeira de poda no melhoramento das propriedades geotécnicas de solos empregados em camadas de cobertura de aterros sanitários, fortalecendo estratégias de sustentabilidade, economia circular e inovação tecnológica no âmbito da engenharia geotécnica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os resíduos de açaí utilizados nesta pesquisa foram coletados na feira Bandeira Branca, no município de Belém (PA). Após a coleta, os caroços de açaí passaram por secagem natural ao sol por quatro dias. Em seguida, o material foi transportado para a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), onde foi posteriormente carbonizado no Laboratório de Carvão Ativado da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), utilizando um gaseificador de leito fixo, com capacidade térmica de 8 kWh e fluxo de ar descendente. Para a produção do biocarvão de madeira foi utilizado resíduos de poda provenientes da Universidade Federal da Paraíba, local onde foi produzido os biocarvões. O processo de produção do biocarvão de resíduos de madeira também foi feito com o uso de um gaseificador, entretanto o equipamento utilizado é de maior dimensão e capacidade térmica de 32kWh. O solo utilizado na pesquisa foi coletado em uma jazida localizada na Central de Tratamento de Resíduos de Pernambuco (CTR-PE), no município de Igarassu-PE, integrante da Região Metropolitana do Recife (Latitude: 07°43'14,61" S; Longitude: 34°56'34,52" W). Para a definição da proporção de biocarvão para a quantidade de solo, foram avaliados trabalhos presentes na literatura, tendo sido utilizada como base a pesquisa de Huang et al. (2019), que também fez uso de biocarvão em camadas de cobertura de aterros sanitários, tendo como melhor resultado na remoção de CH_4 a proporção de 15% em volume, que representou uma proporção em massa de 2,49-2,78% de biocarvão. Como forma de padronizar as misturas e facilitar a sua implantação, nesta pesquisa foi utilizada uma proporção de 17,5% em volume, o que correspondeu a 3% de biocarvão em massa de solo para todos os ensaios realizados. Após a separação dos materiais foram realizadas a mistura e homogeneização do solo com os respectivos biocarvões a uma proporção de 1:0,03 de solo e biocarvão, tanto para o de açaí como para os resíduos de madeira. As amostras foram divididas em 3 tipos:

- Solo Natural
- Mistura SBA: Solo + biocarvão de açaí
- Mistura SBM: Solo + biocarvão de resíduos de madeira

Em seguida, foram realizados ensaios conforme normas técnicas nacionais e internacionais, visando à caracterização física e à determinação das propriedades geotécnicas do solo natural e das misturas. Para a classificação dos materiais segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), bem como para a avaliação das demais propriedades geotécnicas, foram executados os seguintes ensaios, conforme as normas da ABNT: NBR 6457:2024 – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade; NBR 7181:2025 – Análise granulométrica; NBR 6459:2025 – Determinação do limite de liquidez; NBR 7180:2025 – Determinação do limite de plasticidade; e NBR 6508 – Determinação da massa específica dos grãos do solo (ABNT, 2024; 2025).

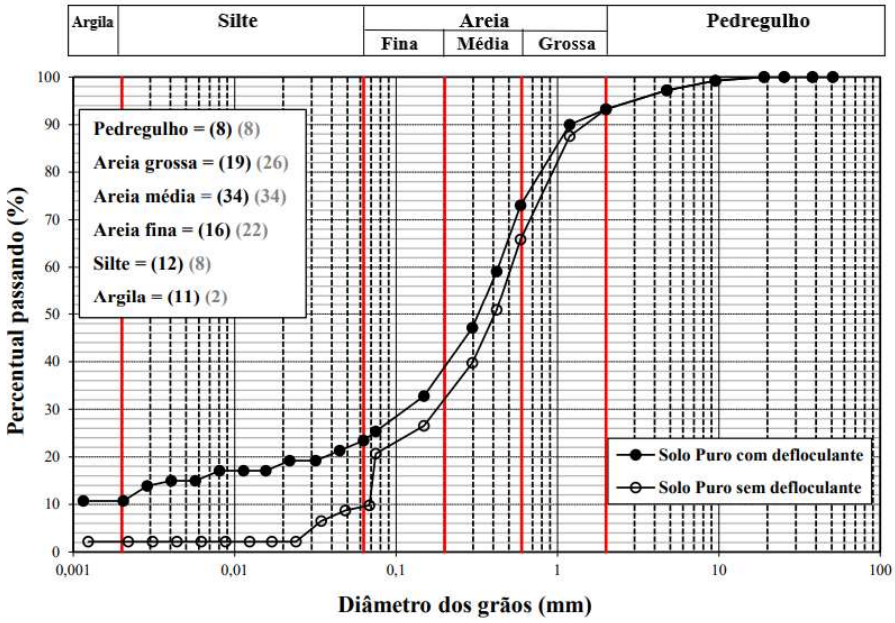
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1Análise Granulométrica

Os resultados obtidos para os ensaios de granulometria estão apresentados a seguir para as amostras de Solo natural, Mistura SBA e Mistura SBM. Para todas as amostras os ensaios foram realizados com defloculante e com dispersor (com a finalidade de verificar a dispersividade das amostras ensaiadas) e sem defloculante e sem dispersor.

• Solo Natural

A Figura 1 apresenta o gráfico da distribuição granulométrica do solo natural.



Legenda: Número em preto correspondente ao valor em % de cada componente com defloculante e em cinza sem defloculante

Figura 1. Curva granulométrica do Solo Natural – com e sem defloculante

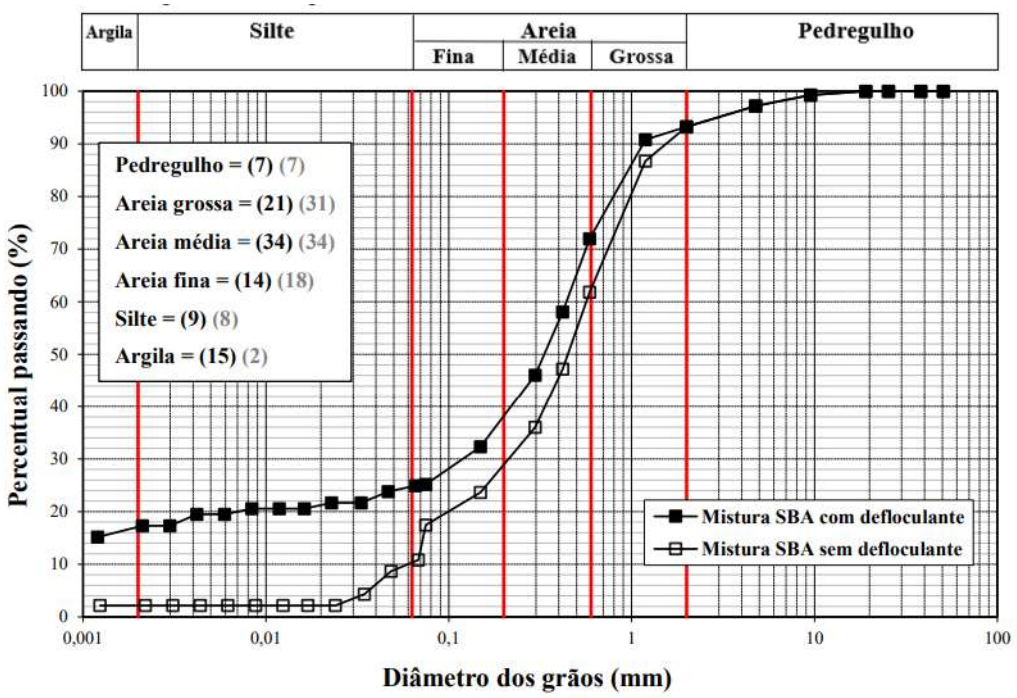
A análise da curva granulométrica com uso de defloculante resultou em valores de D30 iguais a 0,115 mm e D60 iguais a 0,30 mm, não sendo possível determinar o D10 devido à presença de partículas argilosas com dimensões inferiores a 0,001 mm, limite mínimo do ensaio de sedimentação. Dessa forma, não foi possível calcular o coeficiente de não uniformidade (CNU) e o coeficiente de curvatura (CC) para essa condição.

Já a curva granulométrica sem defloculante apresentou valores de D10, D30 e D60 iguais a 0,068 mm, 0,15 mm e 0,50 mm, respectivamente, resultando em CNU de 7,35 e CC de 0,66. O valor de CNU indica ampla distribuição dos tamanhos das partículas; entretanto, o valor de CC inferior a 1 evidencia descontinuidade na distribuição granulométrica, não atendendo aos critérios para classificação como areia bem graduada. Segundo a classificação granulométrica adotada pela ABNT, o solo natural é classificado como areia silto-argilosa. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o material foi classificado como SM (areia siltosa), de baixa plasticidade**.**

• Mistura SBA

O ensaio de granulometria para a mistura SBA é apresentado na Figura 2, tendo sido também avaliados o comportamento do material com e sem defloculante.

A curva granulométrica obtida com o uso de defloculante apresentou valores de D30 iguais a 0,114 mm e D60 iguais a 0,42 mm, não sendo possível determinar o D10, o que inviabilizou o cálculo dos coeficientes de não uniformidade (CNU) e de curvatura (CC). Na análise sem defloculante, os valores de D10, D30 e D60 foram de 0,06 mm, 0,21 mm e 0,58 mm, respectivamente, resultando em CNU de 9,66 e CC de 1,27. Esses valores indicam ampla distribuição dos tamanhos das partículas e distribuição granulométrica contínua, atendendo aos critérios para uma areia bem graduada. Segundo a terminologia da ABNT, o material é descrito como areia argilo-siltosa. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o material foi classificado como SC (areia argilosa), de baixa plasticidade.

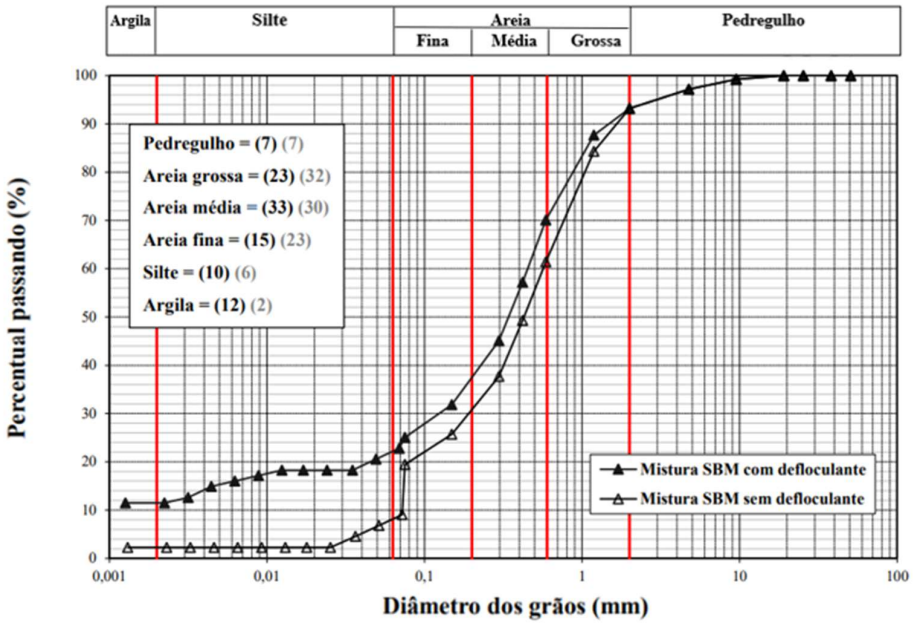


Legenda: Número em preto correspondente ao valor em % de cada componente com defloculante e em cinza sem defloculante

Figura 2. Curva granulométrica da Mistura SBA – com e sem defloculante

• Mistura SBM

Para a mistura SBM foram realizados os mesmos procedimentos, seguindo as diretrizes do normativo e na Figura 3 é apresentado o resultado da curva granulométrica com e sem defloculante.



Legenda: Número em preto correspondente ao valor em % de cada componente com defloculante e em cinza sem defloculante

Figura 3. Curva granulométrica da Mistura SBM – com e sem defloculante

A curva granulométrica com uso de defloculante apresentou D30 de 0,117 mm e D60 de 0,45 mm, não sendo possível determinar o D10, o que impossibilitou o cálculo dos coeficientes de não uniformidade (CNU) e de curvatura (CC). Na condição sem defloculante, os valores de D10, D30 e D60 foram de 0,07 mm, 0,199 mm e 0,59 mm, resultando em CNU de 8,42 e CC de 0,96. Embora o valor de CNU indique ampla distribuição dos tamanhos das partículas, o valor de CC inferior a 1 evidencia descontinuidade na distribuição granulométrica, não atendendo aos critérios para classificação como areia bem graduada. Segundo a terminologia da ABNT, o material é descrito como areia argilo-siltosa. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o material foi classificado como SC (areia argilosa), de baixa plasticidade.

O solo natural apresentou massa específica real dos grãos de 2,652 g/cm³ e índice de plasticidade de 6%, sendo classificado como fracamente plástico. Com a incorporação do biocarvão de açaí (SBA), observou-se redução da massa específica real dos grãos para 2,574 g/cm³ e aumento do índice de plasticidade para 8%, caracterizando um solo medianamente plástico. De forma semelhante, a mistura com biocarvão de resíduos de madeira (SBM) apresentou massa específica real dos grãos de 2,506 g/cm³ e índice de plasticidade de 9%, mantendo a classificação como solo medianamente plástico.

A redução da massa específica real dos grãos nas misturas contendo biocarvão está associada à baixa densidade e à elevada porosidade desse material, que substitui parcialmente a fração mineral do solo. Esse comportamento é comumente relatado na literatura, sendo atribuído à estrutura altamente porosa do biocarvão e à sua menor massa específica em relação às partículas minerais do solo, este comportamento também foi verificado em Reddy et al., (2015), Kumar et al., (2021) e Manahiloh et al., (2025). A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados de caracterização física e geotécnica das amostras analisadas.

Tabela 1. Resumo dos resultados de caracterização de todas as amostras

Material		Solo Natural	Mistura SBA	Mistura SBM
Granulometria (%)	Argila	11	15	12
	Silte	12	9	10
	Areia Fina	16	14	15
	Areia Média	34	34	33
	Areia Grossa	19	21	23
	Pedregulho	8	7	7
Índice de Consistência (%)	LL	22	25	26
	LP	16	17	17
	IP	6	8	9
Massa específica real dos grãos (g/cm³)		2,652	2,574	2,506

Legenda: LL: Limite de liquidez – LP: Limite de Plasticidade – IP: Índice de Plasticidade.

A análise das amostras ensaiadas evidenciou redução da massa específica real dos grãos nas misturas contendo biocarvão, em comparação ao solo natural. A incorporação de biocarvão de açaí resultou em redução de 2,94%, enquanto a adição de biocarvão de resíduos de madeira promoveu uma diminuição de 5,5%. Esse comportamento está associado às propriedades intrínsecas dos biocarvões, especialmente à sua elevada porosidade e menor densidade em relação às partículas minerais do solo. Além disso, observa-se que a mistura SBM apresentou maior redução da massa específica quando comparada à SBA, sugerindo que o biocarvão de resíduos de madeira exerceu maior influência nessa propriedade, possivelmente em razão de diferenças em sua estrutura porosa e composição. Resultados semelhantes foram observados por Van Zwieten et al. (2010) e Sun et al. (2014), que também relataram redução da massa específica dos solos após a incorporação de biocarvão, atribuindo esse comportamento à baixa densidade e à elevada porosidade do material.

Em relação aos índices de consistência, observou-se um discreto aumento do índice de plasticidade após a incorporação dos biocarvões. Esse comportamento pode ser atribuído à elevada área superficial específica, à estrutura porosa e à maior capacidade de retenção de água do biocarvão, fatores que favorecem maior interação entre as partículas do solo e promovem alterações nos limites de Atterberg (Liu et al., 2021). Tendência semelhante foi observada por Manahiloh et al. (2025), que verificaram aumento dos limites de Atterberg e do índice de plasticidade em solos tratados com biocarvão de madeira. Apesar desse incremento, as misturas permaneceram na faixa de baixa a média plasticidade, indicando que a adição de biocarvão promove alterações moderadas nas propriedades de consistência, sem comprometer as características geotécnicas do material.

Sob a perspectiva da aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários, esses resultados são relevantes, pois a redução da massa específica dos grãos pode contribuir para a obtenção de camadas de cobertura mais leves, minimizando problemas relacionados à retração, à formação de fissuras e às variações volumétricas decorrentes dos ciclos de umedecimento e secagem. Dessa forma, os resultados corroboram o potencial do uso de biocarvão como material de melhoria para solos empregados em camadas de cobertura de aterros sanitários, promovendo alterações físicas favoráveis sem comprometer as características geotécnicas necessárias ao desempenho dessas estruturas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a produção de biocarvão a partir de biomassas residuais, que seriam originalmente descartadas, constitui uma alternativa eficiente e sustentável para o aproveitamento de resíduos de açaí e de madeira provenientes de podas, contribuindo diretamente para a promoção da economia circular. A valorização desses materiais e sua inserção em cadeias produtivas ampliam o potencial de aplicação do biocarvão, destacando-se seu elevado desempenho como material adsorvente, inclusive para uso em camadas de cobertura de aterros sanitários voltadas à retenção de gases.

Do ponto de vista físico e geotécnico, para as condições analisadas, a incorporação de biocarvão, tanto de açaí quanto de resíduos de madeira, promoveu aumento da fração de finos e redução da massa específica real dos grãos em relação ao solo natural. Em relação aos limites de consistência, observou-se elevação dos limites de liquidez e de plasticidade, indicando que solos tratados com biocarvão demandam maior teor de umidade para atingir os estados plástico e líquido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 6457. *Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 6459. *Solos – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6508. *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7180. *Solos – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

Brasil (2010). Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br. Acesso em: 09 jan. 2026.

Costa, M. D.; Mariano, M. O. H.; Araujo, L. B.; Jucá, J. F. T. (2018). Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23 (1), p. 77–90.

Grohmann, D.; Prosperi, F.; Menconi, M. E. (2020). Tilia sp.'s pruning residues wood panels for thermal insulation. In: *Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction*. Elsevier, p. 129–148.

Huang, D; Yang, L; Ko, J. H; Xu, Q. *Comparison of the methane-oxidizing capacity of landfill cover soil amended with biochar produced using different pyrolysis temperatures*. Science of The Total Environment, [S. l.], v. 693, p. 133594, 2019.

Hussain, R.; Ghosh, K. K.; Ravi, K. Impact of biochar produced from hardwood of mesquite on the hydraulic and physical properties of compacted soils for potential application in engineered structures. *Geoderma*, v. 385, p. 114836, 2021.

Liu, Z.; Chen, X.; Jing, Y.; Li, Q.; Zhang, J.; Huang, Q.; Cai, Z. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops. *Soil and Tillage Research*, v. 205, p. 104798, 2021.

Lopes, E.; Soares-Filho, B.; Souza, F.; Rajão, R.; Merry, F.; Carvalho Ribeiro, S. (2019). Mapping the socio-ecology of Non Timber Forest Products (NTFP) extraction in the Brazilian Amazon: The case of açaí (*Euterpe precatoria* Mart) in Acre. *Landscape and Urban Planning*, 188, p. 110–117.

Manahiloh, K. N.; Fetene, S. M.; Detwiler, E. *Effect of Wood-Based Biochar on the Engineering Properties of Medium Plasticity Clay*. Geosciences, v. 15, n. 11, 430, 2025.

Matrapazi, V. K.; Zabaniotou, A. (2020). Experimental and feasibility study of spent coffee grounds upscaling via pyrolysis towards proposing an eco-social innovation circular economy solution. *Science of the Total Environment*, 718, 137316.

Reddy, K. R.; Yaghoubi, P.; Yukselen-Aksoy, Y. *Effects of biochar amendment on geotechnical properties of landfill cover soil*. Waste Management, v. 40, p. 96–108, 2015.

Sun, S.-N.; Cao, X.-F.; Li, H.-Y.; Xu, F.; Sun, R.-C. (2014). Structural characterization of residual hemicelluloses from hydrothermal pretreated Eucalyptus fiber. *International Journal of Biological Macromolecules*, 69, p. 158–164.

Van Zwieten, L.; Kimber, S.; Morris, S.; Chan, K. Y.; Downie, A.; Rust, J.; Joseph, S.; Cowie, A. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327 (1–2), p. 235–246.