

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Influência da incorporação de biossólido (ETE) nos parâmetros de compressibilidade de um solo arenoso laterítico

Camila Maria Borges

Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, camilaborgesuem@gmail.com

Fabiana Artuso

Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, fabianaartuso@gmail.com

Juliana Azoia Lukiantchuki

Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, jazoia@yahoo.com.br

RESUMO: O biossólido, caracteriza-se como sendo o subproduto do lodo de esgoto que é gerado ao final dos processos de tratamento realizados nas estações de tratamento de esgoto e que frequentemente é destinado à agricultura. Esse subproduto ainda pode apresentar características adequadas para o uso em obras geotécnicas, sendo esta uma nova proposta de destinação desse resíduo. O objetivo desse artigo foi avaliar as características de compressibilidade de misturas de solo arenoso laterítico com o lodo de esgoto estabilizado com cal (biossólido). Foram analisadas amostras de solo, biossólido e misturas em proporções de biossólido em 25%, 50% e 75% em massa seca com solo. O comportamento quanto a compressibilidade dos materiais foi avaliado por meio de ensaios de adensamento unidimensional realizado conforme a NBR 16853. Os resultados indicaram que quanto maior o teor de biossólido maiores são os valores dos coeficientes de compressibilidade. Esse comportamento pode ser relacionado com a composição fibrosa do biossólido estudado.

PALAVRAS-CHAVE: Biossólido, Lodo de Esgoto, Estação de Tratamento de Esgoto, Solo Arenoso Laterítico, Compressibilidade

ABSTRACT: Biosolid is a product of waste sludge generated during the treatment process in wastewater treatment plants and it is frequently destined to agricultural purposes. This product also shows suitable characteristics for the use in geotechnical designs, and it is a new approach for biosolids destination. The aim of this work was evaluated the compressibility parameters of a lateritic sandy soil mixtures with waste sludge stabilized by lime (biosolid). It was evaluated soil samples, biosolid and mixtures using biosolid proportion of 25%, 50% and 75% in terms of dry mass of soil. The compressibility behavior of materials was evaluated using unidimensional compressibility tests performed as NBR 16853. The results show as the higher biosolid content higher as the coefficient of compressibility values. This behavior can be related with the fiber composition of biosolids.

KEYWORDS: Biosolid, Waste Sludge, Wastewater Treatment Plant, Lateritic Sandy Soil, Compressibility

1 Introdução

Durante os processos envolvidos no tratamento da fase líquida dos lodos provenientes das estações de tratamento de esgoto (ETE) são gerados subprodutos como a areia, material gradeado, espuma, lodo primário e lodo secundário (VON SPERLING, 2005). Segundo Van Haandel e Sobrinho (2006), o lodo primário é formado por sólidos do esgoto bruto que se sedimentam, enquanto que o lodo secundário é gerado durante os processos biológicos e é formado por sólidos não-biodegradáveis e massa bacteriana e ambos possuem grande quantidade de matéria orgânica.

A composição e a quantidade de lodo de esgoto gerados são variáveis e dependem do tipo de esgoto e do processo de tratamento adotado. No geral, o lodo é formado por matéria orgânica, nutrientes e patógenos, além da possibilidade de elementos tóxicos e metais pesados (BETTIOL E CAMARGO, 2006). Para que seja feito o correto descarte desse material, é necessário que algumas características sejam alteradas, como por exemplo a instabilidade biológica, que pode tornar o lodo putrescível. Além disso, a qualidade higiênica



também deve ser alterada a fim de que não sejam identificados patógenos prejudiciais à saúde. Por fim, é necessário também retirar a água em excesso do lodo para que seu volume seja reduzido e o seu manuseio se torne mais fácil (HAANDEL E SOBRINHO, 2006).

O grande volume de resíduo gerado pelas estações de tratamento de esgoto ainda é predominantemente descartado na forma de disposição nas células de aterros sanitários. Assim, observa-se que esses resíduos são manuseados da mesma forma que os resíduos sólidos urbanos. Este fato além de promover a diminuição da vida útil do aterro sanitário proporciona uma estrutura mais instável do ponto de vista geotécnico. Isto porque as suas propriedades são amplamente variáveis e ainda não consagradas na literatura. Para este material a reciclagem agrícola vem se apresentando como uma solução de descarte do lodo tratado a longo prazo, tendo um grande potencial como fertilizante e apresentando resultados positivos (VON SPERLING, 2005). No entanto, o lodo de esgoto, antes de sua utilização agrícola, precisa passar por um tratamento eficiente de estabilização e desinfecção. A mistura de cal virgem ao lodo em proporções entre 30% a 50% do peso seco do lodo é um dos métodos de estabilização e desinfecção do lodo de esgoto que possibilita a reciclagem agrícola do lodo tratado. Esse processo eleva a temperatura, em um estágio inicial, e provoca mudança do pH da massa de lodo, reduzindo a presença de agentes patogênicos (SANEPAR, 1999). A Water Environment Federation, em 1994, adotou a definição de biossólido como sendo o produto resultante do processo de tratamento do lodo de esgoto, com características que permitam sua destinação final, também denominado de lodo de esgoto estabilizado (METCALF & EDDY, 2003).

Com o intuito de encontrar outras aplicações do lodo de esgoto, muitas pesquisas (UKWATTA et al, 2015; CUSIDÓ, CREMADES, 2012; KIM et al, 2005; ZHANG et al, 2016; LUCENA et al, 2014; INGUNZA et al, 2014) começaram a ser desenvolvidas para analisar o comportamento do lodo de esgoto como material do setor da construção diferentes formas: in natura, cinza de incineração e biossólido. O uso desse material como substituição total ou parcial dos recursos naturais visa, sobretudo, reduzir a exploração de recursos naturais incorporando soluções sustentáveis a longo prazo. Dessa forma este artigo tem como objetivo analisar a influência do biossólido no comportamento de compressibilidade de um solo arenoso laterítico visando contribuir com o entendimento do efeito da adição desse subproduto no solo natural.

2 Biossólido, solo e misturas

O biossólido utilizado é proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto Alvorada, situada na região Norte da cidade de Maringá, Paraná e sob administração da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR). O biossólido é disponibilizado pela companhia para utilização na agricultura e, por isso, o material passa por estabilização alcalina prolongada (EAP) na qual é adicionado de 30 a 50% de cal em relação a massa de lodo. O solo laterítico analisado na pesquisa foi coletado próximo à cidade de Mandaguaçu, localizada na região Noroeste do estado do Paraná. Coletado em uma camada superficial de solo evoluído, originário do Arenito Caiuá, o solo apresenta textura areno-argilosa e é classificado como latossolo vermelho distrófico. Os materiais foram destorroados e passados na peneira 2 mm.

Os materiais foram misturados em massa seca nas proporções 25%, 50% e 75% de biossólido para análise da influência no comportamento de compressibilidade do solo. A codificação da mistura segue S (solo) seguida da proporção B (biossólido) seguida de sua proporção. Dessa forma, as amostras ensaiadas são: S, S75-B25, S50-B50, S25-B75 e B, sendo S a amostra constituída integralmente por solo e B a amostra de biossólido.

3 Caracterização geotécnica e Compactação

Para os ensaios de caracterização geotécnica do solo, do biossólido e das misturas, as amostras foram preparadas de acordo com a NBR 6457 (1986). A caracterização geotécnica seguiu os procedimentos indicados pelas normas NBR 6508 (1984), NBR 7181 (1984), NBR 6459 (1984) e NBR 7180 (1984) para os ensaios de massa específica real dos grãos, análise granulométrica conjunta, limite de liquidez e limite de plasticidade, respectivamente.

A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos materiais. Observa-se que os valores de massa específica das amostras que possuem teor de biossólido estão variando entre 2,57 g/cm³ e 2,35 g/cm³ e ficaram próximos aos valores encontrados por Prim (2011) de 2,47 a 2,54 g/cm³ e



Pimentel (2012) de 1,96 a 2,46 g/cm³. A massa específica apresentou tendência de reduzir com o incremento do teor de biossólido. Os ensaios de limites de consistência demonstram que o biossólido e as misturas com maior teor de biossólido não apresentaram características plásticas. A ausência de plasticidade nessas misturas se deve ao uso de areia durante o processo de tratamento do lodo de esgoto e que resultou em um material estabilizado (biossólido) com características arenosas.

Tabela 1. Caracterização geotécnica das amostras.

Parâmetro	S	S75-B25	S50-B50	S25-B75	B
Massa específica (g/cm ³)	2,70	2,57	2,46	2,35	2,14
Limite de Liquidez (%)	28	24	-	-	-
Limite de Plasticidade (%)	16	17	-	-	-
Índice de Plasticidade (%)	12	7	-	-	-
% Argila (< 0,002 mm)	28,6	16,0	9,4	4,6	5,5
% Silte (0,002 – 0,06 mm)	4,7	16,7	17,8	17,7	21,7
% Areia Fina (0,06 – 0,2 mm)	40,9	33,7	30,9	25,6	13,2
% Areia Média (0,2 – 0,6 mm)	25,8	30,4	33,6	39,3	41,8
% Areia Grossa (0,6 – 2,0 mm)	0,00	3,2	8,3	12,8	17,8

A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas obtidas nos ensaios de análise granulométrica conjunta. As porcentagens dos materiais constituintes para as diferentes faixas granulométricas definida pela NBR 6502 (1995) estão indicadas na Tabela 1. Com os resultados dos ensaios de caracterização, o solo pode ser classificado como uma areia argilosa (SC); a mistura S75-B25 como uma areia argilosa siltosa (SC-SM); e o biossólido e as misturas S50-B50 e S25-B75 como areia siltosa (SM).

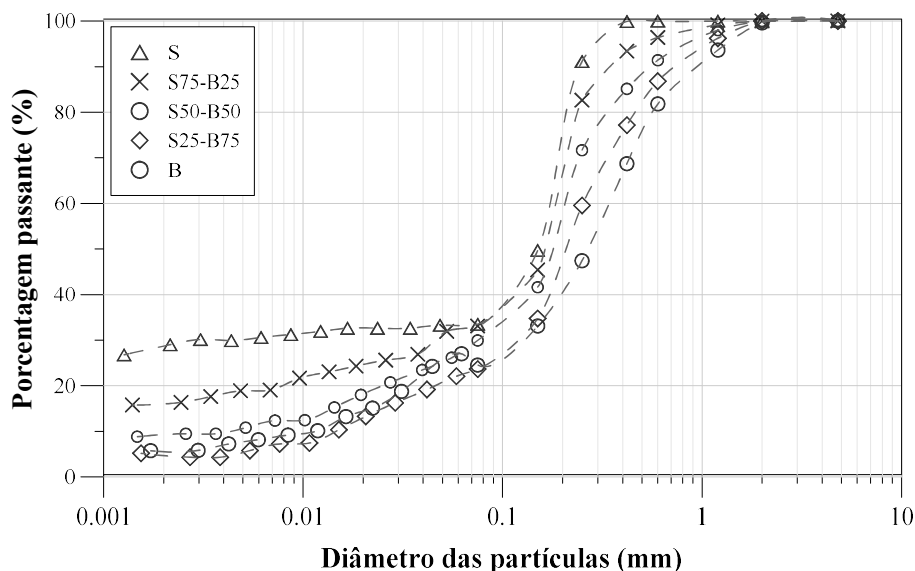


Figura 1. Curva granulométrica das amostras

O comportamento da compactação para as amostras analisadas, utilizando o ensaio realizado na energia Proctor Normal, seguindo procedimento da NBR 7182 (1986) pode ser observado na Figura 2. Os parâmetros de compactação obtidos, para cada um dos materiais analisados, estão apresentados na Tabela 2. A amostra de biossólido (B) apresentou repulsão a adição de água (comportamento hidrofóbico) durante a realização dos ensaios. Desta forma, observa-se que considerando esta dificuldade os pontos da curva de compactação do B apresentou um intervalo de umidade superior a 2%.

É possível analisar a relação entre a massa específica aparente seca máxima, o teor de biossólido e o teor de umidade ótimo. Enquanto a massa específica seca máxima diminui com o incremento de biossólido na



mistura, o teor de umidade ótimo aumenta. Esse comportamento de diminuição da massa específica máxima e aumento no teor de umidade também foi observado por Montalvan (2016) e é explicado por Pimentel (2012) pelo fato da absorção de água dos materiais orgânicos deixarem o solo menos denso. Os resultados apresentaram-se coerentes com os valores de massa específica dos grãos apresentados na Tabela 1.

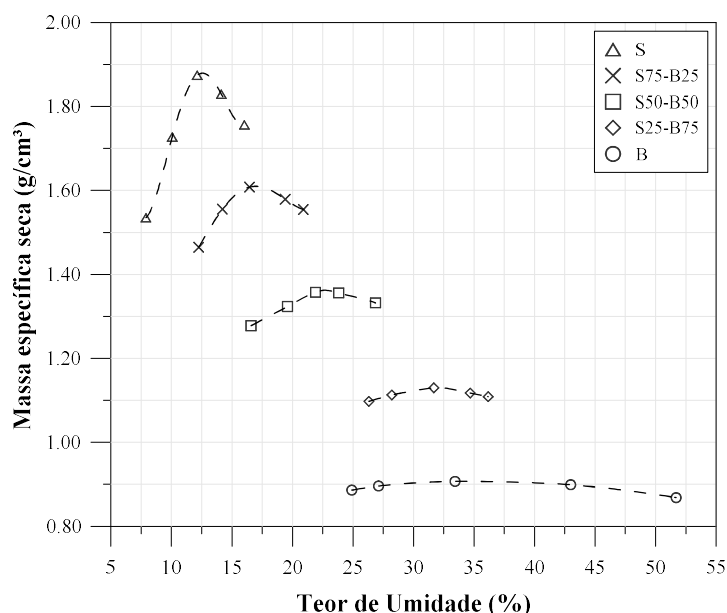


Figura 2. Curvas de compactação

Tabela 2. Parâmetros de compactação.

Parâmetro	S	S75-B25	S50-B50	S25-B75	B
Massa específica aparente seca máxima (g/cm³)	1,88	1,61	1,36	1,13	0,91
Teor de umidade ótimo (%)	12,6	17,0	22,6	31,8	35,3

4 Ensaio de compressibilidade

Para avaliação da compressibilidade das amostras foram realizados ensaios de adensamento unidimensional em corpos de prova compactados através dos parâmetros de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo. Os corpos de prova apresentaram um grau de compactação igual ou maior do que 95% do resultado obtido no ensaio utilizando a energia Proctor Normal. A Tabela 3 apresenta as características iniciais dos corpos de prova como: peso específico aparente seco (ρ_d), teor de umidade inicial (w_i), grau de compactação (GC), desvio entre teor de umidade ótima (Δw_{ot}), índice de vazios inicial (e_0), grau de saturação inicial (S_i) e altura de sólidos (h_s).

Tabela 3. Características dos corpos de prova.

AMOSTRA	ρ_d (g/cm³)	w_i (%)	GC (%)	Δw_{ot} (%)	e_0	S_i (%)	h_s (mm)
S	1,909	12%	101,5%	-0,4%	0,415	80%	1,414
S75-B25	1,606	17%	99,8%	0,5%	0,600	75%	1,250
S50-B50	1,349	23%	99,2%	0,4%	0,824	69%	1,096
S25-B75	1,093	32%	96,7%	0,2%	1,150	65%	0,930
B	0,895	36%	98,4%	1,1%	1,390	56%	0,837



As amostras foram submetidas a tensões de pré-adensamento, referenciadas na NBR 16853 (2020), tentando observar a estabilização dos deslocamentos. Os estágios de carregamento utilizados foram de 40 kPa, 80 kPa, 160 kPa, 320 kPa, 640 kPa, 1285 kPa, 2570 kPa e 51400 kPa e os estágios de descarregamento foram de 1285 kPa, 320 kPa e 80 kPa. Para cada estágio, foram feitas leituras no extensômetro de 1/8min, 1/4min, 1/2min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 60min, 120 min, até que a leitura se estabilizasse ou próximo dessa situação. No caso das misturas de biossólido a estabilização demorou para ocorrer e no caso do biossólido puro nem sempre foi possível observar essa estabilização.

4.1 Resultados

A Figura 4 apresenta as curvas de compressibilidade dos materiais em relação aos índices de vazios, respectivamente. Observa-se que o índice de vazios aumenta com o aumento do teor de biossólido nas misturas. Esse comportamento ratifica o fato de que o biossólido apresenta-se como sendo um material poroso, relacionado sobretudo à sua composição. Na Tabela 3 também é possível observar que no preparo das amostras a incorporação do biossólido proporcionou amostras com maiores índices de vazios.

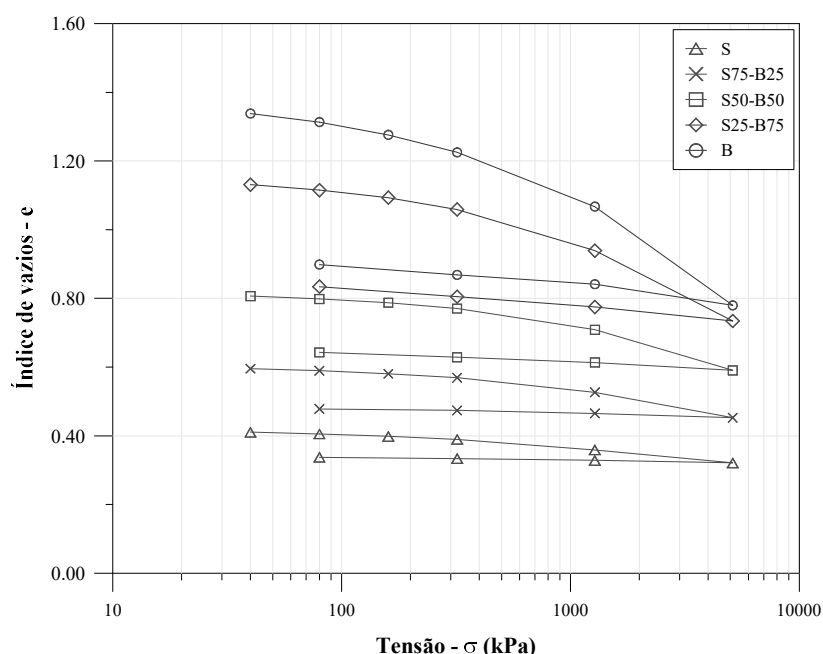
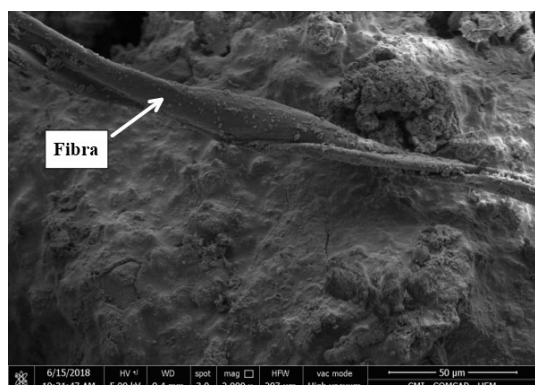


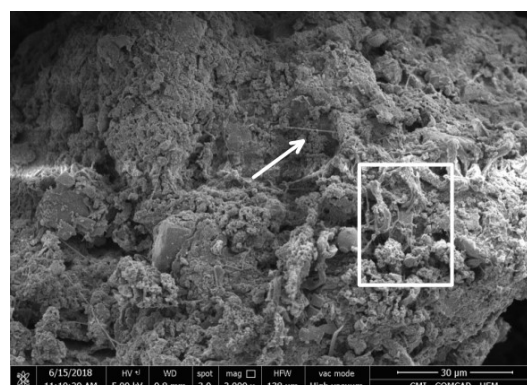
Figura 3. Curva de compressibilidade – Índice de Vazios x Tensão

Durante os ensaios de adensamento, observou-se que as amostras que continham maior teor de lodo se deformavam e as curvas não estabilizavam mesmo quando sujeitas ao carregamento por um período maior que 24h chegando em alguns casos a 72h. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) indicaram na morfologia do material a presença de diferentes tipos de fibras (matriz fibrosa) (Figura 4). Algumas fibras podem estar relacionadas com madeiras, utilizadas no processo de tratamento do lodo, e outras fibras são praticamente invisíveis sendo atribuídas a presença de cabelo humano. Assim, a presença de fibras certamente influenciou diretamente no processo de estabilização das deformações dos materiais. Quando misturado com o solo em proporções iguais (S50-B50) a amostra apresentou um aspecto menos poroso e um arranjo melhor entre os grãos também observado na microscopia eletrônica de varredura (ARTUSO, BORGES E LUKIANTCHUKI, 2019).

A Figura 5 apresenta a curva de adensamento dos materiais para a tensão de 1280 kPa na qual é possível verificar a não estabilização da deformação até períodos superiores a 24 horas. Dessa forma, não foi possível calcular o coeficiente de adensamento vertical dos materiais.



(a) Micrografia para a amostra de biossólido (2000×)



(b) Micrografia para a amostra de biossólido (3000×)

Figura 4. Micrografia para a amostra de biossólido com a indicação da presença de fibras.

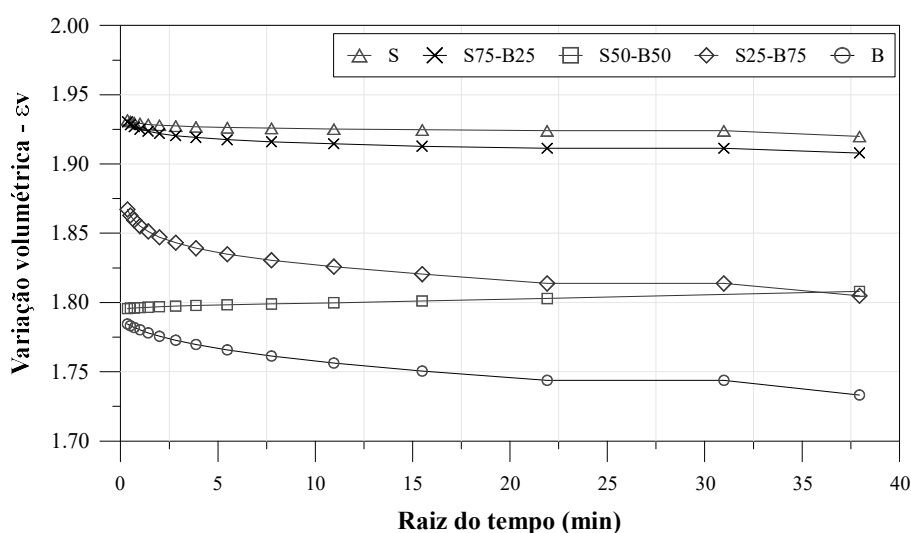


Figura 5. Deformação dos materiais ao longo do tempo de carregamento de 1280kPa

A partir das curvas de compressibilidade obtidas foram determinados a tensão de pré-adensamento (σ'_p), o índice de compressão (C_c) e o índice de recompressão (C_r) para cada material (Tabela 4). Os resultados demonstraram que, conforme esperado, o biossólido é mais compressível que o solo, assim quanto maior o teor de biossólido na amostra maior foi o índice de compressão. O C_c do biossólido apresentou-se cerca de 6,5 vezes maior do que o valor do C_c do solo puro. Os parâmetros encontrados são ligeiramente diferentes dos resultados encontrados por Wang et al (1992), que obtiveram um coeficiente de compressão C_c de 4,04 para uma mistura solo-biossólido na proporção 37,5% e 62,5%, respectivamente. Adicionalmente os valores de C_r e σ'_p também aumentaram com a adição de biossólido. O comportamento observado está relacionado com a presença de fibras no material e as diferenças com os valores da literatura são atribuídas ao método de estabilização do lodo de esgoto, a quantidade de cal utilizada na estabilização do resíduo e as características do solo analisado.

Tabela 4. Parâmetros de compressibilidade dos materiais.

Índice	S	S75-B25	S50-B50	S25-B75	B
σ'_p (kPa)	280	390	450	400	800
C_c	0,063	0,123	0,197	0,340	0,412
C_r	0,006	0,007	0,023	0,048	0,050

5 Conclusão



O presente trabalho apresentou a influência da adição de biossólido em um solo laterítico típico da região Noroeste do Paraná. A pesquisa foi conduzida objetivando-se analisar o emprego de misturas de solo-biossólido para fins de aplicação geotécnica. Os resultados indicaram que a incorporação de biossólido ao solo natural promove o aumento da compressibilidade do material. Adicionalmente observou-se que quanto maior o teor de biossólido maiores são os valores dos coeficientes de compressibilidade e recompressão. A compressibilidade do biossólido está diretamente relacionada com a sua composição, onde observou-se que o material apresenta-se como sendo uma matriz bastante porosa formada por diferentes tipos de fibras. Destaca-se que o emprego do materiais em obras geotécnicas depende de outros tipos de estudos, onde destaca-se a resistência ao cisalhamento dos materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 6459. *Determinação do Limite de Liquidez*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). 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 (1995). NBR 6502. *Rochas e solos*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). NBR 6457. *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). NBR 7180. *Determinação do Limite de Plasticidade*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). NBR 7182. *Solo – Ensaio de compactação*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16853. *Ensaio de adensamento unidimensional*, Rio de Janeiro.
- Artuso, F., Borges, M. C., Lukiantchuki, J. A. (2019) Caracterização geotécnica do biossólido proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) misturado em solo típico do Noroeste do Paraná. In: IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São Carlos, EESC-USP. *Anais ABMS*, p. 315-320.
- Bettiol, W.; Camargo, O. A. (2006) *Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente.
- Cusidó, J. A.; Cremades, L. V. (2012) Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: leachability and toxicity studies. *Waste Management*, v. 32, p.1202-1208.
- Ingunza, M. P. D.; Pereira, K. L. A.; dos Santos Junior, F. O. (2014) Use of Sludge Ash as a Stabilizing Additive in Soil-Cement Mixtures for Use in Road Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 7.
- Kim, E. H.; Cho, J. H.; Ssoobin, Y. (2005) Digested sewage sludge solidification by converter slag for landfill cover. *Chemosphere*, v. 59, n. 3, p. 387-395.
- Lucena, L. C. F. L.; Juca, J. F. T.; Soares, J. B.; Marinho Filho, P. G. T. (2014) Use of wastewater sludge for base and subbase of road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 33, p. 210-219.
- Metcalf & Eddy. Inc (2003). *Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse*. 4. ed. NewYork, McGraw - Hill Book, 1815p.
- Montalvan, E. L. T. (2016) *Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP*. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 133p.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- Pimentel, F. J. G. (2012) *Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de esgoto em camada de cobertura de aterro sanitário*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 216p.
- Prim, E. C. C. (2011) *Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 285p.
- SANEPAR (1999). Companhia de Saneamento do Estado do Paraná. *Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura*. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. PROSAB. Curitiba.
- Ukwatta, A.; Mohajerani, A.; Setunge, S.; Eshtiagui, N (2015). Possible use of biosolids in fired-clay bricks. *Construction and Building Materials*, v. 91, p. 86-93.
- Van Haandel, V. A. C.; Além Sobrinho O, P. (2006) Produção, composição e constituição de lodo de esgoto. In ANDREOLI, C. V. (Coord). *Alternativas de uso de resíduos do saneamento: Biossólidos*. Rio de Janeiro-RJ: ABES, 417p.
- Von Sperling, M. (2005) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. v.1. 3.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 452p.
- Wang, M. C., Hull, J. Q, Jao, M., Dempsey, B. A., Cornwell, D. A. (1992) Engineering behavior of water treatment sludge. *Journal of Environmental Engineering*, v. 118, n. 6, p. 848-864.
- Zhang, H.; Yang, B.; Zhang, G.; Zhang, X. Sewage sludge as barrier material for heavy metals in waste landfill. *Archives of Environmental Protection*, v. 42, n. 2, p. 52-58, 2016.