

RELAÇÃO ENTRE O TEOR DE LODO DE ETA E PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO EM MISTURAS COM SOLO SILTOSO DA REGIÃO DE SANTA MARIA-RS

Eduarda Fração Santos

Mestranda do curso de Engenharia Civil UFSM
eduardafracao@gmail.com

Juliana Scapin

Doutoranda do curso de Engenharia Civil UFSM
juliana.scapin@ufsm.br

Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Prof. Dr. do curso de Engenharia Civil UFSM
rinaldo@ufsm.br

Resumo. *O lodo proveniente de estação de tratamento de água (ETA) é um resíduo sólido cujo descarte representa custos elevados. Assim, pretende-se empregar esse resíduo como material para obras geotécnicas e para isso são necessárias análises das suas propriedades para garantir um bom controle tecnológico e seu emprego correto em obras. Nesta pesquisa foram realizadas misturas com diferentes teores de lodo a um solo da região de Santa Maria. As misturas foram identificadas como SL0 (mistura sem lodo), SL15 (com 15% de lodo) e SL35 (com 35% de lodo). Através dos ensaios de compactação com energia normal verificou-se diminuição das massas específicas aparentes secas máximas que foram de em média 1625,0(SL0); 1450,0(SL15) e 1270,0(SL35) em kg/m³ e aumento nos teores de umidade ótima que atingiram em média 21(SL0); 27,2(SL15) e 35,8(SL35) em porcentagens. Por fim, verificou-se a possibilidade de prever o comportamento de misturas que utilizem os mesmos materiais.*

Palavras-chave: *Lodo de ETA. Misturas. Compactação.*

1. INTRODUÇÃO

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004) o lodo proveniente de sistemas de tratamento de água é classificado como um resíduo sólido e deve ser disposto em aterro de resíduos, a fim de diminuir riscos ao ambiente. O lançamento inadequado do lodo de ETA em corpos hídricos pode provocar vários impactos negativos ao ambiente como aumento da quantidade de sólidos em suspensão, assoreamento, mudança de cor, aumento das concentrações de alumínio ou ferro e aumento da demanda química do oxigênio (CORDEIRO, 1999a e SILVA, 2011).

Porém, a disposição correta do lodo de ETA exige que esse passe por um método secagem, atingindo um teor de sólidos mínimo de 20% (RICHTER, 2001). Essa atividade é usualmente muito dispendiosa e a escolha do método mais eficiente envolve a análise de muitos fatores como a área necessária para implantação, distância da estação até o destino final, condições climáticas, custos de equipamentos, operação, equipe, necessidades de acondicionamento e entre outros fatores. (CORDEIRO, 1999b).

Assim, o emprego do lodo de ETA em obras geotécnicas é uma forma de dar uma

destinação adequada a este resíduo, reduzindo o risco ambiental. Contudo, conforme afirma Boscov (2008), é necessário mais pesquisas na área para a utilização do lodo em obras geotécnicas, tanto pelo potencial de substituir a argila natural, poupando os custos e a degradação ambiental resultantes da exploração de jazidas, como para evitar o problema de disposição em aterros de um material altamente compressível e com baixa resistência ao cisalhamento.

Esta pesquisa estudou misturas do solo empregado como camada de cobertura no aterro sanitário da Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), com adição do lodo proveniente dos tanques de decantação da estação de tratamento de água da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), com objetivo de verificar seu comportamento com relação a compactação permitindo maior previsibilidade para o uso em obras geotécnicas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram recolhidas amostras deformadas do solo utilizado como camada de cobertura do aterro sanitário, o material foi armazenado em sacos plásticos resistentes e transportado até o Laboratório de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) onde foi submetido à secagem ao ar e preparado para os ensaios seguindo os procedimentos descritos pela NBR6457 (ABNT, 2016).

O lodo da estação de tratamento de água foi coletado na estação de tratamento de água da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), armazenado em tonéis plásticos e transportado até o LMCC da UFSM onde foi submetido à secagem ao ar (Figura.1).



Figura 1. Materiais utilizados

2.1 Preparo das misturas

Antes da realização dos ensaios de caracterização e compactação, cada mistura foi preparada de acordo com a quantidade de material necessária para a realização de cada análise.

As amostras foram compostas considerando o peso de material seco, logo foi necessário aplicar um fator de correção de acordo com a umidade de cada material para a pesagem das parcelas de cada mistura.

Finalmente, as amostras foram submetidas aos ensaios de laboratório mostrados na Tabela 1, obedecendo suas respectivas normas técnicas vigentes.

Tabela 1. Normas Técnicas e Ensaios de Laboratório

Ensaio	Norma Técnica
Preparação de amostras de solo	NBR 6457:2016
Limite de liquidez	NBR 6459:2016
Limite de plasticidade	NBR 7180:2016
Análise granulométrica de solos	NBR 7181:2016
Massa específica real dos grãos	NBR 6458:2017
Compactação de solos	NBR 7182:2016

3. COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

Entende-se por compactação de um solo a redução rápida do índice de vazios por meio de processos mecânicos, face à compressão ou expulsão do ar dos poros (MASSAD, 2016). O ensaio de compactação tem como objetivo determinar a curva de compactação do material que relaciona a massa específica aparente seca com o teor de umidade.

Para determinação dessa curva, uma amostra deformada de solo é compactada em um molde utilizando uma determinada energia. A massa específica aparente úmida do solo compactado é determinada através da relação do seu peso com o seu volume (volume do molde). Toma-se ainda uma amostra de solo retirado do seu interior, para determinação da umidade. Com a umidade e a massa específica aparente úmida, calcula-se a massa específica aparente seca do solo compactado.

O procedimento anterior é repetido para diferentes umidades de solo, com reuso ou não do material. A curva de compactação é traçada através da relação da massa específica aparente seca e da umidade. Para isso, geralmente associa-se uma reta ascendente do ramo seco com uma reta descendente do ramo

úmido, unindo as retas com uma curva parabólica (PINTO, 2006).

Ainda, um fato interessante com relação a diferentes energias de compactação é que a massa específica aparente seca máxima varia linearmente com o logaritmo da energia aplicada (MASSAD, 2016). Essa relação é representada pela linha nomeada de linha das máximas mostrada na Figura 2 abaixo.

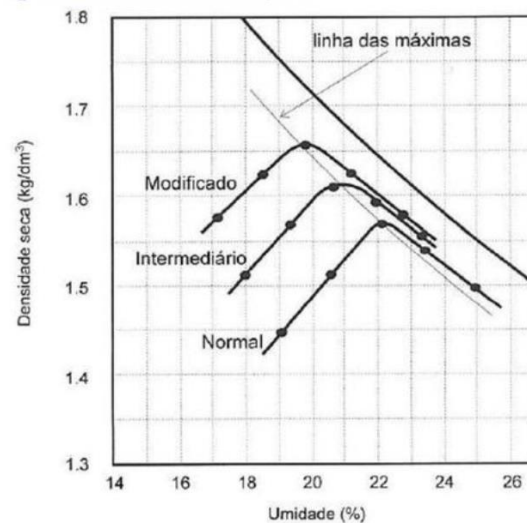


Figura 2. Curva de compactação de um solo com diferentes energias (Fonte: PINTO, 2006)

3.1 Relação entre teor de lodo de ETA e a massa específica aparente seca máxima

Nesta análise observou-se que o aumento do teor de lodo de ETA presente nas misturas provocou um efeito semelhante ao observado pela queda de energia de compactação.

A medida que o teor de lodo aumentou, ocorreu diminuição nas densidades aparentes secas máximas das misturas e aumento nos teores de umidade ótima.

Assim, para critérios de análise, plotou-se uma curva de tendência linear logarítmica a fim de representar essa relação.

4. ANÁLISES E RESULTADOS

4.1 Caracterização geotécnica

As misturas estudadas para nesta análise foram as mesmas já caracterizadas por Santos, E. F.; Scapin, J.; Pinheiro, R. J. B. (2018). Logo, nesta seção serão utilizados os resultados já apresentados anteriormente.

Os valores obtidos para o limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP) e a massa específica real dos grãos (γ_s) das amostras estudadas encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Massa específica real dos grãos e limites de consistência

Amostra	γ_s (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
SL0	2,835	40	26	14
SL15	2,744	55	38	17
SL35	2,637	70	58	12
Lodo	2,474	-	-	-

Fonte: SANTOS, E. F.; SCAPIN, J.; PINHEIRO, R. J. B., 2018.

O valor da massa específica encontrado para o lodo de ETA utilizado nesta pesquisa foi superior ao dos estudados por Samadikun et. al (2018) e Prim (2011) que apresentaram de 2,12 g/cm³ e 1,818 g/cm³ respectivamente e inferior ao determinado por Silva e Hemi (2018) de 2,8 g/cm². Esse fato é explicado pela alta variabilidade do material devido a fatores como a planta da estação de tratamento de água, características da água tratada, produtos químicos utilizados, a forma de coleta do lodo e o tempo de estocagem (RICHTER, 2001).

Foi adotado o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) para classificação misturas. Para isso, foi feita a análise granulométrica através de peneiramento e sedimentação com e sem defloculante (hexametáfosfato de sódio).

As amostras SL15 e SL35, com adição lodo, sedimentaram rapidamente na etapa sem defloculante. Acredita-se que isso ocorreu pois no processo de tratamento d'água são utilizados sais de alumínio como coagulantes e a presença desse aditivo químico no lodo interferiu nas análise de granulométrica por sedimentação. O mesmo efeito também foi observado por Montalvan e Boscov (2018) que estudaram o lodo de ETA proveniente de Cubatão que utiliza cloreto férrico como agente coagulante.

Os resultados da análise granulométrica encontram-se expressos na Tabela 3 a seguir. Os limites utilizados para definir as frações constituintes foram estabelecidos conforme as orientações da NBR 6502.

Tabela 3. Análise Granulométrica e Classificação das amostras

Amostra		SL0	SL15	SL35
Frações Granulométricas (%)	Pedregulho	0	0	0
	Areia Grossa	2	11	18
	Areia Média	7	14	13
	Areia Fina	25	8	4
	Silte	40	34	32
	Argila	26	33	33
	SUCS	ML	MH	MH

Fonte: SANTOS, E. F.; SCAPIN, J.; PINHEIRO, R. J. B., 2018. Adaptada e corrigida.

Segundo o SUCS, a amostra SL0 recebeu a nomenclatura ML, silte de baixa compressibilidade, pois apresentou a fração silte predominante (40%), LL abaixo de 50% e IP de 14%.

A amostra SL15, segundo o SUCS, foi classificada como MH, silte de alta compressibilidade, pois seu LL foi superior a 50% com IP 17%, já a amostra SL35 que apresentou 33% de argila, LL 70% e IP 12% também recebeu classificação MH.

4.2 Ensaios de compactação Proctor Normal

Foram realizados ensaios de compactação utilizando amostras deformadas, com reuso de material e energia normal de compactação.

A compactação com energia normal aplica o efeito de compactação de equipamentos convencionais de campo, que corresponde a 26 golpes de um soquete com massa de 2,5 Kg caindo de 30,5 cm sobre uma porção de solo contida em um cilindro padrão.

Para cada mistura foram realizadas duas compactações obtendo valores semelhantes para o teor de umidade ótima (h_{ot}) massa específica aparente seca máxima (γ_{max}), a média aritmética dos resultados foi adotada como resultado final.

As curvas de compactação obtidas são apresentadas nas Figuras 3,4,5,6,7 e 8, na página seguinte, e os resultados resumidos na Tabela 4.

Tabela 4. Ensaios de compactação com energia normal

Amostra	h_{ot} (%)	γ_{max} (kg/m ³)	h_{ot} Médio (%)	γ_{max} Média (kg/m ³)
SL0-1	21,5	1620,0	21,0	1625,0
SL0-2	20,3	1630,0	-	-
SL15-1	26,6	1455,0	27,2	1450,0
SL15-2	27,8	1445,0	-	-
SL35-1	35,9	1265,0	35,8	1270,0
SL35-2	35,6	1275,0	-	-

Fonte: SANTOS, E. F.; SCAPIN, J.; PINHEIRO, R. J. B., 2018.

4.3 Linha das máximas

Pode ser observada uma relação entre o teor de lodo de ETA presente nas misturas com comportamento das mesmas durante a compactação. Plotando-se as curvas de compactação juntas isso pode ser observado (Figura 9).

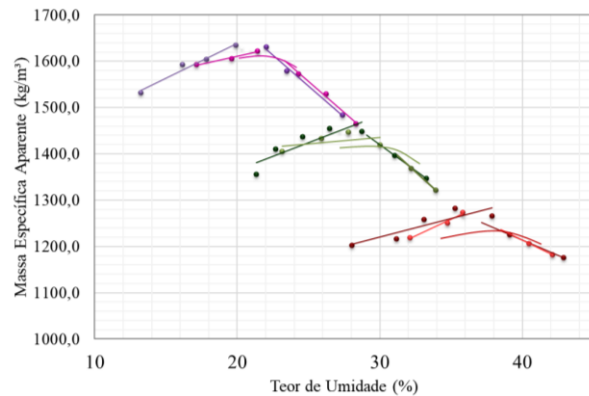


Figura 9. Curvas de compactação de misturas com diferentes teores de lodo de ETA

Utilizando os pontos de máxima massa específica aparente seca e os teores de umidade ótima correspondente, plotou-se uma linha de tendência logarítmica mostrada na Figura 9.

Com isso seria possível estimar os valores de densidade aparente seca máxima e teores ótimos de umidade para misturas com diferentes teores de lodo. Contudo, para isso, é necessário que não ocorram alterações nas características dos materiais utilizados e nos procedimentos adotados para realização dos ensaios.

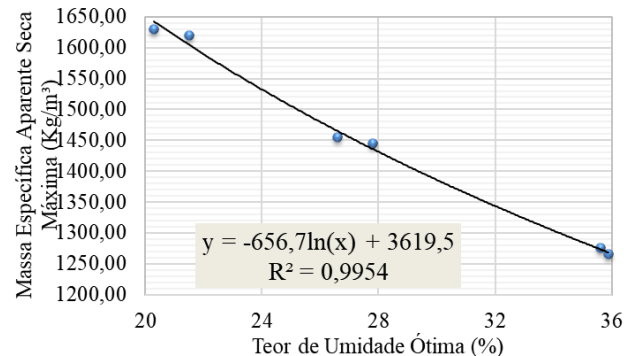


Figura 10. Linha das máximas: Relação teor de lodo de ETA e massa específica aparente seca máxima

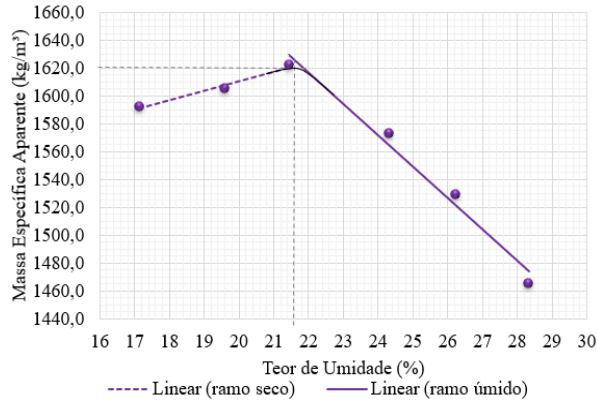


Figura 3. Curva de Compactação SL0-1

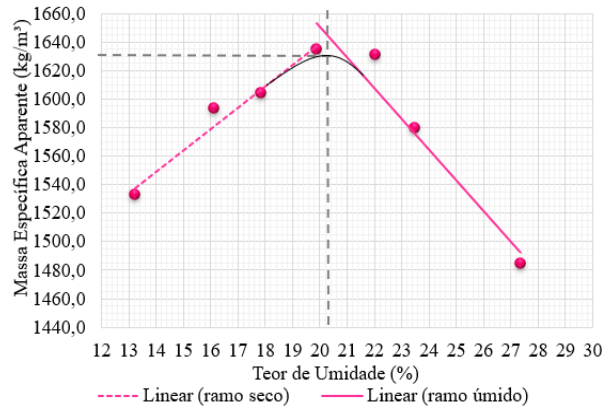


Figura 6. Curva de Compactação SL0-2

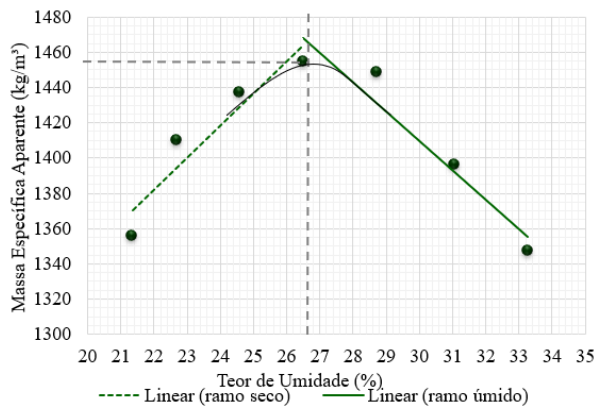


Figura 4. Curva de Compactação SL15-1

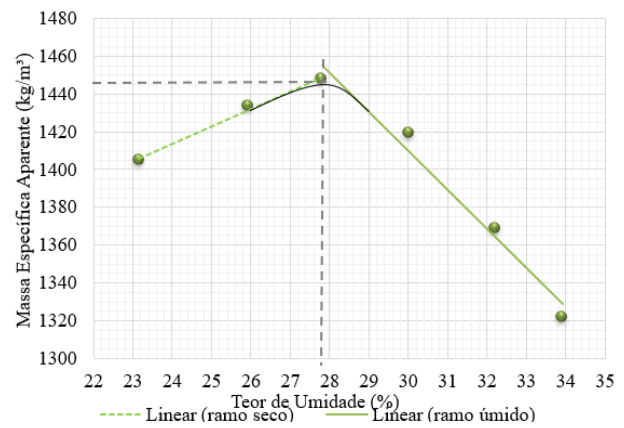


Figura 7. Curva de Compactação SL15-2

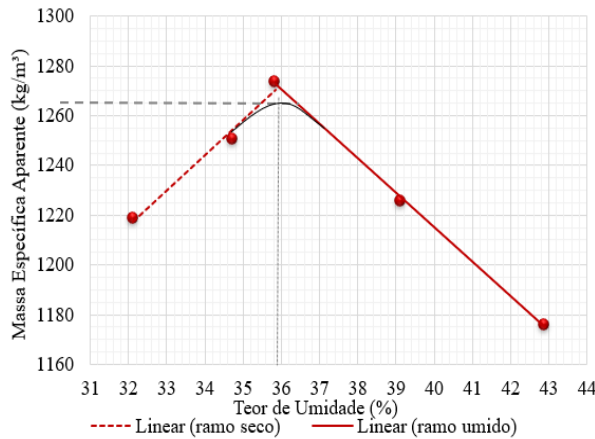


Figura 5. Curva de Compactação SL35-1

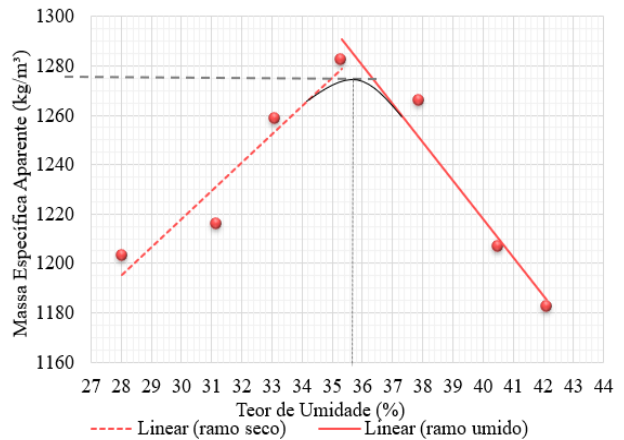


Figura 8. Curva de Compactação SL35-2

5. ANÁLISE DE RELAÇÃO LINEAR:

5.1 Relação teor de lodo de ETA e massa específica aparente seca máxima

Com os valores de massa específica aparente seca máximas obtidos nos ensaios de compactação das misturas plotou-se um gráfico utilizando o teor de lodo como abscissa (Figura 11).

A equação (Eq. 1) obtida para a reta demonstra uma relação linear decrescente entre os parâmetros analisados, onde “y” representa a massa específica aparente seca máxima e “x” o teor de lodo, com um coeficiente de determinação de 0,9933, muito próximo a um.

$$y = 1616,4 - 10,081x \quad (1)$$

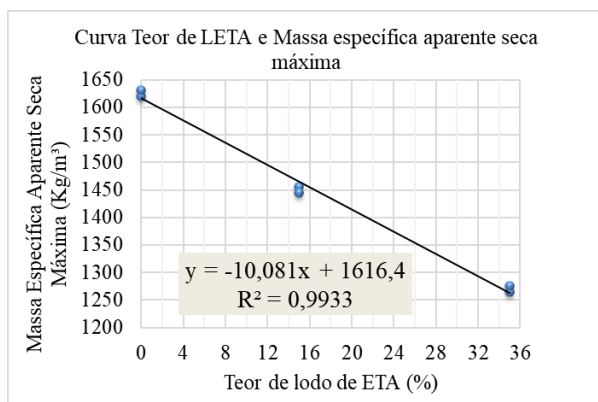


Figura 11. Relação Teor de lodo de ETA e Massa específica aparente máxima

5.2 Relação teor de lodo de ETA e teor de umidade ótima

Com os teores de umidade ótima obtidos nos ensaios de compactação das misturas plotou-se um gráfico com o teor de lodo como abscissa (Figura 12).

A equação (Eq. 2) obtida para a reta demonstra uma relação linear crescente entre os parâmetros analisados, onde “y” representa o teor de umidade ótima e “x” o teor de lodo, com um coeficiente de determinação também de 0,9933, próximo a um.

$$y = 20,876 + 0,4245x \quad (2)$$

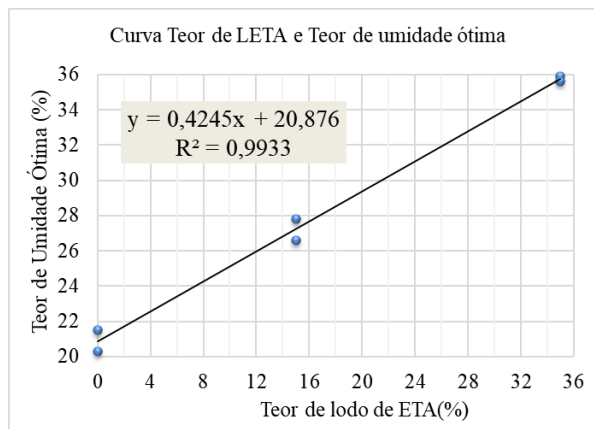


Figura 12. Relação Teor de lodo de ETA e Teor de umidade ótima

5.3 Aplicação das equações e resultados

Através das equações obtidas (Eq. 1 e Eq. 2), foram calculados os valores de seus respectivos parâmetros substituindo “x” pelo teor de lodo de cada mistura. Os resultados obtidos foram comparados com os valores médios dos ensaios de compactação realizados em laboratório.

A Tabela 5 a seguir mostra as diferenças entre os parâmetros calculados e os obtidos experimentalmente e também demonstra o percentual de erro que essas diferenças representam com relação aos parâmetros calculados.

Através desses dados foi observado que os resultados obtidos com uso das equações (Eq. 1 e Eq. 2) foram próximos aos valores médios experimentais. O maior erro representou aproximadamente 1,04% do valor calculado, o que é uma variação baixa.

Portanto, o emprego das relações lineares estabelecidas para previsão do comportamento de misturas de solo com o lodo de ETA empregados nesta pesquisa é válido. Contudo, devido a alta variabilidade das características dos materiais, principalmente dos lodos de ETA, seu emprego é limitado.

Tabela 5. Comparação: Valores calculados e experimentais

Mistura	Valores calculados		Valores médios experimentais		Diferenças		Erro (%)	
	γ_{\max} (kg/m ³)	h_{ot} (%)	γ_{\max} (kg/m ³)	h_{ot} (%)	γ_{\max} (kg/m ³)	h_{ot} (%)	γ_{\max}	h_{ot}
SL0	1616,400	20,876	1625,00	21,00	8,600	0,124	0,5320	0,594
SL15	1465,185	27,244	1450,00	27,20	15,185	0,044	1,0364	0,160
SL35	1263,565	35,734	1270,00	35,80	6,435	0,066	0,5093	0,186

6. CONCLUSÃO

Conclui-se que é possível estabelecer relações lineares que permitam prever o comportamento de misturas de solo com o lodo de ETA. Assim, seria possível empregar misturas com diferentes composições visando atingir determinados critérios de uso para obras geotécnicas diversas, porém o uso dessas relações é limitado ao lodo de ETA em questão e ao solo utilizado e as relações podem não ser válidas para demais materiais provenientes de outras fontes e ou que apresentem características distintas.

7. REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995, 18 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180: Solo: determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016, 3 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181: Solo: Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016, 12 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182: Solo: Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016, 9 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2017a, 5 p.
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457: Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016, 8 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004: Classificação de Resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Letras. 2008. 248p

CORDEIRO, J.S.; CAMPOS, J.R. **O Impacto Ambiental Provocado pela Indústria da Água**. Revista Saneamento Ambiental, São Paulo, n. 56, mar/abr, 1999a.

CORDEIRO, J.S. **Importancia do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs**. In: REALI, A.P(Coord.). **Noções Gerais de Tratamento e Disposição final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**: Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 1999b. p.1-21

MASSAD, F. **Mecânica dos Solos Experimental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 287p.

MONTALVAN, E. L. T. e BOSCOV, M. E.
G. Comportamento Geotécnico de Misturas de Areia Argilosa Laterítica com Lodo da Estação de Tratamento de Água do Município de Cubatão In: XIX Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica: Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, 2018, Salvador. Disponível em <
https://www.dropbox.com/sh/qqw8mytwyi112yk/AAAvqqjUwz11E3mS8rba6ZOia/Geotecnia%20Ambiental?dl=0&preview=35412.pdf&subfolder_n_av_tracking=1 .> Acesso em Maio, 2019. ABMS, 2018.

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

PRIM, E. C. C. **Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Brasil, 2011. 279p.

RICHTER, C.A. **Tratamento de Lodos de Estação de Tratamento de Água**. São Paulo: Blucher, 2001. 102 p.

SANTOS, E. F.; SCAPIN, J.; PINHEIRO, R. J. B. **Estudo de misturas de solo com adição de lodo de estação de tratamento de água para uso em aterro sanitário** In: XIX Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica: Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, 2018, Salvador. Disponível em <
https://www.dropbox.com/sh/qqw8mytwyi112yk/AAAvqqjUwz11E3mS8rba6ZOia/Geotecnia%20Ambiental?dl=0&preview=34724.pdf&subfolder_n_av_tracking=1 > Acesso em Maio, 2019. ABMS, 2018.

AAAvqqjUwz11E3mS8rba6ZOia/Geotecnia%20Ambiental?dl=0&preview=36160.pdf&subfolder_n_av_tracking=1.> Acesso em Abril, 2019. ABMS, 2018.

SAMADIKUN, B. P. et al. **Potential Utilization of Sewage Sludge from Water Treatment Plant as Brick Material** . EDP Sciences, 2018, 4p. . Disponível em <
https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/48/e3sconf_icenis18_05001/e3sconf_icenis18_05001.html> Acesso em Maio, 2019. ABMS, 2018.

SILVA, M. V. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – IPEN/ Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. 132 p

SILVA, A. dos S. e HEMSI, P. S. **Efeito do Teor de Sólidos na Resistência ao Cisalhamento de um Lodo de ETA Visando seu Uso em Cobertura Diária de Aterros Sanitários** In: XIX Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica: Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, 2018, Salvador. Disponível em <
https://www.dropbox.com/sh/qqw8mytwyi112yk/AAAvqqjUwz11E3mS8rba6ZOia/Geotecnia%20Ambiental?dl=0&preview=34724.pdf&subfolder_n_av_tracking=1 > Acesso em Maio, 2019. ABMS, 2018.