

AValiação DA PERMEABILIDADE DE MISTURAS DE LATOSSOLO ALUMINOFÉRRICO COM RESÍDUOS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET)

William M. Kubiaki Levandoski

Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Erechim
williankubi@gmail.com

Joice Batista Reis

Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Erechim
joice.jbr.reis@gmail.com

Manuella de Moraes

Mestranda no Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Erechim
manuellademoraes@gmail.com

Rafaela Pollon

Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Erechim
rafaelapollon1997@gmail.com

Rafael Pazza

Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Erechim
rafael.pazza34@gmail.com

Hevelin Pagliarini

Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Erechim
hevelin.p@outlook.com

Arthur Henrique Knorst Colling

Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Erechim
ahcolling@hotmail.com

Eduardo Pavan Korf, Dr.

Professor do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária e Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Erechim
eduardo.korf@uffs.edu.br

Resumo. O presente trabalho teve como objetivo estudar o incremento de PET em solo, visando aplicação em estruturas de contenção de contaminantes em aterros de resíduos e barragens de rejeitos de mineração. O resíduo passou por um pré-tratamento de moagem e foram adicionados os teores de 0%, 5% e 10% ao

solo. Ensaios de compactação foram realizados utilizando a energia de proctor normal, encontrando os teores de umidade ótima das misturas assim como os valores de massa específica máxima. Posteriormente realizou-se ensaios de permeabilidade com carga variável. Observou-se uma diminuição nos teores de umidade e massa específica com

o incremento de PET. Em contrapartida a condutividade hidráulica do solo foi acrescida com a adição do resíduo, sendo os valores superiores ao recomendado na literatura (10^{-09} m/s), denotando a necessidade de novos estudos com maior energia de compactação,, para verificação do teor máximo de PET a ser adicionado.

Palavras-chave: *Condutividade hidráulica, Estabilização de solos. Reutilização.*

1. INTRODUÇÃO

Segundo ABIPLAST (2017), os plásticos não biodegradáveis são produzidos a partir de monômeros como o eteno, propeno, butadieno, entre outros, oriundos da nafta que por sua vez, é extraída do petróleo. Conhecida como a terceira geração da cadeia petroquímica, a indústria de transformados plásticos promove a transformação das resinas (polímeros) em produtos diversos, tal como como o polietileno tereftalato (PET), com o qual são produzidas, principalmente, embalagens para bebidas.

O PET é a quinta resina plástica mais consumida no Brasil e isso se reflete em sua participação como 32% do volume dessa tipologia de resíduo presente na coleta seletiva dos brasileiros (ABIPLAST, 2017; CEMPRE, 2018). O Censo da Reciclagem de PET no Brasil, realizado em 2015, contabilizou a reciclagem de 274 mil toneladas de PET, que serviram como matéria prima para a produção de têxteis, resinas insaturadas e alquídicas, embalagens para alimentos e não alimentos, entre outros (ABIPET, 2016). Entretanto, o setor de reciclagem deste material, do ano de 2012 a 2015, apresentou queda de mais de 17% devido à baixa atividade econômica e redução drástica do preço do petróleo, reduzindo a rentabilidade e portanto a atratividade.

Apesar do segmento do PET apresentar as melhores taxas de reciclagem pós consumo quando comparado a outros plásticos, ainda há uma lacuna de cerca de 49% deste material que não é reciclado, ou seja, é destinado para aterros sanitários ou outras formas de disposição inadequadas, como lixões, aterros controlados e até mesmo em compartimentos ambientais (ABIPET, 2015; IPEA, 2012).

Por ser um material que impacta ambiental e economicamente a questão de resíduos sólidos e por tratarem-se de resíduos de longo período de degradação, ocasionam problemas ambientais quando dispostos inadequadamente.

A indústria da construção civil têm se mostrado ativa na busca de soluções para a substituição de materiais naturais ante ao aumento no rigor das normas ambientais e a escassez de recursos naturais, sendo assim, é potencialmente, uma grande recicladora (SELUNG, 2013).

Materiais residuais originados da resina PET tem ganhado espaço nesse nicho de mercado e inúmeras pesquisas foram desenvolvidas, avaliando sua aplicação em diferentes obras como em misturas asfálticas, barreiras de contenção de resíduos e reforço de subleitos de rodovias (GOMES, 2018).

Na geotecnia, os solos podem ser usados como base de sustentação das obras de engenharia, como barragens e aterros. Para isso, busca-se melhorar as propriedades mecânicas de solos, reforçando-o com a adição de materiais geotécnicos.

Como o resíduo de PET é um material quimicamente estável e apresenta elevada resistência mecânica (ABIPLAST, 2017), aliando isso com os impactos ambientais e econômicos causados com o descarte incorreto deste material, sua aplicação em solos torna-se uma instigante alternativa.

O presente trabalho visa avaliar o comportamento hidráulico de solo compactado com a adição de diferentes

porcentagens de PET, visando aplicação em estruturas de contenção de contaminantes em aterros de resíduos e barragens de rejeitos de mineração.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Características do solo da Região do Alto Uruguai-RS

O estudo utilizou de um solo basáltico residual, extraído da área experimental da Universidade Federal da Fronteira Sul, localizada no norte do Rio Grande do Sul, sendo este classificado como um solo siltoso de alta compressibilidade e baixa plasticidade (BOEHL *et al.*, 2016).

2.2 Coleta, preparação e caracterização do solo

O solo foi coletado no Campus da Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Erechim, com auxílio de pá, a uma profundidade de 0,90 m, compondo o horizonte B. Este solo, foi seco em temperatura ambiente até a umidade higroscópica, havendo o destorroamento e a posterior passagem pela peneira de abertura 4,8 mm, como descrito na norma que descreve a preparação de amostras de solo para ensaios de compactação, NBR 6457 (ABNT, 1986).

Do solo passante, separou-se amostras para os ensaios de compactação e permeabilidade.

2.3 Coleta e caracterização do resíduo de PET

O resíduo de politereftalato de etileno foi obtido por meio da diminuição do tamanho das partículas de garrafas, este processo foi realizado utilizando um moinho de facas. O material obtido após o beneficiamento está

apresentado na Fig. 1 e possui granulometria inferior a 2 mm.



Figura 1. Resíduo de PET moído.

O material moído foi homogeneizado e teve seu quarteamento realizado conforme a NBR NM 27, reduzindo as amostras para o ensaio de caracterização (ABNT, 2000).

A caracterização do resíduo decorreu de análise granulométrica, normatizada pela NBR NM 248 referente a determinação da composição granulométrica de agregados.

2.4 Ensaios de Compactação

Os ensaios de compactação foram executados conforme a NBR 7182 (ABNT, 1986), baseando-se na umidade ótima do solo em estudo determinada por Boehl *et al.* (2016). Os ensaios foram realizados adotando misturas de solo-PET com teores de 0 %, 5% e 10 % de incremento em massa de resíduo.

A compactação foi realizada adotando a energia de proctor normal, empregando-se 26 golpes, aplicados a três camadas das misturas. Esses ensaios propiciaram a elaboração das curvas de compactação das misturas, assim como a determinação dos pesos específicos máximos e os teores de umidade ótimos, respectivamente, dados posteriormente utilizados na preparação dos corpos de prova

dos ensaios de permeabilidade de carga variável.

2.5 Ensaios de Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi executado conforme a descrição da NBR 14545 (ABNT, 1984), os corpos de prova foram preparados através de compactação das misturas e do solo, nos seus estados de umidade ótima, obtidos no ensaio de compactação de proctor normal. A preparação do permeâmetro foi feita com uma tela de arame, sobre a tela foi posta uma camada de areia, a amostra foi envolta por argila e um anel de borracha cobrindo o topo do anel formado pela argila.

Após a preparação do corpo de prova, este foi inundado a partir de percolação no sentido ascendente. O ensaio foi prosseguido até se conseguir quatro medidas do coeficiente de permeabilidade relativa.

Os ensaios foram realizados adotando misturas de solo-PET com teores de 0%, 5% e 10% de incremento em massa do resíduo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Strehl (2016) já havia realizado a análise granulométrica desse mesmo solo. Os valores foram obtidos seguindo as especificações da NBR 7181 (1984). Os dados granulométricos coletados por Strehl (2016) se apresentam na Tabela 1.

Através do ensaio de caracterização granulométrica efetuado com os resíduos de PET, obteve-se a curva de distribuição granulométrica dos resíduos, que se apresenta na Fig. 2.

Tabela 1. Distribuição granulométrica do solo

Propriedades Físicas	Resultados (%)
Argila	61,82
Silte	29,65
Areia Fina	5,38
Areia Média	1,57
Areia Grossa	1,46
Pedregulho Fino	0,12
Pedregulho Médio	0,00
Pedregulho Grosso	0,00
Pedra de Mão	0,00

Fonte: Adaptada de Strehl, 2016

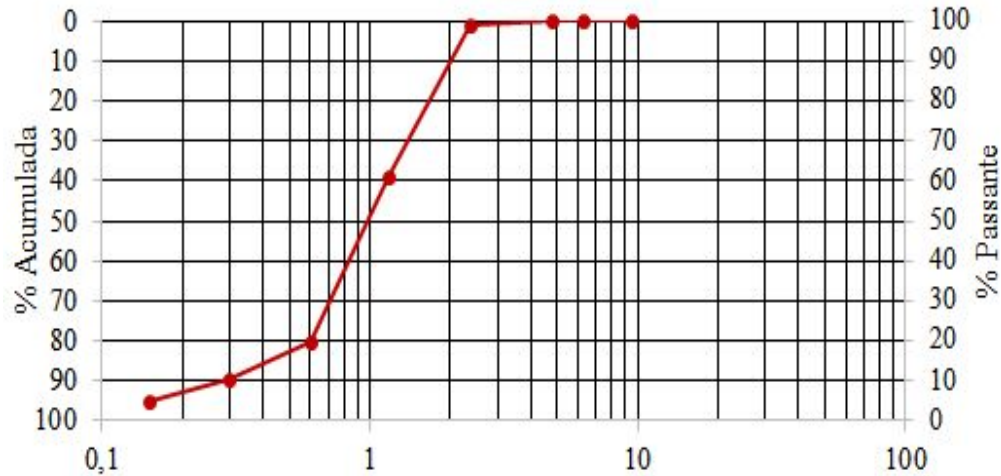


Figura 2. Distribuição granulométrica do resíduo de PET

Utilizando o solo puro e misturas de solo com resíduo de PET, adotando-se teores de 5% e 10%, foram realizados os ensaios de

compactação de Proctor na energia normal, resultando nas curvas de compactação apresentadas nas figuras Fig. 3, 4 e 5.

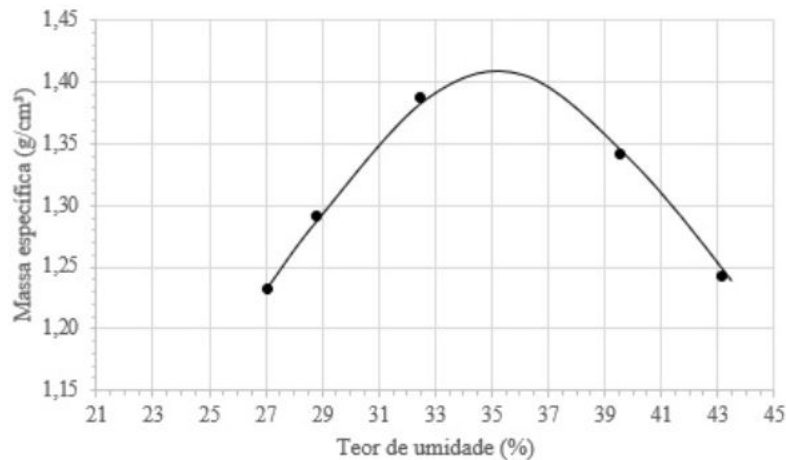


Figura 3. Curva de compactação para a amostra de solo puro, sem adição de resíduo de PET.

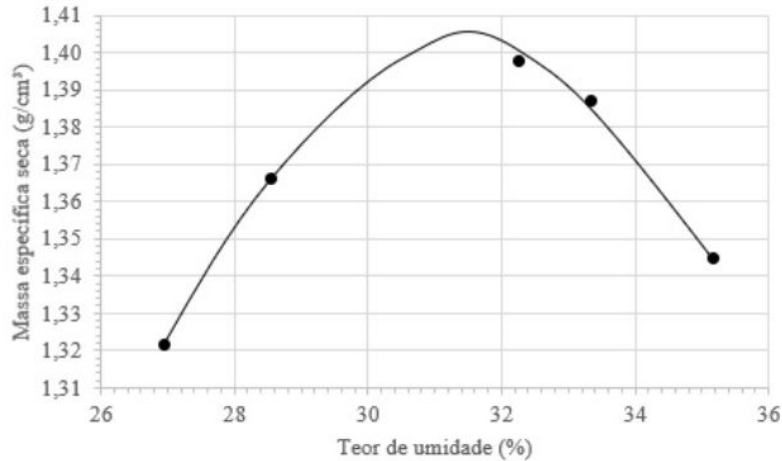


Figura 4. Curva de compactação para a amostra contendo 5% de resíduo de PET.

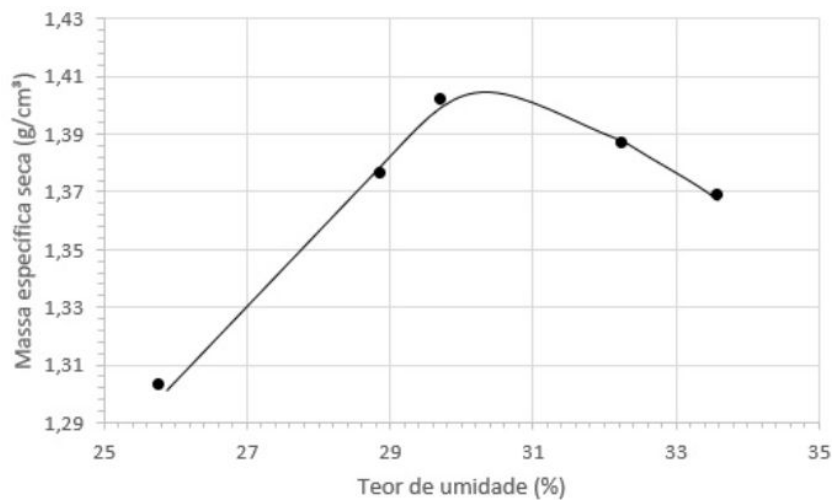


Figura 5. Curva de compactação para a amostra contendo 10% de resíduo de PET.

Os valores de massa específica máxima seca e teor ótimo de umidade encontrados nas amostras do ensaio de compactação, tiveram um comportamento uniforme conforme a adição de resíduo de PET, sendo que para a amostra sem adição do resíduo de PET (Fig. 3), o valor de massa específica máxima seca para o teor ótimo de umidade 35,2% foi de 1.410 g/cm³, já para a amostra contendo 5% de resíduo PET (Fig. 4), com o teor de umidade ótimo de 31% é de 1.406 g/cm³, por fim, para a amostra com 10% de adição de resíduo de PET (Fig. 5), o valor de massa específica máxima seca é de 1.404 g/cm³, com teor de umidade ótimo 30,4%.

Observou-se assim, uma redução na massa específica seca e de teor de umidade conforme o aumento do teor de resíduo de PET. Esse comportamento, pode ser visualizado nas figuras Fig. 6 e 7, onde são apresentadas as relações entre a massa específica seca máxima e o teor de umidade ótimo em função do teor de resíduo de PET adicionado a mistura. Fato já observado em estudo de reforço de solo argiloso com resíduo de PET (ROCHA, NOVO, 2015).

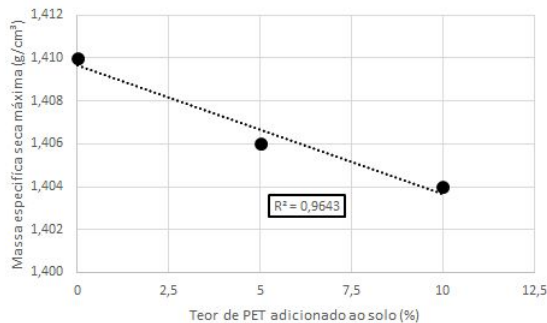


Figura 6. Relação entre o teor de resíduo de PET e a massa específica seca máxima.

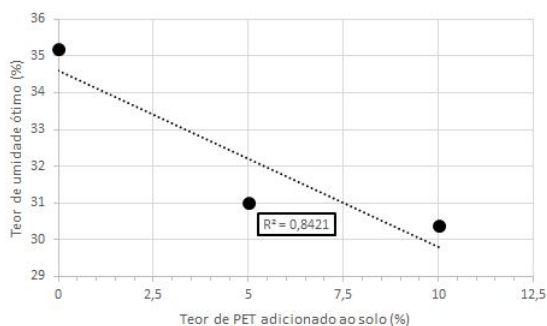


Figura 7. Relação entre o teor de resíduo de PET e a teor de umidade ótima

Em ambas relações se verificaram o comportamento decrescente e certa linearidade entre as variáveis, como pode ser observado através do coeficiente de determinação (R^2). O resíduo de PET, por se tratar de um material mais leve que o solo, provocou uma redução de cerca de 0,42% da massa específica seca máxima (Figura 6), para a mistura com o teor de 10% de resíduo de PET. Já o teor de umidade (Fig. 7), apresenta redução de aproximadamente 13,6% comparando a mistura de teor 10% e o solo puro.

Na sequência do ensaio de compactação, os corpos de prova foram preparados para o ensaio de permeabilidade. Foi preparado corpo de prova apenas com solo, sem adição de resíduo de PET e com as misturas de resíduo de PET nos teores de 5% e 10% mais solo. Todos os corpos de

provas foram moldados em seus respectivos estados de umidade ótima, obtidos no ensaio de compactação de proctor normal. Com isso foi possível obter a condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade, conforme demonstra a Fig. 8.

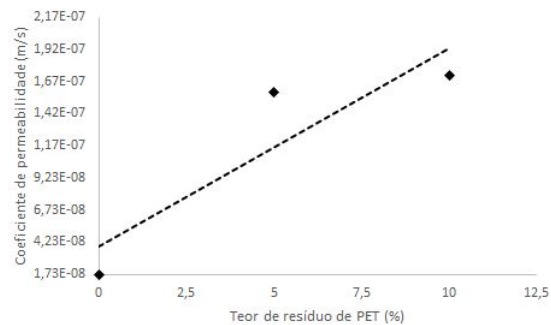


Figura 8. Coeficiente de permeabilidade para amostras com diferentes teores de resíduo de PET

Como pode ser observado na Fig. 8, o valor inicial de condutividade hidráulica com a compactação proctor normal da amostra com solo puro foi de $1,73 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Já, com a adição de resíduo de PET verificou-se aumento da condutividade hidráulica, com tendência linear, conforme fig. 8. Com a adição de 5% de resíduo de PET, analisando-se isoladamente os valores, observou-se um aumento significativo na condutividade hidráulica da amostra na ordem de 10 vezes, porém, na amostra com 10% de resíduo de PET o aumento não foi tão expressivo, ficando próximo ao valor de condutividade hidráulica da amostra de 5%.

De acordo com Rowe et al. (1995) e Manassero et al. (2000), é necessário que barreiras impermeáveis tenham uma condutividade hidráulica tal, que atenda à requisitos como valores inferiores à 10^{-9} m/s. Este requisito não foi atendimento em nenhum dos valores observados neste estudo, embora para 0 % de PET a condutividade hidráulica resultante foi muito

próxima ao valor recomendado pelos autores.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo investigou o comportamento hidráulico de solo compactado com a adição de diferentes porcentagens de PET, visando aplicação em estruturas de contenção de contaminantes em aterros de resíduos e barragens de rejeitos de mineração.

Em um primeiro momento foi observado a redução da massa específica máxima seca e o teor de umidade ótimo das amostras, conforme o aumento do teor de PET adicionado.

Verificou-se também neste estudo que para 0% de PET adicionado, a condutividade hidráulica esteve acima do limite estabelecido por Daniel (1993) para barreiras impermeáveis ($<10^{-09}$ m/s), embora muito próxima, o que sugere que uma nova análise desse solo seja realizada com ensaios de proctor modificado e que sua compactação seja feita, com a adição de 1 a 2% de umidade, em relação ao teor ótimo, favorecendo à estrutura no ramo úmido e também estudando-se adição de teores de PET inferiores a 5%, verificando assim o máximo teor de PET a ser utilizado, em que não haja prejuízo na condutividade hidráulica encontrada.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET - ABIPET. Perfil 2017. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2019/03/Perfil-2017.pdf>. Acesso em: abr. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET - ABIPET. Censo da

reciclagem do PET no Brasil - 2016 . Disponível em: <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>. Acesso em: abr. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (2003). **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. NBR NM 248. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1986). **Amostras de solo - Preparação para ensaio de compactação e ensaio de caracterização**. NBR 6457. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1986). **Solo - ensaio de compactação**. NBR 7182. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (2000). **Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. NBR 14545. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1984). **Solo - Análise Granulométrica**. NBR 7181. Rio de Janeiro.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM - CEMPRE. Pesquisa anual sobre coleta seletiva. Disponível em: <http://cempre.org.br/ciclosoft/id/9>. Acesso em: abr. 2019. <http://cempre.org.br/ciclosoft/id/9>

DANIEL, D. E. *Clay liners*. In: **Geotechnical practice for waste disposal**. London: Chapman & Hall, 1993. p. 33-65.

GOMES, Nayra Cardoso. **Comportamento hidromecânico de solos reforçados com fibras de PET para aplicação em batteiras de contenção de resíduos.** 2018. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2018/3093-gomes-nc-tm-18-1>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: abr. 2019.

MANASSERO, M.; BENSON, C. H. e BOUAZZA, A. **Solid Waste Containment Systems.** International Conference on Geotechnical & Geological Engineering -GeoEng 2000. November Melbourne, Australia, p. 19-24, 2000.

ROCHA, L. V.; NOVO, B.R. Aplicabilidade de Novos Materiais Geotécnicos Visando o Reforço de Solos: **“Estudo experimental de solo argiloso reforçado com pó de PET”.** PUC: Rio de Janeiro, 2015.

ROWE, R. K.; QUIGLEY, R.M.; BOOKER, J.R. **Clayey barrier systems for waste disposal facilities.** E&FN Spon: London –EUA, 1995. p. 390.

SELUNG, C; MENEGOTTO, M.L.; MENEGOTTO, A. G. F.; PAVAN, R. C.; Avaliação de blocos de concreto para alvenaria com adição de resíduos de borracha de pneu. HOLOS Environment

(Online), v. 13, n. 2, 2013. ISSN: 1519-8634 (ON-LINE).

STREHL, M. J. **Avaliação das propriedades geotécnicas de um solo do campus Erechim-RS através dos ensaios de compactação tipo proctor.** 2016. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental): Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim RS, 2016.