

COMPORTAMENTO DE BARREIRAS GEOSSINTÉTICAS EM ATERROS SANITÁRIOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Bruna T. Uhde

Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade
de Passo Fundo – PPGEng - UPF
175623@upf.br

Claudio L. Queiroz

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade
de Passo Fundo – PPGEng - UPF
175624@upf.br

Rodrigo da Cruz

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade
de Passo Fundo – PPGEng - UPF
170546@upf.br

Márcio F. Floss

Professor/Pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da
Universidade de Passo Fundo – PPGEng - UPF
marciofloss@upf.br

Resumo. *O constante aumento de indústrias e o crescimento das áreas urbanas ocasionou um aumento significativo dos resíduos sólidos urbanos, e de instalações de aterros sanitários. A construção de um sistema planejado possibilita realizar a contenção e o tratamento do lixiviado evitando uma série de problemas de ordem ambiental, econômica e social. A preocupação com possíveis contaminações de solos e lençóis freáticos faz com que se tenha um cuidado especial quanto as barreiras de proteção aplicadas. A utilização de geossintéticos como material impermeabilizante aumenta cada vez mais, principalmente geomembranas e geocompostos bentoníticos. Com a possibilidade de diversos contaminantes diferentes no lixiviado de aterros sanitários o presente trabalho apresenta um estudo bibliográfico sobre diferentes configurações de barreiras com geossintéticos, principalmente GCL's, onde avaliam sua condutividade hidráulica quando exposto. Concluiu-se que os geossintéticos tem*

apresentado um bom comportamento nos estudos encontrados, porém ainda são necessárias mais investigações quanto aos geossintéticos expostos a diferentes contaminantes.

Palavras-chave: *GCL. Contenção de contaminantes. Lixiviado.*

1. INTRODUÇÃO

As instalações de aterros sanitários é uma solução para o aumento dos resíduos sólidos urbanos, pois uma vez que não são tratados desenvolver uma série de problemas de ordem ambiental, econômica e social. Muitos países investem nos aterros por ser uma solução onde um sistema é planejado e construído com o cuidado de preservar a segurança local e dispor de forma adequada os resíduos.

Devido à preocupação com a contaminação do solo e do lençol freático em relação a disposição de resíduos e seu

lixiviado, é crescente a utilização de diferentes barreiras impermeabilizantes em aterros sanitários. A necessidade de garantir a eficiência e a segurança ambiental no local de despejo, faz com que sejam exigidos diversos sistemas de proteção que devem manter a impermeabilização e a contenção do material lixiviado. Com isso diversas configurações de barreiras de proteção foram desenvolvidas no decorrer dos anos, sendo que cada uma possui algum diferencial e se adequa a necessidade do aterro em questão, levando em consideração fatores econômicos, periculosidade do resíduo e o risco ambiental que apresenta.

A utilização de geossintéticos já se faz presente em diferentes obras de infraestrutura, por ser um material que se apresenta de diversas formas e para diferentes funções. Sendo assim, não seria diferente nas obras de aterros onde vem sendo aplicado como material impermeabilizante e está desempenhando um papel fundamental. Os geossintéticos mais usualmente aplicados para barreiras são as geomembranas, um geossintético com baixíssima permeabilidade, e os geocompostos bentoníticos, conhecidos como GCL é um revestimento de argila geossintética formado por dois geotêxteis que confinam um núcleo de bentonita que possui alto poder expansivo.

Nesse contexto o presente trabalho tem como objetivo apresentar estudos realizados por diferentes pesquisadores sobre diferentes configurações de barreiras com geossintéticos, principalmente GCL's, aplicadas em lixiviados de aterros sanitários, apontando as suas principais características e os objetivos das pesquisas.

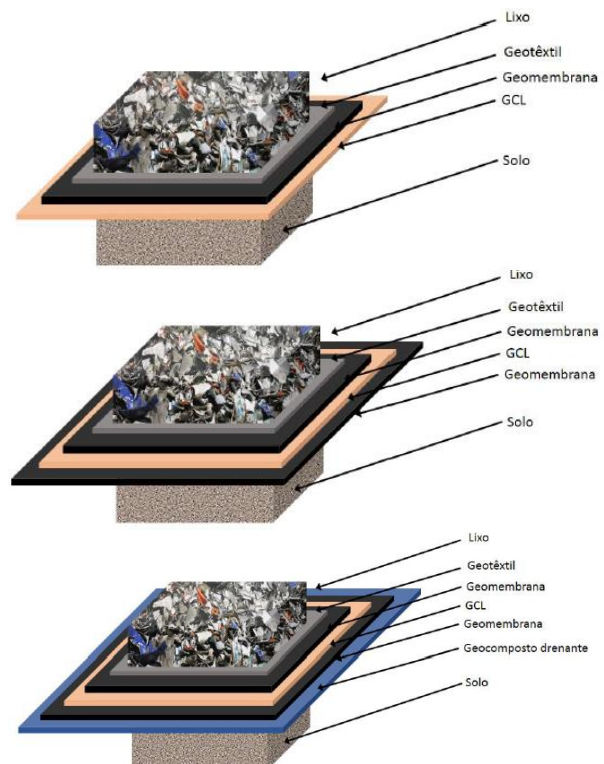
2. GEOSSINTÉTICOS EM BARREIRAS IMPERMEABILIZANTES

A construção de barreiras geossintéticas depende do projeto, do rejeito a ser armazenado e dos contaminantes que podem conter. Devendo se adequar e chegar a

melhor solução para cada caso. O Manual Técnico do Geocomposto Bentonítico (PALMA E SOUZA, 2018), salienta que esse geossintético possui uma característica de autocicatrização, tendo a capacidade de expandir e vedar pequenos furos na camada de bentonita, o que é de grande interesse em barreiras de proteção, pois permite uma maior eficiência e vida útil do aterro caso ocorra alguma depredação no material durante sua instalação ou no decorrer da sua utilização.

A barreira hidráulica deve ser constituída por uma combinação de geossintéticos, que pode ser com camada simples de geomembrana, camada dupla ou camada dupla com geocomposto drenante, onde o geotêxtil pode ser aplicado com a função de proteger a geomembrana. Como demonstrado na Figura 1 a seguir.

Figura 1 - Possíveis configurações de barreiras geossintéticas



Fonte: Palma e Souza (2018).

Os GCL's são elementos comuns nas instalações de contenção de resíduos devido

à sua baixa condutividade hidráulica à água (geralmente $<10^{-10}$ m/s) e facilidade instalação (BENSON et al., 2010). A eficácia dos GCL's convencionais é controlada principalmente pela condutividade hidráulica da Na-B no GCL, que é predominantemente composta pelo mineral montmorilonita. A expansão osmótica da montmorilonita produz canais de fluxo estreitos e tortuosos, resultando em baixa condutividade hidráulica (SCALIA et al., 2014).

Assim a bentonita hidratada forma uma folha densa com baixo índice de vazios alinhamento quase paralelo das plaquetas de montmorilonita no plano do GCL, o que contribui para a baixa condutividade hidráulica no sentido da camada (EGLOFFSTEIN, 1994).

A utilização de GCL's na interface entre a geomembrana e a argila compactada, formando uma barreira composta é uma opção para redução de vazamentos através de danos na geomembrana devido a capacidade de expansão da bentonita preenchendo prováveis espaços vazios ao longo da interface de contato com a geomembrana, ou mesmo selar possíveis danos (MENDES, 2010).

Os GCL's podem oferecer várias vantagens em relação aos revestimentos tradicionais de argila compactada, incluindo facilidade de instalação, espessura limitada e baixa permeabilidade à água, entre outros (BOUAZZA, 2002). A eficiência de GCL's como barreiras hidráulicas para contaminantes encontrados em lixiviados de aterros sanitários depende da condutividade hidráulica da bentonita sódica. Sendo que os revestimentos geossintéticos de argila (GCL's) consistem em uma fina camada de bentonita entre dois geotêxteis ou geomembrana, sendo amplamente utilizados como barreiras hidráulicas em cobertura de aterros (SCALIA; BENSON, 2011).

Dentre os contaminantes presentes em aterros sanitários, os metais pesados como Pb, Cu e Zn são facilmente encontrados em lixiviados de aterros sanitários (ROWE et

al., 2004). A contaminação por esses metais é persistente e gera diversos problemas em muitos locais pela migração através do solo, que é influenciada pela troca de cátions. Nesse sentido a aplicação de GCL's como barreira para metais tem como principal influência o desempenho hidráulico e as propriedades retentivas dos GCL's em soluções metálicas.

3. METODOLOGIA

O levantamento das publicações foi realizado por meio de consulta bibliográfica e de revisão bibliográfica sistematizada de publicações científicas. A pesquisa de publicações em periódicos, foi realizada no portal de periódicos da Capes, no portal de pesquisas internacionais Science Direct, Scopus e web of Science. Entre as palavras chaves utilizadas destacam-se as seguintes: Geosynthetic clay liners and Landfill; Metals; Chemical interaction; Hydraulic conductivity. As palavras chave também foram pesquisadas em língua portuguesa. Foram selecionados os trabalhos que apresentaram o uso de materiais geossintéticos em barreiras para aterros sanitários. Os resultados e discussão dos artigos são apresentados no item 4.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O uso de geossintéticos apresenta ampla aplicação como barreira de lixiviados em aterros sanitários, e estudos têm sido desenvolvidos sobre o comportamento hidráulico de GCL's em barreiras para atenuar lixiviados contendo metais. Lange et al. (2007) estudaram a capacidade do GCL's em atenuar metais pesados. Os autores avaliaram a atenuação dos metais (As, Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Sr, Zn). O GCL foi pré-hidratado com água desionizada, antes da exposição às soluções de metais. A condutividade hidráulica (k) aumentou de 1.6×10^{-11} m/s, para 5×10^{-11} m/s, isso ocorreu pelo deslocamento de Na⁺ pelos cátions metálicos. O GCL mostrou grande

atenuação para diversos metais presentes no efluente ácido (pH 3,3) e quase neutro (pH 6,8). A troca de cátions, e a precipitação ou co-precipitação foram identificados como os principais mecanismos de retenção dos metais.

Lake et al. (2007) estudaram a condutividade hidráulica de um GCL convencional contendo bentonita sódica para soluções de sulfato de alumínio. O GCL foi pré-hidratado com água destilada e manteve um valor de condutividade hidráulica inferior a 5×10^{-11} m/s após a permeação de solução de alumínio. A troca catiônica e a precipitação de compostos de alumínio foram identificados como prováveis mecanismos de atenuação.

Bradshaw e Benson (2014) avaliaram a condutividade hidráulica em diferentes tensões de um GCL hidratado e permeado por um lixiviado sintético e outro real de aterro sanitário. O GCL utilizado era composto por bentonita sódica granular envolta por dois geotêxteis (um tecido e outro não tecido) e os principais componentes encontrados no lixiviado foram Na, Ca, Mg e K. Após análise, constatou-se que condutividade hidráulica do GCL permeado com os lixiviados foi cinco vezes maior que a condutividade hidráulica com água desionizada. Além disso, foi possível verificar que o teste de condutividade é acelerado se a permeação é feita primeiramente em baixa tensão e em seguida refeita com a tensão pretendida em campo, no entanto essa metodologia apresenta condutividade hidráulica até três vezes maior do que quando é realizada a permeação já com a tensão pretendida.

Bradshaw et al. (2016) novamente estudaram a condutividade hidráulica de GCL's, dessa vez analisando como ela é afetada pela permeação de lixiviados recirculados de aterros de resíduos sólidos, situação em que o uso de revestimentos alternativos não é permitido. Os testes foram conduzidos em amostras de GCL durante 5 anos usando 7 lixiviados de aterros com recirculação de chorume e um lixiviado de

um aterro com gerenciamento convencional e os elementos mais abundantes nos lixiviados foram Na, K, Mg, Ca e Cl. Além disso, os efeitos de tensão e temperatura também foram avaliados. O GCL utilizado no estudo continha bentonita sódica convencional, encapsulada entre dois geotêxteis (um tecido e outro não tecido). Os testes de condutividade hidráulica foram realizados a 4 e 25 °C para avaliar o impacto da atividade microbiana na condutividade hidráulica e a tensão foi avaliada simulando um forro de uma célula de aterro sanitário com sistema de coleta de lixiviados e levantamento de resíduos (20 kPa) e após 5 a 6m de resíduos depositados (70 kPa).

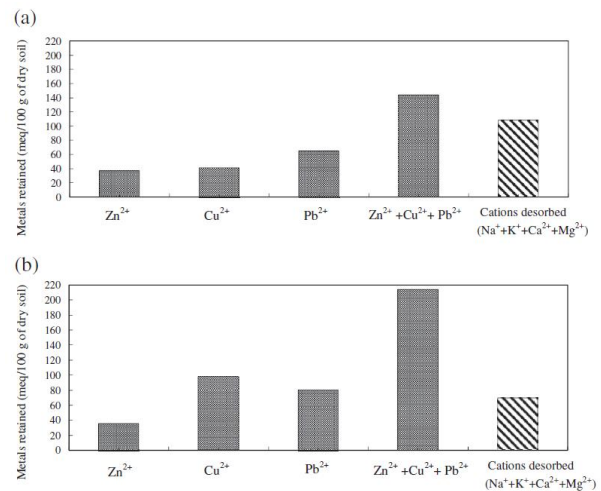
Os resultados analisados pelos autores mostraram que a condutividade hidráulica a longo prazo dos GCL's permeados por lixiviado recirculado é comparável à condutividade hidráulica ao lixiviado convencional, o que indica que lixiviados recirculados não têm impacto adverso maior sobre condutividade do que lixiviados convencionais. Além disso, verificou-se que os GCL's testados com maior tensão apresentaram condutividades até três vezes menores e que a produção de gás por atividade biológica pode ser minimizada reduzindo a temperatura para 4°C sem comprometer a condutividade hidráulica (BRADSHAW et al. 2016). Os autores ainda trazem dados de Bareither et al. (2010), relatando um histórico de vazamento de revestimentos GCL's quando expostas a lixiviados recirculados em dois aterros sanitários, e constatam taxas de vazamento muito baixas, inferiores a 0,34 L/m² ao ano.

Schakelford et al. (2010) estudaram o desempenho hidráulico de dois GCL's como barreiras para aterro de rejeitos de zinco e cobre. Os dois GCL's utilizados foram um GCL padrão e um GCL resistente a contaminantes, que foram permeados por três líquidos, sendo uma água subterrânea do local (GW), uma água de processo (PW) e um lixiviado simulado (SL), que apresentou concentrações de Cd, Zn, Mg, Fe, Ca, Mn, Cu e Al. Os testes de condutividade

hidráulica foram conduzidos em permeâmetros de paredes flexíveis com objetivo de determinar os efeitos da pré-hidratação com o GW, do tipo de GCL, do tipo de líquido permeante e da duração do estágio de contração do teste. Os resultados foram consistentes com os de outros estudos mostrando que a permeação de GCL's com soluções eletrolíticas fortes como o PW e o SL tendem a causar aumentos significativos da condutividade hidráulica quando comparado com o GW. Desta forma, verificou-se que ambos os lixiviados simulados causaram impactos adversos significativos no desempenho hidráulico de ambos GCL's, independentemente de os espécimes GCL estarem ou não pré-hidratados com GW antes da permeação com PW ou SL. No geral, os resultados deste estudo enfatizaram a necessidade de realizar testes de condutividade hidráulica usando materiais específicos do local.

Mazzieri et al. (2013) em estudo com o objetivo de analisar a migração de metais em GCL convencional e GCL com aditivo sintético ácido, ambos pré-hidratados com água destilada, utilizaram como solução permeante lixiviado contendo Cu; Zn²⁺ e Pb³⁺ para um pH 2, o valor baixo de Ph foi para garantir a dissolução dos sais metálicos no lixiviado. Após a permeação do lixiviado a condutividade hidráulica do GCL convencional aumentou de 1,5x10⁻¹¹ m/s para 1,8x10⁻¹⁰. O pH do lixiviado diminuiu de 8,4 para 4,1 isso ocorre pela entrada de H⁺ + cátions. O GCL contendo o aditivo apresentou condutividade hidráulica entre 3,7x10⁻¹² m/s e 4,1x10⁻¹² m/s, na figura 2 é apresentado a comparação de metais retidos por peso molecular em mg, para o GCL convencional (2a) e GCL contendo aditivo (2b).

Figura 2 - Comparação da retenção de metais em GCL convencional e com aditivo.



Fonte: Mazzieri et al. (2013).

A ordem de seletividade observada para o GCL convencional foi Pb > Cu > Zn. Para o GCL com aditivo a maior retenção foi de Cu > Pb > Zn. A retenção diferente de cátions metálicos pode ser relacionada à seletividade de troca de metal da argila montmorilonita, além disso a ordem de seletividade observada dos metais pode ser correlacionada à solubilidade dos hidróxidos. Após a permeação com o lixiviado, a concentração de Na⁺ no efluente aumentou em relação à permeação com água destilada, como resultado de uma liberação de Na⁺ trocável por cátions metálicos, apresentando papel significativo na atenuação de metais.

Yong e Phanduchewit (1993) estudaram a seletividade e a retenção de metais pesados em quatro diferentes tipos de solos, variando o Ph. Os autores destacam que à medida que o pH diminui, a precipitação torna-se menos importante e a troca de cátions se torna dominante, já com valores de pH da solução acima de 4 -5, prevalece a precipitação.

Alguns estudos com foco na condutividade hidráulica (k) para diversos contaminantes inorgânicos, demonstram que os GCL's pré-hidratados apresentam k significativamente mais baixo do que os GCL's convencionais (SCHROEDER et al., 2001; KATSUMI et al., 2008).

Feng et al. (2019) em estudo sobre a solução analítica para o transporte de contaminantes orgânicos degradáveis através de composto constituído por uma camada de Geomembrana (GMB), e um composto geossintético (GCL) verificaram o efeito significativo sobre a melhoria da eficiência de barreira especialmente para cenários com alta carga de lixiviado.

Bouazza et al. (2017) investigaram a influência do subsolo mineralogia sobre a hidratação de um GCL australiano. GCL amostras foram hidratadas sobre areia siltosa, areia argilosa argila de baixa plasticidade e argila de alta plasticidade, que foram compactadas a 2%. Os autores verificaram que a hidratação do GCL dependia fortemente do conteúdo de Esmectita do Subsolo. Assim, quanto maior o conteúdo de Esmectita do subsolos, menor o teor de água do GCL, isso ocorre pelo alto índice de absorção de água, o que faz com que a esmectita possua alta capacidade de troca de cátions com o meio.

Wang et al. (2016) em experiências com diferentes solos, mostraram que a sucção do solo pode variar de zero com o solo totalmente saturado, a centenas de MPa quando em estado seco.

Wang et al. (2019) realizaram testes de condutividade hidráulica (k) para avaliar a permeabilidade de lixiviado inorgânico em GCL com bentonita sódico e GCL com bentonita cálcica ambos foram hidratados com água destilada. Os autores verificaram que a k foi de $1,5 \times 10^{-11}$ m/s para o GCL com bentonita sódica e $5,1 \times 10^{-11}$ m/s para o GCL de bentonita cálcica, isso ocorre pela maior capacidade de expansão da bentonita sódica, quando hidratada, por outro lado a bentonita cálcica apresenta grande capacidade absorvente de íons de solução.

Zhang et al. (2019) em estudo com objetivo de avaliar a condutividade hidráulica de GCLs, disponíveis comercialmente, com diferentes conteúdos de bentonita. Os resultados dos testes mostraram que após a saturação completa das amostras de GCLs, os valores de

condutividade hidráulica são semelhantes, tendendo a diminuição devido a consolidação do GCL.

Para Yang et al. (2017) ainda há grandes lacunas na pesquisa com o uso de GCL's em barreiras. Os autores destacam que a crescente produção de nanomateriais para produtos de consumo aumenta a probabilidade de nanopartículas serem descartadas em aterros sanitários (PAULA E BERGE, 2012). Em geral, os aterros sanitários usam GCL como seu sistema anti-infiltração, pois contém bentonita que apresenta propriedades especiais impermeabilidade, coeficiente de baixa permeabilidade e forte capacidade de adsorção de poluentes. No entanto estudos sobre o comportamento de transporte de nanopartículas em GCL's ainda são escassos.

5. CONCLUSÕES

Dentre os materiais geossintéticos, o GCL é o que tem a utilização mais disseminada como barreiras em aterros sanitários e de rejeitos. Os estudos já realizados, demonstram que o emprego desses materiais como barreiras atenuam a permeação de um grande número de metais, devido a sua baixa condutividade hidráulica, sendo a troca catiônica, e a precipitação ou co-precipitação, identificado como os principais mecanismos de retenção desses metais.

Além disso, os resultados dos estudos enfatizaram a necessidade de utilizar materiais específicos do local nos testes de condutividade hidráulica, visando entender o real comportamento dos contaminantes sob os geossintéticos. Também foi possível perceber que ainda existem lacunas na realização de estudos sobre a aplicação de outros tipos de geossintéticos como barreiras, que ainda são bastante restritos aos GCL's.

Os resultados das pesquisas citadas nesse trabalho podem ser de interesse para pesquisadores e engenheiros que projetam

aterros sanitários e outras instalações de contenção de líquidos.

2.1. Reconhecimento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)

6. REFERÊNCIAS

BAREITHER, C. A., BENSON, C. H., BARLAZ, M. A., EDIL, T. B.; TOLAYMAT, T. M. Performance of North American bioreactor landfills. I: Leachate hydrology and waste settlement. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000219, 824–838, 2010.

BENSON, C., OREN, A., AND GATES, W. Hydraulic conductivity of two geosynthetic clay liners permeated with a hyperalkaline solution. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, p. 206–218, 2010.

BOUAZZA, A. Geosynthetic lining in mining applications. In: **Proceedings 6th International Congress on Environmental Geotechnics**, New Delhi, India, v. 1, p. 221-259, 2011.

BOUAZZA, A., ALI, M. A., GATES, W. P. & ROWE, R. K. New insight on geosynthetic clay liner hydration: the key role of subsoils mineralogy. **Geosynthetics International**, v. 24, p. 139–150, 2017.

BRADSHAW, S. L.; BENSON, C. H. Effect of Municipal Solid Waste Leachate on Hydraulic Conductivity and Exchange Complex of Geosynthetic Clay Liners. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 140. DOI: 10.1061/(ASCE) GT.1943-5606.0001050, 2014.

BRADSHAW, S. L.; BENSON, C. H.; RAUEN, T. L. Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners to Recirculated Municipal Solid Waste Leachates. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 142. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001387, 2016.

EGLOFFSTEIN, T.A. Properties and test methods to assess bentonite used in GCL's. In: Koerner, R., Gartung, E., Zanziger, H. (Eds.), **Geosynthetic Clay Liners**. Balkema, Rotterdam, Netherlands, p. 51-73, 1994.

FENG, S.J., PENG, M.Q., CHEN, H.X., & CHEN, Z.L. (2019). Fully transient analytical solution for degradable organic contaminant transport through GMB/GCL/AL composite liners. **Geotextiles and Geomembranes**. doi:10.1016/j.geotexmem.2019.01.017

KATSUMI, T., ISHIMORI, H., ONIKATA, M., FUKAGAWA, R. Long-term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 26, p. 14-30, 2008.

LAKE, C.B., CARDENAS, G., GOREHAM, V., GAGNON, G.A. Aluminum migration through a geosynthetic clay liner. **Geosynthetics International**, v. 14, p. 201-209, 2007.

LANGE, K., ROWE, R.K., JAMIESON, H. Metal retention in geosynthetic clay liners following permeation by different mining solutions. **Geosynthetics International**, v. 14, p. 178-187, 2007.

MAZZIERI, F.; DI EMIDIO, G.; FRATALOCCHI, E.; DI SANTE, M.; PASQUALINI, E. Permeation of two GCLs with an acidic metal-rich synthetic leachate. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 40, p. 1-11, 2013.

MENDES, M. J. A.; TOUZE-FOLTZ, N.; PALMEIRA, E. M.; PIERSON, P. Influence of structural and material properties of GCL's on interface flow in composite liners due to geomembrane defects. **Geosynthetics International**, v. 17, p. 34-47, 2010.

PALMA, S. L.; SOUZA, S. T. Manual Técnico FortLiner: Geocomposto Bentonítico GCL. Ober Geossintéticos, 12p. Disponível em: <<http://www.obergeo.com.br/linha-de-produtos>>. Acesso em: 28 de nov. 2018.

PAULA L. BERGE N. D. Single-walled carbon nanotube behavior in representative mature leachate. **Waste Manage**, v. 32, p. 1699–1711, 2012.

YANG, P. J.; TAO Z.; YOULONG L. Z. Effect of Osmotic Pressure on Migration Behavior of nZnO in GCL's. **Environmental Earth Sciences**, v.10, 2017.

ROWE, R.K., QUIGLEY, R.M., BRACHMAN, R.W.I., BOOKER, J.R. Barrier Systems for Waste Disposal Facilities, second ed. Spon Press, London, UK, 2004.

SCALIA, J., BENSON, C.H. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers with composite barriers. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.137, p. 683-695, 2011.

SCHROEDER, C., MONJOIE, A., ILLING, P., DOSQUET, D., THOREZ, J. Testing a factoryprehydrated GCL under several conditions. In: Proceedings Sardinia 2001, **8th International Waste Management and Landfill Symposium**, Santa Margherita di Pula, Cagliari, Italy. CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy, p. 188-196, 2001.

SHACKELFORD, C. D.; SEVICK, G. W.; EYKHOLT, G. R. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to tailings impoundment solutions. **Geotextiles and Geomembranes**. v.28, p. 149-162, 2010.

YONG, R. N.; PANDUNGCHWIT, Y. pH influence on selectivity and retention of heavy metals in some clay soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 30, p. 821-833, 1993.

WANG, Y., MA, J., GUAN, H. A mathematically continuous model for describing the hydraulic properties of unsaturated porous media over the entire range of matric suctions. **Journal Hydrology**. v. 541, p. 873–888, 2016.

WANG, B.; XU, J.; CHEN, B.; DONG, X.; DOU, T. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to inorganic waste leachate. **Applied Clay Science**. V. 168, p. 244-248, 2019.

ZHANG, G.; ZHANG, H.; LIU, J.; ZHOU, L.; YAN, M.; WANG, J. Experimental Investigation of Volume Change and Hydraulic Conductivity on Geosynthetic Clay Liner. **Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics**. Environmental Science and Engineering, Singapore, ICEG 2018.