

Quantificação de esforços em geomembranas devido o aumento da disposição de resíduos

Gabriel Orquizas Mattiello Pedroso

Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, gabpedroso@hotmail.com

Jefferson Lins da Silva

Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: Geossintéticos são materiais industrializados, fabricados com pelo menos um componente polimérico sintético ou natural, e sua utilização cresceu consideravelmente nas últimas décadas. A aplicação no setor da geotecnia ambiental é destacada em sistemas de barreiras de controle e desvio de fluxo em aterros sanitários e lagoas de efluentes. Nestes sistemas, sua principal função é evitar a migração indesejável de líquidos para o solo circundante. A geomembrana é o elemento chave em grande parte das barreiras de controle e desvio de fluxo, porém um dos problemas associados a este material é a degradação por meio da exposição a agentes mecânicos, químicos, biológicos e hidráulicos, seja na fase de instalação ou durante a vida útil do aterro. Ainda, notam-se divergências de opiniões acerca da eficiência de algumas camadas de proteção, considerando a complexidade do sistema e seu desempenho. Neste contexto, este artigo pretende analisar numericamente, por meio do programa SIGMA/W, os esforços atuantes na geomembrana durante o processo de empilhamento dos resíduos em um aterro sanitário. O modelo do aterro sanitário é bidimensional e suas dimensões são compatíveis com um aterro com 50 m de comprimento e 12 m de altura. Os materiais utilizados na composição da camada de fundo que serve como sistema de barreira são, de baixo para cima, argila, geotêxtil não tecido, geomembrana e uma areia bem graduada. O modelo simula a disposição dos resíduos sólidos em 4 etapas de enchimento do aterro sanitário, no qual cada etapa compreende 3 m de espessura de resíduos sólidos. A geomembrana foi modelada como um elemento de viga ancorada na crista do talude do aterro e os elementos de interface foram colocados entre os materiais utilizados no modelo (argila/geomembrana, geomembrana/areia e areia/resíduo sólido). As simulações foram feitas a fim de examinar diferentes condições, como por exemplo: variabilidade dos parâmetros de resistência da argila, da areia e das interfaces, e diferentes valores de peso específico do resíduo sólido. Para cada combinação de simulação será avaliado o comportamento da geomembrana quanto a seu deslocamento, deformação e força axial. Os valores dos parâmetros necessários para a simulação numérica foram obtidos de resultados experimentais encontrados na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Geomembrana, Barreira de fluidos, Aterro Sanitário, Análise Numérica.

1 INTRODUÇÃO

Em âmbito mundial, a utilização de geossintéticos na engenharia geotécnica e ambiental teve um aumento significativo, devido as suas vantagens, como por exemplo, redução de custos, fácil aplicabilidade, durabilidade e por se tratar de um material industrializado possuem valores de suas

propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas tabelados a partir de ensaios de laboratório.

Nos aterros sanitários há um crescente uso de geomembranas de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) na composição dos sistemas de impermeabilização de barragens de resíduo, segundo Gallagher *et al.* (2006). Existem três formas de configuração de uma barreira de resíduo, revestimento simples, revestimento

composto e revestimento duplo, conforme citado na NBR 16199:2013. Segundo Vertematti (2015), a utilização de geomembranas de PEAD é recomendada, pois elas possuem excelente estabilidade e durabilidade, frente às solicitações mecânicas e químicas.

Mesmo com todas as qualidades citadas acima o projeto de um sistema de barreiras de resíduos tendem a ser complexos, devido a interação da interface geossintéticos/solo e do comportamento da geomembrana quando exposta a diversas condições adversas, as quais modificam seu desempenho mecânico e hidráulico, assim como estudado nos trabalhos de Rebelo (2003) e Lodi (2003).

Neste contexto, este trabalho analisa o desempenho mecânico da geomembrana considerando as fases de enchimento de um aterro sanitário, por meio de uma modelagem numérica utilizando-se o *software* SIGMA/W pertencente ao programa GEOSTUDIO/2012. As simulações foram feitas a fim de examinar diferentes condições de exigência mecânica da geomembrana, utilizando-se valores distintos nos parâmetros de entrada do modelo, como por exemplo: variabilidade dos parâmetros de resistência da argila, da areia e das interfaces e diferente valor de peso específico do resíduo sólido. Para cada combinação de simulação será avaliado o comportamento da geomembrana quanto ao seu deslocamento, deformação e força axial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Visão geral do modelo

Trata-se de um aterro sanitário com 40 m de comprimento por 12 m de altura, com um talude de ângulo aproximadamente de 22°, o modelo foi baseado no artigo apresentado por Zamara *et al.* (2013).

A combinação de materiais formando o sistema de barreira de resíduo segue a seguinte ordem: solo da base, argila compactada, geomembrana, geotêxtil não tecido e por último a deposição do resíduo. A Figura 1 mostra a ordem dos materiais na base e no talude do

aterro sanitário.



Figura 1. Visão esquemática do sistema de barreira de resíduo.

O *software* SIGMA/W utiliza-se do métodos dos elementos finitos a fim de simular o comportamento dos materiais e das interfaces do modelo simulado, ele pode representar os esforços nos resíduos sólidos e no sistema de barreira de fluídos.

A malha de elementos finitos utilizada é considerada como um meio contínuo, sujeito a um estado plano de tensão e constituída por elementos quadriláteros distantes de 0.5 e uma malha refinada próxima aos elementos de interface com 0.3 m.

O modelo é bidimensional e foi construído em quatro etapas de enchimento, no qual cada etapa representa uma célula de três metros de resíduo. A Figura 2 abaixo ilustra duas diferentes etapas da construção.

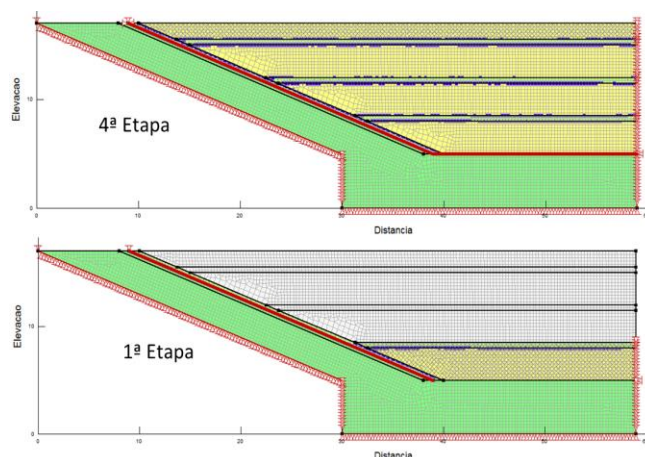


Figura 2. Ilustração das etapas de modelagem.

Conforme ilustrado na Figura 2 o modelo foi simulado em quatro etapas, segundo Fowmes *et*

al. (2007) a construção do modelo em estágios de enchimento com resíduo sólido é o procedimento mais crítico em termos de estabilidade, pois a deformação do material é acumulativa com as etapas. Fowmes *et al.* (2007) também afirma que a construção do modelo em várias etapas previne um alto carregamento devido ao alto volume de material e assim evitando uma deformação que não exemplifica a realidade.

Baseado no modelo de Fowmes *et al.* (2007) e com o intuito de representar a realidade é necessário a ancoragem da geomembrana na crista do talude, evitando sua movimentação e resultando no desenvolvimento de tensões no corpo da geomembrana.

2.2 Parâmetros adotados

A resistência ao cisalhamento do solo adotado na simulação é representada pelo critério de Mohr-Coulomb e a do resíduo sólido como um material Elasto-Plástico.

O valor do peso específico do resíduo foi adotado com base em Abreu e Vilar (2013), o qual, por meio de ensaios de *crosshole* obteve-se o valor do peso específico do resíduo no aterro sanitário de São Carlos. Os valores dos parâmetros de resistência do resíduo utilizados no modelo foram obtidos em Jones *et al.* (1997), coesão e ângulo de atrito, e em Jones *et al.* (2005), módulo de Young e coeficiente de Poisson.

As propriedades dos solos adotados foram baseadas nos dados obtidos pelo estudo experimental de Rebelo (2003). A Tabela 1 apresenta um resumo dos materiais utilizados no modelo.

Tabela 1. Propriedades dos materiais utilizados.

Material	E (Mpa)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Argila	150	27,5	5	23
Areia	70	17	0	35
Resíduo	0,5	10	5	25

Os geossintéticos foram considerados como elementos de viga no modelo e suas propriedades são obtidas segundo a norma ASTM D638 (2003) e . A geomembrana utilizada possui o módulo de Young $E = 338$ MPa (5% de deformação) e o geotêxtil com

módulo de Young $E = 120$ MPa (5% de deformação).

A importância da interface já foi citada por alguns autores como Rebelo (2003); Dixon e Jones (2006); Monteiro, (2012), levando isso em consideração o *software* SIGMA/W nos permite modelar a interface entre dois elementos. As interfaces consideradas foram entre a geomembrana/argila (GM/C), geomembrana/geotêxtil (GM/GT), geotêxtil/areia (GT/S) e areia/resíduo (S/R).

O ensaio de cisalhamento direto é tipicamente utilizado para ensaios de interface em geossintéticos, seu procedimento é normatizado segundo ISO 12957-1:2005. E a partir da envoltória de resistência define-se o ângulo de atrito e a coesão entre os materiais da interface. Os valores de interface considerados neste trabalho foram os apresentados no trabalho de Zamara *et al.* (2013) e estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de interface considerados. Fonte: Zamara *et al.* (2013).

Material	E (MPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	δ (°)
GM/C	10	8	22	5
GM/GT	10	13.3	1.4	15
GT/S	10	29.9	1.8	5
S/R	10	20	5	2.5

2.3 Simulações realizadas

Cinco diferentes análises numéricas foram realizadas, a fim de compreender o comportamento de cada material dentro do modelo e avaliar mecanicamente a geomembrana em diferentes situações.

Na Tabela 3 abaixo é resumido qual parâmetro sofreu alteração em cada simulação.

Tabela 3. Resumo das simulações realizadas.

Simulação	Parâmetro que sofreu alteração
1	Simulação inicial (Valores Tabelas 1 e 2)
2	E das interfaces reduzido para 1 MPa
3	E da argila reduzido para 30 MPa
4	Peso específico do resíduo sólido aumentado para 14 kN/m ³
5	Ângulo de dilatação das interfaces (δ) reduzido para 1°

3 RESULTADOS

Foram realizadas cinco simulações, assim como resumidas na Tabela 3, para cada simulação foram plotados gráficos de deslocamento (m) x comprimento (m), força axial (kN) x comprimento (m) e deformação (%) x comprimento (m), todos os gráficos foram considerados como a distância 0 a crista do

talude do aterro sanitário e todos os valores plotados são a respeito da geomembrana. As Figuras 3, 4 e 5 mostram os resultados de cada gráfico considerando as diferentes simulações realizadas.

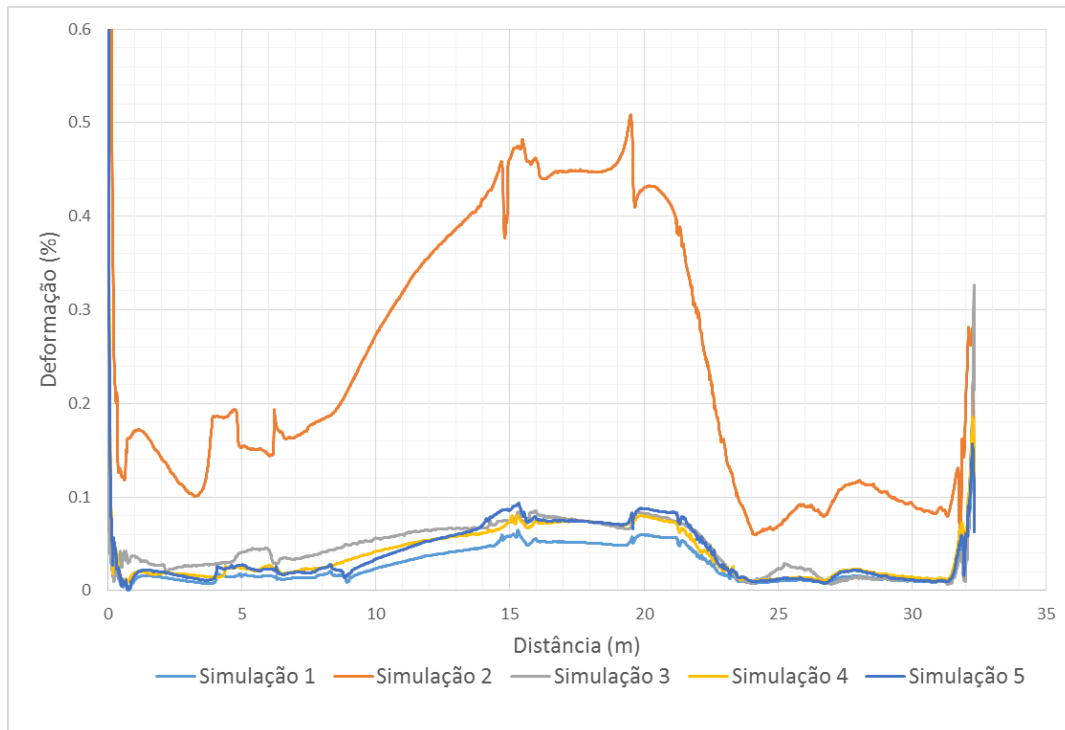


Figura 3. Deformação da geomembrana.

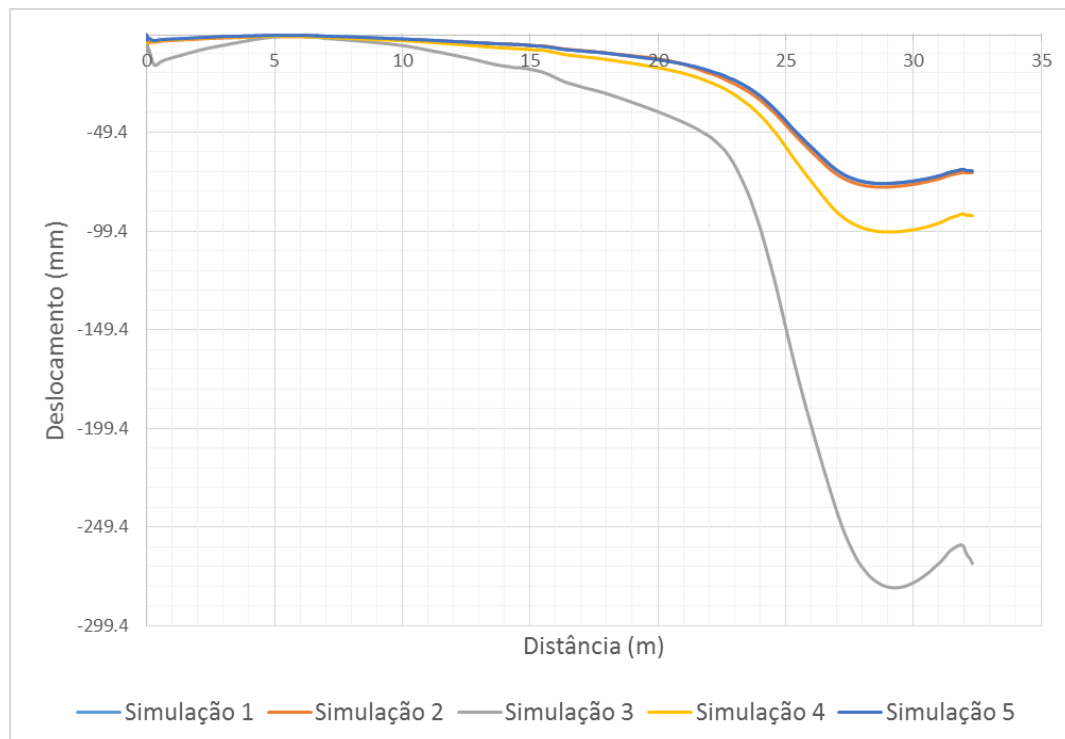


Figura 4. Deslocamento da geomembrana.

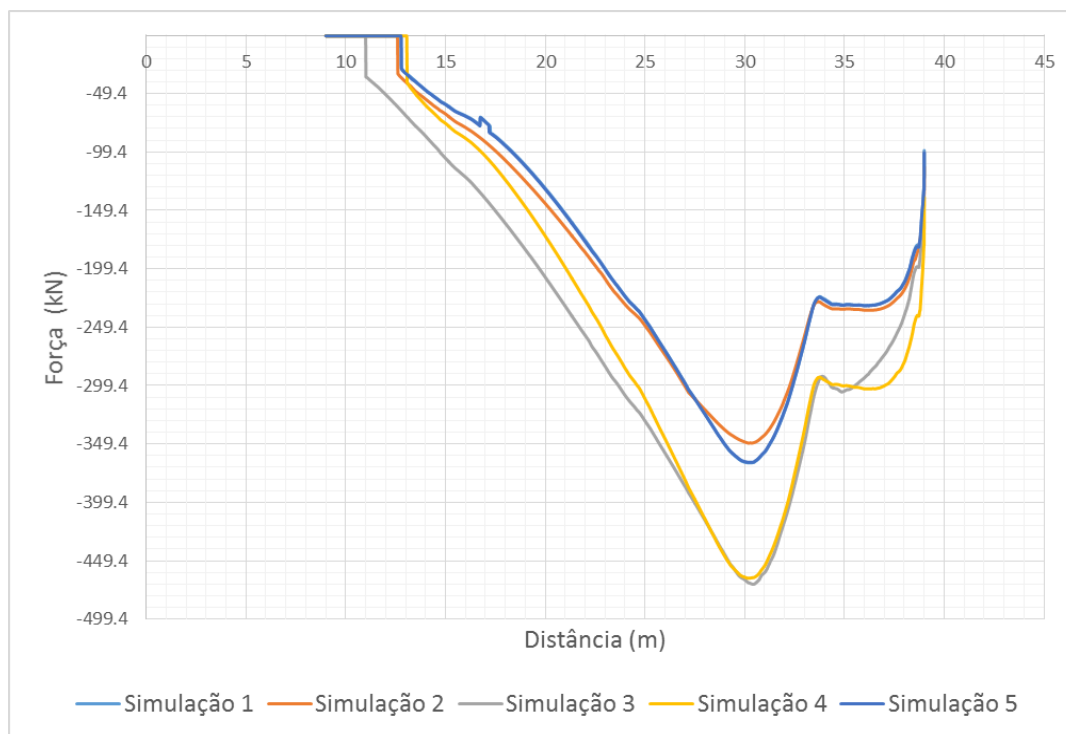


Figura 5. Força na geomembrana.

3.1 Influência do módulo de rigidez da argila

Observando-se as Figuras 5 e 4 percebe-se que o módulo de rigidez da argila é importante pois irá controlar a deformação da camada de argila compactada, ou seja, com a diminuição do módulo de rigidez, consequentemente a força aplicada na geomembrana e seu deslocamento aumentará.

3.2 Influência do peso específico do resíduo sólido

Com o aumento do peso específico do resíduo sólido de 10 kN/m^3 para 14 kN/m^3 há um aumento na força mobilizada pela geomembrana e também percebe-se que a forma do gráfico é similar, sendo a diferença na magnitude de seus valores, assim como mostrado na Figura 5.

O peso específico de 14 kN/m^3 pode ocorrer na prática, pois trata-se de um resíduo sólido com menor quantidade de matéria biodegradável.

3.3 Influência da interface

O SIGMA/W considera a interface como um elemento sem espessura que separa dois

elementos estruturais, com a função de permitir um esforço cisalhante entre os elementos.

Segundo Dixon *et al.* (2006) a maioria das falhas em aterros sanitários é devido a seleção inadequada dos parâmetros de resistência da interface entre os componentes. Com esse problema em vista, Fowmes *et al.* (2007) concluíram que a escolha de um valor muito alto de rigidez da interface restringe o movimento, podendo gerar resultados que subestimam os valores reais. Já a escolha de um valor baixo de rigidez causa excessiva movimentação e a resistência não é mobilizada, obtendo-se resultados conservadores.

Por meio da Figura 3, observa-se que a deformação da geomembrana é afetada pelos valores assumidos pelas interfaces. Com a diminuição da rigidez das interfaces, percebe-se que a deformação da geomembrana sofreu um aumento significativo, assim como previsto por Fowmes *et al.* (2007).

4 CONCLUSÕES

Um modelo numérico que simula a construção de um aterro sanitário foi apresentado neste trabalho. Os esforços mecânicos (deslocamento, força axial e deformação) suportados pela

geomembrana foram apresentados. E através de cinco diferentes simulações foram analisados a influência da variação da rigidez da interface, do peso específico do resíduo sólido e da rigidez da camada de argila verificando a influência de cada parâmetro de entrada nos resultados do modelo.

O modelo simulado pelo *software* SIGMA/W por meio do método dos elementos finitos, apresentou resultados de mesma magnitude dos resultados obtidos por Zamara *et al.* (2013), assim mostrando a validade do modelo. A Tabela 4 mostra os valores máximos obtidos por Zamara *et al.* (2013) e os valores obtidos no modelo simulação 1 apresentado.

Tabela 4. Comparação do modelo apresentado e Zamara *et al.* (2013).

	Zamara <i>et al.</i> (2013)	Modelo simulação 1
Deslocamento geomembrana (mm)	40.9	75
Deformação geomembrana (%)	0.13	0.06
Força geomembrana (kN/m)	2.29	3.65

Por outro lado, a calibração e comparação com ensaios de laboratório e instrumentação de campo são necessárias.

Através do modelo foi possível observar a influência dos parâmetros de interface nos esforços atuantes na geomembrana, mostrando a importância de um estudo laboratorial e estatístico dos dados que alimentam o modelo.

O aumento do peso específico do resíduo sólido teve uma grande influência na força axial e no deslocamento da geomembrana, dando relevância para a caracterização do tipo de resíduo que será disposto no aterro sanitário.

A importância de um estudo numérico do comportamento da geomembrana em aterros sanitários é necessária para melhor entendimento do funcionamento do sistema.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao CNPq pela bolsa de estudos

e ao Departamento de Geotecnia da USP-EESC, por todo apoio e incentivo ao longo deste projeto.

REFERÊNCIAS

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
NBR 16199: Geomembranas Termoplásticas – Instalação em Obras Geotécnicas e de Saneamento Ambiental, 2013, 30p.
- ASTM D638 (2003) *Standard test method for tensile properties of plastics*. American Society for Testing and Materials.
- Abreu, A.E.S. e Vilar, O. (2013) *In place MSW unit weight measurement in São Carlos landfill, Brazil*. Proceedings Sardinia 2013, 13 International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cabliari, Italy, 11 p. CD-ROM.
- Dixon, N., Jones, D.R.V. e Fowmes, G.J. (2006) *Interface shear strenght variability and its use in reliability-based landfill stability analysis*. Geosynthetics International. Vol. 13 Nº 1.p1.
- Fowmes, G.J., Jones, D.R.V., e Dixon, N. (2007) *Analysis of a landfill directive compliant steepwal. lining system*. Proceedings 10th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia. p369.
- Gallagher, E.M.G; Needham, A.D e SMITH, J.W.N. (2006) *The service life of polyethylene geomembrane barriers*. Engineering Geology 85.Issue 1-2. 82-90.
- Jones, D.R.V., Taylor, D.P. e Dixon, N. (1997) *Shear strenght of waste and its use in landfill stability analysis*. In: Yong, R.N., Thomas, H.R. (Eds.), Proceedings of the Geoenvironmental Engineering Conference. Thomas Telford, London, pp. 343-350.
- ISO 12957- 1 (2005) *Geosynthetics – Determination of friction characteristics – Part 1: Direct shear test*. International Organization for Standardization. 8p.
- Jones, D.R.V. e Dixon, N. (2005) *Landfill lining stability and integrity: the role of waste settlement*. Geotextiles and Geomembranes 23, pp. 27-53.
- Lodi, P.C. (2003) *Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de poli (cloreto de vinila) PVC*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 354p.
- Monteiro, C.B. (2012) *Estudo de interface solo-geomembrana com variações de níveis de saturação do solo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 130p.
- Rebello, K.M.W. (2003) *Resistência de interfaces entre geomembranas e solos através do ensaio de ring shear*. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 194p.
- Vertematti, J.C./Coordenador, (2015) *Manual brasileiro de geossintéticos*. Ed. Bluncher. São Paulo, Brasil.

Zamara, K.A., Dixon, N., Fowmes, G., Jones, D.R.V., Zhang, B., (2013) *Landfill site slope lining system performance: study case vs numerical modelling analysis*. Geotextiles and Geomembranes, 42, pp 224-235.