

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA BENTONITA UTILIZADA EM GCL'S (GEOSYNTHETIC CLAY LINERS) PARA APLICAÇÃO EM BASES DE ATERROS DE RESÍDUOS

Leonardo Sanches Previti ¹; Fernando Luiz Lavoie ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Nos últimos anos, os aterros sanitários vêm sofrendo profundas transformações em sua configuração física devido, principalmente, ao desenvolvimento de novos materiais utilizados em liners de base. Inicialmente, a impermeabilização era realizada por camadas de argila compactada (CCL); hoje, porém, tal solução tem sido preterida pelos GCLs, devido às inúmeras vantagens dos geossintéticos em comparação às CCLs. Os GCLs consistem em uma fina camada de bentonita (argila montmorilonítica) envolvida entre duas camadas de geotêxteis. Esta pesquisa destinou-se a estudar detalhadamente o comportamento deste material. Dentre as propriedades estudadas da bentonita, podemos citar sua alta expansibilidade (da ordem de 200% em relação à espessura original) e sua baixa permeabilidade, que pode atingir valores próximos a $9.10^{-10} \text{ cm.s}^{-1}$ para tensões superiores a 196kPa. Conclui-se, portanto, que o uso destes geossintéticos para impermeabilizações propicia uma maior segurança no manejo de aterros sanitários, além de permitir um ganho de volume no armazenamento de resíduos, em comparação às argilas compactadas.*

Introdução

Um dos maiores problemas ambientais no Brasil é a geração e armazenamento de resíduos sólidos. Por muito tempo esta questão foi negligenciada pela sociedade e autoridades civis, permitindo-se, assim, um aumento das áreas de lixões próximos a grandes centros urbanos.

Com a aprovação da Lei nº 12.305/10, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a construção de aterros sanitários tornou-se prioridade para muitos municípios, por se tratar de uma solução muito mais ecológica e racional no armazenamento de lixo.

A impermeabilização da base dos aterros pode ser feita pelo uso de geossintéticos ou pela compactação de solo. Dentre as vantagens do GCL (Geosynthetic Clay Liner), podemos citar: a) pequena espessura, se comparado ao solo compactado; b) instalação simples; c) extremamente resistente a recalques diferenciais.

O princípio ativo do GCL, e objeto de estudo desta pesquisa, é a argila bentonítica, que fica contida entre duas camadas de geotêxteis ou entre uma camada de geotêxtil e outra de geomembrana.

Por ser um material altamente expansivo quando em contato com fluidos, a bentonita pode bloquear a passagem de subprodutos da decomposição do lixo, como chorume e gases contaminantes, para o solo.

Nesta pesquisa foi feito um estudo das propriedades da bentonita em pó e granulada, buscando comprovar sua eficiência como barreira de fluxo, teoricamente maior quando comparada a outros materiais convencionais, e expandir os dados presentes na literatura quanto à sua permeabilidade sob tensões elevadas.

Material e Métodos

As bentonitas utilizadas (granulada e em pó) foram fornecidas por um produtor nacional de GCLs. Estas argilas foram utilizadas para todos os ensaios descritos a seguir.

a) Ensaio granulométrico

Realizado de acordo com a norma NBR7181/1984.

b) Limites de Atterberg

Os limites de consistência de cada amostra foram determinados através dos ensaios de limite de liquidez (LL), de acordo com a norma NBR 6459, e limite de plasticidade (LP), de acordo com a norma NBR 7180. Para encontrar-se o limite de liquidez, coloca-se um corpo de prova moldado da argila em um aparelho de Casagrande. Com o auxílio de uma ferramenta, faz-se uma pequena ranhura na argila. O LL corresponde à umidade do corpo em que a ranhura se fecha após a aplicação de 25 golpes pelo aparelho.

O limite de plasticidade, por outro lado, corresponde à umidade em que a amostra, moldada em pequenos cilindros de até 3mm de diâmetro, fragmenta-se.

O índice de plasticidade, IP, é determinado através da diferença do LL e do LP.

c) Ensaios de inchamento e expansão livre

O ensaio de inchamento foi executado de acordo com a norma ASTM D5890. Ele consiste na hidratação gradativa de 2g da argila peneirada em uma proveta graduada, com um volume de 90mL de água destilada. Ao término da colocação da amostra (feita cuidadosamente a cada 0,1g), adiciona-se mais 10mL de água para que eventuais resíduos presos às paredes da proveta sejam retirados. Após um período de 16 horas, registra-se o volume de expansão da argila.

O ensaio de expansão livre foi realizado conforme a norma ASTM D4829. Neste experimento, o solo é colocado em um aparelho que o confina lateralmente, permitindo apenas a expansão vertical. Sobre o solo posiciona-se um edômetro, capaz de medir a variação de altura do corpo de prova. O ensaio é finalizado quando a variação de altura cessa e o solo estabiliza-se.

d) Ensaios de permeabilidade a carga variável e adensamento unidimensional

Os ensaios de permeabilidade e adensamento foram executados (de acordo com as normas NBR 14545 e NBR12007, respectivamente) em uma prensa de adensamento, onde o corpo de

prova foi posicionado. Este corpo foi saturado com água e pressionado com uma tensão de confinamento constante. A cada 24 horas, aumentou-se a carga de confinamento do CP. As deformações sofridas pelo solo foram registradas em um software ligado à prensa.

Simultaneamente, foi feita a avaliação da variação volumétrica de uma bureta conectada à célula onde o corpo de prova estava confinado. Pela diferença de volume, foi possível calcular os coeficientes de permeabilidade do solo sob diferentes pressões. A figura 1 mostra a prensa de adensamento utilizada no estudo.

Figura 1 - Prensa de adensamento.



Resultados e Discussão

Os resultados dos ensaios granulométricos estão apresentados nas figuras 2 e 3.

Figura 2 – Curva granulométrica da bentonita granulada.

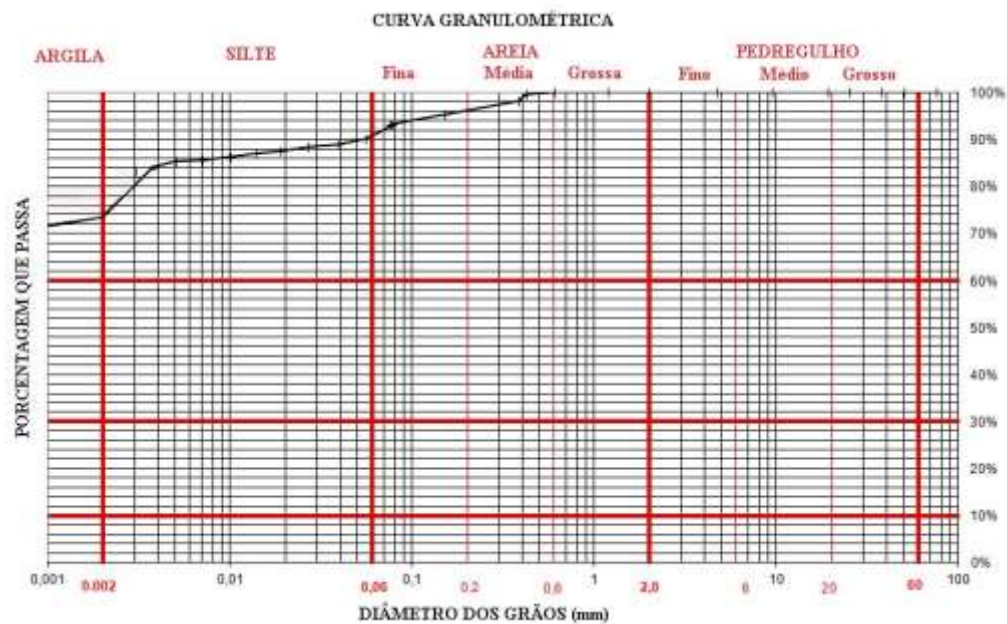
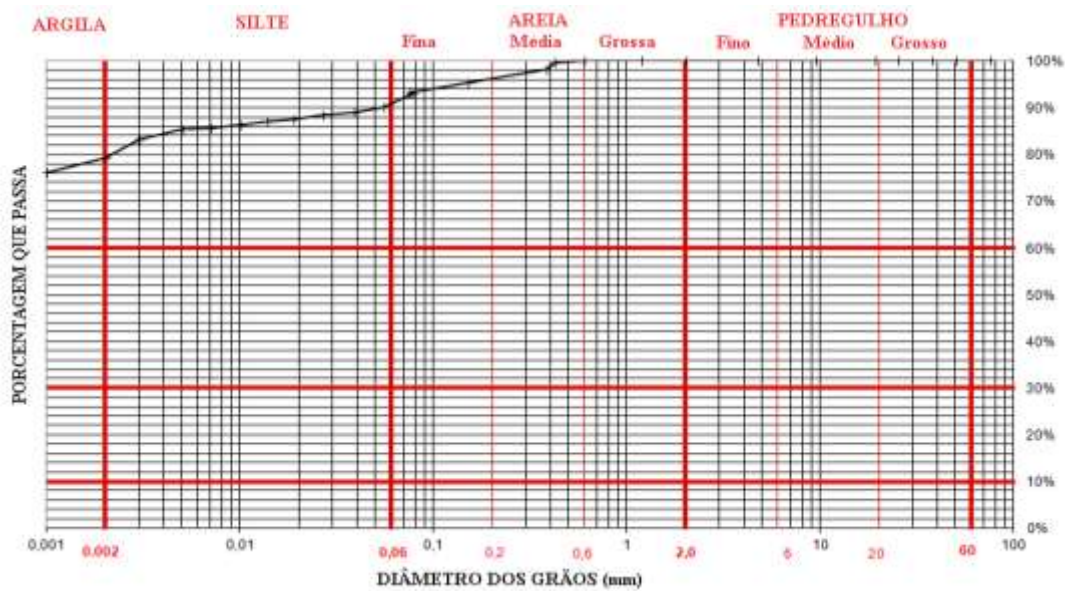


Figura 3 – Curva granulométrica da bentonita em pó.



A tabela 1 apresenta as propriedades das amostras ensaiadas.

Tabela 1 - Propriedades das amostras.

Propriedades	Bentonita Granulada	Bentonita em Pó
--------------	---------------------	-----------------

ρ (g/cm³)	2,813	2,790
LL (%)	323	333
LP (%)	54	43
IP (%)	269	290
e	1,39	1,65
w (%)	13,24	11,68

Analisando-se as curvas apresentadas nas figuras 2 e 3, foi possível determinar a atividade coloidal de cada amostra pela equação 1. Os resultados estão apresentados na tabela 2.

Equação 1
$$AC = \frac{IC}{\% \text{ Argila}}$$

Tabela 2 - Atividade coloidal das amostras.

Propriedade	Bentonita Granulada	Bentonita em Pó
AC	3,63	3,72

De acordo com os resultados apresentados na tabela 2, as duas argilas são consideradas ativas, ou seja, $AC > 1,25$.

Os resultados dos ensaios de inchamento e expansão livre estão apresentados na tabela 3. As curvas de expansão livre em função do tempo podem ser vistas nas figuras 4 e 5, respectivamente, para a bentonita granulada e em pó.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de inchamento e expansão livre das amostras.

Ensaio	Bentonita Granulada	Bentonita em Pó
Inchamento (mL/2g)	20	25
Expansão livre (%)	162,4	207,6

Figura 4 - Expansão livre da bentonita granulada em função do tempo.

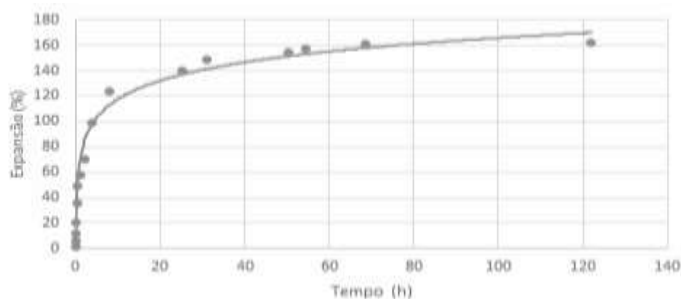
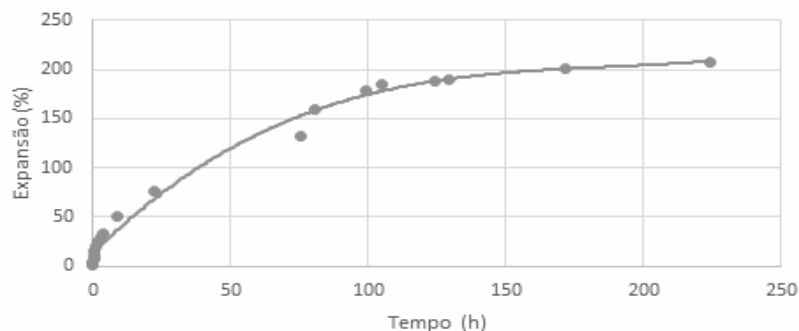


Figura 5 - Expansão livre da bentonita em pó em função do tempo.



Os resultados do ensaio de adensamento de ambas as amostras estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de adensamento.

Bentonita Granulada		Bentonita em Pó	
Tensão (kPa)	Índice de vazios	Tensão (kPa)	Índice de vazios
12,3	1,53	12,3	1,79
12,3	2,588	12,3	3,477
24,5	2,588	24,5	3,477
49,0	2,588	49,0	3,454
98,1	2,463	98,1	3,287
196,1	2,172	196,1	2,812
490,4	1,474	490,4	2,156
980,7	0,987	980,7	1,728
1961,4	0,572	1961,4	1,276
490,4	0,795	490,4	1,499
98,1	1,263	98,1	1,849
12,3	1,871	12,3	2,117

Com estes resultados, foi possível calcular a pressão de expansão das argilas. Esta propriedade corresponde à tensão em que o índice de vazios, após a expansão, iguala-se ao índice da amostra antes de ser ensaiada. As figuras 6 e 7 apresentam as curvas de adensamento das bentonitas granulada e em pó, respectivamente.

Figura 6 - Índice de vazios da bentonita granulada em função da tensão aplicada.

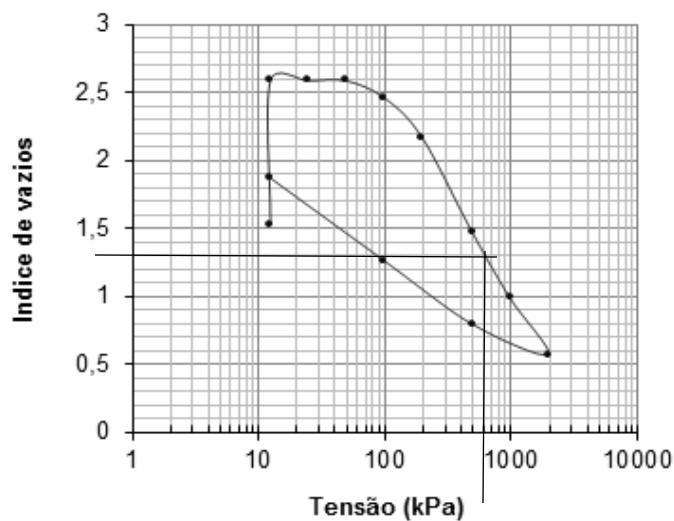
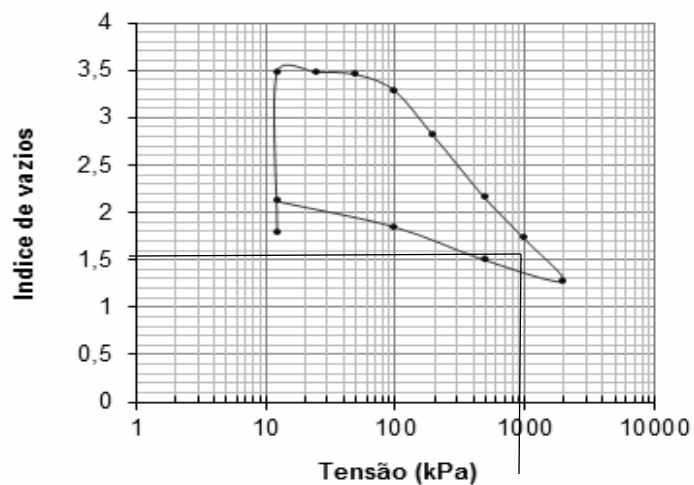


Figura 7 - Índice de vazios da bentonita em pó em função da tensão aplicada.



Na tabela 5 são apresentadas as pressões de expansão das amostras ensaiadas.

Tabela 5 – Pressão de expansão das amostras.

Amostra	Pressão de Expansão (kPa)
Bentonita Granulada	470,0
Bentonita em Pó	870,0

As permeabilidades em função das tensões de confinamento de cada amostra estão apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 - Coeficiente de permeabilidade em função da pressão de cada amostra.

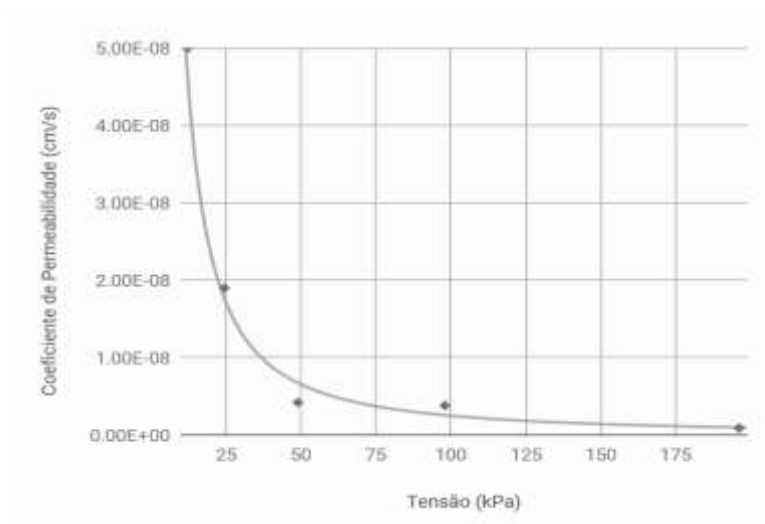
Bentonita Granulada		Bentonita em Pó	
Tensão (kPa)	k (cm/s)	Tensão (kPa)	k (cm/s)
12,3	9,80E-09	12,3	5,00E-08
24,5	3,70E-09	24,5	1,90E-08
49,0	3,70E-09	49,0	4,20E-09
		98,1	3,80E-09
		196,1	9,00E-10

Para traduzir os valores de tensão respectivos a cada coeficiente de permeabilidade, relacionamos a altura de resíduos com a permeabilidade do solo. Para esta análise, foram utilizados os valores de k obtidos para a bentonita em pó.

Além disso, será necessária a adoção de um valor médio para o peso específico de resíduos. Utilizou-se $\gamma_{\text{médio}} = 12,50 \text{ kN/m}^3$ (valor próximo ao encontrado na literatura, arredondado para efeito de cálculo, tendo em vista a variabilidade desta propriedade para um material tão irregular como o lixo).

Os resultados estão apresentados na figura 8 (a equação para determinar-se o coeficiente de permeabilidade é $k = 1,51\text{E-}06.x^{-1,39}$ e foi ajustada com base no gráfico da figura 8).

Figura 8 - Gráfico da tensão vs. coeficiente de permeabilidade da bentonita em pó.



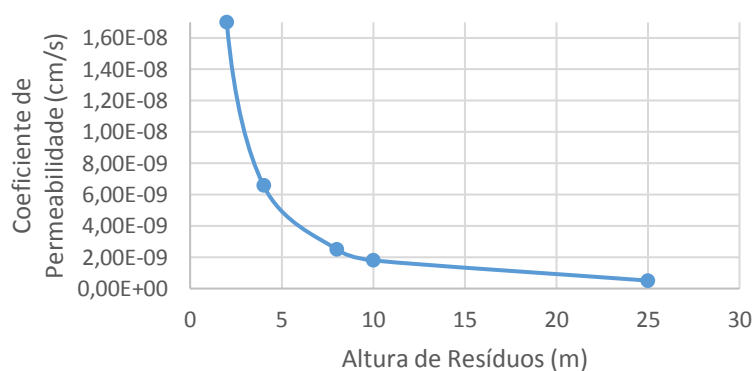
A tabela 7 apresenta os resultados de k para diferentes alturas de resíduos, utilizando a equação ajustada no gráfico da figura 8.

Tabela 7 - Coeficiente de permeabilidade para diferentes alturas de resíduos.

Altura de Resíduos (m)	Tensão (kPa)	K(cm/s)
0,5	6,25	1,2E-07
1,0	12,5	4,5E-08
2,0	25,0	1,7E-08
4,0	50,0	6,6E-09
8,0	100,0	2,5E-09
10,0	125,0	1,8E-09
25,0	312,5	5,1E-10

A figura 9 apresenta o gráfico de k versus altura de resíduos.

Figura 9 - Gráfico do coeficiente de permeabilidade K em função da altura de resíduos.



Conclusões

Os valores obtidos para a análise granulométrica e para os limites de Atterberg estão coerentes com os registrados na literatura para argilas expansivas.

A atividade coloidal de ambas as amostras está bem acima do mínimo esperado para argilas ativas ($AC > 1,25$). Desta forma, percebe-se que as bentonitas estudadas apresentam um alto potencial expansivo.

No ensaio de adensamento, a tensão exercida pela expansão da bentonita granulada foi próxima da metade da pressão exercida pela bentonita em pó (470kPa e 870KPa, respectivamente). A expansão livre das amostras apresentou uma relação parecida (162,4% para a granulada e 207,6% para a em pó). Pode-se concluir, portanto, que a bentonita em pó é mais expansiva que a granulada.

A medição dos coeficientes de permeabilidade, por outro lado, foi um pouco problemática, devido principalmente à capacidade de impermeabilização das argilas. Por serem muito baixos, o cálculo dos coeficientes foi extremamente demorado, resultando em uma diferença considerável no número de dados da amostra em pó (ensaiada antes) para a granulada.

Para a análise da relação entre altura de resíduos e coeficientes de permeabilidade, foi utilizada uma equação baseada nos dados da bentonita em pó. Devido à falta de dados para pressões elevadas (correspondentes a alturas acima de 25m), os coeficientes obtidos para estas tensões não necessariamente correspondem à realidade (coeficientes de permeabilidade abaixo de 10^{-10} cm/s são extremamente incomuns, mesmo em solos altamente expansivos como este). Estes dados, porém, foram úteis para confirmar-se o que já era esperado na teoria: a melhora da capacidade de impermeabilização de GCLs com o aumento do volume de resíduos sólidos no aterro sanitário.

Confirma-se experimentalmente, portanto, a eficiência do uso de Geosynthetic Clay Liners em aterros sanitários. Além de apresentarem um volume consideravelmente menor que argilas compactadas, seu baixo índice de permeabilidade é ainda melhor aproveitado quando o aterro estiver completamente saturado.

Referências Bibliográficas

- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS, **ASTM D4829-11**: Standard Test Method for Expansion Index of Soils. 2017. 5p.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS, **ASTM D5890-11**: Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners. 2017. 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: Pini, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: Pini, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 7181**: Análise granulométrica de Solos. 2017. 15p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 12007**: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. 2017. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: Pini, 2000.
- Camargo Barros, J.M. (2011) *Curso de Mecânica dos Solos*. Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul.
- Irokawa, T.T.; Rigonato, C.B. (2016) *Ensaio de Desempenho em Liners em Aterros de Resíduos*.
- Silveira, A.M.M. (2004) *Estudo do Peso Específico de Resíduos Sólidos Urbanos*.
- Vertematti, J.C.; Vilar, O.M.; Bueno, B.S.; Benvenuto, C. (2015) Aplicação em Barreiras Impermeabilizantes, *Manual Brasileiro de Geossintéticos*, 457-503.