

JORGE LUIS VIEIRA DA SILVA

# **Colmatação biológica de geotêxteis**

Orientador: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar

Versão corrigida

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

São Carlos

2013



JORGE LUIS VIEIRA DA SILVA

## **Colmatação biológica de geotêxteis**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título  
de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar

São Carlos

2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S586c Silva, Jorge Luis Vieira da  
Colmatção Biológica de Geotêxteis / Jorge Luis  
Vieira da Silva; orientador Orencio Monje Vilar. São  
Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação  
e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2013.

1. Geotêxtil. 2. Aterro Sanitário. 3. Colmatção.  
4. Lixiviado. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JORGE LUIZ VIEIRA DA SILVA**.

Título da dissertação: "Colmatação biológica de geotêxteis".

Data da defesa: 08/10/2013

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

Prof. Titular **Orêncio Monje Vilar** (Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof<sup>a</sup>. Associada **Maria Bernadete Amâncio Varesche Silva**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. **Eliane Viviani**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:  
Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**



Dedico este trabalho a minha mãe Filomena.

À minha noiva Michele.

Ao amigo Benedito de Souza Bueno.



## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e pelo dom de perseverar e por tudo que me proporcionou.

A minha mãe, Filomena (eternamente presente na minha vida), pelo incentivo, pelo amor incondicional, pelos esforços e, principalmente, pelo exemplo de caráter e dedicação, sem o qual eu jamais chegaria até aqui.

Ao professor Orencio pela ajuda, orientação e inestimável amizade durante a pesquisa realizada.

Ao professor Benedito de Souza Bueno pela amizade e ensinamentos, além da fundamental orientação durante minha vida acadêmica.

A minha noiva Michele, pela paciência e companheirismo, principalmente nos momentos mais difíceis.

Ao CNPq pela bolsa concedida e apoio a pesquisa.

A todos os professores e funcionários da EESC pela contribuição pessoal e profissional durante o curso.

Ao pessoal do laboratório geossintéticos, Francisco, Fagner, Portelinha, Albano, Natália, Marcus, Gianfranco, que se mostraram grandes amigos durante o período de convivência.

A todos os funcionários do Departamento de Geotecnia, Maristela, Oscar, Benedito, José Luiz, Neiva, Antônio, Álvaro, Herivelto, Toninho, Décio, Jorjão e senhor Willson em especial ao pessoal do Laboratório de Geossintéticos da EESC-USP pelo apoio técnico e pela boa convivência. Em especial, Walter, Manoel, Cléver, Marcão e Tiago, pela amizade e companheirismo durante a pesquisa.

À Eloisa Pozzi pelo auxílio nas análises relativas aos microorganismos.

Aos colegas de turma pela boa convivência e grande amizade adquirida durante o período do curso. Mario, Ana Elisa, Jaqueline, Filipe, Loana, Breno, Liz, Murilo, Camila, Rômulo, Bruno Medeiros, Bruno Canoza, Vanessa, Felipe, Patrícia, Jude, Vinicius, Jamal e Bianca.

Aos meus irmãos, André e Andressa pelo amor e apoio mesmo à distância.

Ao meu pai e sua esposa, pelo carinho e ajuda nos momentos difíceis.

Finalmente gostaria de agradecer a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para esta conquista da minha vida.

Caso tenha esquecido alguém, por favor sinta-se parte desse trabalho e saiba que não foi por mal.

“Um sonho sonhado sozinho é um sonho.

Um sonho sonhado junto é realidade”.

Raul Seixas



## **RESUMO**

SILVA, J. L. V. Colmatação biológica de geotêxteis. 2013. 135. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

Geossintéticos são materiais cada vez mais aplicados em aterros sanitários, cumprindo diferentes funções como barreiras para líquidos e gases. Na função de filtração, o uso destes materiais não está consagrado, principalmente, em função da possível colmatação total ou parcial dos geotêxteis por ação de microrganismos, a chamada colmatação biológica. Neste contexto, o presente trabalho visa avaliar a colmatação de geotêxteis tecidos e não tecidos submetidos ao fluxo de lixiviado de aterro sanitário. Foram utilizados três geotêxteis não tecidos de gramatura 200 g/m<sup>2</sup>, sendo um de filamento contínuo de poliéster (PET) e dois de fibra curta, porém fabricados com polímeros diferentes poliéster e polipropileno (PET e PP) e um geotêxtil tecido de polipropileno, com gramatura 400 g/m<sup>2</sup>. Para avaliar a colmatação dos geotêxteis montaram-se ensaios de permeabilidade de longa duração em que se mediu a condutividade hidráulica ao longo do tempo. Após os ensaios de permeabilidade, realizou-se microscopia eletrônica de varredura para avaliar o fechamento dos poros dos geotêxteis, além de avaliar o crescimento bacteriano ocorrido no interior do geotêxtil. Os resultados obtidos permitem constatar significativa redução da condutividade hidráulica dos materiais após o período de 30 dias de ensaios, onde notou-se a predominância do processo de cegamento.

**Palavras-chaves:** Geotêxtil, Colmatação, Aterro Sanitário, Lixiviado.



## **ABSTRACT**

SILVA, J. L. V. Biological clogging of geotextile. 2013. 135 f. Dissertation. School of Engineering at São Carlos, University of Sao Paulo, São Carlos, 2013.

Geosynthetic materials have been intensively used in landfills in different functions as liquid and gas barriers. As filters, geosynthetics are not completely accepted in designs, since total or partial geotextile clogging can occur for biotic deposition (or impregnation), usually named biological clogging. This work evaluates the clogging on nonwoven and woven geotextiles under leachate flow for landfill application. For this purpose, nonwoven geotextiles with short and long polyester filaments and mass per unit area of 200 g/m<sup>2</sup> were used, as well as polypropylene and polyester nonwoven geotextiles with mass per unit area of 400 g/m<sup>2</sup>. Cross-plane permeability tests were periodically conducted in geotextiles samples which were under long term leachate flow. After each permeability test, scanning electron microscopy (SEM) was conducted to evaluate the source of pore geotextile clogging, as well as the bacteria growing into the geotextile matrix. Results have shown a significantly reduction on hydraulic conductivity of geotextile filters after 30 days of leachate flow, which was motivated by blinding process.

**Keywords:** Geotextile, Clogging, Landfills, Leachate.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Vazadouro a Céu Aberto .....	35
Figura 2.2 - Esquema de um aterro sanitário proposto (IPT, 1995) .....	37
Figura 2.3 - Consumo de geossintéticos nos Estados Unidos desde a década de 1970 (KOERNER, 1998).....	44
Figura 2.4 - Representação esquemática do uso de geossintéticos em um aterro sanitário (KOERNER, 2005).....	45
Figura 2.5 - (a) Esquema de projeto de sistema de drenagem de lixiviados apenas com uso de geotêxtil (b) Esquema de sistema de drenagem com uso de geossintéticos e material granular (ROWE e VANGULCK, 2004) .....	46
Figura 2.6 - Faixa de variação granulométrica segundo os critérios de Terzaghi .....	48
Figura 2.7 - Representação esquemática da distribuição das partículas de solo (a) solo com coeficiente de uniformidade menor ou igual a 3 (b) solo com coeficiente de uniformidade maior que 3 (GIROUD, 2005). .....	49
Figura 2.8 - Tipos de colmatação de geotêxtil (PALMEIRA, 2003) (a) cegamento (b) bloqueamento (c) colmatação interna. ....	56
Figura 2.9 - Coeficiente de permeabilidade de geotêxteis não-tecido (ROLLIN et al. 1982)..	56
Figura 2.10 - Representação das possíveis formas de acúmulo (a) paralela ao fluxo, (b) em série (FAURE, et al., 2006) .....	58
Figura 2.11 - Mecanismo de acúmulo de partículas: (a) todos os poros estão abertos (não há obstrução), (b) poucos poros obstruídos, (c) muitos poros estão obstruídos e (d) aparecem os “bolos” acima dos poros há uma completa obstrução (FAURE, et al., 2006). ....	58
Figura 2.12 - Curva típica das fases de crescimento bacteriano (REMÍGIO, 2006 apud	

METCALF e EDDY, 1990).....	61
Figura 2.13 - Cinética do crescimento bacteriano (a) geotêxtil GTX (b) geotêxtil GTY (c) geotêxtil GTZ (REMÍGIO, 2006) .....	63
Figura 2.14 - (a) Superfície limpa exposta a um fluxo turbulento de fluido contendo microrganismos dispersos, nutrientes e macromoléculas orgânicas. $\delta$ refere-se à espessura da sub-camada viscosa. (b) Transporte e absorção de moléculas orgânicas sobre a superfície limpa. (c) Transporte e adsorção de células microbianas à superfície condicionada. (d) Continuação de transporte e adesão de células microbianas, bem como crescimento e outros processos metabólicos dentro do biofilme. (e) Transporte, adesão e aumento do crescimento de massa do biofilme, enquanto o processo de desprendimento de massa acumulada diminui (CHARACKLIS, 1981).....	65
Figura 2.15 - Resultados típicos de ensaios de permeabilidade através do tempo (KOERNER e KOERNER, 1995).....	66
Figura 2.16 - Valores obtidos através das técnicas de remediação (Koerner e Koerner, 1992) .....	67
Figura 2.17 – Seqüência de montagem dos ensaios de Carvalho (2010). (a) Camada drenante, (b) colocação do geotêxtil, (c) colocação e compactação do resíduo, (d) vista do equipamento montado, com as saídas dos lixiviados.....	68
Figura 2.18 – Cimentação da camada drenante pelo lixiviado (McIsaac & Rowe, 2006).....	69
Figura 3.1 - Lixiviado sendo coletado da caixa de passagem no aterro sanitário de São Carlos .....	73
Figura 3.2 – (a) Esquema do equipamento usado para realização dos ensaios de permeabilidade com fluxo constante (a) reservatório superior (b) reservatório inferior (c) permeômetros (b) Equipamento em funcionamento .....	74
Figura 3.3 - (a) Bomba submersa modelo SB 2000 (b) bomba instalada no equipamento .....	75

Figura 3.4 - Detalhe do extravasor instalado com a finalidade de manter a carga constante...	75
Figura 3.5 – (a) Vista em corte do permeâmetro usado na pesquisa (b) Permeâmetros instalados no equipamento.....	76
Figura 3.6 – Instrumento usado para acompanhar o pH das amostras de lixiviado .....	78
Figura 3.7 – Equipamento usado para medir eH e condutividade elétrica do lixiviado.....	78
Figura 3.8 - Microscópio Digital Olympus MIC-D usado na pesquisa (Traduzido do site da empresa Olympus) .....	80
Figura 3.9– (a) Microscópio Digital ao lado do computador (b) detalhe da placa de vidro.....	80
Figura 3.10 – Microscópio eletrônico de varredura .....	81
Figura 3.11 – Frascos com alcoóis usados na desidratação das amostras .....	82
Figura 3.12 – Amostras após a preparação para MEV .....	83
Figura 3.13 – Equipamento usado para deposição de ouro nos corpos-de-prova .....	84
Figuras 3.14 – (a) Placa de Petri pronta para inoculação de microorganismos (b) Várias placas em duplicatas para avaliação .....	85
Figura 4.1 – Ensaio de condutividade hidráulica nos geotêxteis estudados.....	88
Figura 4.2 – Amostra do geotêxtil GTA colmatado, segundo diferentes ampliações (a) ampliação de 57 vezes (b) 75 vezes (c) 132 vezes (d) 183 vezes (e) 255 vezes, sendo este o aumento máximo proporcionado pelo equipamento. ....	90
Figura 4.3 - Amostra de geotêxtil GTB colmatado, conforme as seguintes ampliações (a) ampliação de 57 vezes (b) 75 vezes (c) 132 vezes (d) 183 vezes (e) 255 vezes.....	91
Figura 4.4 - Amostra de geotêxtil GTC após os ensaios de permeabilidade, visualizados no microscópio óptico com as seguintes ampliações (a) ampliação de 57 vezes (b) 75 vezes (c) 132 vezes (d) 183 vezes (e) 255 vezes. ....	92
Figura 4.5 - Amostra de geotêxtil GTD após os ensaios de permeabilidade, visualizados no microscópio óptico com as seguintes ampliações (a) ampliação de 57 vezes (b) 75	

vezes (c) 132 vezes (d) 183 vezes (e) 255 vezes.....	93
Figura 4.6 – Imagem dos geotêxteis analisados na MEV com aumento de 1000 vezes.....	95
Figura 4.7 – Imagem do geotêxtil GTA após 35 dias de ensaio com fluxo e aumento de 500 vezes.....	96
Figura 4.8 – Análise do MEV do geotêxtil GTB com aumento 500 de vezes.....	97
Figura 4.9 – MEV do geotêxtil GTC com aumento de 500 vezes .....	97
Figura 4.10 – Geotêxtil GTD com aumento de 20 vezes.....	98
Figura 4.11 – MEV do geotêxtil GTD com aumento de 50 vezes.....	98
Figura 4.12 – Presença de bactérias aderidas ao filamento do geotêxtil GTA .....	99
Figura 4.13 – Formação do biofilme no geotêxtil GTB.....	100
Figura 4.14 – Material aderido na fibra do geotêxtil GTC, sobre uma camada de material não identificado.....	100
Figura 4.15 – Colônia de bacilos aderidos ao filamento do geotêxtil GTD.....	101
Figura 4.16 – Camada superficial de baixa condutividade formada sobre o geotêxtil .....	102
Figura 4.17 – Seção transversal dos geotêxteis, sendo possível notar o material depositado, sobre a superfície, ficando o interior do geotêxtil, praticamente desobstruído.....	103
Figura 4.18 – Redução da porosidade dos geotêxteis após o período ensaiado.....	104
Figura 4.19 – Correlação entre condutividade hidráulica com a área preenchida dos geotêxteis .....	105
Figura 4.20 – Temperatura e pH medidos durante a pesquisa .....	106
Figura 4.21 – Acompanhamento do resultado de Eh e condutividade elétrica durante a pesquisa .....	107
Figura 4.22 – Contagem de bactérias em Unidade formadoras de Colônias por mL (UFC/mL) .....	113
Figura 4.23 – Sólidos Totais dos geotêxteis estudados.....	113

Figura 4.24 – Presença de bacilos, cocos e morfologias desconhecidas .....	114
Figura 4.25 – Presença de cistos de protozoários .....	115



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores característicos de lixiviados, de acordo com a idade do aterro (Tchobanoglous et al. 1993) .....	39
Tabela 2.2 – Possíveis formas de nitrogênio (METCALF & EDDY, 2003) .....	42
Tabela 2.3 - Tipos de geossintéticos e suas funções.....	43
Tabela 2.4 - Tabela com alguns critério de retenção (AGUIAR e VERTEMATTI, 2004) .....	51
Tabela 2.5 - Alguns métodos para determinação dos critérios de permeabilidade (AGUIAR & VERTEMATTI, 2004) .....	52
Tabela 3.1 – Ensaio de caracterização e suas respectivas normas .....	72
Tabela 4.1 – Resultado da caracterização dos geotêxteis.....	87
Tabela 4.2 – Valores da caracterização do lixiviado, quanto aos parâmetros DQO e DBO, antes e após a execução do ensaio .....	109
Tabela 4.3 – Metais presentes no lixiviado analisado .....	110
Tabela 4.4 – Resultados obtidos para o nitrogênio presente no lixiviado .....	111



## SUMÁRIO

1.	Introdução .....	29
1.1	Objetivos.....	30
1.2	Organização do Trabalho.....	31
2.	Revisão Bibliográfica .....	33
2.1	Resíduos Sólidos Urbanos .....	33
2.2	Disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).....	34
2.2.1	Vazadouro a Céu Aberto (“Lixões”) .....	34
2.2.2	Aterro Controlado .....	35
2.2.3	Aterros Sanitários .....	36
2.2.4	Composição dos Lixiviados.....	38
2.2.4.1	Demanda Química de Oxigênio (DQO) .....	40
2.2.4.2	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	40
2.2.4.3	Potencial Hidrogeniônico (pH).....	41
2.2.4.4	Nitrogênio (N) .....	41
2.2.4.5	Sólidos Totais .....	42
2.2.5	Geossintéticos Aplicados em Aterros Sanitários .....	43
2.2.6	Sistemas de drenagem e de filtração.....	46
2.2.6.1	Sistemas de drenagem e filtração compostos por materiais naturais.....	46
2.2.6.2	Drenagem e filtração com geossintéticos .....	50
2.3	Colmatação .....	54
2.3.1	Colmatação física.....	55
2.3.2	Colmatação Química .....	59
2.3.3	Colmatação Biológica.....	60

2.3.3.1 Crescimento Bacteriano .....	60
2.3.3.2 Biofilme.....	64
2.3.3.3 Ensaios de Permeabilidade.....	65
2.3.3.4 Utilização de equipamento de grande dimensão .....	67
3. Materiais e Métodos .....	71
3.1.1 Geotêxteis.....	71
3.2 Lixiviado .....	72
3.3 Descrição dos equipamentos usados na pesquisa.....	74
3.3.1 Equipamento usado para ensaios com fluxo contínuo .....	74
3.3.2 Acompanhamento dos valores de pH, eH .....	77
3.3.2.1 pH.....	77
3.3.2.2 Condutividade Elétrica e eH .....	78
3.4 Exames Microscópicos.....	79
3.4.1 Microscopia Óptica .....	79
3.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura .....	81
3.5 Análise microbiológica de Unidades Formadoras de Colônias (UFC).....	84
4. Resultados e Discussões.....	87
4.1 Caracterização dos Geotêxteis Ensaaiados .....	87
4.2 Ensaio de Condutividade Hidráulica.....	87
4.2.1 Microscopia Óptica dos Geotêxteis.....	89
4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	94
4.3.1 Avaliação da seção transversal dos geotêxteis.....	101
4.4 Avaliação da Porosidade .....	103
4.5 Correlação entre a área dos geotêxteis e a condutividade hidráulica .....	105
4.5.1 Temperatura e pH do lixiviado.....	105

4.6	Parâmetros Físico-Químicos do Lixiviado Analisado.....	107
4.6.1	Potencial Oxi-redutor (Eh) e Condutividade Elétrica.....	107
4.6.2	DQO e DBO .....	108
4.6.3	Fosfato Total.....	109
4.6.4	Metais .....	110
4.6.5	Nitrogênio (N) .....	111
4.7	Contagem de bactérias e quantificação de sólidos totais.....	112
4.8	Análise Microscópica .....	114
4.8.1	Análise dos Microrganismos Presentes no Lixiviado.....	114
5.	Conclusão .....	117
5.1	Sugestões para futuras pesquisas .....	119
6.	Referências .....	121



## 1. Introdução

O crescimento econômico alcançado no país nas últimas décadas gerou aumento do poder aquisitivo por grande parte da população. O reflexo desse fenômeno transparece no aumento do consumo de produtos em geral, o que conseqüentemente causa maior geração de resíduos sólidos. Esse processo vem causando grande preocupação aos responsáveis por gerenciar estes resíduos e dispô-los de forma adequada, a fim de minimizar os impactos ambientais, como a contaminação do solo, ar, águas superficiais e subterrâneas.

Considerando os aspectos negativos provenientes do mau gerenciamento dos resíduos sólidos, a engenharia propõe e desenvolve técnicas e soluções para minimizar os impactos ambientais, como é o caso da construção de aterros sanitários, sendo atualmente a técnica mais empregada e segura para tal finalidade, em substituição aos vazadouros a céu aberto (lixões) e aterros controlados, uma vez que estes não são projetados com sistemas de impermeabilização e drenagem (de líquidos e gases) adequados.

Um dos principais objetivos de um aterro sanitário é impedir que o lixiviado (mistura de chorume, líquido proveniente da degradação da matéria orgânica, com a água proveniente da chuva) percole através do maciço de resíduos e do solo de fundação, causando grandes impactos ao meio ambiente. Para minimizar estes inconvenientes são construídos sistemas de impermeabilização, com uso de materiais naturais ou geossintéticos, na base e na cobertura do aterro, que, respectivamente, impedem o fluxo de fluidos para o solo de fundação e águas subsuperficiais e a infiltração descontrolada para dentro do maciço aumentando a quantidade de lixiviado produzido, além de impedir a emissão de gases para a atmosfera.

Outro componente essencial de um aterro sanitário é o sistema de drenagem e filtração

eficiente, tendo a função de filtrar e transportar o lixiviado para fora do maciço.

Os sistemas de drenagem e filtração geralmente são construídos com materiais granulares naturais (areia e brita), contudo esses materiais nem sempre estão acessíveis, fator que pode aumentar consideravelmente o custo final da obra, além de sua extração causar impactos ambientais. Neste âmbito, uma das soluções encontradas é a utilização de geossintéticos, dentre os quais cabe destacar os geotêxteis, georredes, geotubos e os geocompostos drenantes.

Entretanto, um problema associado à utilização destes materiais em aterro sanitário é a possibilidade de ocorrência de colmatção total ou parcial ao longo do tempo. Dentre os principais tipos de colmatção cabe destacar a biológica, objetivo do presente estudo, que trata do preenchimento dos vazios dos geotêxteis por microrganismos presentes no lixiviado, capazes de formarem colônias, impedindo a passagem de fluido através dos geotêxteis, reduzindo a permeabilidade e causando aumento da carga hidráulica no interior da área de disposição.

Devido aos problemas relacionados à colmatção biológica de sistemas drenantes e filtrantes, vários trabalhos e pesquisas vêm sendo desenvolvidos ao longo dos últimos anos, uma vez que este problema pode vir a causar inutilidade de drenos e filtros.

Nesta linha, este trabalho visa avaliar e compreender a colmatção biológica de geotêxteis submetidos ao fluxo constante de lixiviado. Para isso, quatro diferentes geotêxteis serão avaliados com a função de filtração de lixiviado, sendo escolhidos três geotêxteis não-tecidos e um geotêxtil tecido.

## **1.1 Objetivos**

O presente trabalho tem por objetivo avaliar:

- Em laboratório, o desempenho de geotêxteis, tecido e não tecidos, frente à filtração de lixiviado;
- O processo de colmatação destes materiais durante o período estudado.

## **1.2 Organização do Trabalho**

No Capítulo 1 faz-se uma introdução sobre o assunto e seus objetivos

No Capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica, contemplando um breve resumo de conceitos e aplicações de geossintéticos em aterros sanitários, dando ênfase em problemas relacionados à colmatação biológica.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e as metodologias utilizadas nesta pesquisa.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios realizados, bem como as análises dos resultados de condutividade hidráulica, acompanhados ao longo do tempo, além das análises no lixiviado, no material retido nos geotêxteis e as imagens microscópicas.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como perspectivas, quanto à utilização destes materiais em aterros sanitários.

No Capítulo 6 apresentam-se as referências consultadas para realização deste trabalho.



## **2. Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Resíduos Sólidos Urbanos**

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) vêm se tornando um problema cada vez maior para a sociedade, isso porque o crescimento populacional causa um maior consumo por parte da população e conseqüentemente maior geração de resíduos. A ABNT através da NBR 10004 – 04 define resíduos sólidos urbanos como:

Resíduos em estado sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Os resíduos sólidos urbanos podem apresentar alto risco à saúde pública, pois possuem propriedades físicas, químicas e infecto-contagiosas que podem ser nocivas aos seres vivos e ao meio ambiente, em especial, quando acondicionado de maneira inadequada.

Para classificação dos resíduos é necessário identificá-los, quanto ao processo que deu origem ao mesmo, características, constituição e compará-los com materiais conhecidos quanto ao nível de impacto causado ao meio ambiente e à saúde pública.

A NBR 10.004/04 classifica os resíduos sólidos em três diferentes classes, conforme seu grau de periculosidade, sendo:

- Resíduos de classe I
- Resíduos de classe II A
- Resíduos de classe II B

Os resíduos de classe I são os que apresentam periculosidade, pois são compostos por materiais tóxicos que causam grandes danos a saúde pública, e ao meio ambiente. Algumas características são peculiares a este tipo de resíduo, como a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Estes resíduos são gerados por ambientes específicos, tais como: indústrias químicas, de transformação, usinas nucleares, hospitais e etc., e representam o resíduo mais caro de ser disposto de maneira correta.

Resíduos de classe II podem ser divididos em Classe II A (Não-Inerte) e Classe II B (Inerte). Os resíduos não inertes são aqueles que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, podendo causar riscos a saúde e ao meio ambiente. Nesta categoria se enquadram os resíduos gerados pela população em geral, não se enquadrando nesta categoria os resíduos industriais.

Os resíduos sólidos de classe II B são aqueles que, submetidos ao contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, não tenham nenhum de seus componentes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto cor, turbidez, dureza e sabor.

## **2.2 Disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**

A disposição final de resíduos sólidos vem se tornando um grande problema da sociedade nas últimas décadas, isso porque, por diversas razões, é cada vez mais difícil encontrar áreas com características que possam receber esses materiais.

Em linhas gerais, as formas de disposição final de resíduos sólidos urbanos pode se dar em vazadouro a céu aberto, em aterros controlados e em aterros sanitários.

### **2.2.1 Vazadouro a Céu Aberto (“Lixões”)**

Os vazadouros a céu aberto consistem no lançamento desordenado dos resíduos, diretamente no solo, sem qualquer tipo de controle ou preocupação com a contaminação do

solo, do ar e de águas, tanto superficiais, quanto subsuperficiais.

Este tipo de técnica proporciona a proliferação de inúmeros problemas de saúde pública, dentre os quais se destaca o aumento da população de ratos, de moscas e mosquitos, baratas, urubus e outros vetores, além de causar odores gerados por gases tóxicos à saúde, contaminam o solo tornando-o impróprio para qualquer tipo de atividade agrícola, e contaminação de águas superficiais e subterrâneas pelo lixiviado.

Tal sistema ainda acarreta o problema de não haver controle quanto ao resíduo depositado, podendo haver resíduos perigosos, como os provenientes de serviços de saúde e indústria, potencializando os riscos à saúde e ao meio ambiente.

Sob todos os aspectos possíveis é a pior forma de disposição final de resíduos. A Figura 2.1 mostra um vazadouro a céu aberto.



Figura 2.1 - Vazadouro a Céu Aberto

Fonte: <http://www.funverde.org.br/blog/archives/26>

### **2.2.2 Aterro Controlado**

Aterros Controlados são formas de disposição final no qual os resíduos são lançados sobre o solo, utilizando princípios de engenharia para confinar os resíduos cobrindo-os com

camadas de argila (quase sempre sem compactação) ao final de cada jornada de trabalho (IPT, 1995).

Tal forma de disposição causa poluição localizada, pois em geral os aterros controlados não possuem impermeabilização na sua base, permitindo assim a contaminação de águas subsuperficiais. Este método ainda possui a desvantagem de não possuir sistema de drenagem e filtração, tanto de lixiviado, quanto de gases. Este método é preferível em relação aos vazadouros, porém não deve substituir os aterros sanitários.

Como os aterros controlados são construídos sem impermeabilização da base, torna-se necessário ao menos impedir a percolação de água para dentro do maciço de resíduos, pois caso ocorra infiltração de água, haverá aumento na quantidade de lixiviado produzido no aterro.

Nem sempre é possível se obter material argiloso para se construir a camada de cobertura de baixa permeabilidade, sendo necessário recorrer a materiais geossintéticos para exercer tal função. Dentre o grupo de geossintéticos, cabe destacar as geomembranas e os GCL's (Geosynthetic Clay Liner), materiais de baixa condutividade hidráulica empregados, na cobertura dos aterros, como técnica de remediação, impedindo a percolação de água para dentro do maciço de resíduos, reduzindo a quantidade de lixiviado produzido.

### **2.2.3 Aterros Sanitários**

Aterro sanitário é atualmente o método de disposição de resíduos sólidos mais adequados. A NBR 8419-92 da ABNT define aterro sanitário como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-o com uma camada de terra na conclusão de cada

jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

Para construção do aterro é necessário que o terreno seja impermeabilizado evitando que o lixiviado percole pelo solo contaminando-o e tornando-o estéril, além de contaminar possíveis lençóis freáticos existentes no local. Contudo a impermeabilização do solo não deve ser a única preocupação na concepção de um aterro. Sistemas de drenagem de gases e do lixiviado também devem ser previstos em projeto. A Figura 2.2 mostra uma vista esquemática de um aterro sanitário, segundo o IPT (1995).

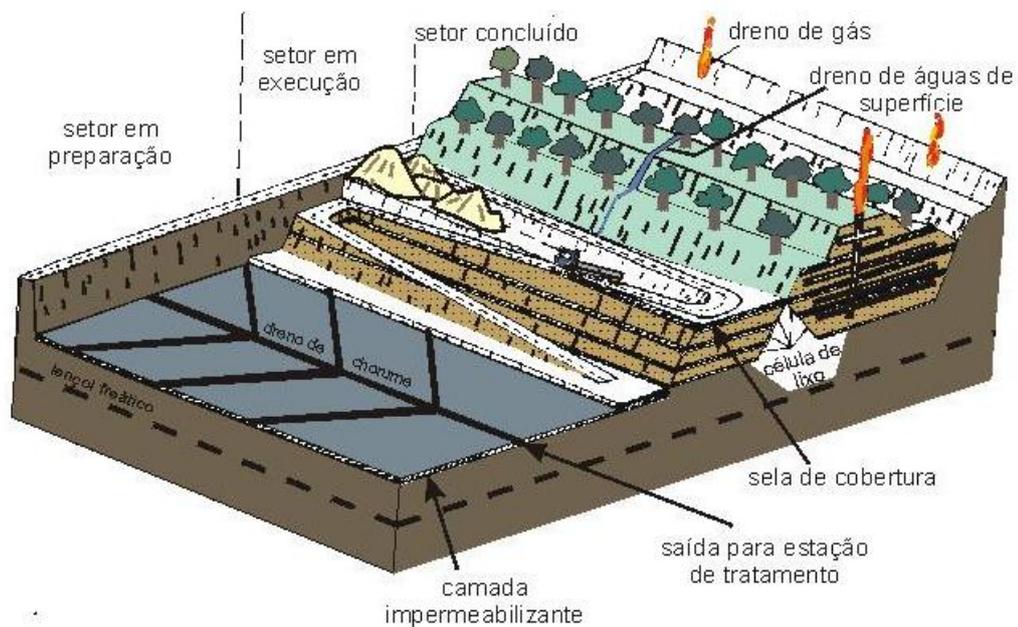


Figura 2.2 - Esquema de um aterro sanitário proposto (IPT, 1995)

Na Figura 2.2 é possível notar setores de preparação, onde são instalados novos sistemas de drenagem de chorume, bem como a instalação de camadas impermeabilizantes na base do aterro.

Nos setores em execução verifica-se o aterramento de lixo através de células, que pode ser realizado ao final de cada dia, ou em menores períodos, dependendo do volume de resíduo recebido.

No setor concluído a presença de camadas impermeabilizantes na base e nos setores concluídos, sistemas de drenagem de chorume, que será conduzido para tratamento, e drenos de gás, sendo possível um reaproveitamento para geração de energia. Posteriormente o local ainda poderá ser reutilizado para o bem da população local.

#### **2.2.4 Composição dos Lixiviados**

A NBR 8849 - 85 define chorume ou sumeiro como “o líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, de cor escura, mal cheirosa e de elevada DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio).” Segundo Christensen et al. (1997) o lixiviado é um problema que acompanha o aterro sanitário desde o início de suas atividades, até décadas após o fechamento do aterro.

Bidone e Povinelli (1999) descrevem as fases da degradação da matéria orgânica até a formação do lixiviado, onde se destaca a fase de transição, ocorrendo da fase aeróbia para a fase anaeróbia e onde se estabelecem as condições de oxi-redução e aparecimento de compostos intermediários (ácidos voláteis).

Nas fases seguintes, dentre outras reações, ocorre a liberação de nutrientes nitrogênio (N) e fósforo (P) que serão suporte para formação da biomassa, seguido do decréscimo de pH com consequente mobilização e possível complexação de espécies metálicas.

Os produtos intermediários começam a ser formados na fase de fermentação metânica, sendo estes produtos convertidos para gás metano (CH<sub>4</sub>) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>). Nesta fase há o retorno do pH a condição de tampão e drástica redução de DQO (Demanda Química de Oxigênio) no lixiviado com aumento na produção de gás.

Na fase final ocorre estabilização da atividade biológica, com relativa inatividade. Começa a ocorrer escassez de nutrientes e paralisação na produção de gás, aumento da oxidação e conservação dos materiais orgânicos resistentes aos micro-organismos em

substâncias húmicas complexas com metais.

As características físicas e químicas dos lixiviados estão relacionadas à idade do aterro sanitário e a fase de degradação do resíduo, conforme ilustrado na Tabela 2.1, proposta por Tchobanoglous et al. (1993). Segundo Contrera (2008) lixiviados coletados em aterros novos, ou seja, aqueles em que os resíduos encontravam-se na fase ácida de decomposição, os parâmetros obtidos apresentaram altos valores de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), nutrientes e metais pesados, e baixos valores de pH. No entanto, em aterros mais antigos, o lixiviado coletado encontrava-se na fase de fermentação metanogênica, onde os valores de pH são da ordem de 6,5 a 7,5, enquanto os valores de DQO, DBO<sub>5</sub>, nutrientes e metais pesados, são menores que os obtidos na fase ácida.

Tabela 2.1 – Valores característicos de lixiviados, de acordo com a idade do aterro (Tchobanoglous et al. 1993)

Parâmetro	Idade do aterro			
	1 ano	menos de 2 anos	5 anos	mais de 10 anos
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	7.500 - 28.000	2.000 - 30.000	400	100 - 200
DQO (mg/L)	10.000 - 40.000	3.000 - 60.000	8.000	100 - 500
Carbono Orgânico Total (COT) (mg/L)	-	1.500 - 20.000	-	80 - 160
Sólidos Totais Suspensos (mg/L)	100 - 700	200 - 2.000	-	100 - 400
Nitrogênio Orgânico (mg/L)	-	10 - 800	-	80 - 120
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	56 - 482	10 - 800	-	20 - 40
Nitrato (mg/L)	0,2 - 0,8	5 - 40	0,5	5 - 10
Condutividade (µmho/cm)	600 - 9.000	-	-	-
pH	5,2 - 6,4	4,5 - 7,5	6,3	6,6 - 7,5
Fósforo Total (mg/L)	25 - 35	5 - 100	12	5 - 10
Magnésio (mg/L)	160 - 250	50 - 1.500	450	50 - 200
Sulfatos (mg/L)	400 - 650	50 - 1.000	2	20 - 50
Ferro Total (mg/L)	21 - 325	50 - 1.200	6,3	20 - 200
Manganês (mg/L)	75 - 125	-	0,06	-
Cádmio (mg/L)	-	-	<0,05	-
Cobre (mg/L)	-	-	<0,5	-
Chumbo (mg/L)	-	-	0,5	-
Níquel (mg/L)	-	-	-	-
Zinco (mg/L)	10 - 30	-	0,4	-

Alguns parâmetros são de extrema relevância, do ponto de vista ambiental, destacando os mais relevantes para a pesquisa nos itens a seguir:

#### **2.2.4.1 Demanda Química de Oxigênio (DQO)**

A DQO é usada para medir a concentração de matéria orgânica em resíduos sólidos domésticos e industriais. A medição é feita através da quantidade de oxigênio requerida para oxidação da matéria até transformá-la em dióxido de carbono e água (CONTRERA, 2008). Uma das limitações da análise da DQO é sua incapacidade de diferenciar matéria orgânica oxidável e inerte. Por outro lado a maior vantagem do método é o curto período de tempo requerido para sua avaliação, isso porque enquanto o ensaio para obtenção da DBO leva em torno de cinco dias para ser realizado, a DQO pode ser obtida em três horas (SAWYER et al. 2003). Conforme pode ser visto na Tabela 2.1 o valor de DQO varia em função da idade do aterro

#### **2.2.4.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)**

É um parâmetro muito utilizado para medição de poluição de águas superficiais e residuais. Os valores são determinados através da medição do oxigênio dissolvido que é consumido por microorganismos na oxidação bioquímica da matéria orgânica (METCALF & EDDY, 2003). Segundo Contrera (2008) o teste de DBO, apesar de muito utilizado apresenta uma série de limitações, como tempo mínimo requerido de cinco dias, preparativos iniciais, possíveis interferências, a preparação de um inóculo adequado, chegando até à precisão do ensaio.

A relação DBO5/DQO pode ser usada como indicativo de tratabilidade ou biodegradabilidade aeróbia de águas residuais, variando conforme a idade do aterro no caso de lixiviado. Inicialmente, as razões DBO5/DQO são maiores ou iguais a 0,5, para aterros novos, e razões na faixa de 0,4 a 0,6 são tomadas como indicativo de que a matéria orgânica

presente no lixiviado será facilmente biodegradável. Em aterros antigos, a razão DBO5/DQO encontra-se na faixa de 0,05 a 0,2, caindo devido ao lixiviado proveniente de aterros antigos conterem ácidos húmicos e fúlvicos, que não são facilmente biodegradáveis, ao contrário dos ácidos voláteis (TCHOBANOUGLOUS et al. 1993).

Caso efluente com alto valor de DBO seja lançado em um corpo d'água, ocorrerá um consumo total do oxigênio dissolvido na água, levando os organismos à morte. Se a DBO for muito alta, o oxigênio será rapidamente consumido e dará início a decomposição anaeróbia da matéria orgânica, sendo responsável pela produção de subprodutos poluidores, como: metano ( $\text{CH}_4$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ) e ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (CARVALHO, 2010).

#### **2.2.4.3 Potencial Hidrogeniônico (pH)**

Trata-se de um parâmetro que indica a evolução da degradação microbiológica da matéria orgânica e a evolução do processo de estabilização da massa de resíduos (CARVALHO, 2010). Em aterros novos, os valores de pH são baixos, devido à grande concentração de ácidos que consomem a alcalinidade do lixiviado (CONTRERA, 2008). Em lixiviados provenientes de aterros antigos, com elevada concentração de nitrogênio amoniacal, tende a aumentar os valores de pH para faixas alcalinas.

#### **2.2.4.4 Nitrogênio (N)**

Os compostos contendo nitrogênio são de grande relevância em processos biológicos, isso porque em águas contendo nitrogênio amoniacal e orgânico são consideradas de poluição recente e potencialmente perigosa, enquanto as águas contendo nitrogênio nitrato, ou seja, dissolvido, indicando poluição antiga com menor risco à saúde (REMÍGIO, 2006).

A química do nitrogênio é extremamente complexa devido ao estado de oxidação em que o mesmo se encontra na natureza, além de possíveis mudanças que podem ocorrer devido a micro-organismos. O estado de oxidação do nitrogênio pode ser modificado, positivamente ou negativamente, pela ação de bactérias que dependendo das condições ambientais podem

ser anaeróbias, aeróbias ou anóxicas (SAWYER, 2003).

O nitrogênio total é composto por nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato, sendo que a fração orgânica composta por aminoácidos, aminoaçúcares e proteínas, importantes nutrientes do crescimento bacteriano. A Tabela 2.2 mostra a composição do nitrogênio total.

Tabela 2.2 – Possíveis formas de nitrogênio (METCALF & EDDY, 2003)

<b>Forma do Nitrogênio</b>	<b>Abreviatura</b>		<b>Definição</b>
Gás amônia	NH <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>	
Íon amônio	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	
Nitrogênio amônia total	NAT <sup>a</sup>	NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	
Nitrito	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	
Nitrato	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
Nitrogênio inorgânico total	NIT <sup>a</sup>	NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
Nitrogênio total Kjeldhal	NTK <sup>a</sup>	N-orgânico + NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	
Nitrogênio orgânico	N-orgânico <sup>a</sup>	NTK - (NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	
Nitrogênio total	NT <sup>a</sup>	N-orgânico + NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	

Na maioria dos lixiviados de aterros sanitários, a forma predominante é a do nitrogênio amoniacal e nitrogênio amônia livre. Este se forma no interior do aterro em meio anaeróbio quando a amônia formada pela decomposição do resíduo orgânico é neutralizada pelo ácido carbônico resultante da decomposição do lixo (CONTRERA, 2008).

#### 2.2.4.5 Sólidos Totais

Os sólidos totais são partículas orgânicas e minerais, encontradas no lixiviado na forma de suspensão ou solução, sedimentáveis ou não (CARVALHO, 2010).

Contrera (2008) considera os sólidos em totais, totais fixos e totais volúveis. Os sólidos totais fixos podem ser um indicativo de elevada salinidade no lixiviado, podendo causar efeito inibitório para microorganismos, quando encontrado em alta concentração.

## 2.2.5 Geossintéticos Aplicados em Aterros Sanitários

Os materiais geossintéticos vêm se tornando uma interessante solução na construção de aterros sanitários, devido a algumas vantagens que tal sistema oferece, dentre os quais cabe destacar:

- São fabricados com rígido controle de qualidade;
- Ocupam um menor volume no corpo de um aterro sanitário;
- De fácil instalação, não necessitam de mão de obra qualificada;
- São leves e de fácil transporte (principalmente quando comparado a materiais naturais como areia, brita e argila);
- Materiais com boa compatibilidade química frente aos resíduos sólidos.

A Tabela 2.3 apresenta os tipos de geossintéticos e as principais funções exercidas por esses materiais dentro de um aterro sanitário:

Tabela 2.3 - Tipos de geossintéticos e suas funções

FUNÇÕES	GEOSSINTÉTICOS							
	Geotêxtil	Geogrelha	Geomembrana	Georrede	Geotubo	Geomanta	GCL	Geocélula
Filtração	X							
Drenagem	X			X	X	X		
Separação	X		X				X	
Reforço	X	X						X
Barreira de fluídos	X		X				X	
Encapsulação	X	X	X					
Proteção	X							
Barreira de solo	X							
Estabilização superficial		X						X
Reforço de vegetação		X		X		X		

De acordo com a Tabela 2.3 é possível notar a grande diversidade de aplicações que os geossintéticos podem exercer em especial os geotêxteis, que dentro do projeto de aterros sanitários podem ter múltiplas finalidades, desde drenagens até reforço dos taludes do mesmo.

Koerner (1998) relata o crescimento no consumo de geossintéticos utilizados em aterros sanitários observados nos Estados Unidos desde a década de 1970. Conforme pode ser

visto na Figura 2.3, verifica-se o grande uso de geomembranas e geotêxteis neste tipo de obra.

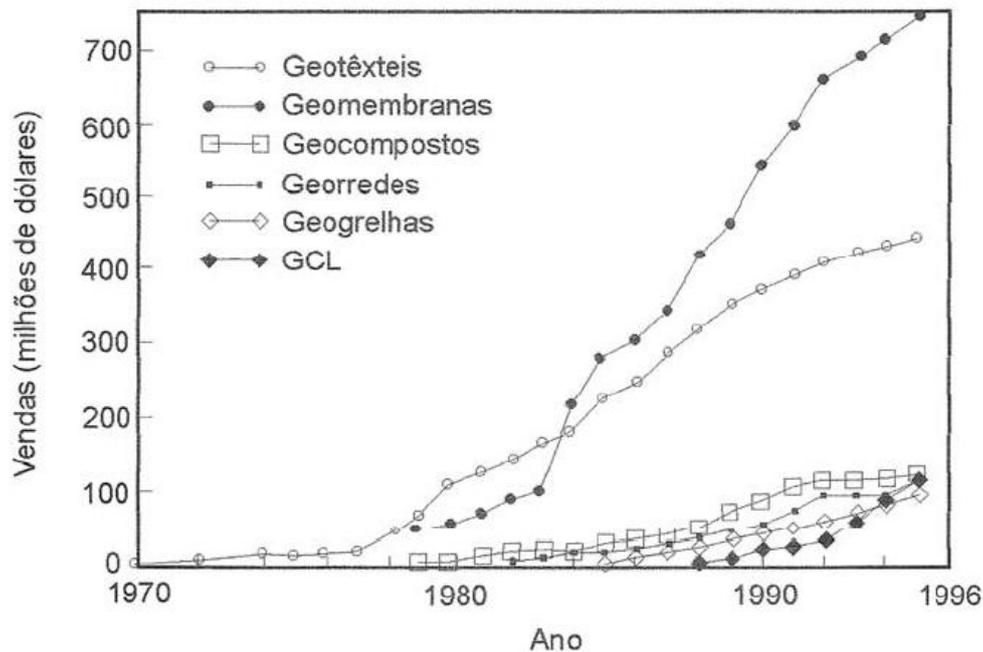


Figura 2.3 - Consumo de geossintéticos nos Estados Unidos desde a década de 1970 (KOERNER, 1998)

A Figura 2.4 mostra uma representação genérica proposta por Koerner (2005) para o uso de geossintéticos em áreas de deposição de resíduos sólidos, contemplando uma elevada quantidade e variedade de materiais, nem sempre necessários em todo e qualquer projeto. Através do esquema, é possível observar uma barreira dupla na base do aterro, sendo este tipo de técnica recomendável quando se tratar de resíduos com elevado grau de periculosidade.

A primeira camada tem a função de reter o lixiviado e drená-lo para fora do corpo do aterro. A função de retenção ou impermeabilização ilustrada na Figura 2.4 é desempenhada pela associação entre uma geomembrana e um GCL (Geosynthetic Clay Liner), enquanto a drenagem é realizada pela georrede nos taludes, colchão de material granular e pelo geotubo, tanto os taludes, quanto nas fundações do aterro. Sob estes elementos, encontra-se uma camada drenante, no caso, um geocomposto (georrede associado a um geotêxtil não tecido) que funciona como filtro e dreno, ou seja, retendo material sólido e permitindo a passagem da

parte líquida a ser transportada para fora do aterro.

A segunda camada exerce a função de detectar possíveis danos na primeira camada, como perfurações e vazamento do lixiviado, permitindo a introdução de possíveis técnicas de remediação, reduzindo assim danos ao meio ambiente.

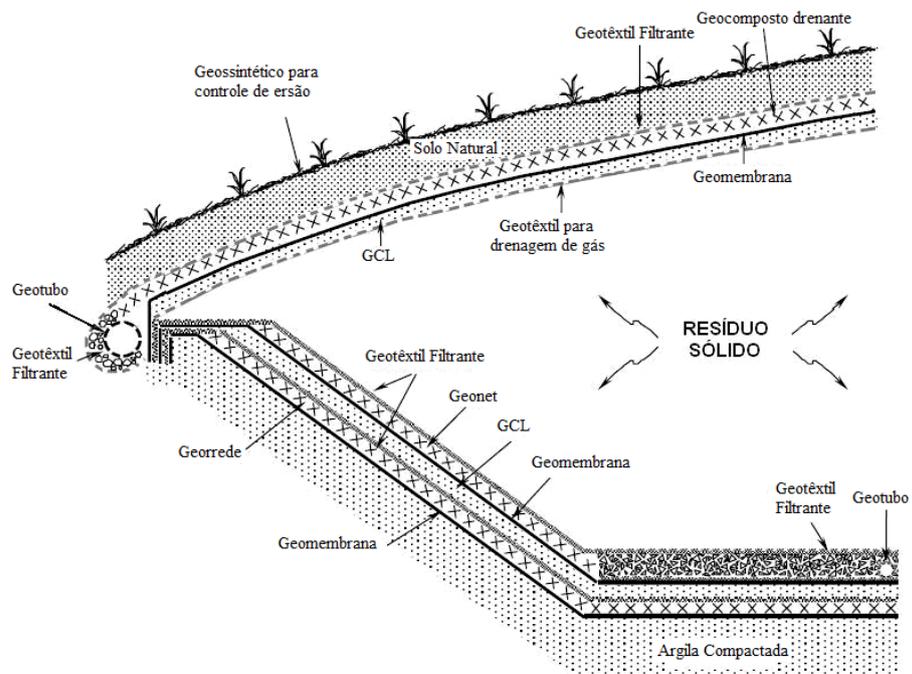


Figura 2.4 - Representação esquemática do uso de geossintéticos em um aterro sanitário (KOERNER, 2005)

Em alguns projetos de drenagem de lixiviado é possível verificar o aumento do uso de geotêxtil com a função de filtração. Em grande parte das vezes, o uso de geotêxteis está associado a materiais granulares, formando trincheiras drenantes ou colchões drenantes, exercendo a função de drenar o líquido para as lagoas de tratamento.

A Figura 2.5 mostra um esquema de projeto associando geotêxteis e materiais granulares como parte do sistema de drenagem de um aterro sanitário.

Em aterros sanitários, os geotêxteis ainda desempenham a importante função de proteger as geomembranas, principalmente quanto a perfurações (estáticas e dinâmicas). Como há possibilidade de ocorrerem perfurações nas geomembranas, é recomendável que

durante a fase de projeto opte-se pela instalação de uma camada de GCL sobre a camada de geomembrana, pois o mesmo é composto por um argilomineral expansivo que tem a função de fechar estas perfurações, evitando possíveis vazamentos. Sistemas de drenagem e de filtração

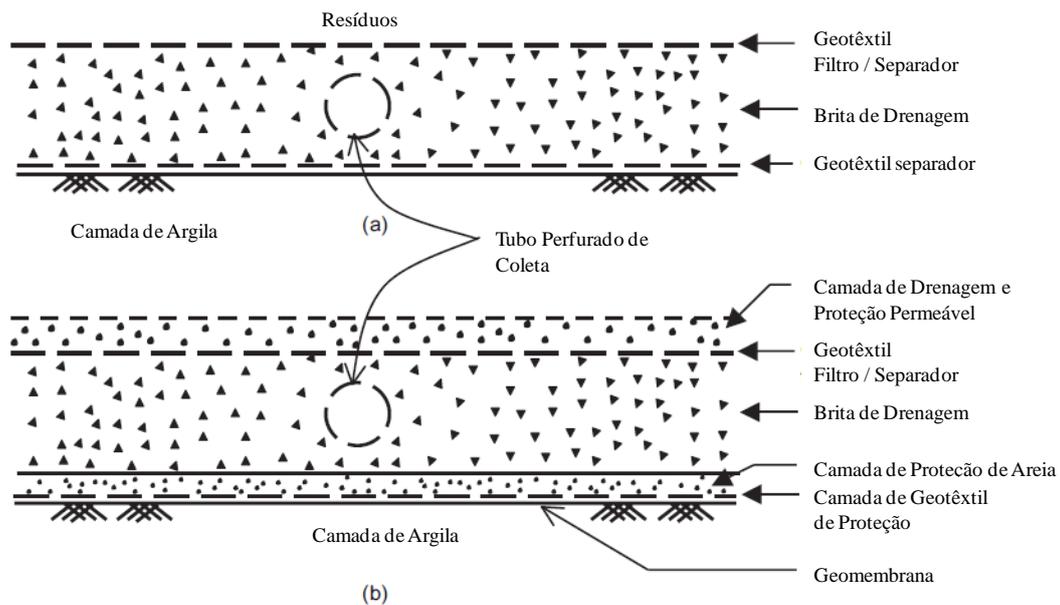


Figura 2.5 - (a) Esquema de projeto de sistema de drenagem de lixiviados apenas com uso de geotêxtil (b) Esquema de sistema de drenagem com uso de geossintéticos e material granular (ROWE e VANGULCK, 2004)

### 2.2.5.1 Sistemas de drenagem e filtração compostos por materiais naturais

Os sistemas de drenagem e filtração são parte importante de diversas obras de engenharia geotécnica, como por exemplo, barragens, aterros sanitários, rodovias, etc., pois garantem o alívio de pressões de água dentro dos maciços, auxiliam no controle de erosão e na coleta de gases e líquidos contaminados.

A NBR 12553-03 define filtração como a “retenção de solo e outras partículas, permitindo a passagem livre do fluido em movimento”. Já a definição de drenagem é a “coleta e condução de um fluido pelo corpo de um geotêxtil ou material correlato”.

Normalmente as duas aplicações ocorrem em conjunto, sendo necessário um bom dimensionamento de ambas para que não haja o comprometimento da obra. Os sistemas de drenagem e filtração, normalmente são compostos por areias e britas, o que pode elevar os custos do empreendimento, principalmente quando estes materiais não se encontrarem disponíveis em locais próximos de sua aplicação.

Em geral os filtros são dimensionados para satisfazer duas condições básicas e contraditórias: a primeira, é que os vazios do material de proteção devem ser pequenos o suficiente para impedir o carreamento de solo a ser protegido. Já a segunda condição é que os vazios sejam grandes o suficiente para proporcionar a livre drenagem do líquido e controlar as forças de percolação, impedindo o desenvolvimento de altas pressões hidrostáticas, ou seja, a carga dissipada no filtro deve ser pequena.

Para atender às duas condições descritas, Terzaghi propôs critérios para dimensionamento de filtros granulares, sendo estes descritos a seguir:

$$D_{15f} < 4 \text{ a } 5 D_{85s}$$

Equação 2.1

$$D_{15f} > 4 \text{ a } 5 D_{15s}$$

Equação 2.2

Sendo:

$D_{15f}$  é o diâmetro do filtro tal que 15% das partículas são menores que ele;

$D_{15s}$  é o diâmetro do solo tal que 15% das partículas são menores que ele;

$D_{85s}$  é o diâmetro do solo tal que 85% das partículas são menores que ele.

Combinando os dois critérios é possível traçar curvas granulométricas paralelas ao solo a se proteger, conforme visto na Figura 2.6, obtendo-se uma faixa de valores que pode ser utilizada para escolha do material para construção do filtro. Vale ressaltar que estes

critérios de dimensionamento não levam em consideração outros fatores que envolvem a escolha de um material para filtro, como a desagregabilidade do material, no caso de britas, além de alteração e alterabilidade dos mesmos. A Figura 2.6 mostra um exemplo de dimensionamento de filtros usando os critérios de Terzaghi.

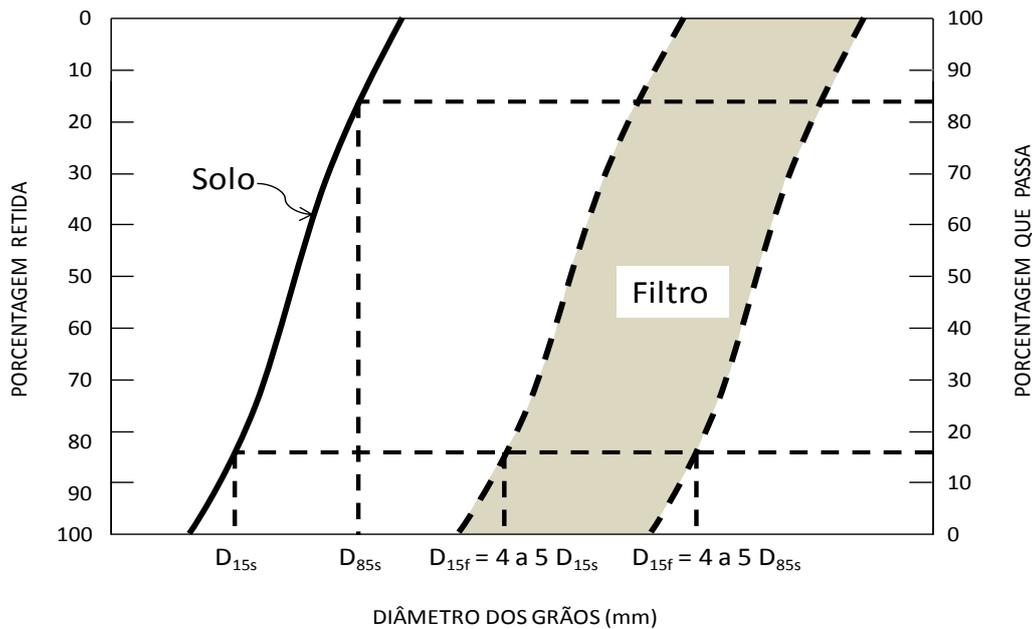


Figura 2.6 - Faixa de variação granulométrica segundo os critérios de Terzaghi

Aguiar e Vertematti (2004) recomendam que antes da adoção de qualquer critério para dimensionamento, deve-se verificar se o solo é auto-filtrante, ou seja, se as partículas maiores serão capazes de reter as partículas menores permitindo a passagem de água e a formação de um pré-filtro estável. No caso de solos auto-filtrantes não é necessário a intervenção, porém caso os solos não sejam auto-filtrantes, é recomendável a intervenção, aplicando filtros para estabilizar e proteger o solo, adotando-se critérios de dimensionamento, como os de retenção, permeabilidade e sobrevivência. Para verificação se o solo é auto-filtrante recomenda-se o uso dos critérios propostos por Chen, et. al. (1981), descrito a seguir:

$$D_{50s} > \frac{D_{85s}}{5}; \quad D_{35s} > \frac{D_{50s}}{5}; \quad D_{15s} > \frac{D_{50s}}{5} \quad \text{Equação 2.3}$$

Sendo:

$D_{50S}$  é o diâmetro do solo tal que 50% das partículas são menores que ele;

$D_{85S}$  é o diâmetro do solo tal que 85% das partículas são menores que ele;

$D_{35S}$  é o diâmetro do solo tal que 35% das partículas são menores que ele;

$D_{15S}$  é o diâmetro do solo tal que 15% das partículas são menores que ele.

Giroud (2005) considera um solo estável quando houver coesão entre as partículas. O autor ressalta que forças externas, como ação de águas, podem desorganizar alguns solos, tornando-os instáveis. Para solos com coeficientes de uniformidade menores que 3 deve-se dimensionar filtros geotêxteis para reter partículas maiores, pois a matriz de solo formada irá auxiliar na retenção de partículas menores.

Para o caso de solos com coeficiente de uniformidade maiores que 3 o filtro geotêxtil deverá ser dimensionado exclusivamente com a finalidade de reter as partículas finas que poderão ser carreadas pelo fluxo do fluido, sendo ignorado em princípio as partículas maiores no dimensionamento. As Figura 2.7 (a) e (b) ilustram solos com coeficientes de uniformidade menores ou iguais a 3 e maiores que 3.

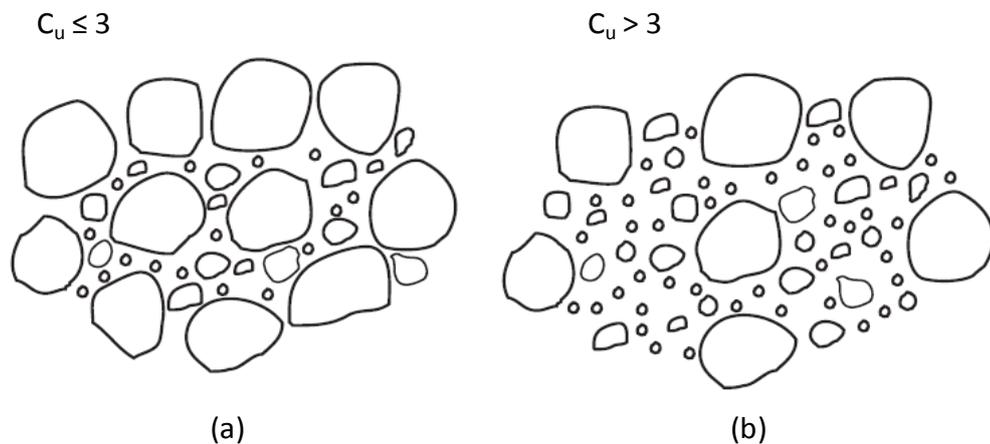


Figura 2.7 - Representação esquemática da distribuição das partículas de solo (a) solo com coeficiente de uniformidade menor ou igual a 3 (b) solo com coeficiente de uniformidade maior que 3 (GIROUD, 2005).

Apesar de ser um método consagrado de concepção de filtros, a utilização de materiais granulares em sistemas de drenagem e filtração vem diminuindo com o tempo devido a alguns fatores como, restrições ambientais para extração, transporte destes materiais a longas distâncias, além do espaço físico ocupado pelos mesmos nas obras.

#### **2.2.5.2 Drenagem e filtração com geossintéticos**

Atualmente, os sistemas drenantes e filtrantes compostos por geossintéticos vêm sendo amplamente utilizados na coleta de gases e efluentes (AGUIAR e VERTEMATTI, 2004). Os geossintéticos mais comuns a serem aplicados neste tipo de obra são os geotêxteis (tecido e não-tecido), os geocompostos, as georredes e os geoespaçadores.

Para avaliação do desempenho de geotêxteis em obras de drenagem e filtração é necessário que se realize uma série de ensaios padronizados, com o intuito de se realizar o correto dimensionamento do sistema, além de se ter uma melhor previsão quanto à vida útil da obra. Koerner (2005) relata alguns ensaios necessários para se projetar adequadamente um sistema filtrante, dentre os quais cabe destacar os ensaios hidráulicos, como permissividade, transmissividade, abertura de filtração ou abertura aparente, além de ensaios físicos como gramatura e espessura.

Para se realizar o correto dimensionamento de um sistema filtrante composto por geotêxteis, é necessário que se respeite alguns critérios, descritos a seguir:

**Critério de Retenção:** Para atender a este critério, o geotêxtil deve ser dimensionado de acordo com a granulometria do solo, sendo necessário realizar ensaios que forneçam valores referentes à abertura dos geotêxteis, como os ensaios de abertura de filtração e abertura aparente. Vários autores apresentam propostas para atender a tal critério, sintetizados por Aguiar e Vertematti (2004) na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Tabela com alguns critério de retenção (AGUIAR e VERTEMATTI, 2004)

<b>Critérios de Retenção para filtros</b>	
<b>Autor</b>	<b>Critério</b>
Giroud (1982)	Para $U > 3$ , utilizar: $O_{max} < A \times D_{50s}/U$ Para $U \leq 3$ , utilizar: $O_{max} < B \times U \times D_{50s}$ , onde A e B assumem os valores: $A = 9$ ; $B = 1,0$ se a densidade relativa for baixa ( $DR < 50\%$ ) $A = 13,5$ ; $B = 1,5$ se a densidade relativa for intermediária ( $50\% < DR < 85\%$ ) $A = 18$ ; $B = 2,0$ se a densidade relativa for alta ( $DR > 80\%$ )
CFGG - Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (1986)	Inequação Genérica: $O < C \times D_{85s}$ Onde: $C = C1, C2, C3, C4$ $C1 =$ fator granulométrico = 1,00 (solos bem graduados e contínuos) 0,80 (solos uniforme e contínuos) $C2 =$ fator de adensamento = 1,25 (solos densos e confinados) 0,80 (solos fofos e não-confinados) $C3 =$ fator hidráulico = 1,00 (gradiente hidráulico menor que 5) 0,80 (gradiente entre 5 e 20) 0,60 (gradiente entre 21 e 40 ou fluxo reverso) $C4 =$ fator função = 1,00 (somente em função do filtro) 0,30 (função de filtro e dreno)
FHWA (1995)	Inequação Genérica: $AOS < B \times D_{85s}$ Onde: Em condições críticas, utilizar: $B = 1$ Em solos com $D_{50} \geq 0,075$ mm: Utilizar $B = 1$ para $U < 2$ ou $U > 8$ Utilizar $B = 0,5$ para $2 < U < 4$ Utilizar $B = 8/U$ para $4 < U < 8$ Em solos com $D_{50} \leq 0,075$ mm, B depende do tipo de geotêxtil: Utilizar $B = 1,8$ para geotêxteis não-tecido Utilizar $B = 1,0$ para geotêxteis tecido Utilizar $AOS < 0,3$ mm para ambos os tipos de geotêxteis

Sendo:

$U$  = Coeficiente de uniformidade do solo;

A e B = são valores adimensionais determinados pelo autor do método;

AOS = Abertura aparente do geotêxtil (Apparent Opening Size).

**Critério de Permeabilidade:** A permeabilidade do geotêxtil deve ser maior que a do solo, ou no mínimo igual, a fim de se evitar perda de carga. Deve-se levar em consideração um fator de segurança, que varia em função do tipo de solo e das condições de aplicação do filtro. O fator de segurança varia entre 1 e 200, conforme o critério adotado (AGUIAR e

VERTEMATTI, 2004). Algumas formas de determinação destes critérios são através de ensaios, como os ensaios de permeabilidade normal ao plano e permissividade, e respeitando algumas propostas, conforme as mostradas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Alguns métodos para determinação dos critérios de permeabilidade (AGUIAR & VERTEMATTI, 2004)

Critérios de Permeabilidade para filtros	
Autor	Critério
CFGG - Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (1986)	$k_n > e_g \times 10^n \times k_s$ , sendo: $e_g$ a espessura do geotêxtil; $k_s$ a permeabilidade do solo $k_n$ a permeabilidade normal do geotêxtil; e $n$ um valor conforme segue: $n = 3$ (situações com baixos gradientes hidráulicos, solos limpos e arenosos) $n = 4$ (baixos gradientes, solos de baixa permeabilidade, silto-argilosos) $n = 5$ (gradientes elevados, e obras de grande responsabilidade)
BAW (1993)	$k_{n \text{ filtro}} \geq 50 \times k_{n \text{ solo}}$ (para solos siltosos) $k_{n \text{ filtro}} \geq 20 \times k_{n \text{ solo}}$ (para solos com pouco silte)
Giroud (1992)	$k_{n \text{ filtro}} \geq i_{\text{solo}} \times k_{n \text{ solo}}$ $i_{\text{solo}} = 1$ a $1,5$ , para drenos de solos e colchões drenantes $i_{\text{solo}} = 3$ a $10$ , para núcleos de barragens $i_{\text{solo}} = 10$ , para proteção de margens

Sendo:

$k_n$  = coeficiente de permeabilidade do geotêxtil;

$k_s$  = coeficiente de permeabilidade do solo;

$k_f$  = coeficiente de permeabilidade do filtro;

$e_g$  = espessura nominal do geotêxtil;

$n$  = valor adimensional definido pelo método;

$i$  = gradiente hidráulico.

**Critérios de sobrevivência:** Está relacionado com as condições de campo onde os geotêxteis serão aplicados e a que tipos de esforços serão submetidos, além de possíveis danos causados na instalação e durante a vida útil da obra, dentre os quais Aguiar e Vertematti (2004) destacaram:

- Resistência a perfurações dinâmicas: associadas a possíveis danos de instalação, que em obras hidráulicas está sujeito às condições mais severas.
- Sensibilidade a solos em suspensão: a presença de solos, principalmente finos, em suspensão é o maior risco possível de haver colmatação em um sistema filtrante. Portanto, é necessário que haja um bom contato entre o geotêxtil e o solo, no caso de filtros horizontais profundos. Contudo, há casos em que a suspensão persiste, como em áreas lodosas, nestes casos o dimensionamento deve permitir que estas partículas atravessem o geotêxtil a fim de minimizar a colmatação.
- Resistência à agressividade do meio: o meio ambiente afeta sensivelmente as características dos geotêxteis principalmente através da ação de raios ultravioleta (UV), produtos químicos e agressividade biológica, podendo causar degradação dos geotêxteis.

Como dito anteriormente, Luetlich et al. (1992) ainda recomenda os critérios de anti-colmatação, onde a abertura formada entre os materiais granulares é determinada pelo tamanho das partículas, cuja única recomendação é que o filtro tenha uma porosidade entre 0,25 e 0,35. Para minimizar os efeitos de colmatação o autor recomenda:

- Uso de geotêxteis com grandes aberturas (O95 ou compatível) que satisfaça ao critério de retenção;
- Para geotêxtil não-tecido, utiliza-se a maior porosidade disponível, nunca inferior a 30%
- Para geotêxtil tecido, utiliza-se a maior porcentagem de área aberta (POA), definida pela relação entre a soma da área individual das aberturas e a área total do geotêxtil, sendo recomendado um valor nunca inferior a 4%.

Após a determinação dos parâmetros de projeto, Koerner (2005) recomenda um procedimento para dimensionamento de filtros com a utilização de geotêxteis, onde são envolvidos fatores de redução que envolvem a aplicabilidade do filtro e a razão de fluxo, sendo aplicado valores permitidos e valores últimos, conforme mostrado a seguir:

$$q_{allow} = \frac{q_{ult}}{RF_{SCB} \times RF_{CR} \times RF_{IN} \times RF_{CC} \times RF_{BC}}$$

Equação 2.4

Sendo:

$q_{allow}$  a vazão admissível

$q_{ult}$  a vazão última

$RF_{scb}$  o fator de redução para colmatação por solo;

$RF_{cr}$  o fator de redução para fluência por compressão (redução dos vazios);

$RF_{IN}$  o fator de redução para intrusão de materiais adjacentes nos vazios do geossintético;

$RF_{CC}$  o fator de redução para colmatação química;

$RF_{BC}$  o fator de redução para colmatação biológica.

Recomenda-se sempre uma investigação dos materiais quanto à colmatação, pois se trata de um fator extremamente prejudicial ao bom funcionamento do filtro, podendo chegar a extremos de impedir o funcionamento do sistema filtrante.

## 2.3 Colmatação

O estudo da colmatação de filtros vem sendo amplamente discutido nos últimos anos em diversos trabalhos encontrados na literatura, (KOERNER & KOERNER (1992), GIROUD et al. (1996), BAVEYE et al. (1998), FLEMING et al (1999), PALMEIRA (2003), MCISAAC & ROWE (2006), PALMEIRA et al.(2008), etc.) isso porque trata-se de um

problema grave que, por vezes, pode inutilizar sistemas filtrantes e drenantes.

Palmeira (2003) define a colmatação, como o termo geral empregado para caracterizar o mau funcionamento de um filtro, sendo causado pela incompatibilidade entre as dimensões das partículas do solo de base e dos poros do filtro. Dessa incompatibilidade, resulta severa perda de capacidade de descarga no sistema drenante e aumento da pressão neutra nos arredores do filtro, alterando as condições inicialmente propostas para o regime de fluxo.

A colmatação, normalmente é dividida em três formas: colmatação física, química e biológica, que serão tratadas de maneiras separadas neste trabalho.

### **2.3.1 Colmatação física**

A colmatação física é caracterizada pelo acúmulo de material (normalmente solo) no sistema filtrante. Palmeira (2003) descreve basicamente três tipos de colmatação:

- Cegamento: ocorre quando as partículas mais finas de solo migram pelos vazios, sendo retidas sobre o filtro resultando em uma camada de baixa permeabilidade, levando a uma redução significativa da condutividade hidráulica do conjunto (Figura 2.8a).
- Bloqueamento: ocorre quando as partículas de solo protegido se posicionam sobre as aberturas do geotêxtil fechando-os e causando mau funcionamento do filtro (Figura 2.8b).
- Colmatação interna: causada pelo fechamento dos poros e dos canais de fluxo no interior da camada do geotêxtil proveniente da intrusão de partículas de solo, precipitação de substâncias ou proliferação de bactérias (Figura 2.8c).

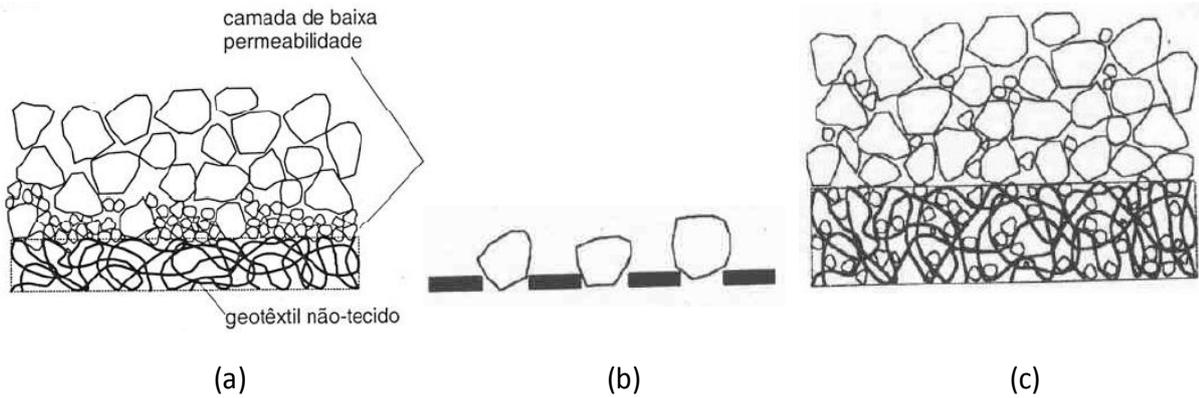


Figura 2.8 - Tipos de colmatção de geotêxtil (PALMEIRA, 2003) (a) cegamento (b) bloqueamento (c) colmatção interna.

Rollin et al. (1982) realizaram ensaios de condutividade hidráulica em geotêxteis utilizando apenas água e, posteriormente, uma mistura solo-água, e notaram grande redução na condutividade hidráulica quando se utiliza a mistura solo-água. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 2.9, sendo possível perceber decréscimo no valor da condutividade hidráulica já nas primeiras 10 horas de ensaio.

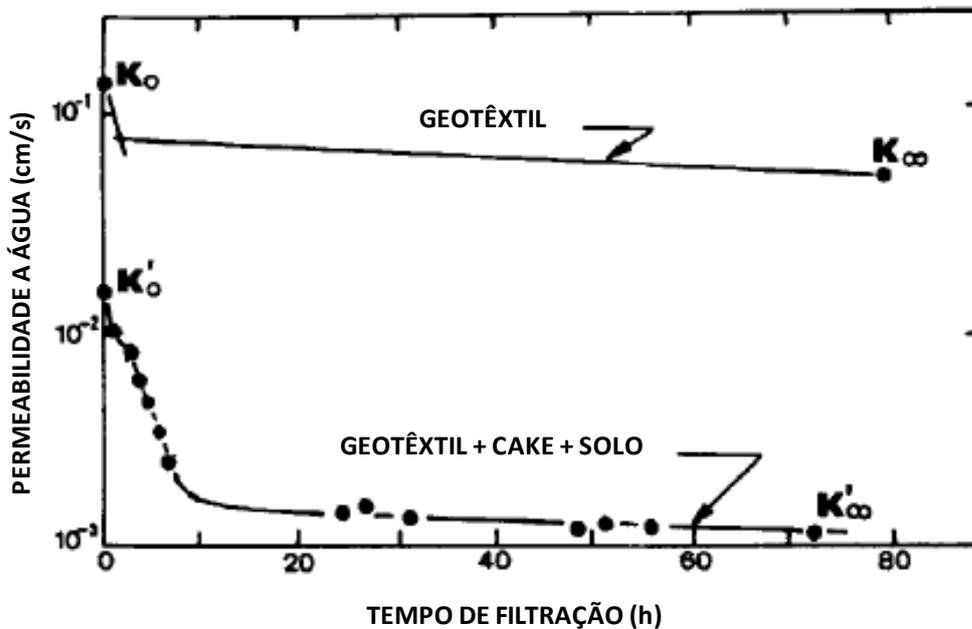


Figura 2.9 - Coeficiente de permeabilidade de geotêxteis não-tecido (ROLLIN et al. 1982)

Conforme ilustrado na Figura 2.9, nota-se que a condutividade hidráulica decresce de maneira menos acentuada quando o geotêxtil é submetido apenas à passagem de água. Ao ser introduzido solo, é formada uma massa de material, que se deposita sobre o geotêxtil, causando drástica redução da condutividade hidráulica nas primeiras horas de ensaio.

Palmeira e Gardoni (2000) relatam que a impregnação inicial dos geotêxteis por partículas de solo, durante o lançamento e a compactação do mesmo, é um fator a ser considerado no processo da colmatação dos geotêxteis. Isso porque tal intrusão afetará as propriedades de compressibilidade, drenagem e filtração dos geotêxteis.

Trabalhos publicados na literatura (LAFLEUR, 1999, PALMEIRA E GARDONI, 2000; FAURE, et al. 2006;) relatam ensaios de condutividade hidráulica e ensaios para determinação de abertura (aparente ou de filtração), como principais métodos para determinação do potencial de colmatação de geotêxteis.

Ling et al. (1993) retiraram amostras de geotêxteis aplicados em campo e realizaram ensaios para obtenção da condutividade hidráulica e compararam os resultados com os resultados de amostras virgens. Os autores tentaram simular as mesmas condições a que os geotêxteis aplicados em campo foram submetidos. Os resultados obtidos pelos autores, foram satisfatórios em relação a ensaios de razão de gradiente e ensaio de fluxo na seção plana de longo tempo sem confinamento. Baseado nos resultados obtidos, os autores acreditam, que ensaios com a utilização de confinamento acabam por representar condições mais próximas das encontradas em campo.

Koerner et al. (1988) relatam o problema ocasionado por cargas dinâmicas provenientes principalmente de ferrovias onde os finos se desprendem da matriz do solo e penetram no geotêxtil causando grandes problemas de colmatação.

Faure et al. (2006) propuseram a utilização de um modelo, cujos resultados foram

comparados com ensaios de filtração. Os autores ressaltam a importância do caminho a ser percorrido pelas partículas sólidas através do geotêxtil, tanto na direção denominada em série, quanto na direção paralela das fibras, conforme mostrado nas Figura 2.10 (a) e Figura 2.10 (b). Os autores ainda relatam a forma com que ocorre o acúmulo de materiais nos caminhos percorridos pelas partículas sólidas, conforme mostrado na Figura 2.11.

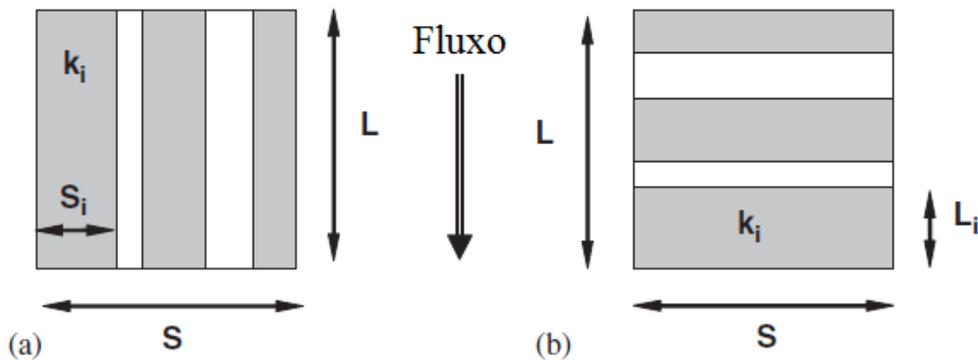


Figura 2.10 - Representação das possíveis formas de acúmulo (a) paralela ao fluxo, (b) em série (FAURE, et al., 2006)

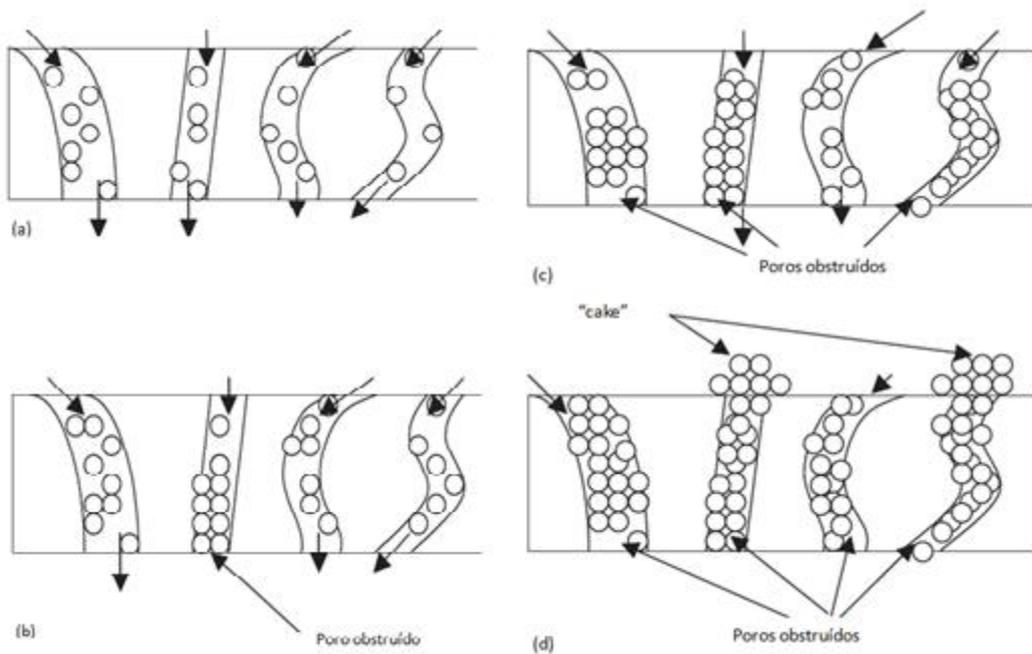


Figura 2.11 - Mecanismo de acúmulo de partículas: (a) todos os poros estão abertos (não há obstrução), (b) poucos poros obstruídos, (c) muitos poros estão obstruídos e (d) aparecem os “bolos” acima dos poros há uma completa obstrução (FAURE, et al., 2006).

### **2.3.2 Colmatação Química**

A colmatação química se caracteriza pela sedimentação de elementos químicos sobre o geotêxtil que acaba por influenciar na redução da condutividade hidráulica do mesmo.

Baveye et al. (1998) descrevem como fatores que afetam a colmatação química a concentração eletrolítica, a fração orgânica dos compostos em fase aquosa, o pH, a composição mineralógica na fase sólida, as características da superfície e as reações químicas (precipitação e dissolução) que estão envolvidas em todos os aspectos que afetam os poros na determinação da condutividade hidráulica média saturada.

Segundo Palmeira (2003), os sistemas drenantes submetidos ao fluxo de fluidos contendo sólidos em suspensão, substâncias químicas ou orgânicas, além de fluidos cujas propriedades se alteram com o tempo podem reduzir a vida útil do sistema, sendo o dimensionamento dos filtros extremamente complexa devido à alteração das características dos líquidos com o passar do tempo.

Rollin e Lombard (1988) descrevem a precipitação de sais, como carbonatos e sulfatos, dissolvidos em água como elementos causadores de colmatação química, pois após penetrar no corpo do geotêxtil e evaporar sob condições atmosféricas, os cristais poderão aderir às fibras e crescer causando uma colmatação parcial ou total do geotêxtil.

Halse et al. (1987) realizaram uma campanha com vários ensaios de longa duração, cerca de 120 dias, em solução alcalina com pH variando entre 10 e 12, e geotêxteis compostos por três tipos de polímeros Policloreto de vinila (PVC), Poliéster (PET) e Polipropileno (PP) e variando os geotêxteis em tecido e não-tecido agulhado e termoligado. Os resultados indicam que alguns polímeros são mais susceptíveis a colmatação química que outros, sendo o pH de extrema relevância nesse contexto, pois a variação deste fator mostrou-se importante no processo.

Mendonça et al. (1999) realizaram uma campanha de ensaios com ausência de fluxo e concluiu que a formação de ocre ocorre na presença de ferrobactérias e esta formação é acentuada sob maiores concentrações do íon  $\text{Fe}^{2+}$  e de oxigênio dissolvido em água. Os autores relatam que geotêxteis tecido de polipropileno possuem menor afinidade a ferrobactérias e seus produtos metabólicos extracelulares, pois apresentaram menor acúmulo de biofilme sob todas as condições estudadas. Quanto aos geotêxteis não-tecidos, estes acabaram sendo os mais susceptíveis a formação de ocre, independente do polímero, indicando que maior superfície específica de geotêxtil induz a uma formação de biofilme mais intensa.

### **2.3.3 Colmatação Biológica**

A colmatação biológica ocorre devido ao crescimento bacteriano no interior do filtro, podendo ocorrer tanto em filtros granulares, quanto em filtros compostos por geotêxteis.

Devido à complexidade do lixiviado em cada fase, vários autores (KOERNER & KOERNER, 1990; MACKAY & KOERNER, 1999; JUNQUEIRA et al., 2006; PALMEIRA et al., 2008) destacam a importância de se conhecer as propriedades dos fluídos para melhor compreensão dos mecanismos de colmatação que estão ocorrendo.

Segundo Bagchi (2004) a colmatação biológica ocorre devido à presença de micro-organismos presentes no lixiviado. O autor destaca ainda alguns fatores que contribuem para tal fenômeno, como relação carbono-nitrogênio, quantidade de nutrientes, mistura com solos e temperatura propícia para o crescimento bacteriano.

#### **2.3.3.1 Crescimento Bacteriano**

Segundo Remígio (2006) o crescimento bacteriano pode ser expresso em termos de número de organismos viáveis ou em termos de massa microbiana. Quando expresso em termos de números, esse crescimento é descrito em quatro fases distintas, conforme mostrado

na Figura 2.12 e na descrição a seguir:

- Fase Lag: representa o tempo requerido para os organismos se aclimatarem no ambiente e iniciarem a divisão celular;
- Fase de crescimento logarítmico: quando há sempre excesso de nutrientes e a taxa de crescimento bacteriano é função apenas de sua capacidade de processar o substrato;
- Fase Estacionária: o crescimento permanece estacionário. Isso se deve aos fenômenos de encerramento do substrato ou dos nutrientes necessários para o crescimento bacteriano e que o crescimento de algumas células decorre da morte de outras;
- Fase de decaimento logarítmico: durante essa fase, a produção de novas células é excedida pela morte da bactéria, que usualmente é função da população viável e das características do meio. Em alguns casos essa fase acaba sendo o inverso da fase de crescimento logarítmico.

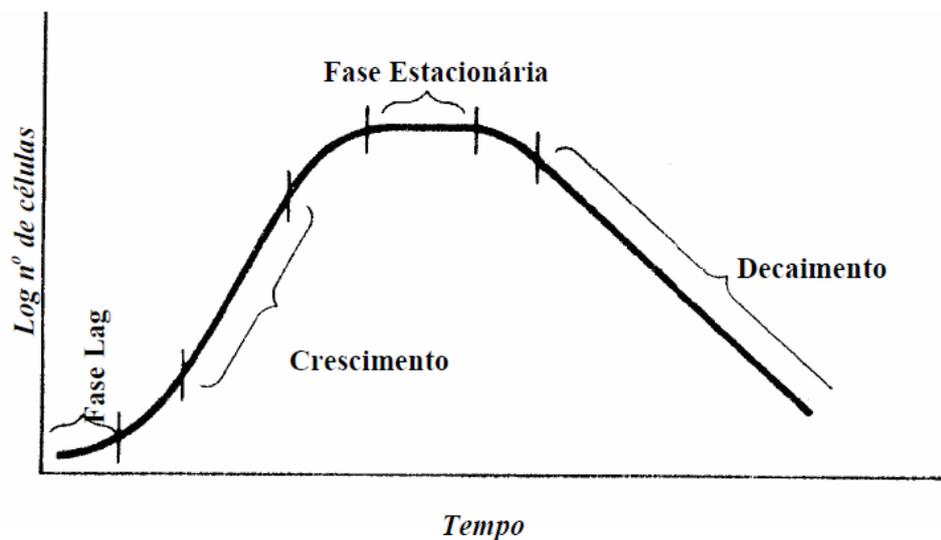


Figura 2.12 - Curva típica das fases de crescimento bacteriano (REMÍGIO, 2006 apud METCALF e EDDY, 1990)

Remígio (2006) utilizou a proposta de Monod (1949) para simular o crescimento bacteriano em um sistema de cultura de microrganismos genéricos, onde o efeito do substrato é usado como fonte de energia. A equação a seguir mostra tal proposta onde o efeito era limitado o substrato.

$$\frac{dX}{dt} = Y \frac{dS}{dt}$$

Equação 2.5

Sendo:

X = concentração de microrganismos (mg/L);

Y = coeficiente de produção celular (mg de biomassa /mg de DQO removida), segundo a autora esse valor foi retirado da literatura (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994), sendo o valor adotado de 0,2;

S = concentração de DQO no meio (mg/L);

t = tempo (dias).

O autor escolheu o parâmetro DQO (parâmetro obtido através de ensaios) para representar a fração orgânica do modelo, sendo necessário uma fração conhecida do geotêxtil (1cm<sup>2</sup>) em 9 ml de água destilada, e em seguida agitada e encubada por 5 dias. Tal procedimento foi adotado por não ser possível análise de DQO diretamente nos geotêxteis, pois o reagente é muito ácido. Palmeira et al. (2008) relatam que as condições assumidas para determinação do crescimento bacteriano foi que o lixiviado estava em condições anaeróbias, isso porque foi retirado de uma célula antiga do aterro sanitário estudado e as condições de fluxo não permitiam entrada de ar no sistema.

Baseados nos resultados obtidos de DQO, Palmeira et al. (2008) fizeram uma simplificação na equação 9, assumindo que a DQO obtida no geotêxtil foi convertida em biomassa (X) e calculou-se os valores de Y em cada período ensaiado. Com os valores de

DQO medidos e Y calculados, os autores plotaram os resultados que mostram o comportamento da equação proposta por Monod (1949), onde a média da que o substrato (DQO) está sendo consumida ou removida pelos microrganismos a biomassa contida nos geotêxteis aumenta, resultando na formação do biofilme. A Figura 2.13 mostra os resultados apresentados nos três geotêxteis usados na pesquisa, sendo o geotêxtil GTA, um de gramatura 100 g/m<sup>2</sup>, o GTB de gramatura 300 g/m<sup>2</sup> e o GTC de gramatura 600 g/m<sup>2</sup>.

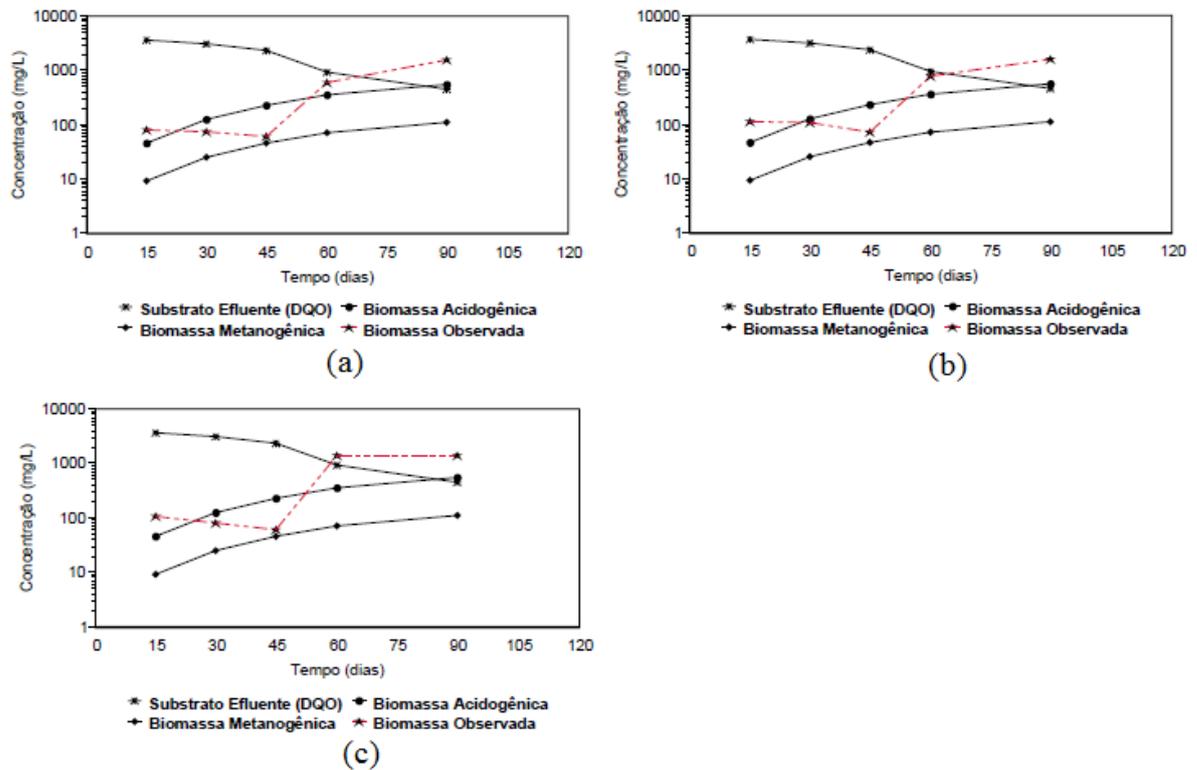


Figura 2.13 - Cinética do crescimento bacteriano (a) geotêxtil GTX (b) geotêxtil GTY (c) geotêxtil GTZ (REMÍGIO, 2006)

Baseado nos resultados ilustrados na Figura 2.13 o autor notou que para os geotêxteis estudados houve uma variação das curvas de biomassa para as condições acidogênicas metanogênicas, indicando tratamento anaeróbico do lixiviado. Porém, o autor relata que para aferição e ajuste da curva observada, com relação ao modelo proposto, era necessário um monitoramento detalhado da degradação do lixiviado e formação da biomassa.

Com relação aos valores ilustrados nas Figura 2.13 (b) e (c), o autor concluiu que o substrato passou a ser limitante a partir de 70 dias de ensaio, quando a DQO continuou a diminuir, mesmo que a biomassa tenha continuado a crescer sensivelmente, porém de forma mais lenta. No caso do geotêxtil GTC o substrato passou a ser limitante por volta de 60 dias e, mesmo com a diminuição da DQO, não houve aumento de biomassa.

### **2.3.3.2 Biofilme**

Biofilmes são sistemas complexos formados por células microbianas embebidas numa matriz polimérica extracelular, cuja estrutura, composição e propriedades dependem da idade do biofilme e das condições ambientais (REMÍGIO, 2006). O autor ainda ressalta a importância de se conhecer os efeitos do acúmulo de biofilme em um sistema de transporte de fluidos provocando aumento do atrito entre o biofilme e o fluido em movimento, fazendo com que ocorra perda de carga em relação ao sistema sem biofilme.

O crescimento de biofilmes pode causar impacto negativo em várias atividades, como estragos em equipamentos através da biocorrosão, contaminação de alimentos e perdas energéticas relacionadas ao aumento de atrito (JASS & WALKER (2000) *apud* XAVIER (2002)).

Segundo Characklis (1999) o desenvolvimento do biofilme é o resultado de processos físicos, químicos e biológicos, como o transporte de moléculas orgânicas e células microbianas na superfície úmida (Figura 2.14 (a)); adesão de moléculas orgânicas para a superfície úmida resultando em uma superfície “condicionada” (Figura 2.14 (b)); adesão de células microbianas para a superfície condicionada (Figura 2.14 (c)); metabolismo de células microbianas aderidas, resultando em mais células aderidas e materiais associados (Figura 2.14 (d)); desprendimento de porções do biofilme (Figura 2.14 (e)).

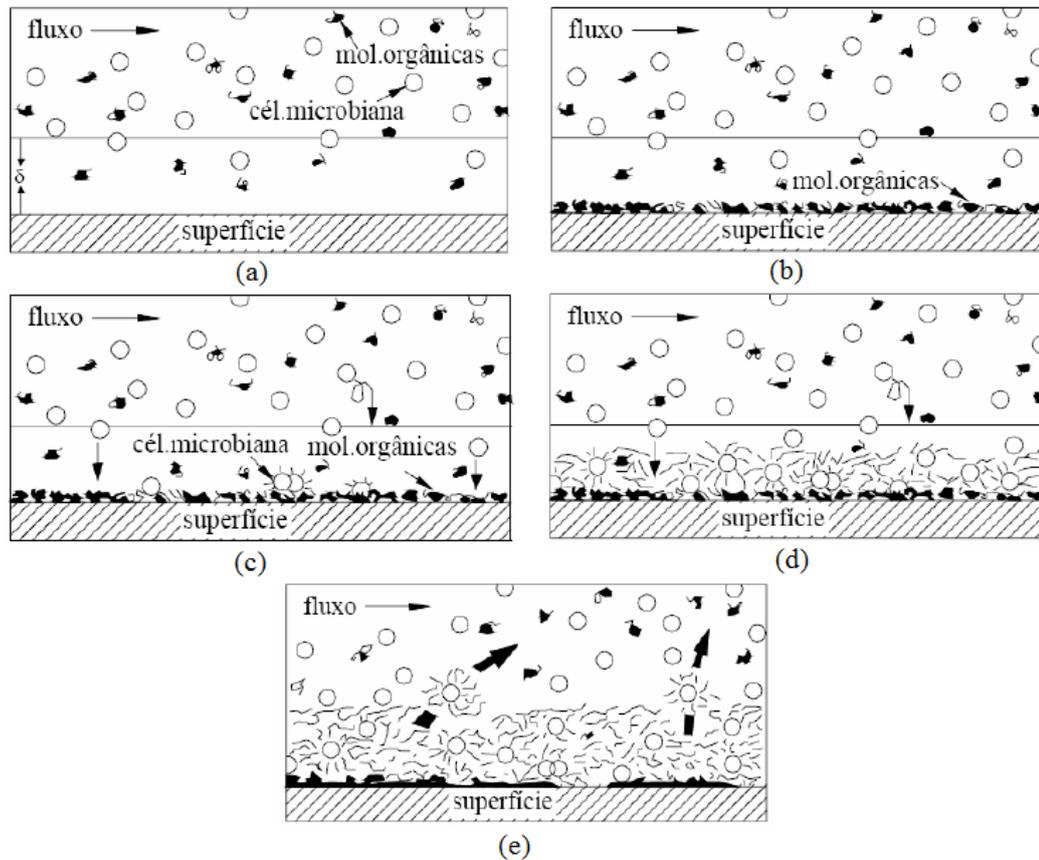


Figura 2.14 - (a) Superfície limpa exposta a um fluxo turbulento de fluido contendo microrganismos dispersos, nutrientes e macromoléculas orgânicas.  $\delta$  refere-se à espessura da sub-camada viscosa. (b) Transporte e absorção de moléculas orgânicas sobre a superfície limpa. (c) Transporte e adsorção de células microbianas à superfície condicionada. (d) Continuação de transporte e adesão de células microbianas, bem como crescimento e outros processos metabólicos dentro do biofilme. (e) Transporte, adesão e aumento do crescimento de massa do biofilme, enquanto o processo de desprendimento de massa acumulada diminui (CHARACKLIS, 1981).

O fato de uma célula bacteriana estar inserida em um biofilme pode fornecer vantagens, como proteção contra agentes agressivos, como ação de desinfetantes e antibióticos e predadores, como os protozoários, (XAVIER, 2002).

### 2.3.3.3 Ensaios de Permeabilidade

A avaliação da colmatção em geotêxteis vem sendo feita levando-se em consideração a redução da condutividade hidráulica destes materiais ao longo do tempo. Alguns trabalhos publicados na literatura (PALMEIRA et al. (2008), REMÍGIO, (2006), KOERNER & KOERNER (1995), MACKAY & KOERNER (1999), BAVEYE et al. (1998)) levam em

consideração tal parâmetro para avaliar se o material está colmatado ou não.

Visando criar um método para determinação da colmatção através de ensaios de condutividade hidráulica a American Society for Testing and Materials (ASTM) criou uma norma (ASTM D1987), com a finalidade de avaliar a colmatção de geotêxteis através de ensaios de carga constante e variada, além de instruir quanto ao uso de contra fluxo como método de remediação do filtro.

Koerner e Koerner (1995) realizaram uma série de ensaios com carga constante para avaliar o desempenho de um determinado geotêxtil frente a três tipos diferentes de lixiviados, além de utilizar água como material padrão para o ensaio. Os resultados são mostrados na Figura 2.15, sendo possível notar que os geotêxteis chegaram a uma redução de até três ordens de grandeza. Os autores utilizaram três diferentes tipos de lixiviado para realização da pesquisa, sendo estes retirados de aterros com idades e locais diferentes, ou seja, sobre condições também diferentes.

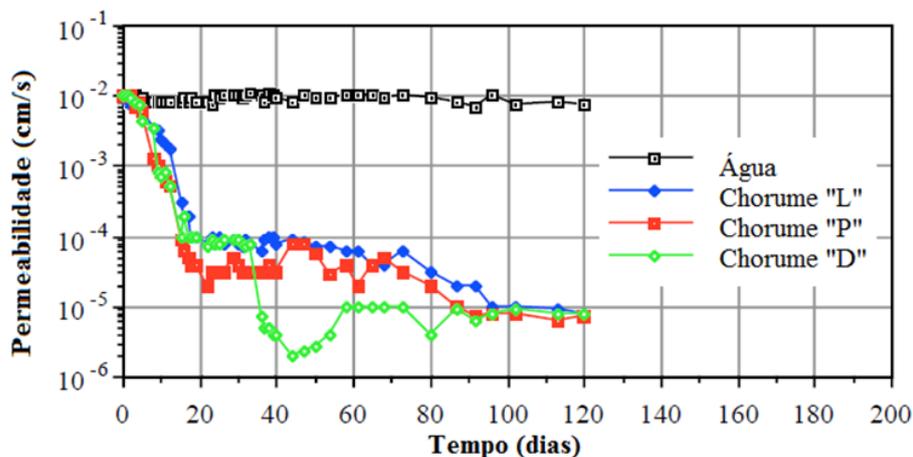


Figura 2.15 - Resultados típicos de ensaios de permeabilidade através do tempo (KOERNER e KOERNER, 1995)

Quanto às técnicas de remediação, os mesmos autores realizaram ensaios com duração de 20 meses em seis diferentes tipos de lixiviados, possibilitando 96 combinações diferentes de ensaios. Os autores relatam a ocorrência de decréscimo no valor de condutividade

hidráulica com o tempo em todas as combinações por colmatção física (depósito de sedimentos) e biológica (crescimento bacteriano).

Após os primeiros 6 meses, os autores começaram a introduzir as técnicas de remediação com o uso de contra fluxo de lixiviado, de água, de nitrogênio e extração por vácuo, sendo o método de contra fluxo por água, aquele que apresentou melhores resultados, conforme mostrado na Figura 2.16.

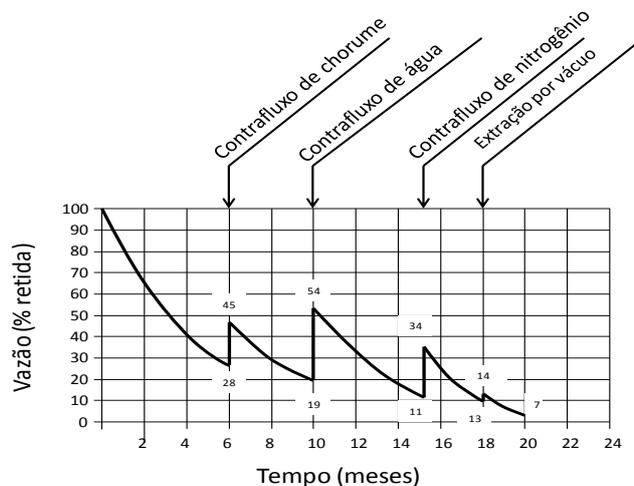


Figura 2.16 - Valores obtidos através das técnicas de remediação (Koerner e Koerner, 1992)

Mackey e Koerner (1999) realizaram uma campanha de 5 anos de ensaios no Aterro de Orange County na Florida (Estados Unidos), utilizando os métodos propostos pela norma ASTM D 1987, onde concluíram que a mesma está limitada, pois é restrito para determinação da redução da condutividade hidráulica nos geotêxteis pela colmatção biológica, sem associar outros mecanismos de colmatção, como a colmatção física e a química, que podem estar ocorrendo simultaneamente no aterro.

#### 2.3.3.4 Utilização de equipamento de grande dimensão

Carvalho (2010) realizou ensaios em células experimentais, fabricadas em PVC. No fundo das células foi instalada uma camada de material granular com a função de simular um sistema de drenagem e um geotêxtil com a função de filtração, sendo então vedadas as tampas

de entrada e saída do equipamento.

O equipamento foi então preenchido com resíduo, conforme mostrado na Figura 2.17, sendo que algumas células foram alimentadas com lixiviado denominado bruto, ou seja, puro e outras com lixiviado tratado. O autor concluiu que a redução da condutividade hidráulica decorrente dos processos de colmatção dos geotêxteis foi significativa, sendo a célula composta por geotêxtil não-tecido a que apresentou maior colmatção, variando de 53,6% a 94,1%.

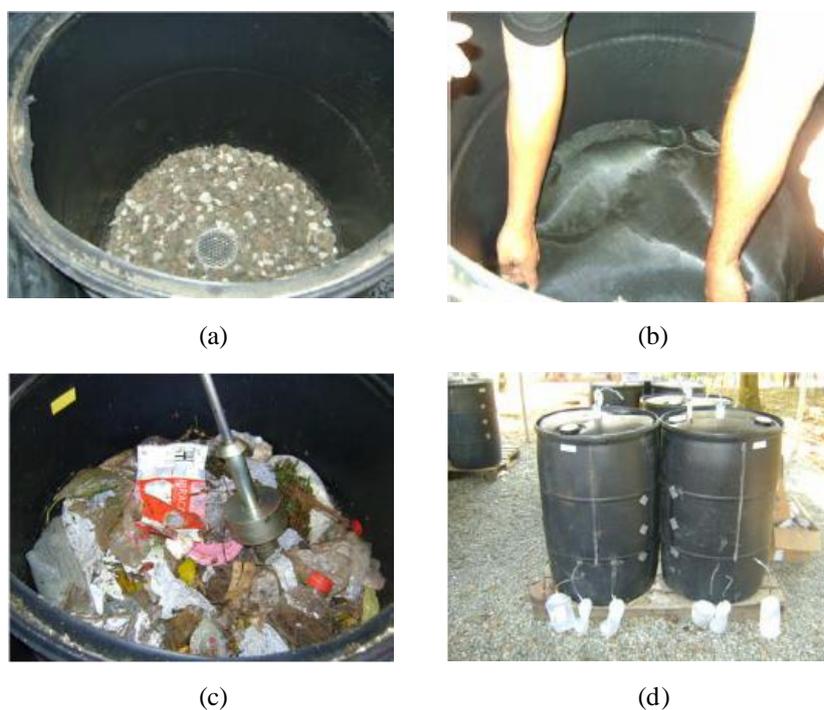


Figura 2.17 – Seqüência de montagem dos ensaios de Carvalho (2010). (a) Camada drenante, (b) colocação do geotêxtil, (c) colocação e compactação do resíduo, (d) vista do equipamento montado, com as saídas dos lixiviados.

A pesquisa realizada por Carvalho (2010) relatou possível favorecimento da biodegradação no interior das células experimentais devido à introdução de lixiviado de uma área mais antiga do aterro de São José dos Campos, já em fase metanogênica, podendo ter influenciado no tipo de formação do biofilme formado na superfície do geotêxtil. Já para um mesmo tipo de geotêxtil, cujas células foram alimentadas com lixiviado tratado e não-

tratados, porém de uma parte mais recente do mesmo aterro, as bactérias identificadas foram as mais variadas possíveis, não sendo possível avaliar fase de degradação do lixiviado.

McIsaac & Rowe (2006) avaliaram o desempenho de geotêxteis com a função de filtro-separador de resíduos e materiais de drenagem. Os autores avaliaram o desempenho do sistema com a utilização de geotêxteis tecido e não tecido, com uma camada de areia e com o sistema drenante diretamente em contato com o resíduo.

Os resultados levaram os autores a concluir que o melhor sistema de filtro-separação para as condições estudadas foi o que utilizava filtro de areia sobre a camada de brita, seguido pelo geotêxtil não tecido, pelo tecido e pelo sistema cujo resíduo encontrava-se em contato direto com a camada drenante, sendo este o pior caso.

O estudo aponta que o geotêxtil não tecido apresentou maior redução dos valores de condutividade hidráulica, permitindo que ocorresse empocamento sobre o geotêxtil, porém segundo os autores era algo passível de simples solução. O bom desempenho se deve a retenção de partículas, que podem vir a cimentar a camada de drenagem, formando uma camada de baixa condutividade hidráulica, conforme pode ser vista na Figura 2.18.



Figura 2.18 – Cimentação da camada drenante pelo lixiviado (McIsaac & Rowe, 2006)



### **3. Materiais e Métodos**

O presente capítulo descreve os materiais, métodos e equipamentos utilizados para a realização desta pesquisa. Foram realizados ensaios de caracterização física e hidráulica nos geotêxteis; ensaios de permeabilidade em regime de fluxo contínuo de lixiviado com a finalidade de representar as condições mais próximas das que ocorrem em campo e ensaios de caracterização do lixiviado. Para finalizar a parte experimental, foram realizados ensaios de microscopia, tanto óptica, cuja finalidade foi avaliar a face colmatada dos geotêxteis, quanto eletrônica de varredura (MEV), realizada com o intuito de avaliar como se dispunham na face e no interior dos geotêxteis.

#### **3.1.1 Geotêxteis**

O estudo experimental foi realizado no Laboratório de Geossintéticos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos e consistiu na realização dos ensaios propostos em geotêxteis tecido e não-tecido, escolhidos com base em suas características físicas, para que se pudesse avaliar cada material individualmente e posteriormente comparar os resultados entre si e com aqueles encontrados na literatura.

Foram escolhidos quatro geotêxteis de gramaturas semelhantes (exceção ao geotêxtil tecido), porém fabricados com polímeros ou processos diferentes. Todos os geotêxteis foram caracterizados, quanto aos parâmetros físicos e hidráulicos, de acordo com as normas nacionais e internacionais (ABNT e ASTM) vigentes, conforme mostrado na Os geotêxteis GTA, GTB e GTC são não-tecidos, sendo o denominado GTA, um não-tecido agulhado de filamento contínuo, com 100% de poliéster; os geotêxteis GTB e GTC são fabricados pelo mesmo processo, conhecido como de fibra cortada, porém o material GTB é fabricado com 100% de poliéster, enquanto o GTC é fabricado com polipropileno. O material GTD é um

geotêxtil tecido de polipropileno.

Tabela 3.1 a seguir.

Os geotêxteis GTA, GTB e GTC são não-tecidos, sendo o denominado GTA, um não-tecido agulhado de filamento contínuo, com 100% de poliéster; os geotêxteis GTB e GTC são fabricados pelo mesmo processo, conhecido como de fibra cortada, porém o material GTB é fabricado com 100% de poliéster, enquanto o GTC é fabricado com polipropileno. O material GTD é um geotêxtil tecido de polipropileno.

Tabela 3.1 – Ensaios de caracterização e suas respectivas normas

Ensaio	Norma
Gramatura ( $\text{g/m}^2$ )	NBR 12568-03
Espessura (mm)	NBR 12569-92
Abertura de Filtração (mm)	AFNOR G 38017
Abertura Aparente (mm)	ASTM D 4751
Permissividade ( $\text{s}^{-1}$ )	NBR 12223-05
Transmissividade ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	NBR 15225-05
Permeabilidade Inicial (cm/s)*	-
Porosidade*	-

\* Recomendações propostas no Manual Brasileiro de Geossintéticos

Em face à heterogeneidade dos geotêxteis, optou-se por caracterizá-los individualmente, quanto à gramatura e espessura dos corpos-de-prova, esse procedimento foi realizado para os ensaios com fluxo contínuo de lixiviado.

### 3.2 Lixiviado

O lixiviado usado na pesquisa foi coletado de uma das caixas de passagem, que dá acesso à Lagoa 2 do Aterro Sanitário do município de São Carlos, conforme mostrado na Figura 3.1. O mesmo foi caracterizado inicialmente e ao final dos ensaios de fluxo contínuo.

A coleta de lixiviado foi realizada no mês de julho de 2012, cuja caracterização foi

feita no Laboratório de Saneamento da EESC-USP e seguiu as recomendações de normas nacionais e internacionais vigentes. A Figura 3.1 mostra a coleta do lixiviado de uma das caixas de passagem do aterro sanitário de São Carlos.



Figura 3.1 - Lixiviado sendo coletado da caixa de passagem no aterro sanitário de São Carlos

Após a realização da coleta, o lixiviado foi transportado para o Laboratório de Geossintéticos, sendo devidamente vedado em bombonas de PEAD. A vedação da tampa foi feita com filme plástico de PVC, cuja finalidade era manter o lixiviado com menor contato possível ao ar.

Em seguida à coleta, o lixiviado foi caracterizado inicialmente com a finalidade de avaliar as condições iniciais a que estes materiais se encontravam. Logo após essa etapa, optou-se pelo acompanhamento de alguns parâmetros durante o andamento da pesquisa, sendo acompanhado o potencial hidrogênico (pH), eH, condutividade elétrica e temperatura.

A escolha destes parâmetros ocorreu pela disponibilidade dos equipamentos e pessoal capacitado para realização destas análises no Departamento de Geotecnia da EESC e por serem ensaios de rápida realização.

### 3.3 Descrição dos equipamentos usados na pesquisa

#### 3.3.1 Equipamento usado para ensaios com fluxo contínuo

Para realização dos ensaios de fluxo contínuo, foi desenvolvido equipamento específico para as análises. A Figura 3.2 mostra uma visão esquemática do arranjo montado para os ensaios de permeabilidade. O equipamento era constituído de dois reservatórios, de PVC, transparentes, sendo um instalado na parte superior de uma estrutura metálica, enquanto o segundo era acoplado na parte inferior do mesmo, cada um com capacidade máxima de armazenamento de 29 litros.

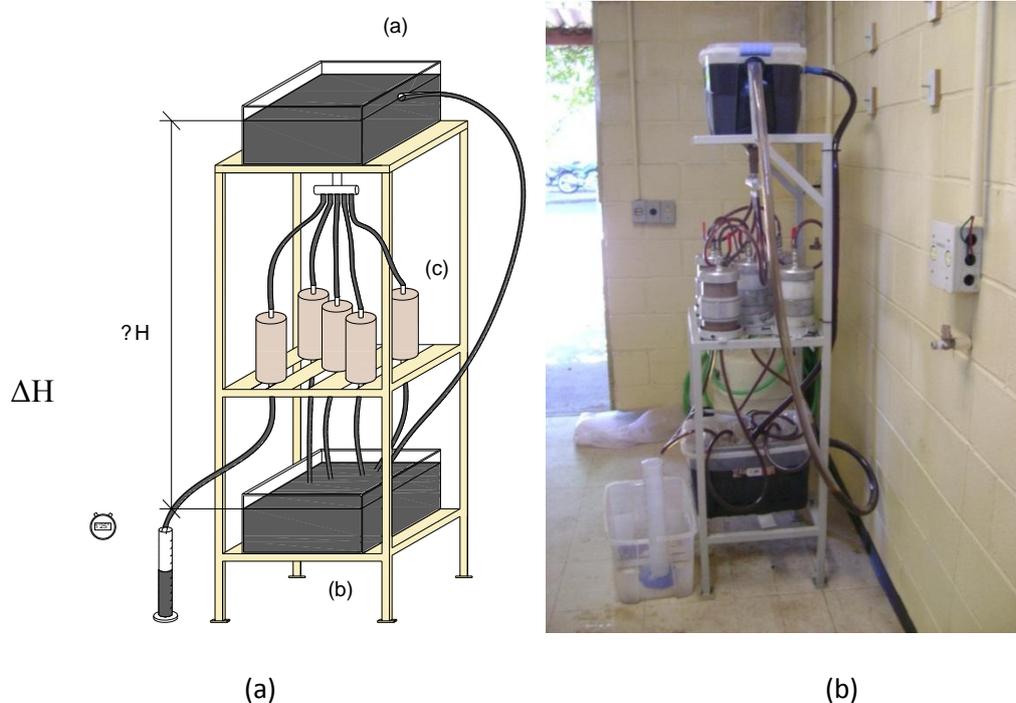


Figura 3.2 – (a) Esquema do equipamento usado para realização dos ensaios de permeabilidade com fluxo constante (a) reservatório superior (b) reservatório inferior (c) permeômetros (b) Equipamento em funcionamento

O equipamento ainda possuía uma bomba submersa, comumente usada em aquários, da marca Sarlo Better, modelo SB 2000, com vazão máxima de 1950 l/h e pressão de 2,1 mca, cuja função era bombear o lixiviado do reservatório inferior para o superior, mantendo assim recirculação constante ao longo do período de ensaio. A Figura 3.3 (a) mostra a bomba

submersa em detalhe, enquanto a Figura 3.3 (b) mostra a bomba já instalada no equipamento.



(a)



(b)

Figura 3.3 - (a) Bomba submersa modelo SB 2000 (b) bomba instalada no equipamento

Para garantir a carga constante no ensaio foi prevista a colocação de um extravasor no reservatório superior, conforme mostrado na Figura 3.4, para que o gradiente hidráulico se mantivesse constante e dessa forma o equipamento poderia funcionar 24 horas por dia de maneira ininterrupta. No reservatório superior foi acoplada uma mangueira de 25 mm de diâmetro, para servir de extravasor.



Figura 3.4 - Detalhe do extravasor instalado com a finalidade de manter a carga constante

Na base do reservatório superior foi instalada uma válvula de esfera, conforme visto na Figura 3.4, para liberar o fluxo do lixiviado. Um dispositivo que individualizava a liberação do lixiviado para cada permeâmetro também foi instalado.

Na região central da estrutura foram instalados os permeômetros, fabricados de PVC, com tampa de alumínio e dispositivos para fixação de mangueiras (conhecidos comercialmente como “espigões”), fabricados em latão, e registros de esfera para individualizar as leituras do ensaio, conforme mostrado na Figura 3.5. As mangueiras eram fabricadas de PVC, com diâmetro de 6 mm e transparentes, o que facilitou a visualização, da passagem de fluxo.

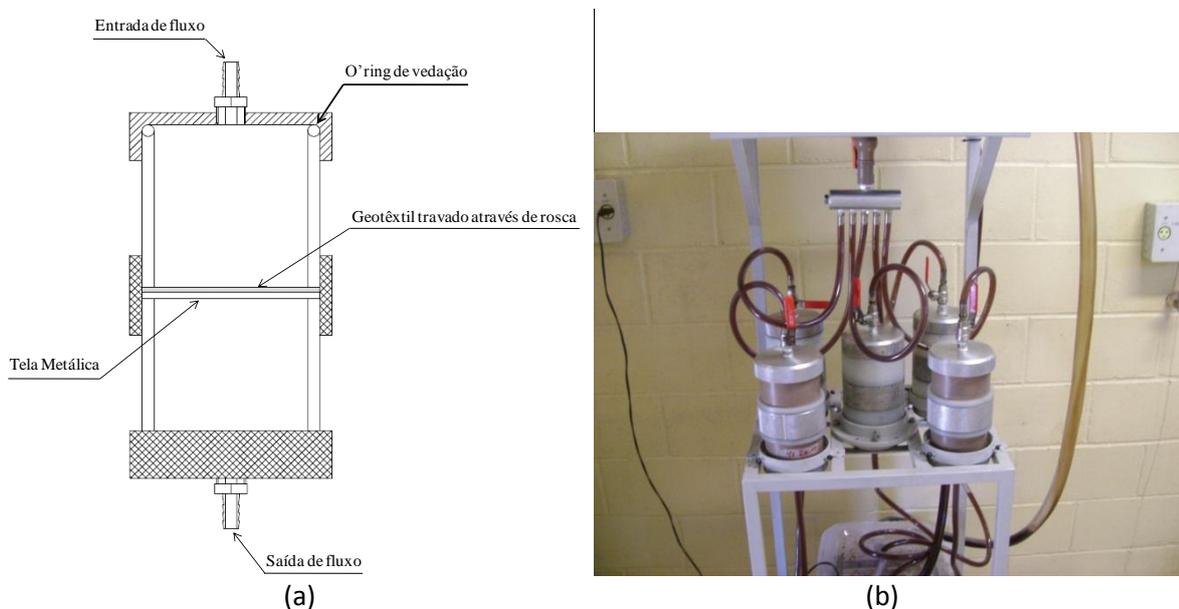


Figura 3.5 – (a) Vista em corte do permeâmetro usado na pesquisa (b) Permeômetros instalados no equipamento

Os permeômetros eram providos de uma tela metálica perfurada, instalada a meia altura com a função de manter o geotêxtil nessa posição e permitir a passagem do lixiviado sem dificuldades. Vale ressaltar que a perda de carga na tela não foi considerada nesta análise.

Para medição das vazões, utilizou-se uma proveta de um litro, além de um cronômetro. A diferença de carga hidráulica entre o nível de lixiviado do reservatório inferior e o superior,

foi medida com uma trena de precisão milimétrica. As espessuras dos corpos-de-prova foram obtidas através de ensaio padronizado (segundo a NBR 12569), enquanto a área foi obtida com paquímetro de precisão de centésimo de milímetro.

Através do equipamento e dos parâmetros obtidos, foi possível utilizar a Equação 3.1 a seguir:

$$k = \frac{V \times t_{GT}}{t \times \Delta H \times A}$$

Equação 3.1

Sendo:

$k$  = condutividade hidráulica;

$V$  = volume;

$t$  = tempo;

$t_{GT}$  = espessura do geotêxtil;

$\Delta H$  = diferença de carga hidráulica;

$A$  = Área do corpo-de-prova.

### **3.3.2 Acompanhamento dos valores de pH, eH**

#### **3.3.2.1 pH**

Durante o período de ensaio de permeabilidade, houve um acompanhamento de alguns parâmetros físico-químicos do lixiviado, para melhor compreensão do processo de colmatação, isso porque esses parâmetros têm grande variabilidade com o tempo. O pH foi medido semanalmente no laboratório de geoquímica do Departamento de Geotecnia da EESC. Uma amostra do reservatório inferior foi retirada e analisada imediatamente, sem que a mesma sofresse qualquer influência do meio externo. A Figura 3.6 mostra o equipamento usado na determinação do pH.



Figura 3.6 – Instrumento usado para acompanhar o pH das amostras de lixiviado

### 3.3.2.2 Condutividade Elétrica e eH

O acompanhamento dos parâmetros eH (energia primária) e condutividade elétrica, foram realizadas empregando as técnicas que medem a energia química necessária para muitos organismos vivos transferirem elétrons de uma fonte de energia, medida através do equipamento ilustrado na Figura 3.7. Através do acompanhamento pode ser possível verificar indícios de atividade microbiana, porém deve-se levar em consideração os parâmetros de pH e temperatura que acabam por influenciar na medição.



Figura 3.7 – Equipamento usado para medir eH e condutividade elétrica do lixiviado

### **3.4 Exames Microscópicos**

Para avaliação microscópica foram utilizados dois diferentes tipos de microscópios, um eletrônico de varredura (MEV) e um óptico, sendo o óptico um Olympus modelo MIC-D com capacidade de aumento de até 255 vezes, o que se mostrou suficiente para as análises dos fechamento dos poros dos geotêxteis, porém para uma análise mais minuciosa quanto ao crescimento das colônias e formação do biofilme, verificou-se a necessidade de um microscópio com maior poder de aumento, sendo utilizado para tal função o MEV.

#### **3.4.1 Microscopia Óptica**

O microscópio óptico possui um sistema de iluminação invertida que transmite a passagem da luz pela parte de cima do corpo-de-prova, além de um sistema que permite rotacionar o sistema de iluminação, gerando um foco oblíquo ou refletido.

A Figura 3.8 mostra um esquema proposto pelo fabricante, onde é possível ver os principais componentes do equipamento. O microscópio é ligado ao computador através de um cabo universal USB (Universal Serial Bus) que permite uma interface equipamento-computador. O cabo ainda tem a função de realizar a alimentação energética do microscópio. Para visualização das imagens utiliza-se um software fornecido pelo fabricante do microscópio, que permite a captura e edição das imagens.

O equipamento permite um ajuste manual de zoom ótico através de uma alça de rotação (ajustador manual), acoplado ao corpo do equipamento, dotado de uma escala graduada com as referências de ampliação, localizada na parte inferior do ajustador. O giro desta alça permite a ampliação da imagem da amostra localizada na placa ajustável.



Figura 3.8 - Microscópio Digital Olympus MIC-D usado na pesquisa (Traduzido do site da empresa Olympus)

A placa ajustável tem 98 milímetros de diâmetro sendo fabricada em material cerâmico resistente a corrosão. No centro da placa há um furo de 21 milímetros de diâmetro onde é instalada a placa de vidro de 1 milímetro de espessura que permite focar e gerar as imagens. O corpo-de-prova deve ser colocado sobre essa placa de vidro onde será inserida a iluminação, gerando a imagem no computador. A Figura 3.9 (a) mostra o microscópio conectado ao computador, enquanto a Figura 3.9 (b) mostra o detalhe da placa de vidro instalada na placa ajustável.



Figura 3.9– (a) Microscópio Digital ao lado do computador (b) detalhe da placa de vidro

A iluminação é feita através de uma lâmpada de LED, localizada na cabeça de iluminação, sendo sua intensidade controlada por um potenciômetro localizado na base do microscópio. O foco é obtido através de um botão localizado próximo a uma placa ajustável, que pode deslizar e girar para melhor posicionar o corpo-de-prova analisado.

### 3.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Após os ensaios de permeabilidade realizaram-se ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), nos geotêxteis, pois havia necessidade de se avaliar o fechamento dos poros e visualizar os microorganismos aderidos aos filamentos dos geotêxteis. A escolha da MEV em relação a outras técnicas de microscopia se deu pela necessidade de um grande aumento (de até 5000 vezes) para que fosse possível a visualização das colônias de bactérias e a formação do biofilme

O microscópio usado na pesquisa foi o modelo DSM 960, disponibilizado pelo instituto de física de São Carlos (IFSC), mostrado na Figura 3.10.



Figura 3.10 – Microscópio eletrônico de varredura

Para fixação das amostras nos suportes usados para MEV, utilizou-se um procedimento modificado de Araújo (1995), onde inicialmente misturou-se uma solução tampão, ou seja, uma solução que sofre pequena variação de pH quando adicionados íons de  $H^+$  ou  $OH^-$ , sendo a solução usada de fosfato (0,1 M) com pH de 7,8 de glutaraldeído. Em seguida, cobriram-se as amostras com a solução de glutaraldeído, devendo estas permanecer em repouso por um período de 12 horas com os frascos abertos em geladeira a uma temperatura de aproximadamente  $4^{\circ}C$ .

Após esse período os materiais foram lavados com a solução tampão por 10 minutos, sendo os frascos agitados, para melhor homogeneização das amostras. Posteriormente as amostras foram desidratadas em alcoóis conforme a sequência a seguir (mostrado na Figura 3.11):



Figura 3.11 – Frascos com alcoóis usados na desidratação das amostras

Álcool 50% (50 % álcool Etílico e 50% de água destilada) sendo imerso pelo período de dez minutos;

Álcool 70% (70 % álcool Etílico e 30% de água destilada) sendo imerso pelo período de dez minutos;

Álcool 80% (80 % álcool Etílico e 20% de água destilada) sendo imerso pelo período de dez minutos;

Álcool 90% (90 % álcool Etílico e 10% de água destilada) sendo imerso pelo período de dez minutos;

Álcool 95% (95 % álcool Etílico e 5% de água destilada) sendo imerso pelo período de dez minutos;

Álcool 100% (100 % álcool Etílico) sendo imerso pelo período de dez minutos;

Logo após a desidratação, os corpos-de-prova foram fixados nos suportes com base de unha, sendo levados para secagem em estufa com temperatura variando entre 30°C e 60°C. Ao término desta etapa as amostras estão aptas a receberem a camada de ouro para visualização no microscópio, conforme mostrado na Figura 3.12.

Cada geotêxtil foi avaliado no topo que esteve em contato direto com o lixiviado, além de uma amostra em corte transversal do corpo-de-prova e uma amostra virgem de cada material, conforme pode ser visto na Figura 3.12.

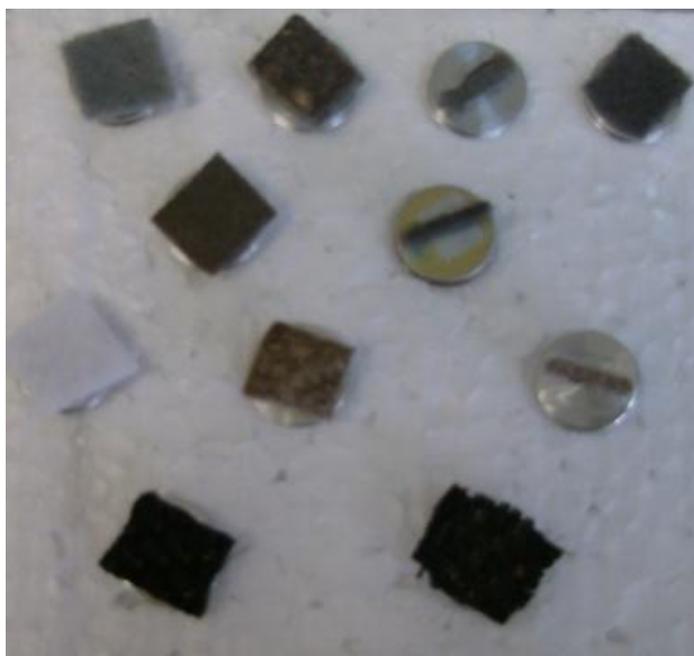


Figura 3.12 – Amostras após a preparação para MEV

Como as amostras biológicas em geral não são boas condutoras de elétrons, ou seja, não emitem elétrons secundários facilmente, foi necessário a deposição de uma fina camada de ouro sobre a superfície das amostras. Para tal finalidade utilizou-se o equipamento Sputter Coater Modelo SCD 050, conforme mostrado na Figura 3.13.

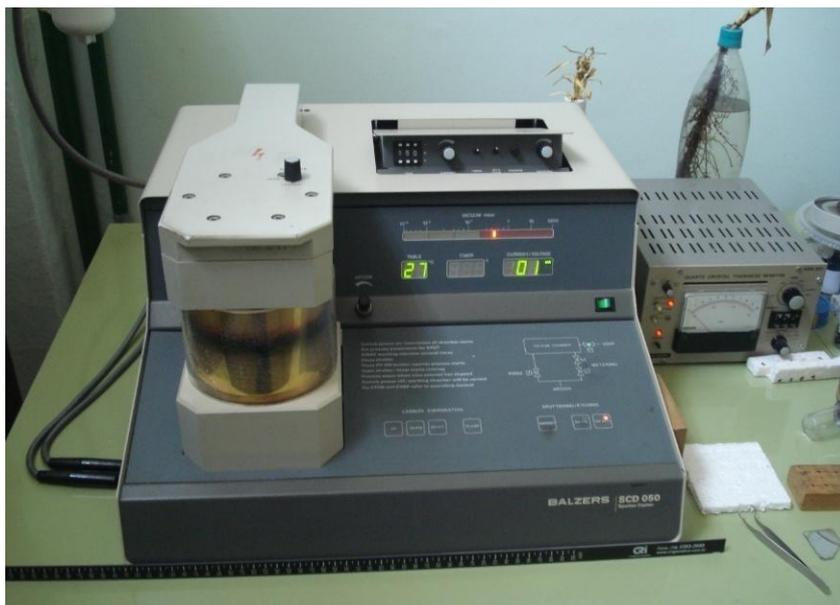


Figura 3.13 – Equipamento usado para deposição de ouro nos corpos-de-prova

### **3.5 Análise microbiológica de Unidades Formadoras de Colônias (UFC)**

A análise microbiológica teve como objetivo quantificar as unidades formadoras de colônias, responsáveis pela formação do biofilme e principal causador da colmatação biológica. As análises foram realizadas no Departamento de Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos.

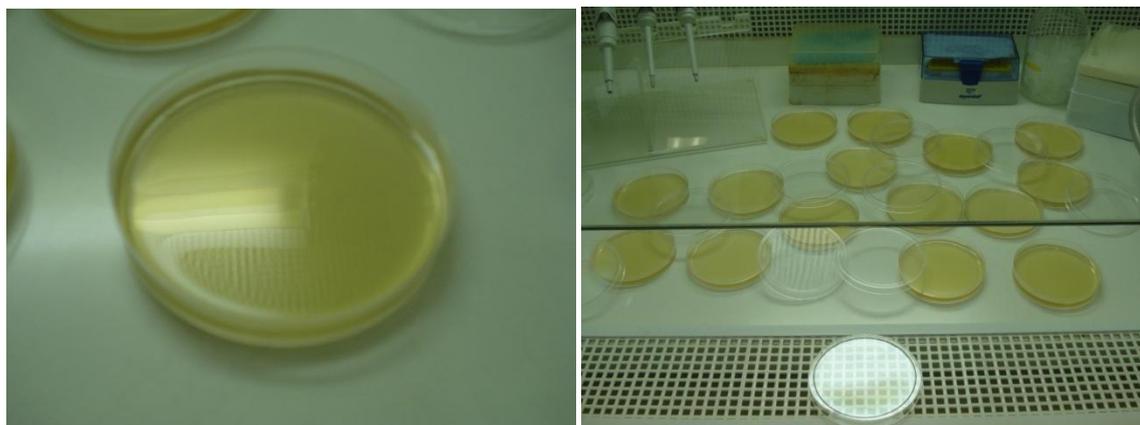
A técnica escolhida foi a de contagem de bactérias na placa de Petri. O princípio da técnica baseia-se na inoculação de volumes pré-determinados de amostras retiradas dos geotêxteis com adição de cultura de extrato de levedura.

Inicialmente “lavou-se” as amostras de geotêxteis com uma solução salina contendo

8% de NaCl<sub>2</sub> sendo o restante da composição água destilada.

Para o preparo do caldo de nutrientes, pesou-se 20g de meio desidratado e acrescentou-se água destilada até completar um volume de 1000 ml. Em seguida agitou-se o frasco, manualmente a fim de homogeneizar a solução, inclinando o frasco de maneira a formar um ângulo de 45° entre o braço e o antebraço, sendo levada em seguida à autoclave, a 121°C, para esterilização.

Após a homogeneização das soluções, transferiu-se volumes em duplicatas nas placas de Petri, conforme recomendado pela norma técnica da CETESB (L5.201, 2006) e visto nas Figuras 3.14 (a) e (b).



(a)

(b)

Figuras 3.14 – (a) Placa de Petri pronta para inoculação de microorganismos (b) Várias placas em duplicatas para avaliação

Após inocular os volumes nas placas de Petri flambaram-se o fundo das placas, antes de verter o meio de cultura na placa. Após a secagem agitou-se as placas inoculadas com o meio com movimentos circulares cerca de dez vezes, deixando-as em repouso para solidificação do meio. Após 48 horas de incubação, em estufa a uma temperatura de 35°C, as bactérias que se desenvolveram nessas condições serão passíveis de formarem colônias e serem contadas.



## 4. Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na etapa experimental desta pesquisa.

### 4.1 Caracterização dos Geotêxteis Ensaados

A Tabela 4.1 resume os resultados obtidos durante a caracterização dos geotêxteis estudados.

Tabela 4.1 – Resultado da caracterização dos geotêxteis

Ensaio	Gradiente x Tensão (kPa)	Materiais			
		GTA	GTB	GTC	GTD
Gramatura ( $\text{g/m}^2$ )	-	205	190	239	445
Espessura (mm)	-	1,83	1,86	1,48	1,13
Abertura de Filtração (mm)	-	0,147	0,136	0,12	0,288
Abertura Aparente (mm)	-	0,252	0,243	0,247	0,315
Permissividade ( $\text{s}^{-1}$ )	-	2,38	2,27	1,48	0,37
	1 x 20	9,53E-06	1,42E-05	2,97E-06	n/a
Transmissividade ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	0,1 x 20	1,15E-05	1,68E-05	3,25E-06	n/a
	1 x 100	3,65E-06	3,88E-06	9,98E-07	n/a
	0,1 x 100	4,62E-06	4,81E-06	1,24E-06	n/a
	1 x 200	2,16E-06	1,85E-06	3,25E-07	n/a
	0,1 x 200	2,79E-06	2,34E-06	5,97E-07	n/a
Permeabilidade Inicial (cm/s)	-	4,4E-01	4,2E-01	2,2E-01	4,2E-02
Porosidade	-	0,92	0,92	0,88	0,70

Nota-se que os geotêxteis GTA, GTB e GTC possuem algumas características próximas entre si, como gramatura, espessura, abertura de filtração, abertura aparente e porosidade. Entretanto o geotêxtil GTD (tecido), difere dos outros três em relação à condutividade hidráulica e à permissividade.

### 4.2 Ensaio de Condutividade Hidráulica

Após a caracterização dos geotêxteis passou-se à realização dos ensaios de permeabilidade. A primeira sequência de ensaios foi descartada por erros de montagem dos corpos-de-prova, que permitiram a ocorrência de fluxo localizado. Sanado este problema,

verificou-se que nos diversos ensaios subsequentes, houve grande decréscimo nos resultados obtidos em todos os geotêxteis estudados, chegando a valores de 5 ordens de grandezas em alguns geotêxteis. A Figura 4.1 mostra os resultados obtidos nestes ensaios, que relacionam a variação de condutividade hidráulica ao longo do tempo.

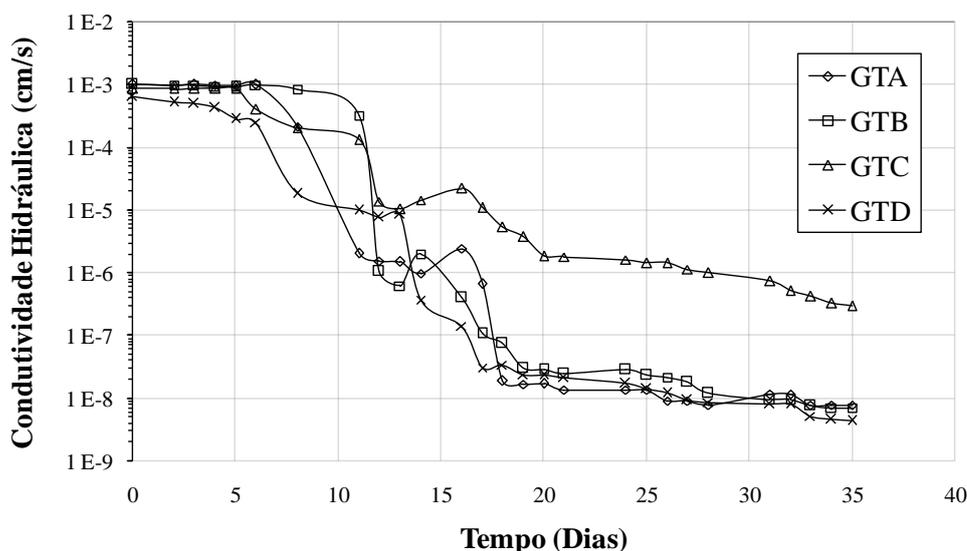


Figura 4.1 – Ensaio de condutividade hidráulica nos geotêxteis estudados

Avaliando os resultados ilustrados na Figura 4.1, é possível verificar que o geotêxtil GTC, foi o que teve a menor redução da condutividade hidráulica entre os materiais estudados.

O geotêxtil GTD é o primeiro a apresentar redução no valor de condutividade hidráulica, atingindo uma redução mais acentuada que os demais geotêxteis nos primeiros oito dias de ensaio.

Entre o décimo e o décimo quinto dia foi possível observar o maior decréscimo de condutividade hidráulica nos geotêxteis estudados, exceção feita ao geotêxtil GTC, que após redução inicial de cerca de duas ordens de grandeza, variou apenas uma ordem de grandeza para menos a partir do décimo dia de ensaio.

Nos primeiros dias de ensaio é possível avaliar um melhor desempenho do geotêxtil

GTB até o décimo segundo dia, sendo que após este período o comportamento foi semelhante aos demais. O decréscimo mais acentuada ocorreu após o décimo segundo dia, possivelmente pela formação do biofilme ou pela deposição de material sólido sobre o geotêxtil.

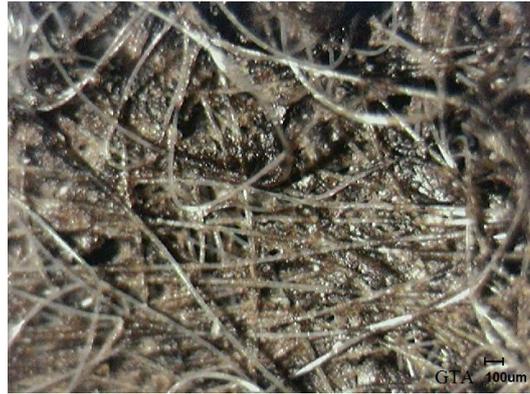
Apenas com os resultados de condutividade hidráulica não é possível afirmar qual tipo de colmatção ocorreu nos geotêxteis, conforme citado por Mackey & Koerner (1999). Dessa forma passou-se então à realização de outros ensaios para que viessem a complementar e auxiliar nas conclusões desta pesquisa.

#### **4.2.1 Microscopia Óptica dos Geotêxteis**

A microscopia óptica teve o intuito de visualizar o fechamento dos poros dos geotêxteis, após os ensaios de permeabilidade, através de um ponto de vista global, não sendo possível visualizar as colônias formadas. Para visualização das colônias de bactérias utilizou-se um microscópio com maior poder de aumento (MEV), conforme descrito anteriormente.

As imagens mostradas nas Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5 mostram as aqui denominadas partículas agregadas aos geotêxteis. Como não é possível distinguir os materiais sólidos dos microrganismos, optou-se posteriormente pelo uso da microscopia eletrônica de varredura, porém vale ressaltar que o uso da microscopia óptica se mostrou uma boa ferramenta na avaliação do fechamento superficial dos poros.

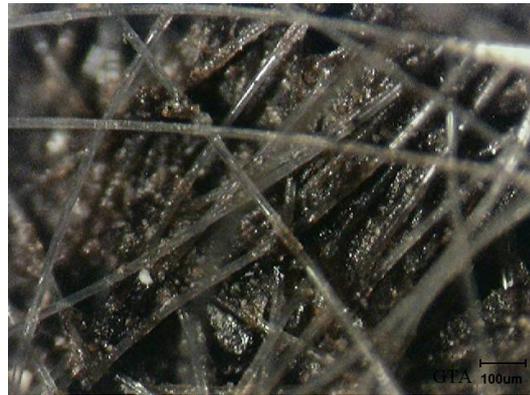
Na Figura 4.2 (a) é possível notar uma grande deposição de materiais sobre o geotêxtil (GTA), bem como poucos vazios não preenchidos. Ao começar a utilizar o aumento do microscópio, torna-se possível perceber que grande parte dos vazios foi preenchida por partículas sólidas, conforme pode ser observado nas Figura 4.2 (b) e (c). Nas Figura 4.2 (d) e (e), as imagens encontram-se nos maiores aumentos proporcionados pelo microscópio, onde é possível constatar uma significativa redução nos poros superficiais do geotêxtil.



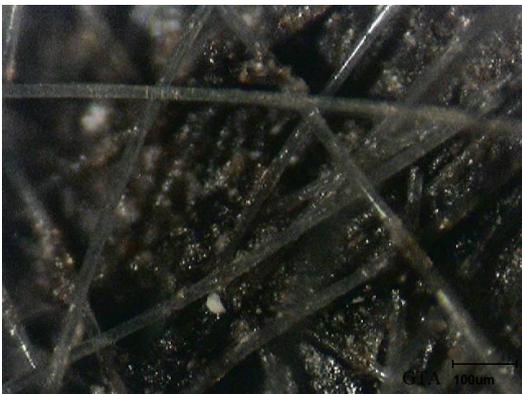
(a)



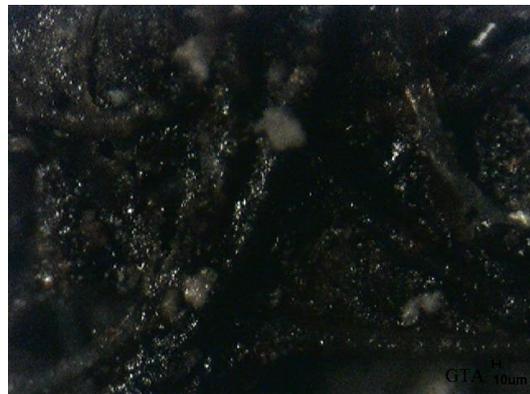
(b)



(c)



(d)

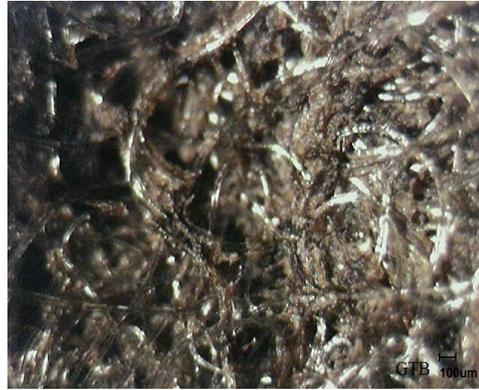


(e)

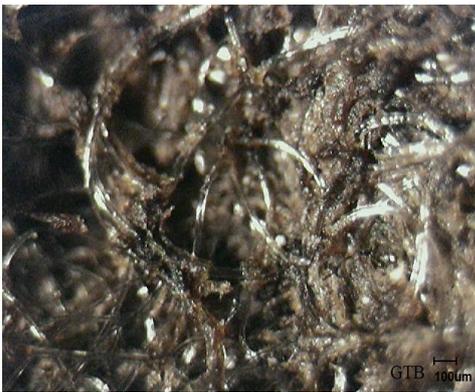
Figura 4.2 – Amostra do geotêxtil GTA colmatado, segundo diferentes ampliações (a) ampliação de 57 vezes (b) 75 vezes (c) 132 vezes (d) 183 vezes (e) 255 vezes, sendo este o aumento máximo proporcionado pelo equipamento.

Com relação ao geotêxtil GTB é possível notar comportamento similar ao anterior, principalmente ao se avaliar as imagens com pouco aumento, como nos casos das Figura 4.3 (a), (b) e (c), porém ao se ampliar a imagem, é possível observar alguns vazios não

preenchidos por material, conforme ilustrado nas Figura 4.3 (d) e (e). Nota-se que os geotêxteis GTA e GTB apresentam semelhanças quando comparadas as imagens, o que reforça o comportamento similar entre ambos nos demais ensaios realizados.



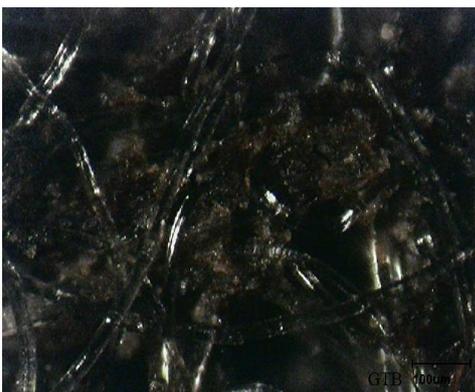
(a)



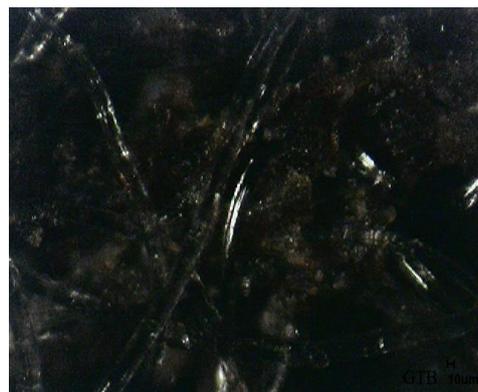
(b)



(c)



(d)

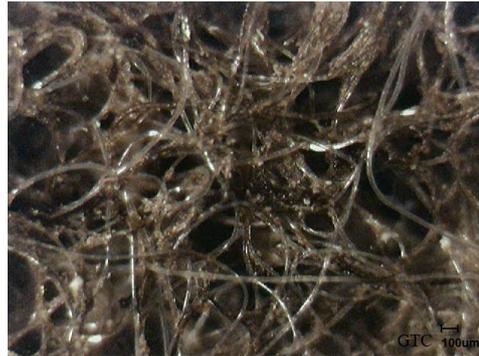


(e)

Figura 4.3 - Amostra de geotêxtil GTB colmatado, conforme as seguintes ampliações (a) ampliação de 57 vezes (b) 75 vezes (c) 132 vezes (d) 183 vezes (e) 255 vezes.

Ao se analisar as imagens do geotêxtil GTC é possível notar uma maior quantidade de

poros não preenchidos por materiais, mostrando uma diferenciação entre esse geotêxtil e os demais apresentados até aqui. As imagens obtidas e mostradas nas Figura 4.4 (a), (b) e (c), quando comparadas com as imagens na mesma escala dos geotêxteis anteriores já são um indício da menor colmatção deste geotêxtil. Já nas Figura 4.4 (d) e (e) é possível notar um menor volume de espaços preenchidos.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

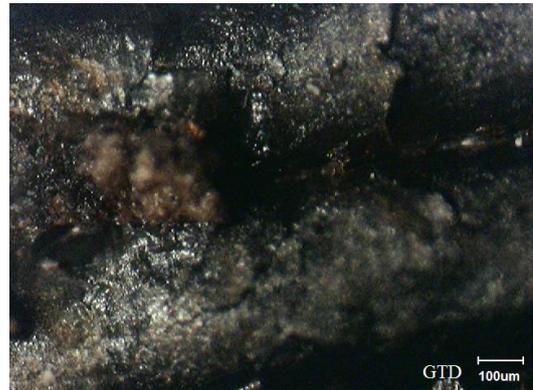
Figura 4.4 - Amostra de geotêxtil GTC após os ensaios de permeabilidade, visualizados no microscópio óptico com as seguintes ampliações (a) ampliação de 57 vezes (b) 75 vezes (c) 132 vezes (d) 183 vezes (e) 255 vezes.



(a)



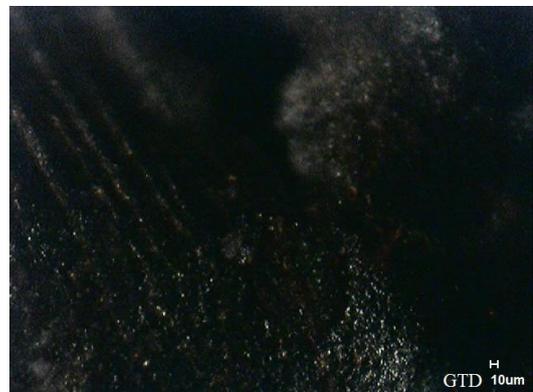
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.5 - Amostra de geotêxtil GTD após os ensaios de permeabilidade, visualizados no microscópio óptico com as seguintes ampliações (a) ampliação de 57 vezes (b) 75 vezes (c) 132 vezes (d) 183 vezes (e) 255 vezes.

O geotêxtil GTD foi aquele que apresentou maior abertura inicial entre os materiais estudados, porém seu desempenho, com relação aos ensaios de permeabilidade, mostrou-se similar aos demais materiais ensaiados. Nas Figura 4.5 (a), (b), (c), (d) e (e) é possível notar a

deposição dos materiais nos poros do geotêxtil. Nas imagens obtidas, nota-se grande acúmulo de material entre as fibras da trama e do urdume. Contudo, conforme dito anteriormente, essa técnica mostrou-se muito eficaz para análise da deposição dos materiais nos geotêxteis, mas não para visualizar os microrganismos e o biofilme, sendo necessário recorrer a microscópios com maior poder de aumento.

### **4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A microscopia eletrônica de varredura foi empregada para evidenciar detalhes da formação do biofilme nos geotêxteis, complementando os resultados obtidos nos ensaios hidráulicos.

A Figura 4.6 mostra uma imagem dos geotêxteis GTA, GTB, GTC (não tecidos) e do GTD (tecido) antes destes serem submetidos ao contato com o lixiviado. Notam-se minúsculas porções de material aderido nos filamentos, decorrentes do processo de fabricação, mas estes não comprometem o desempenho dos geotêxteis como filtro.

Apesar da similaridade das imagens é possível perceber que as fibras possuem tamanhos semelhantes, além de se avaliar a disposição das fibras e possibilitar a visualização e posteriormente o cálculo da porosidade dos geotêxteis. Através das análises microscópicas e do cálculo de porosidade, fica evidenciado o pequeno espaço entre os filamentos do geotêxtil GTD, ainda que este tenha apresentado a maior abertura de filtração nos ensaios padronizados.

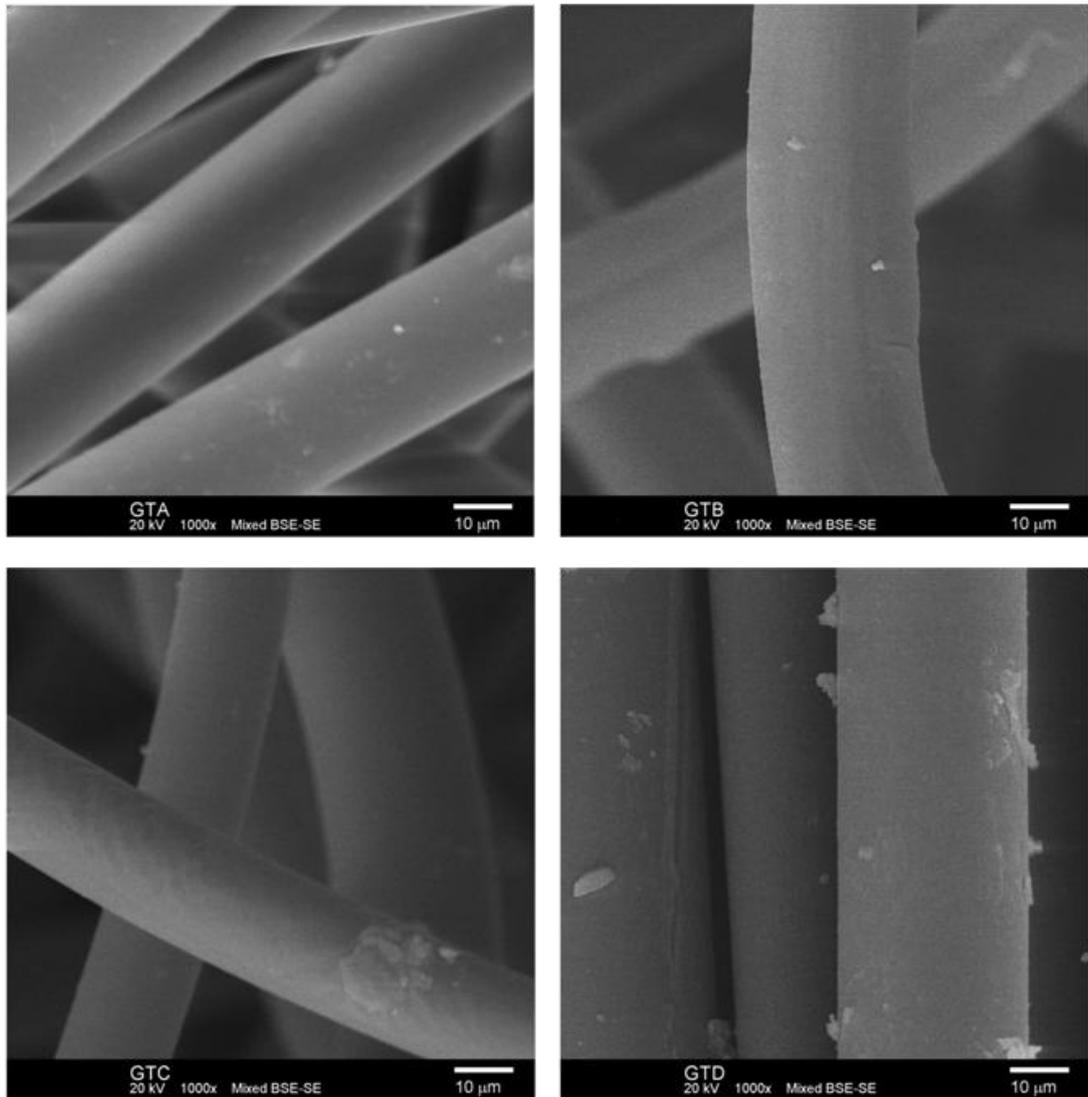


Figura 4.6 – Imagem dos geotêxteis analisados na MEV com aumento de 1000 vezes

Algumas análises foram feitas em uma escala maior de detalhes com a finalidade de se avaliar a aderência de microrganismos e a formação do biofilme, através de um aumento de 500 vezes, conforme visto na Figura 4.7, além de possibilitar a visualização do fechamento dos poros nos geotêxteis. Este geotêxtil sofreu uma redução de condutividade hidráulica de 5 ordens de grandeza, resultado do fechamento dos poros do geotêxtil, também notado através da microscopia eletrônica de varredura. Porém, ao analisar-se a imagem a seguir, é possível notar poros não preenchidos no interior do geotêxtil, o que reforça a ideia de cegamento dos geotêxteis.

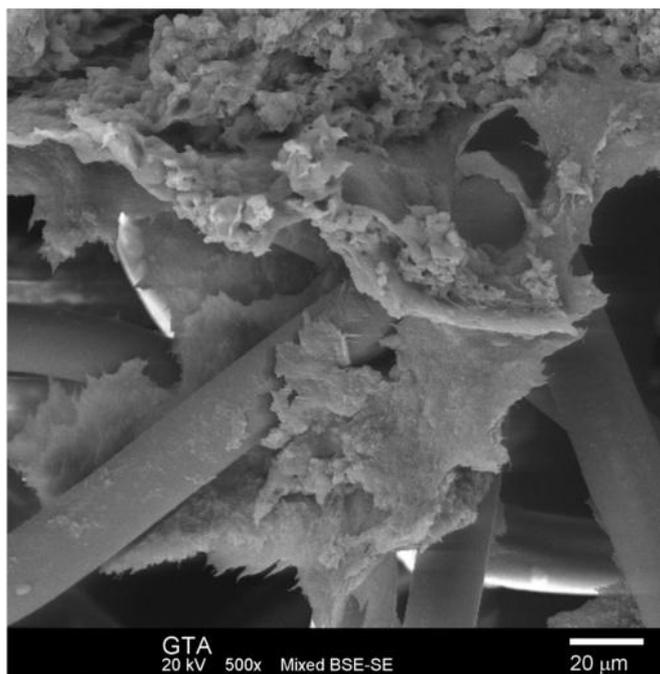


Figura 4.7 – Imagem do geotêxtil GTA após 35 dias de ensaio com fluxo e aumento de 500 vezes

Ao avaliar a imagem do geotêxtil GTB, ilustrada na Figura 4.8 notou-se uma menor formação de biofilme em relação ao geotêxtil GTA, apesar dos resultados do ensaio de permeabilidade apontarem comportamento similar entre ambos. Porém o fato de haver menor formação de biofilme na imagem analisada pode estar relacionado à amostra escolhida para realização da MEV, tendo em vista que poderia haver locais com maior biofilme, isso porque a análise microscópica sempre depende da amostra escolhida, o que pode ser uma desvantagem na hora de se avaliar os resultados obtidos.

Enquanto notou-se discrepância entre as imagens avaliadas nos geotêxteis GTA e GTB, não se pode dizer o mesmo em relação aos materiais GTA e GTC, pois conforme mostrado na Figura 4.9, também foi possível notar o fechamento dos poros superficiais deste geotêxtil. Vale a pena ressaltar que os três geotêxteis analisados até aqui são geotêxteis não tecidos, enquanto o próximo geotêxtil a ser avaliado é um tecido.

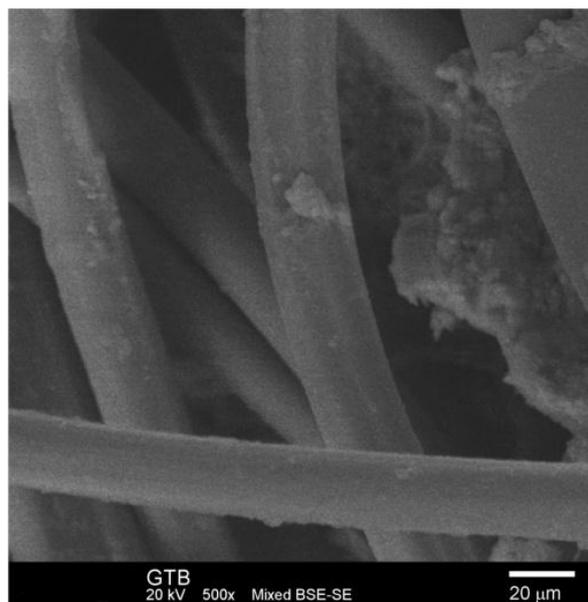


Figura 4.8 – Análise do MEV do geotêxtil GTB com aumento 500 de vezes

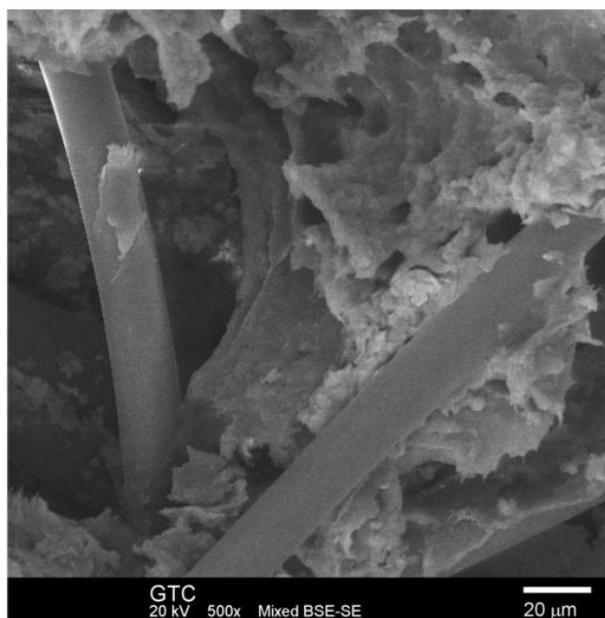


Figura 4.9 – MEV do geotêxtil GTC com aumento de 500 vezes

Com relação ao geotêxtil GTD, optou-se por uma imagem com aumento de 20 vezes para melhor ilustrar a formação do biofilme nos poros entre as fibras do material. A Figura 4.10 ilustra um biofilme formado sobre as fibras, bem como material depositado entre as mesmas.

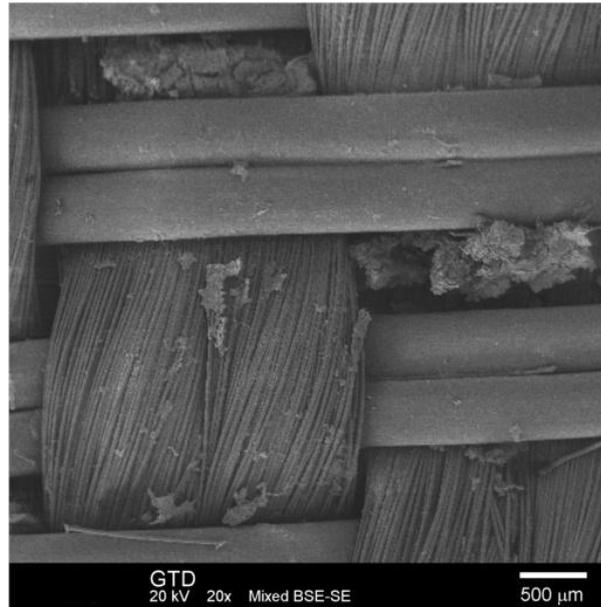


Figura 4.10 – Geotêxtil GTD com aumento de 20 vezes

Na Figura 4.11, é possível notar a formação do biofilme entre as fibras do geotêxtil, o que conforme já fora dito acaba por causar maior resistência bacteriana e colmatção do geotêxtil.

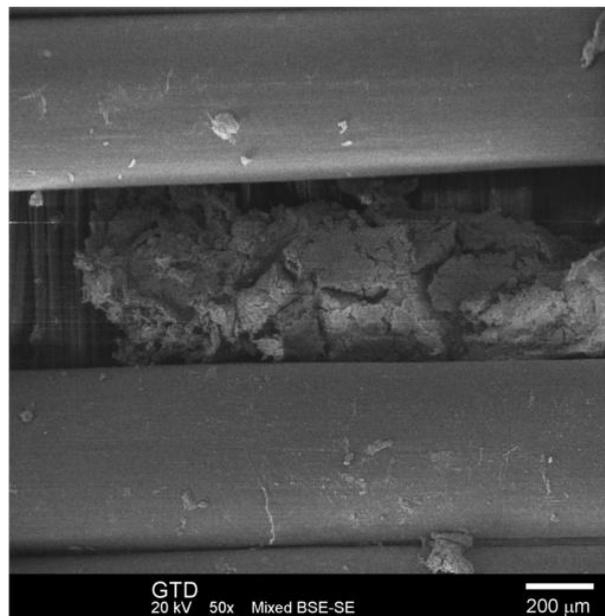


Figura 4.11 – MEV do geotêxtil GTD com aumento de 50 vezes

Uma análise com maior aumento foi realizada para avaliar a formação do biofilme nos geotêxteis. Notou-se nessa etapa uma presença maior de bactérias no geotêxtil GTD (tecido), onde as fibras possuem uma superfície mais plana, o que facilita a aderência bacteriana nas fibras.

A Figura 4.12 mostra microrganismos aderidos ao filamento do geotêxtil GTA, onde é possível avaliar a pequena presença de bactérias aderidas ao filamento.

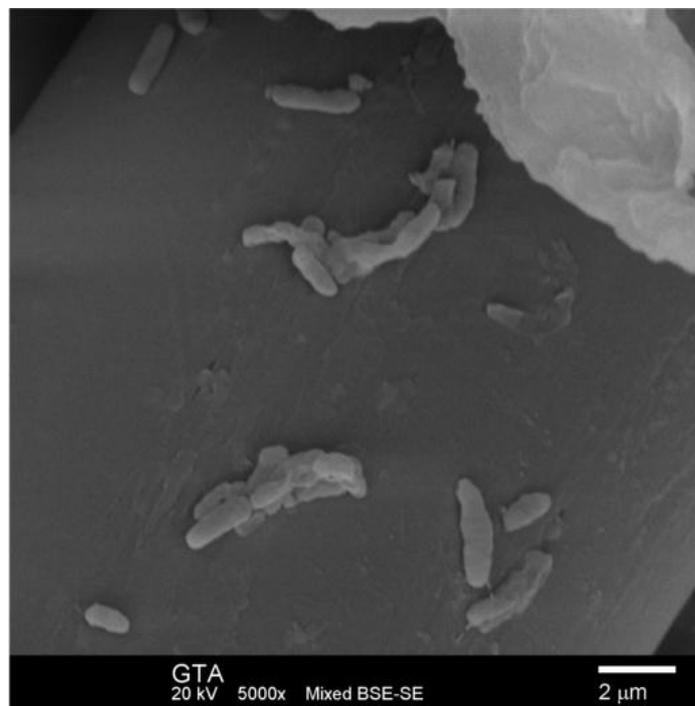


Figura 4.12 – Presença de bactérias aderidas ao filamento do geotêxtil GTA

Ao se avaliar a Figura 4.13 é possível notar alguns microrganismos formando um biofilme no geotêxtil GTB.

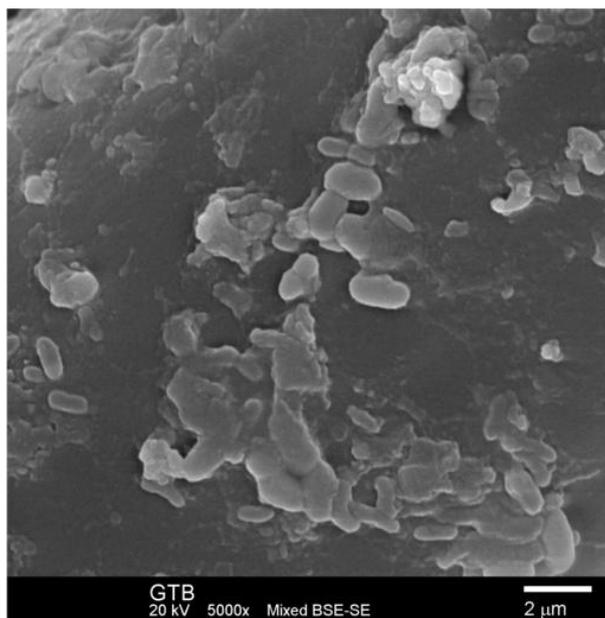


Figura 4.13 – Formação do biofilme no geotêxtil GTB

No caso do geotêxtil GTC houve certa dificuldade em visualizar os microrganismos presentes nos filamentos. Isso porque ocorre sobre este geotêxtil uma camada de material, não identificado, podendo ter sido produzido pelos microrganismos, ou durante a preparação da amostra. A Figura 4.14 ilustra este fato.

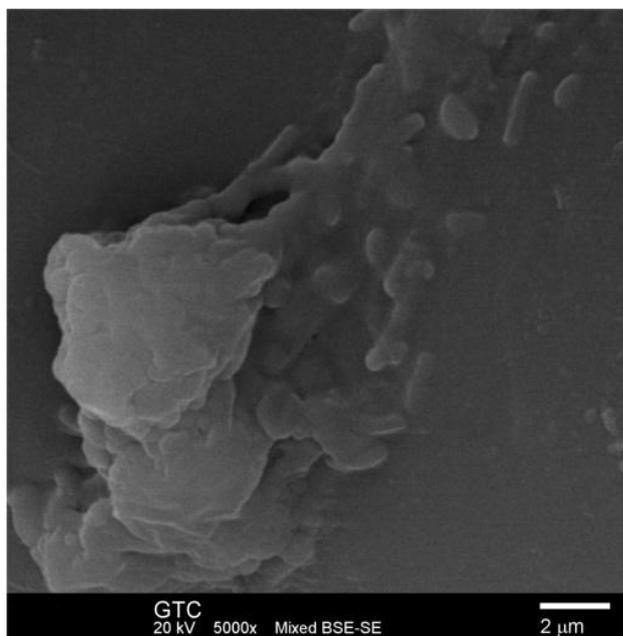


Figura 4.14 – Material aderido na fibra do geotêxtil GTC, sobre uma camada de material não identificado

Conforme dito anteriormente, o geotêxtil GTD foi aquele que apresentou melhor visualização dos microorganismos nos filamentos, em especial devido a sua estrutura planar. A Figura 4.15 mostra uma colônia de bactérias aderida ao filamento, resultando posteriormente em um biofilme.

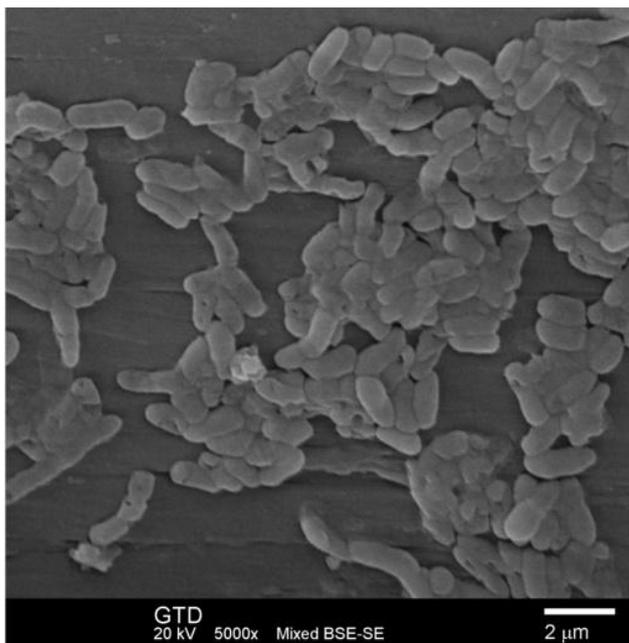


Figura 4.15 – Colônia de bacilos aderidos ao filamento do geotêxtil GTD

Avaliando a Figura 4.15, é possível notar as bactérias juntando-se para formar o biofilme, o que confere a elas grandes vantagens, como proteção contra agentes agressivos e predadores, como protozoários (XAVIER, 2003). Estas bactérias enquadram-se na morfologia dos bacilos, sendo estes confirmados através da microscopia ótica, realizada no material retirado da superfície do geotêxtil.

#### **4.3.1 Avaliação da seção transversal dos geotêxteis**

A partir das imagens obtidas da microscopia eletrônica de varredura, notou-se a formação do biofilme na parte superficial dos geotêxteis ensaiados, contudo o interior do geotêxtil aparentava não estar tão preenchido quanto a superfície. Assim realizou-se

microscopia eletrônica de varredura na seção transversal dos geotêxteis para melhor avaliar os geotêxteis estudados, ao longo da espessura.

A avaliação da seção transversal teve como finalidade avaliar o tipo de colmatação que estava ocorrendo no geotêxtil, pois havia dúvida se o processo ocorrido era colmatação interna ou cegamento. Na análise da superfície dos geotêxteis, em especial os não tecidos, verificou-se a presença de uma camada de material depositado, tratando-se de uma camada de baixa condutividade hidráulica sobre os geotêxteis.

A Figura 4.16 mostra uma imagem obtida através da microscopia eletrônica de varredura que mostra o geotêxtil GTA com a camada de material depositado. Na Figura 4.17 é possível avaliar a seção transversal dos geotêxteis, não sendo possível notar um grande volume de vazios preenchidos pelo biofilme.

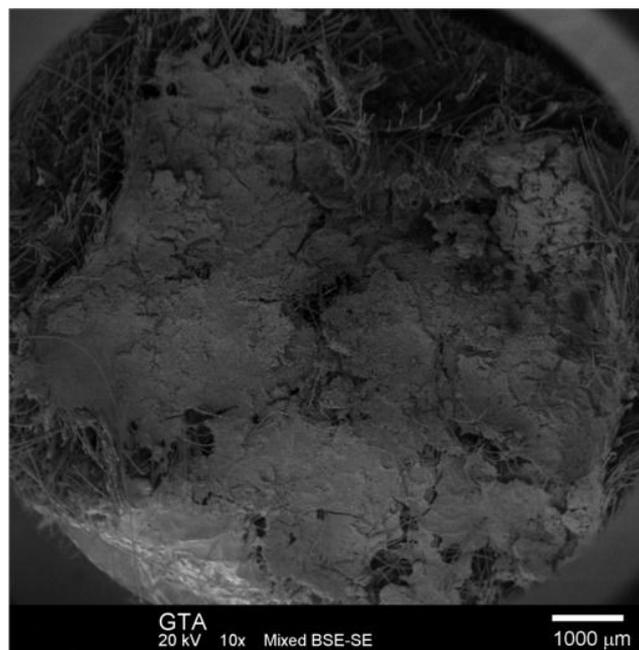


Figura 4.16 – Camada superficial de baixa condutividade formada sobre o geotêxtil

Não foi possível realizar essa análise no geotêxtil GTD (tecido), uma vez que na fase de preparação, o mesmo não mantinha sua estrutura intacta, não sendo possível preparar o corpo-de-prova.

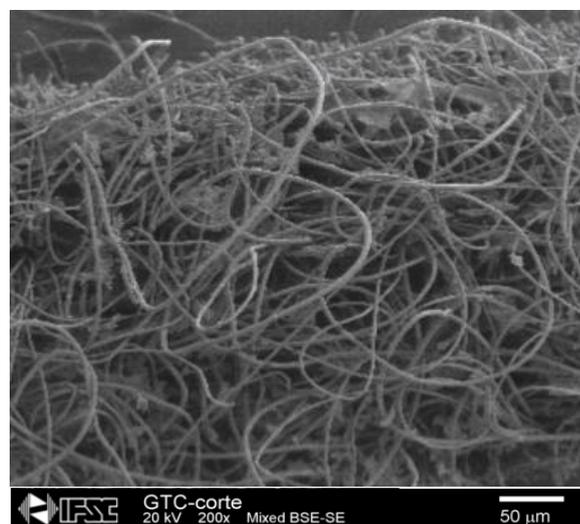
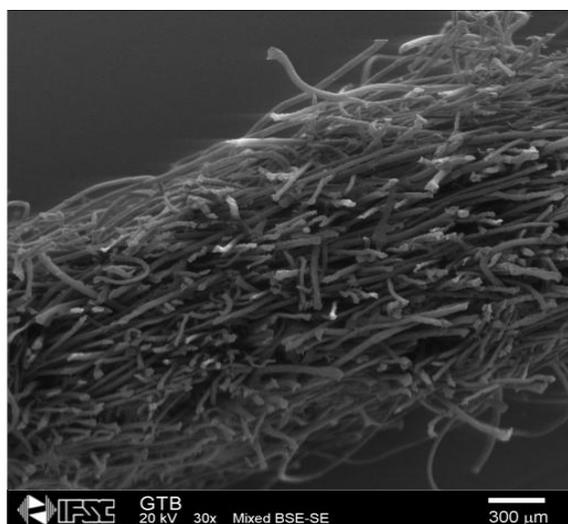
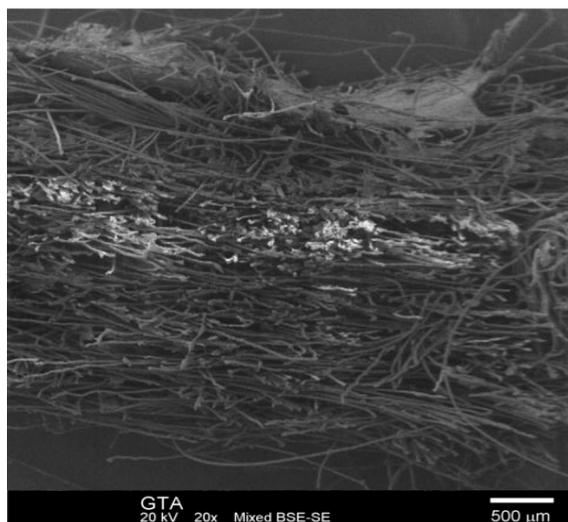


Figura 4.17 – Seção transversal dos geotêxteis, sendo possível notar o material depositado, sobre a superfície, ficando o interior do geotêxtil, praticamente desobstruído.

#### 4.4 Avaliação da Porosidade

Ao final dos ensaios de condutividade hidráulica optou-se por avaliar a redução da porosidade dos geotêxteis devido à formação do biofilme. Para tal avaliação optou-se pela utilização do modelo proposto por Giroud (1996) mostrado na

Equação 4.1 a seguir:

$$k = \frac{\beta \rho g}{16\eta} \frac{n^3}{1-n^2} d_f^2$$

Equação 4.1

Sendo:

$k$  é a condutividade hidráulica do geotêxtil (obtida através de ensaio);

$\beta$  é o fator de forma em função da tortuosidade do caminho a ser percorrido;

$g$  é a aceleração da gravidade;

$\eta$  é viscosidade dinâmica do fluido;

$n$  é a porosidade do geotêxtil;

$d_f$  é o diâmetro médio da fibra ou filamento do geotêxtil.

Remígio (2006) utilizou o mesmo modelo para avaliação da redução da porosidade dos geotêxteis submetidos a ensaios de fluxo com lixiviados. Os valores obtidos pelo autor foram da ordem de 70% de redução de porosidade nos geotêxteis estudados.

A Figura 4.18 mostra as reduções de porosidade calculadas a partir reduções da condutividade hidráulica.

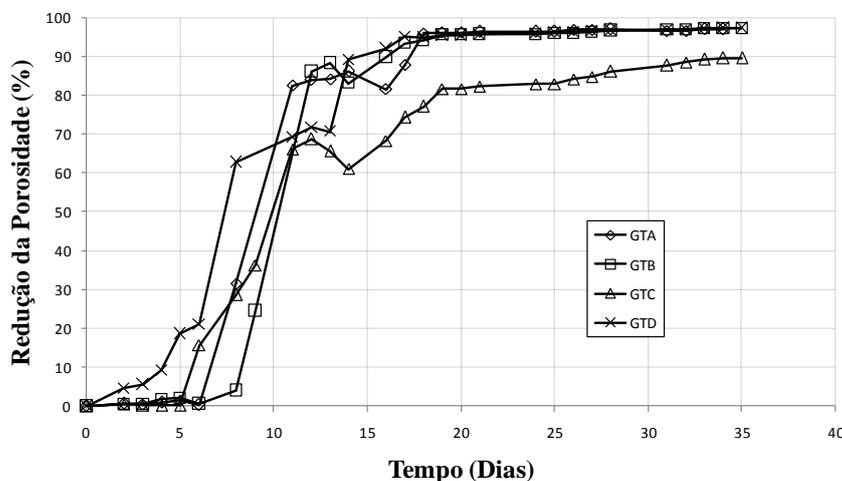


Figura 4.18 – Redução da porosidade dos geotêxteis após o período ensaiado

Como seria de se esperar, é possível notar uma redução na porosidade dos geotêxteis que chega até cerca de 97%, com exceção feita ao geotêxtil GTC, onde a redução foi de 89%. Tal redução se deve principalmente à formação do biofilme na superfície do geotêxtil, conforme já constatado nas análises anteriores. Isto foi confirmado pelas imagens

microscópicas da seção transversal dos geotêxteis onde se pôde notar que o volume de vazios no interior dos geotêxteis, estava preservado com pouca colmatação interna e maior predominância do processo de cegamento.

Dessa forma, esta análise é meramente ilustrativa, pois não reflete uma redução da porosidade propriamente dita, mas sim uma redução da área disponível para o fluxo.

#### 4.5 Correlação entre a área dos geotêxteis e a condutividade hidráulica

Tendo em vista a observação referente à porosidade, procurou-se avaliar a redução da área disponível para o fluxo, provocada pela deposição do filme biológico principalmente na superfície dos geotêxteis. Assim, a partir das condutividades hidráulicas medidas, recalcularam-se as áreas, de acordo com a lei de Darcy.

A Figura 4.19 mostra o resultado desta inferência, onde é possível notar que a área superficial dos geotêxteis chegou a valores extremamente baixos, sendo possível afirmar que praticamente toda a superfície dos geotêxteis fora recoberta pelo biofilme formado.

##### 4.5.1 Temperatura e pH do lixiviado

O acompanhamento da temperatura do lixiviado foi feito diariamente, enquanto o pH foi medido semanalmente, os resultados obtidos encontram-se na Figura 4.20.

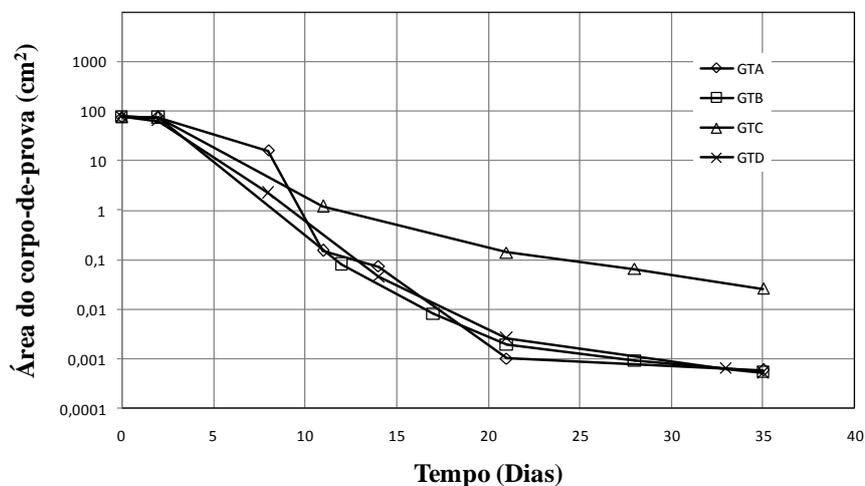


Figura 4.19 – Correlação entre condutividade hidráulica com a área preenchida dos geotêxteis

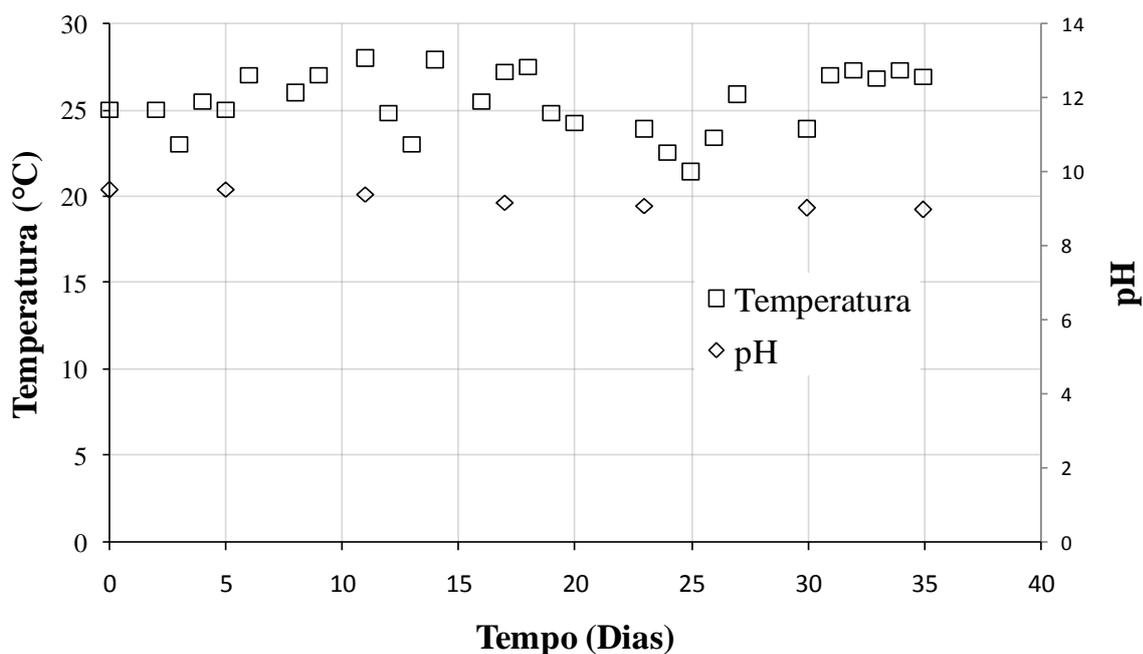


Figura 4.20 – Temperatura e pH medidos durante a pesquisa

Conforme visto na Figura 4.20, é possível notar variação de temperatura, chegando a extremos, com diferenças da ordem de 10°C. Segundo Bidone e Povinelli (1999) a temperatura ótima de fermentação é de 42°C, ou seja, maior que a temperatura encontrada na pesquisa. Os autores ainda relatam que um aterro sanitário, em geral tem temperaturas inferiores a 45°C.

Pelczar et al. (1997) indicam algumas temperaturas tidas como “ótimas” para o crescimento bacteriano, onde cabe destacar as bactérias do grupo das mesófilas, que crescem e se desenvolvem na faixa de temperatura entre 25°C e 40°C, ou seja, a mesma condição encontrada durante o período estudado, com pequenas exceções.

É possível notar a influência da temperatura nesta pesquisa ao se analisar as imagens da microscopia eletrônica de varredura e perceber o desenvolvimento de bactérias com a morfologia dos bacilos, sendo esta do grupo das mesófilas.

Os valores de pH podem servir de indicativo com relação à fase em que a

microbiologia encontra-se no interior do aterro. A Figura 4.20 mostra os resultados obtidos durante o monitoramento dos permeâmetros, sendo possível observar valores da ordem de 9,0 a 9,5. O valor obtido é compatível com a idade do Aterro Municipal de São Carlos, isto é, na fase em que os valores encontram-se na fase alcalina. Com a baixa variação nos valores encontrados de pH é possível afirmar que esta variável pouco influenciou a colmatção dos geotêxteis, tendo em vista que a variação não passou de 0,5.

## 4.6 Parâmetros Físico-Químicos do Lixiviado Analisado

### 4.6.1 Potencial Oxi-redutor (Eh) e Condutividade Elétrica

O valor do potencial redox (Eh) é um parâmetro usado para medir a capacidade de oxidação e redução dos resíduos do aterro. Segundo Bidone e Povinelli (1999) esta é a ferramenta mais usada para conhecimento da atividade microbiana, sendo influenciada pelo valor de pH e pela temperatura. A Figura 4.21 mostra as variações do Eh e da condutividade elétrica durante a realização dos ensaios de permeabilidade.

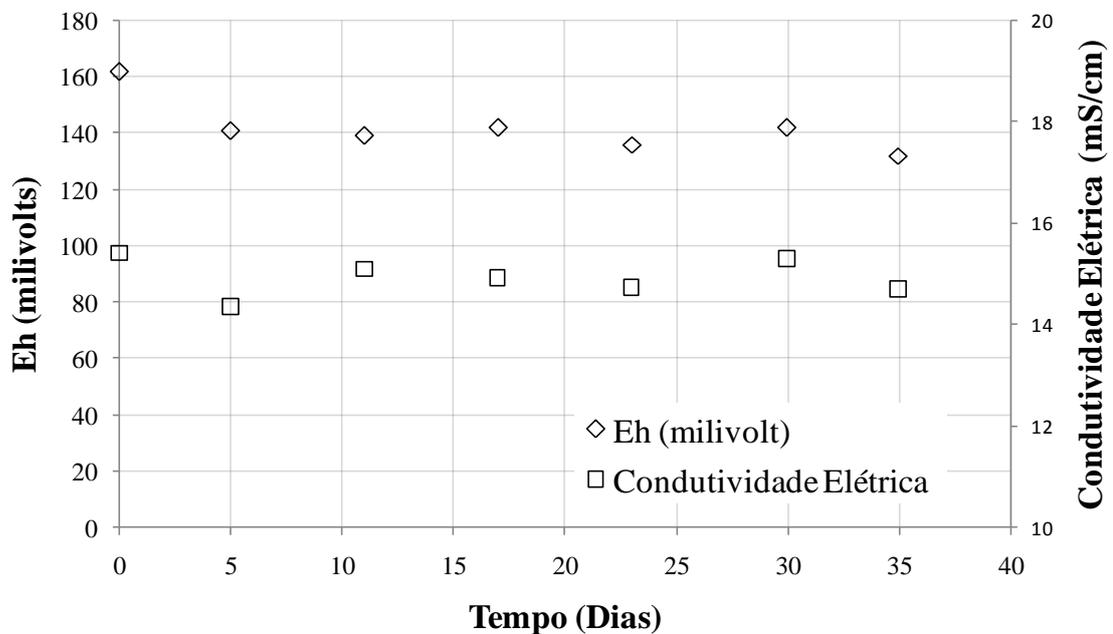


Figura 4.21 – Acompanhamento do resultado de Eh e condutividade elétrica durante a pesquisa

Bidone e Povinelli (1999) relatam que a produção do gás metano ( $\text{CH}_4$ ), muito estudado atualmente devido a sua capacidade de geração de energia, tem seu  $E_h$  ótimo para valores menores que 340 milivolts, o que não torna o lixiviado estudado um material com potencial gerador de metano.

Os valores de condutividade elétrica foram acompanhados com o intuito de estimar, rapidamente, a quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD) presentes no lixiviado. Quanto mais elevado o valor de STD, a solubilidade de precipitados de alumínio e ferro irá aumentar, influenciando na cinética da coagulação (DI BERNARDO, 2000a).

Os valores de condutividade elétrica mostraram-se compatíveis com os encontrados na literatura, com baixa variação no período estudado. Schalch (1992) associou o valor da condutividade elétrica, de lixiviados provenientes de resíduos sólidos urbanos, provenientes de aterros com diversas idades.

Banar et al. (2006) relatam baixos valores de condutividade elétrica, variando entre 2,01 a 34,2 mS/cm, como resultante das condições meteorológicas locais, neste caso de países da região do Mar Mediterrâneo, onde imperavam períodos de chuva, durante a época em que foram feitas as análises. A mesma circunstância pode ser aplicada a pesquisa, uma vez que a coleta de lixiviado ocorreu em períodos de chuva, o que reforça a justificativa dos valores obtidos.

Além do acompanhamento semanal da Condutividade Elétrica e do Potencial Redox, o lixiviado utilizado na pesquisa foi caracterizado no início e fim dos ensaios para que se pudesse avaliar eventuais variações em suas características, algumas delas, possivelmente, associadas à percolação pelo geotêxtil.

#### **4.6.2 DQO e DBO**

A Tabela 4.2 mostra os resultados de DBO e DQO do lixiviado usado na pesquisa.

Tabela 4.2 – Valores da caracterização do lixiviado, quanto aos parâmetros DQO e DBO, antes e após a execução do ensaio

Parâmetros	Unidades	Inicial	Final
DBO <sub>5</sub>	(mg O <sub>2</sub> /L)	470	762
DQO	(mg O <sub>2</sub> /L)	4690	2960

O valor de DQO reduziu após o período de ensaio, indicando oxidação da matéria orgânica presente no lixiviado. Segundo Contrera (2008), o decréscimo deste parâmetro pode indicar uma depuração do lixiviado.

O valor de DBO, ao contrário do que ocorreu com o valor de DQO, aumento ao fim do período de ensaio, podendo indicar que ocorreu dissolução da matéria orgânica por microrganismos durante o processo de oxidação.

Utilizando os valores de DQO e DBO é possível chegar à relação DBO/DQO, muito utilizada como indicativo de tratabilidade do lixiviado. Por se tratar de um lixiviado proveniente de um aterro sanitário antigo (com mais de 10 anos), ou seja, já em fase metanogênica, os valores obtidos, tanto no início quanto no fim do período de ensaio, apresentaram valores de 0,10 e 0,25 respectivamente, o que segundo Contrera (2008) indica que o lixiviado usado é de difícil tratabilidade e composto por materiais tóxicos e com a presença de ácidos húmicos e fúlvicos.

#### 4.6.3 Fósforo Total

Segundo Pelczar et al. (1997) todos os organismos vivos necessitam de enxofre e fósforo para sobreviver e se desenvolver. Nas bactérias, o fósforo é consumido na forma de fosfato.

A concentração de fosfato total reduziu no período estudado, passando de 49 mg.PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/L, para 6 mg.PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/L, servindo de indicativo da presença de microrganismos redutores deste

nutriente, um dos nutrientes essenciais para seu desenvolvimento, bem como para a formação do biofilme.

#### 4.6.4 Metais

A maioria dos metais encontrados no lixiviado reduziu sua concentração durante período estudado, sendo possível afirmar que houve consumo ou diluição dos mesmos. No caso dos metais em que a concentração aumentou, pode-se justificar com o fato apenas de ter ocorrido maior concentração no material coletado para análise, porém a diferença entre os valores, inicial e final, foi relativamente baixa, uma vez que estes metais não são produzidos por microrganismos. A Tabela 4.3 mostra os resultados obtidos nas amostras de lixiviados estudados.

Tabela 4.3 – Metais presentes no lixiviado analisado

Metais	Unidades	Inicial	Final
Zinco	(mg Zn/L)	1,911	0,208
Chumbo	(mg Pb/L)	0,22	0,31
Cádmio	(mg Cd/L)	0,038	0,077
Níquel	(mg Ni/L)	0,521	0,511
Ferro	(mg Fe/L)	9,93	3,194
Manganês	(mg Mn/L)	0,243	0,183
Cobre	(mg Cu/L)	1,924	0,121
Cromo Total	(mg Cr/L)	0,704	0,234

Metcalf & Eddy (2003) classificam os metais encontrados como pesados e primariamente poluentes, como o cádmio, altamente tóxico, que ao ser inalado pode causar câncer, e quando exposto durante período prolongado pode acumular-se em órgãos vitais, como fígado, pâncreas, rins e tiróide. No caso do lixiviado analisado, os valores de chumbo (Pb) e cádmio (Cd) aumentaram após o período estudado, indicando maior concentração destes metais na segunda amostra.

Outro metal extremamente perigoso é o chumbo, que pode ser absorvido por inalação e ingestão, quando este estiver presente em águas, em especial águas subterrâneas. Pode causar danos ao cérebro, rins e defeitos em fetos. O resultado obtido também foi de aumento, possivelmente por estar mais concentrado na segunda amostra analisada. O cromo encontrado mostrou-se menos concentrado na segunda amostra avaliada, podendo ter sido retido no geotêxtil ou apresentar-se em menor concentração na amostra analisada. O cromo é um composto que pode causar câncer e corrosão de tecidos humanos, causando danos à pele e aos rins.

Alguns destes metais são necessários ao crescimento bacteriano, como o zinco, o ferro, o níquel, o manganês e o cobre. Estes metais encontraram-se com valores menores na amostra extraída no fim do ensaio, indicando o consumo destes metais pelas bactérias que compõem o lixiviado, o que reforça a idéia de crescimento bacteriano nas condições ensaiadas e, demonstrada pela disposição e colmatação dos geotêxteis ensaiados, como se mostrará adiante.

#### 4.6.5 Nitrogênio (N)

A concentração de nitrogênio amoniacal reduziu com o tempo, indicando grande consumo de amônia pelos microrganismos presentes no lixiviado. O nitrogênio amoniacal acaba elevando o valor de pH dos lixiviados, o que acaba sendo confirmado nessa pesquisa, uma vez que ao cair o valor nitrogênio amoniacal o mesmo ocorreu com o valor de pH, porém não na mesma proporção. A Tabela 4.4 mostra os resultados do acompanhamento do nitrogênio, tanto amoniacal, quanto nitrato, obtidos na pesquisa.

Tabela 4.4 – Resultados obtidos para o nitrogênio presente no lixiviado

Parâmetros	Unidades	Inicial	Final
Nitrogênio Amoniacal	(mg N/L)	2645	236
Nitrogênio Nitrato	(mg N/L)	85	190

A presença do geotêxtil parece indicar uma boa eficiência na remoção de nitrogênio amoniacal, apresentando redução deste parâmetro da ordem de 90% em relação ao valor inicial. Vale ressaltar que a remoção não se deveu apenas ao uso do geotêxtil, mas também às condições de ensaio realizadas e a presença de bactérias consumidoras deste tipo de nitrogênio.

É importante ressaltar que durante a pesquisa parte do nitrogênio amoniacal pode ter alterado para nitrogênio nitrato, que justifica o aumento dos valores deste parâmetro ao fim do período estudado, conforme pode ser visto na Tabela 4.4. O processo de nitrificação pode não ter ocorrido completamente, sendo que parte dos compostos podem ter sido convertidos em nitrito, uma fase intermediária entre o nitrogênio amoniacal e o nitrogênio nitrato.

#### **4.7 Contagem de bactérias e quantificação de sólidos totais**

A contagem de bactérias mostrou-se uma ferramenta útil durante a pesquisa, uma vez que torna-se possível avaliar a quantidade de bactérias presentes nos geotêxteis. Essa contagem teve a função de subsidiar uma melhor compreensão do mecanismo de colonização das bactérias nos geotêxteis. A Figura 4.22 mostra a contagem de bactérias realizadas em cada geotêxtil analisado.

Baseado na Figura 4.22 nota-se uma maior quantidade de bactérias no geotêxtil GTD, porém sem qualquer relação com as reduções de condutividade hidráulica medidas, uma vez que os geotêxteis GTA, GTB e GTC mostraram semelhantes condutividades hidráulicas. Quanto aos sólidos totais os valores mostraram-se próximos para os geotêxteis GTA,GTB e GTC e menores para o GTD, sem nenhuma relação direta com as reduções de condutividade hidráulica observados. A Figura 4.23 mostra o resultado do ensaio de sólidos totais para cada amostra.

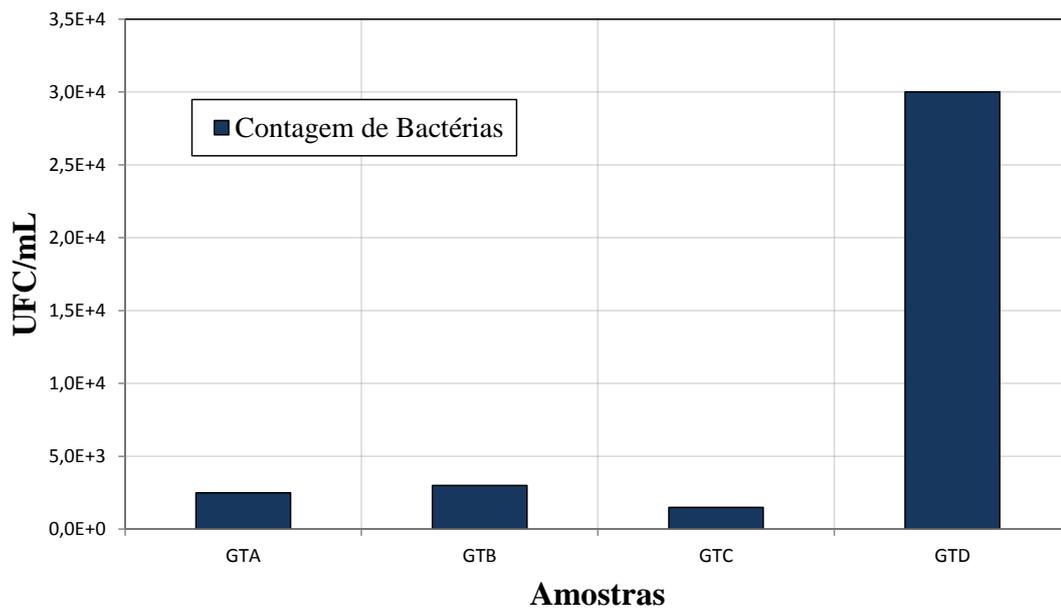


Figura 4.22 – Contagem de bactérias em Unidade formadoras de Colônias por mL (UFC/mL)

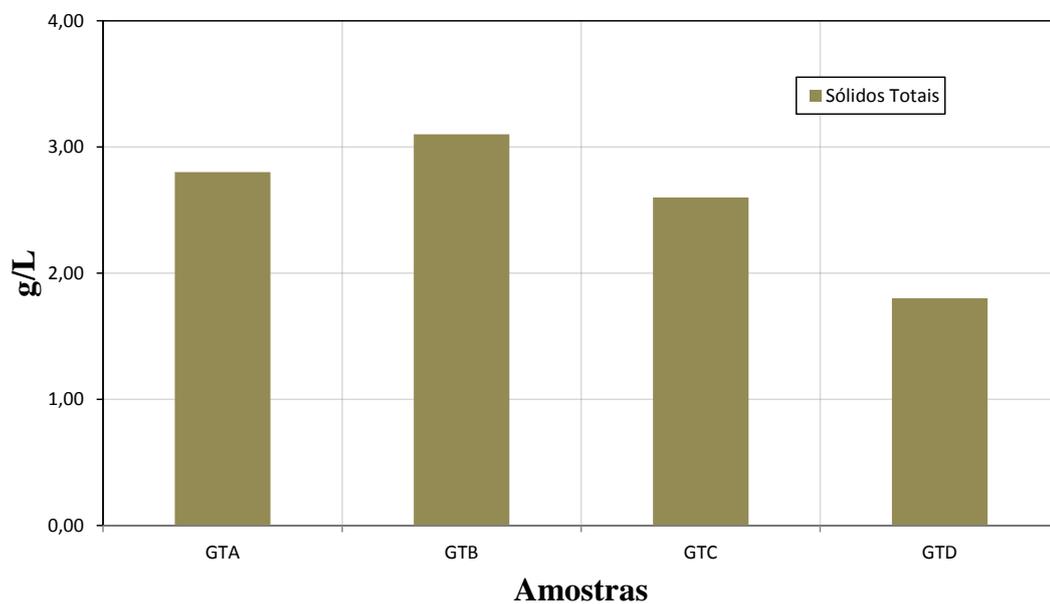


Figura 4.23 – Sólidos Totais dos geotêxteis estudados

## 4.8 Análise Microscópica

### 4.8.1 Análise dos Microrganismos Presentes no Lixiviado

As análises foram realizadas nos geotêxteis submetidos aos ensaios permeabilidade com a finalidade de visualizar os microrganismos retidos nos geotêxteis.

O material retirado da superfície do geotêxtil foi fixado em uma lâmina através de uma solução de ágar diluído em água destilada. Posteriormente esta lâmina foi levada ao microscópio para análise das possíveis morfologias dos microrganismos presentes no lixiviado.

Como resultados dessa análise puderam ser identificados bacilos, cocos, cistos de protozoários e outras morfologias desconhecidas, conforme ilustrado nas Figura 4.24 e Figura 4.25.

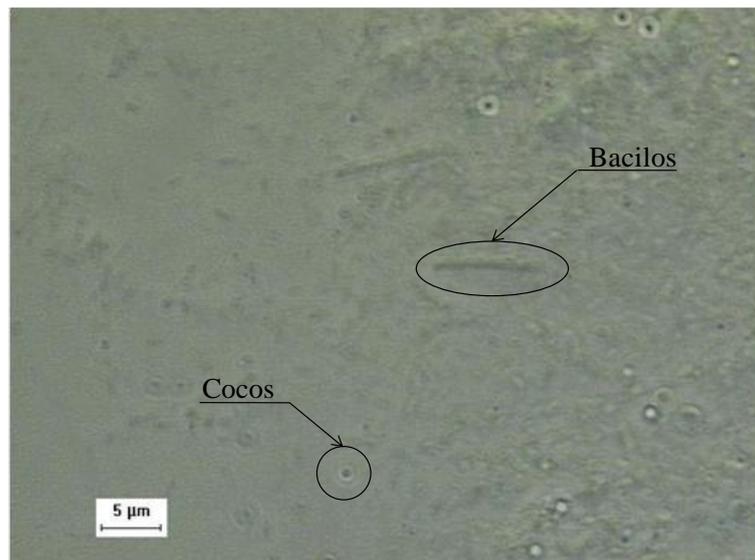


Figura 4.24 – Presença de bacilos, cocos e morfologias desconhecidas

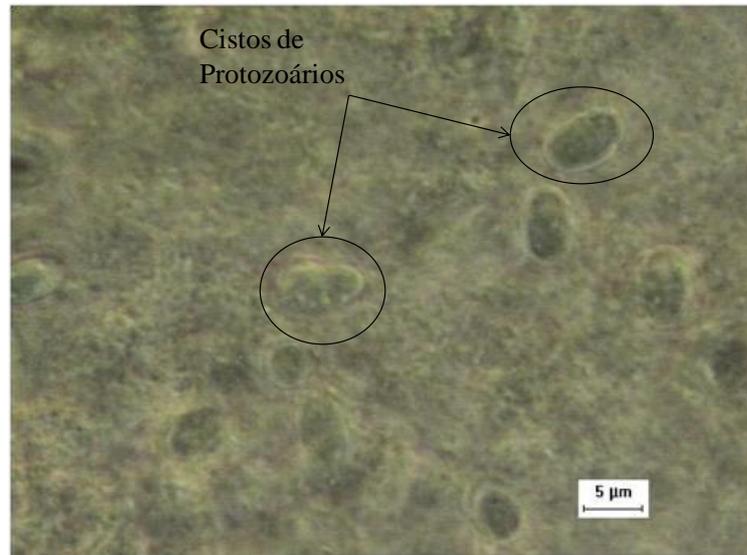


Figura 4.25 – Presença de cistos de protozoários

Não foi possível identificar quais as espécies de microrganismos presentes no lixiviado, porém sabe-se que estes podem ser nocivos à saúde pública. Estes organismos reproduzem-se de maneira acelerada, quando em ambiente que lhes oferece condições para isso, e é uma das razões da colmatção observada nos geotêxteis ensaiados. Registra-se que tais microrganismos têm sido apontados como responsáveis pela colmatção de filtros, tanto os compostos por materiais granulares, quanto os compostos por geotêxteis (Baveye et al. 1998).

Os protozoários geralmente estão associados a doenças gastrointestinais ao redor do planeta, pois possuem alta resistência a cloração, são de difícil detecção em água e infectam diferentes tipos de animais (Di Bernardo et al. *apud* Keller, 2000). Os protozoários mostrados na Figura 4.25, não foram passíveis de identificação quanto ao seu gênero, apenas quanto a sua forma.



## 5. Conclusão

Após o período de ensaios chegou-se às seguintes conclusões:

- Os resultados e as análises permitiram observar acentuada redução da condutividade hidráulica dos geotêxteis já nos primeiros dez dias de fluxo, permanecendo em decréscimo constante até 35 dias de ensaio;
- Os geotêxteis apresentaram comportamento similar, exceção feita ao geotêxtil GTC, cuja redução de condutividade hidráulica foi menos pronunciada do que a observada em relação aos demais geotêxteis testados, provavelmente devido ao polímero (polipropileno) que o constitui e ao processo usado em sua fabricação;
- As análises das imagens feitas através da microscopia óptica permitiu a visualização de uma grande oclusão dos espaços vazios da superfície dos geotêxteis por material depositado, tanto biológico, quanto sólido;
- A avaliação feita através da microscópica eletrônica de varredura, realizada na seção transversal dos geotêxteis não tecidos, possibilitou visualizar que os poros do interior do geotêxtil permaneciam abertos, enquanto grande parte do material sólido encontrava-se depositado na superfície dos geotêxteis, reforçando a ideia da ocorrência do processo conhecido como cegamento e não a colmatção interna como os cálculos previam;
- A microscopia eletrônica de varredura possibilitou visualizar e confirmar o fechamento dos poros através de uma visão micro, onde foi possível perceber como ocorre a formação de colônias, o que acaba por fortalecer tais microrganismos, tornando mais difícil sua extração e auxiliando no processo

de colmatção biológica dos geotêxteis. Através da microscopia eletrônica de varredura foi possível observar a maior formação de colônias no geotêxtil GTD, uma vez que sua superfície plana auxilia o processo, o que foi observado em menor escala no demais geotêxteis;

- Com relação aos parâmetros do lixiviado, acompanhados durante o período de ensaio, é possível afirmar que o pH permaneceu praticamente inalterado durante o período estudado, exercendo pouca influência no processo de colmatção dos geotêxteis estudados;
- A temperatura pouco alterou durante o período estudado, porém acaba por exercer grande influência na reprodução dos microrganismos presentes no lixiviado, ou seja, acaba por influenciar no crescimento dos microrganismos, além dos parâmetros Eh e condutividade elétrica;
- A condutividade elétrica variou constantemente durante os ensaios, mas sempre dentro de valores considerados baixos, o que demonstra uma baixa influência da temperatura e do pH, frente a este parâmetro;
- Os resultados das análises físico-químicas realizadas antes e após os períodos ensaios de permeabilidade apresentaram uma razão DBO/DQO entre 0,10 e 0,25, ou seja, o lixiviado usado na pesquisa possuía baixa carga biológica, confirmado através da contagem de bactéria, além de difícil tratabilidade. Apesar da baixa carga biológica é possível verificar o alto consumo de nutrientes e metais que compõem o lixiviado e servem de base para o crescimento de colônias;
- A contagem de bactérias se mostrou uma ferramenta importante na avaliação da colmatção biológica dos geotêxteis, isso porque o geotêxtil com maior

quantidade de bactérias (GTD) era o que possuía a maior abertura entre os materiais estudados, o que reforça a ideia da maior formação de biofilme neste material, em especial pela forma com que as fibras estão dispostas, ou seja, com maior superfície plana, o que facilita a reprodução das bactérias;

- A quantificação de sólidos totais mostrou valores muito próximos entre os geotêxteis avaliados, sendo possível afirmar que sua contribuição para colmatação dos geotêxteis foi igual para todos os materiais estudados.

## **5.1 Sugestões para futuras pesquisas**

A partir dos resultados obtidos são apresentadas as seguintes sugestões:

- Realização de ensaios com lixiviados de aterros novos e de aterros mais antigos, isso porque o geotêxtil é aplicado na base do aterro e entra em contato com o lixiviado ainda jovem.
- Realizar pesquisas com a utilização de equipamento que permita ensaios com carga variável, o que permitiria resultados mais precisos quando os geotêxteis apresentarem menor condutividade hidráulica.



## 6. Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos: NBR 8419. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos: NBR 8849. Rio de Janeiro, 1985.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aterro de resíduos não perigosos – Critérios para instalação, implantação e operação: NBR 13896. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área: NBR 12568. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Geossintéticos – Terminologia: NBR 12553. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Geossintéticos – Amostragem e preparação de corpos-de-prova de geotêxteis: NBR 12593. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Geossintéticos – Determinação de capacidade de fluxo no plano: NBR 15225. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Geotêxteis – Determinação da espessura: NBR 12569. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Geotêxteis e produtos correlatos – Determinação das características de permeabilidade hidráulica normal ao plano e sem confinamento: NBR 15223. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos Sólidos – Classificação: NBR 10004. São Paulo, 2004.

AFNOR – ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. NF G 38017: Porometrie: Détermination de l'ouverture de filtration. 1999.

AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. (2004). Aplicações em Drenagem. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Editora Edgard Blücher, pp. 225-240.

AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. (2004). Aplicações em Filtração. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Editora Edgard Blücher, pp. 175-198.

ALMEIDA, M. S. S.; SPADA, J.; EHRLICH, M. (1995). Geotextile filtration test on two Brazilian soils and current filter criteria. *Geosynthetics International*, Vol 2, pp. 357-377.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1987. Standard Test Method for Biological Clogging of Geotextile or soil/Geotextile Filters. 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 4491 – Standard Test Method for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity. 1999a (Revisada em 2009).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 4751. Test Method for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile. 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 5322. Standard Practice for Laboratory Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids. 1998 (Reaprovada em 2009).

BAGCHI, A. (2004). Design of landfills and integrated waste management. John Wiley and Sons, New York.

BANAR, M.; ÖZKAN, A.; KÜRKÇÜOĞLU, M. (2006). Characterization of the leachate in an urban landfill by physicochemical analysis and solid phase microextraction-GC/MS. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol 121, pp.439-459.

BAVEYE, P.; VANDEVIVERE, P.; HOYLE, B. L.; DELEO, P. C.; LOZADA, D. S. (1998). Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, pp 123-191.

BENSON, C. H.; KUCUKKIRCA, I. E.; SCALIA, J. (2010). Properties of geosynthetics exhumed from a final cover at a solid waste landfill. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 28, pp. 536-546.

BHATIA, S.K.; SMITH, J.L. (1996). Geotextile characterization and pore-size distribution: Part I. A review of manufacturing process. *Geosynthetics International*, Vol 3, pp. 85-105.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. (1999). Conceitos básicos de resíduos sólidos. EESC/USP, São Carlos, SP, p 120.

BUENO, B. S. (2004). Matérias- Primas. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Editora Edgard Blücher, pp. 13-26.

BUENO, B. S.; VILAR O. M. (2004). Propriedades, Ensaios e Normas. Manual

Brasileiro de Geossintéticos, Editora Edgard Blücher, pp. 27-62.

CARVALHO, C. L. (2010). Avaliação do processo de colmatção de filtros geotêxteis usados em sistemas de drenagem de aterros sanitários. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 153 p.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Contagem de bactérias heterotróficas: método de ensaio. 2006.

CHARACKLIS, W. G. (1981). Fouling biofilm development: A process analysis, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol 23, pp. 1923-1960.

CHRISTOPHER, B. R.; FISHER G. R. (1992). Geotextile filtration principles, practices and problems. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 11, pp. 337-357.

CONTRERA, R. C. (2008). Tratamento de Lixiviados de aterros sanitários em sistema de reatores anaeróbio e aróbio operados em batelada sequencial. São Carlos – SP, 2008, 731 p., Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FAURE, Y. H.; BAUDOIN, A.; PIERSON, P.; PLÉ. O. (2006). A contribution for predicting geotextile clogging during filtration of suspend soils. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 24, pp. 11-20.

FAURE, Y. H.; GOURC, J. P.; GENDRIN, P. (1990). Structural study of porometry an filtration opening size of geotextiles. *Geosynthetics: Microstructure and Performance*, ASTM STP 1076, I. D. Peggs, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 102-119.

GIROUD, J.P. (1996). Granular Filters and Geotextile Filters. *Geofilter's 96*, Jean Lafleur and Andre L. Rollin (eds), Montreal, Quebec, Canada, pp. 565-678.

GIROUD, J.P. (2005). Quantification of geosynthetic behavior. *Geosynthetics International*, Special Issue on the Giroud Lectures Vol 12, pp. 2-27.

HALSE, Y.; KOERNER R.M.; LORD Jr. A.E. (1987). Effects of high levels of alkalinity on geotextile. Part I: Ca(OH)<sub>2</sub> solutions. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 5, pp. 261-282.

JOHN, N. W. M. (1987). *Geotextiles*. Blackie and Son Ltda. Glasgow and London, 347.

JUNQUEIRA, F. F.; SILVA, A. R. L.; PALMEIRA, E. M. (2006). Performance of drainage systems incorporating geosynthetics and their effect on leachate. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 24, pp. 311-324.

KALINOVICH, I.; RUTTER, A.; ROWE, R. K.; McWATTERS, R.; POLAND, J. S. (2008). The application of geotextile and granular filters or PCB remediation. *Geosynthetics International*, Vol 15, pp. 173-183.

KOERNER, G. R.; KOERNER, R. M. (1992). Leachate Flow Rate Behavior through Geotextile and Soil Filters and Possible Remediation Methods. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 11, pp. 401-430.

KOERNER, G. R.; KOERNER, R. M. (1995). Leachate clogging assessment of geotextile and soil landfill filters. Environmental Protection Agency EPA.

KOERNER, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics*. 5. ed. Upper Sadle River: Prentice-Hall, 796 p.

KOERNER, R. M.; SOONG, T. -Y (2000). Leachate in landfills: the stability issues. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 18, pp. 293-309.

KOERNER, R. M.; LORD Jr, A. E.; HALSE, Y. H. (1988). Long-term durability and aging of geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 7, pp. 147-158.

LAFLEUR, J. (1999). Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 17, pp. 299-312.

LEE, K.; JEON, H. (2008). Evaluation of Clogging Effects on Nonwoven Geotextile Filters by Negative-ion Treatment. *Fiber and Polymers*, Vol 9, N°3 pp. 365-373.

LING, H. I.; TATSUOKA, F.; WU, J. T. H.; NISHIMURA, J. (1993). Hydraulic conductivity of geotextile under typical operational conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 12, pp. 509-542.

LUETTICH, S. M.; GIROUD, J. P.; BACHUS, R. C. (1992). Geotextile Filter Criteria Guide. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 11, pp. 355-370.

MACKEY, R. E.; KOERNER G. R. (1999). Biological clogging of geotextile filters – A five year study. *Geosynthetics '99 Conference Proceedings*, Boston, USA, Vol. 2, pp. 783-798.

MENDONÇA, M. B.; EHRLICH, M.; CAMMAROTA, M. C.; SILVA, L. R. (1999). Formação de biofilmes de ocre em geotêxteis. III Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Volume 1, Rio de Janeiro, pp. 257-265.

MONOD, J. (1949). The growth of bacterial cultures. *Ann. Rev. Microbiol.*, vol, 3.

MUÑOZ, C.S. (2005). Desempenho de geotêxteis na filtração de solos instáveis. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 119 p.

PALMEIRA, E. M. (1998). Estruturas de contenção e aterros íngremes reforçados com geossintéticos. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

PALMEIRA, E. M. (2003). Fatores condicionantes do comportamento de filtros geotêxteis. IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Volume 1, Porto Alegre, pp. 49-67.

PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. (2000). The influence of partial clogging and pressure on the behavior of geotextiles in drainage systems. *Geosynthetics International*, Vol 7, pp. 403-431.

PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. (2002). Drainage and filtration properties of non-woven geotextile under confinement using different experimental techniques. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 20, pp. 97-115.

PALMEIRA, E. M.; REMÍGIO A. F. N.; RAMOS M. L. G.; BERNARDES R. S. A. (2008). Study on biological clogging of nonwoven geotextiles under leachate flow. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 26, pp. 205-219.

PELCZAR, M., REID, R., CHAN, E. C. S. (1997). *Microbiologia – Conceitos e Aplicações*. Vol.1, São Paulo, Mc. Graw-Hill, 2 Ed., Brasil, 524p.

QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. (2002). *Geotechnical aspects of landfill design and construction*. Prentice-Hall, New Jersey.

REMÍGIO, A. F. N. (2006). Estudo da Colmatação Biológica de Sistemas Filtro Drenantes Sintéticos de Obras de Disposição de Resíduos Domésticos Urbanos sob Condições Anaeróbicas. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 134 p.

RIGO, J. M.; LHOTE, F.; ROLLIN, A. L.; MLYNAREK, J.; LOMBARD, G. (1990). Influence of geotextile structure on pore size determination. *Geosynthetics: Microstructure and Performance*, ASTM STP 1076, I. D. Peggs, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 90-101.

ROLLIN, A. L.; DENIS, R.; ESTAQUE, L.; MASOUNAVE, J. (1982). Hydraulic behavior of synthetic non-woven filter fabrics. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol 60, pp. 226-234.

ROLLIN, A. L.; LOMBARD, G. (1988). Mechanisms affecting long-term filtration behavior of geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 7, pp. 119-145.

ROWE, R. K. (2005). Long-term Performance of Contaminant Barrier Systems. *Geotechnique*, 55, N° 9, pp. 631-678.

ROWE, R. K.; VANGULCK, J.F. (2004). Filtering and Drainage of Contaminant Water. Proc. 4th Int. Conf. on GeoFilters, Stellen-bosch, pp 1-63.

SATO, M.; YOSHIDA, T.; FUTAKI, M. (1986). Drainage performance of geotextiles. Geotextiles and Geomembranes, Vol 4, pp. 223-240.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, A. (1994). Tratamento anaeróbio de esgotos. Um manual para regiões de clima quente.

VANDEVIVERE, P.; BAVEYE, P. (1992). Effect of bacterial extracellular polymers on the saturated hydraulic conductivity of sands columns. Applied Environmental Microbiology Vol 58, pp. 1690-1698.

VIEIRA, J. L.; ABRAMENTO, M.; CAMPOS, M. V. W. (2010). Experimental study of clogging in drainage systems. IX International Conference on Geosynthetics. Volume, 3, Guarujá, pp. 1145-1148.

WU, C-S.; HONG, Y-S.; YAN, Y-W.; CHANG, B-S. (2006). Soil-nonwoven geotextile filtration behavior under contact with drainage materials. Geotextiles and Geomembranes, Vol 24, pp. 1-10.

XAVIER, J. B.; PICIOREANU, C.; ALMEIDA, J. S.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. (2003). Monitoração e modelagem da estrutura de biofilmes. Boletim de biotecnologia, N 76 pp. 2-13.

YAMAN, C., MARTIN J. P., and KORKUT, E. (2006). Effects of wastewater filtration on geotextile permeability. Geosynthetics International, 13, No 3, pp. 87-97.