

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTUDO DA COLMATAÇÃO BIOLÓGICA DE SISTEMAS FILTRO-
DRENANTES SINTÉTICOS DE OBRAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS
DOMÉSTICOS URBANOS SOB CONDIÇÕES ANAERÓBIAS

ALINE FLÁVIA NUNES REMÍGIO

ORIENTADOR: **ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD (UnB)**

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD-038/06

BRASÍLIA, 01 DE JUNHO DE 2006

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

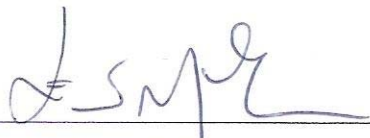
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTUDO DA COLMATAÇÃO BIOLÓGICA DE SISTEMAS FILTRO-
DRENANTES SINTÉTICOS DE OBRAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS
DOMÉSTICOS URBANOS SOB CONDIÇÕES ANAERÓBIAS

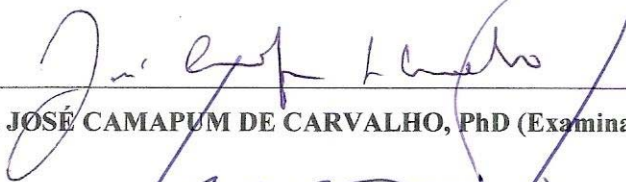
ALINE FLÁVIA NUNES REMÍGIO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA,
COMO REQUISITO NECESSÁRIO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
GEOTECNIA.


APROVADA POR:



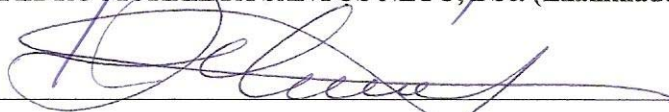
Prof. ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD. (Orientador)



Prof. JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (Examinador Interno)



Prof. PEDRO MURRIETA SANTOS NETO, DSc. (Examinador Interno)



Prof. DELMA DE MATTOS VIDAL, PhD. (Examinador Externo)



Prof. MAURÍCIO EHRlich, DSc. (Examinador Externo)

BRASÍLIA, 01 DE JUNHO DE 2006

FICHA CATALOGRÁFICA

REMÍGIO, ALINE FLÁVIA NUNES

Estudo da Colmatação Biológica de Sistemas Filtro-Drenantes Sintéticos de Obras de Disposição de Resíduos Domésticos Urbanos sob Condições Anaeróbias. [Distrito Federal] 2006.

xx, 134 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2006).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Colmatação biológica

2. Geotêxtil

3. Sistemas filtro-drenantes

4. Obras de disposição de resíduos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

REMÍGIO, A. F. N., 2006. Estudo da Colmatação Biológica de Sistemas Filtro-Drenantes Sintéticos de Obras de Disposição de Resíduos Domésticos Urbanos sob Condições Anaeróbias. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-038/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 134 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Aline Flávia Nunes Remígio.

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: “Estudo da Colmatação Biológica de Sistemas Filtro-Drenantes Sintéticos de Obras de Disposição de Resíduos Domésticos Urbanos sob Condições Anaeróbias”.

GRAU/ANO: Doutor/2006.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Eng^a Aline Flávia Nunes Remígio
Rua 19 Sul, Lote 09, Resid. Cooperbrapa I, Apto. 801
CEP: 71940-720 – Águas Claras/DF – Brasil

DEDICATÓRIA

Ao meu esposo Petrucio

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela orientação, proteção, força e incentivo.

Ao meu orientador Ennio Marques Palmeira, por quem tenho enorme respeito e admiração, que com muita paciência contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos co-orientadores Ricardo Silveira Bernardes e Maria Lucrecia Gerosa Ramos pelas indispensáveis sugestões e ensinamentos ao longo de todo o trabalho.

A Viviane Mourão pela sua contribuição técnica na realização das análises microbiológicas.

A Professora Sônia Bao, pela orientação e a Suzane Frank e Shélida pelo suporte na realização das análises microscópicas.

Ao Laboratório de Análise de Águas da UnB, em especial a Simone Batista que muito ajudou na realização das análises físico-químicas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia pelos ensinamentos.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia pelo apoio, em especial a Vanilson e a Sidcley pela contribuição.

A João Pedro pela amizade e contribuição na montagem do sistema experimental.

A Chiquinho, operador de máquinas do Aterro do Jóquei por sua contribuição na coleta do chorume.

Ao CNPq pelo indispensável incentivo financeiro.

Aos colegas da geotecnia, pelo companheirismo e ensinamentos, seja científico, seja de vida. Dentre eles: Marcia, Paula, Karoline, Karla, Allan, Luciana, Jairo, Manoel, Silvrano, Mariana, Íris, Hector, Silvana, Cláudia Gurjão, Márcia Mara, Marta, Joaquim Neto e Gilberto. Em especial, Elidiane, Gregório, Newton, Adriano e Diego pela valorosa ajuda na reta final deste trabalho.

A todos os amigos que fiz em Brasília, em especial, Ana Cláudia & Tito, Rosendo & Cris, Vladimir & Himylsis, Yasser & Rosângela, Giulliano & Regina.

Ao meu esposo Petrucio, a quem dedico esta Tese, companheiro em todos os momentos, co-participador dos meus sonhos e conquistas.

A minha mãe Suely, minha tia Salomé, meus avós Pedro e Antônia e minha irmã Ísis, pelo incentivo.

Ao meu pai Flávio pelo constante apoio e incentivo.

Aos meus sogros Leonora e Francisco Lopes pelo apoio e consideração.

RESUMO

Esta tese apresenta uma avaliação do processo de colmatção biológica ao qual podem estar submetidos os sistemas filtro-drenantes em obras de disposição de resíduos. De forma geral, a colmatção do dreno pode ser originada pela ocorrência de três mecanismos, simultaneamente: físicos, químicos e biológicos. No caso de sistemas de drenagem para chorume, o problema se torna mais complexo, uma vez que o chorume é um líquido de composição bastante heterogênea. Para a avaliação do processo de colmatção biológica foi desenvolvido um estudo experimental onde foram realizados ensaios de longa duração com três tipos de geotêxteis não tecidos com diferentes gramaturas (100, 300 e 600 g/cm²). Nestes ensaios os geotêxteis foram submetidos ao fluxo de chorume ou imersos nele por diferentes intervalos de tempo, buscando-se representar condições diferentes a que o sistema de drenagem pode estar em um aterro de resíduos domésticos. As amostras de geotêxteis submetidas aos dois tipos de ensaios de colmatção foram posteriormente analisadas para se avaliar os grupos funcionais de microorganismos responsáveis pela formação do biofilme por meio de análises microbiológicas e imagens obtidas em microscópio de varredura para verificar o nível de obstrução dos vazios dos geotêxteis. Foram também realizados ensaios de aumento de carga hidráulica em geotêxteis colmatados, para a verificação do gradiente necessário para a desobstrução dos seus vazios. O chorume utilizado nos ensaios foi obtido no Lixão do Jóquei Clube, Brasília, e foi caracterizado ao longo do tempo por meio de análises físico-químicas. Os resultados de ensaios de fluxo mostraram significativas perdas de permeabilidade dos geotêxteis ensaiados ao longo do tempo. Os resultados obtidos com as análises microbiológicas permitiram perceber que todos os geotêxteis apresentaram os grupos funcionais investigados, sendo que as bactérias foram as que se mostraram em maior quantidade. As análises microscópicas foram importantes para o conhecimento do processo de formação do biofilme ao longo do tempo. O ensaio de aumento de carga hidráulica permitiu conclusões preliminares importantes quanto à capacidade de recuperação do potencial drenante de geotêxteis colmatados, uma vez que mostraram que para as condições utilizadas nos ensaios, estes poderiam voltar a funcionar satisfatoriamente após o acúmulo de alturas relativamente pequenas (2m) de chorume acima do sistema drenante.

ABSTRACT

This thesis presents an evaluation of the biological clogging processes that drainage systems of landfills may be subjected. In general, clogging of the drainage system may be caused by the simultaneous actions of three types of clogging mechanisms: physical, chemical and biological clogging. In drainage systems for leachate, the problem is even more complex due to the heterogeneous nature of leachate. For the evaluation of the biological clogging process an experimental study was conducted, where long term tests were performed on three types of nonwoven geotextiles with varying masses per unit area (100, 300 and 600 g/m²). In these tests the geotextiles were subjected to the flow of leachate (column tests) or were immersed in leachate for different test durations, aiming to simulate conditions under which the drainage system may be subjected in a landfill. After these tests specimens of the geotextiles were subjected to microbial analyses for the identification and quantification of the types of bacteria responsible for the clogging mechanism, and images from scanning microscopy were obtained for the assessment of clogging level of the geotextiles. Tests in which clogged geotextile specimens were subjected to increasing values of water head were also carried out to investigate the washing up of the bacteria films from the geotextile voids. The leachate used in the tests was collected from the Jóquei Clube dump, Brasília, and its properties were monitored by physical and chemical analyses during the tests durations. The column tests showed significant geotextile permeability reductions with time. The results of the microbial tests allowed the verification that all the microorganisms investigated were present in the geotextiles, with the predominance of bacteria. Microscopic analyses were important for the understanding of the mechanism of biofilm formation with time. The tests with increasing water heads showed that for the conditions of the tests performed in this study the geotextile would be able to recover its original draining condition for low (2m) leachate mounds on the drainage system.

ÍNDICE

Capítulo	Página
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE FIGURA	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xviii
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	2
1.2 - JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS DA PESQUISA	3
1.3 - ESTRUTURA DA TESE	4
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 - RESÍDUOS SÓLIDOS	7
2.1.1 - ATERRO SANITÁRIO	9
2.1.2 - CHORUME	11
2.2 - GEOSSINTÉTICOS APLICADOS A ATERROS SANITÁRIOS	14
2.2.1 - SISTEMAS DRENANTES	16
2.2.2 - FILTRO GRANULAR	17
2.2.3 - FILTRO SINTÉTICO	18
2.3 - FILTRAÇÃO COM GEOTÊXTEIS	19
2.3.1 - PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS GEOTÊXTEIS	20
2.3.2 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GEOTÊXTEIS	23
2.3.3 - CRITÉRIOS DE PROJETO DE FILTROS SINTÉTICOS	24
2.3.3.1 - COMITÊ FRANCÊS DE GEOTÊXTEIS E GEOMEMBRANAS (CFGG)	24
2.3.3.2 - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA)	25
2.3.3.3 - UNIVERSIDADE DE GRENOBLE E ESCOLA POLITÉCNICA DE MONTREAL (IRIGM/EPM)	26
2.3.3.4 - GIROUD (1988)	26
2.3.4 - COMPROMETIMENTO DO SISTEMA DRENANTE	27
2.3.4.1 - PIPING	27
2.3.4.2 - COLMATAÇÃO	28
2.4 - COLMATAÇÃO FÍSICA	30
2.5 - COLMATAÇÃO QUÍMICA	31
2.6 - COLMATAÇÃO BIOLÓGICA	31
2.6.1 - ATIVIDADE MICROBIOLÓGICA	32

2.6.2 -	CRESCIMENTO BACTERIANO	33
2.6.2.1 -	CINÉTICA DO CRESCIMENTO BACTERIANO (METCALF & EDDY, 1990)	36
2.6.3 -	BIOFILME	38
2.6.3.1 -	FORMAÇÃO DO BIOFILME EM GEOTÊXTEIS	40
3 -	MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1-	MATERIAL	45
3.1.1 -	GEOTÊXTIL	45
3.1.2 -	CHORUME	46
3.1.3 -	AREIA	46
3.2 -	DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL	47
3.2.1 -	ENSAIO DE COLMATAÇÃO COM FLUXO	47
3.2.2 -	ENSAIO DE COLMATAÇÃO POR IMERSÃO	51
3.3 -	ANÁLISE QUÍMICA DO CHORUME	52
3.3.1 -	DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO - DQO	53
3.3.2 -	NITRATO E AMÔNIA	55
3.3.3 -	ORTOFOSFATO	55
3.3.4 -	PH	55
3.4 -	ANÁLISE MICROBIOLÓGICA	56
3.5 -	ANÁLISE MICROSCÓPICA	68
3.6 -	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	71
3.6.1 -	SIMULAÇÃO DA LEI DE CRESCIMENTO BACTERIANO PROPOSTA POR MONOD (1949)	71
3.7	ENSAIO DE DESOBSTRUÇÃO DOS POROS DO GEOTÊXTIL POR AUMENTO DE CARGA HIDRÁULICA	73
4 -	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	75
4.1 -	ENSAIO DE COLMATAÇÃO COM FLUXO	76
4.1.1 -	ANÁLISE QUÍMICA DO CHORUME	76
4.1.2 -	ANÁLISE MICROBIOLÓGICA	80
4.1.3 -	ANÁLISE MICROSCÓPICA	82
4.1.4 -	SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO BACTERIANO	92
4.1.5 -	VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS GEOTÊXTEIS COM O TEMPO	95
4.1.6 -	AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DE VOLUME DE VAZIOS DOS GEOTÊXTEIS	97

4.2 -	ENSAIO DE COLMATAÇÃO POR IMERSÃO	99
4.2.1 -	ANÁLISE QUÍMICA DO CHORUME	99
4.2.2 -	ANÁLISE MICROBIOLÓGICA	101
4.2.3 -	ANÁLISE MICROSCÓPICA	103
4.2.4 -	SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO BACTERIANO	108
4.3 -	ENSAIO DE DESOBSTRUÇÃO DOS POROS DO GEOTÊXTIL POR AUMENTO DE CARGA HIDRÁULICA	111
5 -	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	119
5.1 -	ENSAIO DE COLMATAÇÃO COM FLUXO	120
5.2 -	ENSAIO DE COLMATAÇÃO POR IMERSÃO	122
5.3 -	ENSAIO DE DESOBSTRUÇÃO DOS POROS DO GEOTÊXTIL POR AUMENTO DE CARGA HIDRÁULICA	124
5.4 -	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	125

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
Tabela 2.1 -	Unidade de destino final do lixo coletado diariamente no Brasil (t/dia).	11
Tabela 2.2 -	Dados típicos da composição do chorume de aterros novos e antigos (TCHOBANOGLOUS et al., 1993).	13
Tabela 2.3 -	Valores e aplicação de C ₁ , C ₂ , C ₃ e C ₄ .	24
Tabela 2.4 -	Critério de dimensionamento da abertura de filtração do geotêxtil – FHWA.	25
Tabela 2.5 -	Critério de projeto de geotêxtil, quanto à capacidade de retenção (GIROUD, 1998).	26
Tabela 2.6 -	Critério de projeto do geotêxtil quanto à colmatação – FHWA.	29
Tabela 2.7 -	Macronutrientes existentes na natureza (MADIGAN et al., 1997).	34
Tabela 2.8 -	Resultados de testes de fluxo em geotêxteis (KOERNER & KOERNER, 1990).	41
Tabela 3.1 -	Características técnicas dos geotêxteis analisados (Catálogo de fabricante)	45
Tabela 3.2 -	Gramatura dos geotêxteis utilizados nos ensaios de colmatação com fluxo.	45
Tabela 3.3 -	Gramatura dos geotêxteis utilizados nos ensaios de colmatação por imersão.	46
Tabela 3.4 -	Métodos utilizados nas análises de chorume	52
Tabela 3.5 -	Importância e técnica de identificação dos microrganismos analisados.	57
Tabela 3.6 -	Formulação da solução de Ringer	58
Tabela 3.7 -	Reagentes utilizados para o meio de cultura Amilolítico (PONTECORVO et al., 1953).	60
Tabela 3.8 -	Reagentes utilizados para o meio de cultura Celulolítico (WOOD, 1980).	62
Tabela 3.9 -	Reagentes utilizados para o meio de cultura Amonificadores (SARATCHANDRA, 1978).	62
Tabela 3.10 -	Reagentes utilizados para o preparo do meio de cultura para oxidantes de amônio (NH ₄ ⁺).	64
Tabela 3.11 -	Reagentes utilizados para o preparo do meio de cultura para oxidantes de nitrito (NO ₂ ⁻).	64
Tabela 3.12 -	Formulação do meio de cultura de bactérias totais.	66

Tabela 3.13 -	Reagentes utilizados para o preparo do meio de cultura solubilizador de fosfato (SYLVESTER-BRADLEY et al., 1982, modificado).	67
Tabela 3.14 -	Reagentes utilizados para o preparo de Solução de Micronutrientes e a Solução FeEDT (SYLVESTER-BRADLEY et al., 1982, modificado).	68
Tabela 4.1 -	Caracterização química do chorume dos ensaios de 15, 30 e 45 dias.	76
Tabela 4.2 -	Caracterização química do chorume do ensaio de 60 dias.	76
Tabela 4.3 -	Caracterização química do chorume do ensaio de 90 dias.	76
Tabela 4.4 -	Contagem de microrganismos nos geotêxteis (UFC/cm ²).	81
Tabela 4.5 -	DQO dos geotêxteis após ensaios de colmatação com fluxo de chorume.	92
Tabela 4.6 -	Caracterização química do chorume.	100
Tabela 4.7 -	Contagem de microrganismos nos geotêxteis (UFC/cm ²).	101
Tabela 4.8 -	DQO do geotêxtil no ensaio de colmatação por imersão.	108

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
Figura 2.1 -	Evolução do crescimento populacional mundial (NEBEL, WROGHT, 1993 apud PHILIPPI, et al., 2004).	8
Figura 2.2 -	Composição dos resíduos sólidos domiciliares brasileiros (TIVERON, 2001).	9
Figura 2.3 -	Representação de um aterro sanitário em várias fases (BRAGA, et al., 2005).	10
Figura 2.4 -	Evolução do consumo de geossintéticos na América do Norte ao longo dos anos (modificado de KOERNER, 1998.).	14
Figura 2.5 -	Sistema de drenagem e impermeabilização de aterro sanitário (ROWE, 2005).	17
Figura 2.6 -	Tipos de Geotêxtil.	19
Figura 2.7 -	Mecanismos de auto-filtração (SPADA,1992).	20
Figura 2.8 -	Mecanismos de colmatação em filtros geotêxteis (PALMEIRA, 2003.)	31
Figura 2.9 -	Curva típica de crescimento bacteriano (METCALF & EDDY, 1990).	35
Figura 2.10 -	Seqüência da predominância relativa dos microrganismos no tratamento de esgotos (modificado de METCALF & EDDY, 1990).	36
Figura 2.11 -	Efeito da concentração de nutrientes limitantes na taxa de crescimento específico (METCALF & EDDY, 1990).	38
Figura 2.12 -	Processo de formação e crescimento de biofilmes (XAVIER et al., 2002).	40
Figura 2.13 -	Variação da capacidade de uma coluna de filtração percolada com chorume (FOURIE et al., 1994).	41
Figura 2.14 -	Crescimento do biofilme dentro do geotêxtil (MLYNAREK & ROLLIN, 1995).	42
Figura 2.15 -	Crescimento do biofilme na superfície do geotêxtil (MLYNAREK & ROLLIN, 1995).	42
Figura 3.1 -	Curva granulométrica da areia.	47
Figura 3.2 -	Equipamento para ensaio de colmatação com fluxo.	48
Figura 3.3 -	Ensaio de colmatação com fluxo de chorume montado no Laboratório de Geotecnia Ambiental da UnB.	49
Figura 3.4 -	Detalhe do permeâmetro utilizado no ensaio de colmatação com fluxo.	50
Figura 3.5 -	Localização das amostras retiradas nos geotêxteis ensaiados.	50
Figura 3.6 -	Recipiente utilizado no ensaio de colmatação por imersão.	51

Figura 3.7 -	Ensaio de colmatação por imersão.	52
Figura 3.8 -	Espectrofotômetro.	53
Figura 3.9 -	Aparelho de aquecimento das amostras para determinação da DQO.	54
Figura 3.10 -	Diferentes tonalidades das amostras inoculadas.	54
Figura 3.11 -	Aparelho para leitura de pH.	56
Figura 3.12 -	Esquema representativo do procedimento das diluições em série.	58
Figura 3.13 -	Autoclave utilizado na esterilização do material.	59
Figura 3.14 -	Câmara de fluxo laminar para análise microbiológica (Capela).	59
Figura 3.15 -	Placas de contagem de amilolíticos antes da aplicação do lugol.	61
Figura 3.16 -	Placas de contagem de amilolíticos após a aplicação do lugol.	61
Figura 3.17 -	Meio de cultura antes de inocular a amostra.	63
Figura 3.18 -	Coloração de diferentes diluições de uma mesma amostra de geotêxtil, indicando a ausência (-) ou presença (+) de microrganismos.	63
Figura 3.19 -	Meio de cultura após sair da autoclave.	65
Figura 3.20 -	Bandeja com amostra para determinação dos organismos oxidantes de amônio e de nitrito (lado esquerdo). Detalhe do meio de cultura com coloração roza e incolor (lado direito).	65
Figura 3.21 -	Colônias de bactérias totais.	66
Figura 3.22 -	Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV.	68
Figura 3.23 -	Amostras dos geotêxteis prontas para metalizar em ouro.	70
Figura 3.24 -	Equipamento utilizado para realizar a metalização em ouro do geotêxtil.	70
Figura 3.25 -	Geotêxtil incubado para análise da DQO.	72
Figura 3.26 -	Equipamento de ensaio de fluxo sob pressão.	74
Figura 4.1 -	Evolução temporal da DQO (mg/L) do chorume utilizado em cada ensaio.	77
Figura 4.2 -	Evolução temporal do pH do chorume utilizado em cada ensaio.	78
Figura 4.3 -	Evolução temporal da amônia (mg/L) do chorume utilizado em cada ensaio.	78
Figura 4.4 -	Evolução temporal do nitrato (mg/L) do chorume utilizado em cada ensaio.	79
Figura 4.5 -	Evolução temporal do ortofosfato (mg/L) do chorume utilizado em cada ensaio.	80
Figura 4.6 -	Contagem de microrganismos nos geotêxteis – com fluxo (UFC/cm ²).	81
Figura 4.7 -	Formação de biofilme após 15 dias para o geotêxtil GTX – com fluxo.	83
Figura 4.8 -	Formação de biofilme após 30 dias para o geotêxtil GTX – com fluxo.	84
Figura 4.9 -	Formação de biofilme após 45 dias para o geotêxtil GTX – com fluxo.	84

Figura 4.10 -	Formação de biofilme após 60 dias para o geotêxtil GTX – com fluxo.	85
Figura 4.11 -	Formação de biofilme após 90 dias para o geotêxtil GTX – com fluxo.	85
Figura 4.12 -	Formação de biofilme após 15 dias para o geotêxtil GTY – com fluxo.	86
Figura 4.13 -	Formação de biofilme após 30 dias para o geotêxtil GTY – com fluxo.	86
Figura 4.14 -	Formação de biofilme após 45 dias para o geotêxtil GTY – com fluxo.	87
Figura 4.15 -	Formação de biofilme após 60 dias para o geotêxtil GTY – com fluxo.	87
Figura 4.16 -	Formação de biofilme após 90 dias para o geotêxtil GTY – com fluxo.	88
Figura 4.17 -	Formação de biofilme após 15 dias para o geotêxtil GTZ – com fluxo.	88
Figura 4.18 -	Formação de biofilme após 30 dias para o geotêxtil GTZ – com fluxo.	89
Figura 4.19 -	Formação de biofilme após 45 dias para o geotêxtil GTZ – com fluxo.	89
Figura 4.20 -	Formação de biofilme após 60 dias para o geotêxtil GTZ – com fluxo.	90
Figura 4.21 -	Formação de biofilme após 90 dias para o geotêxtil GTZ – com fluxo.	90
Figura 4.22 -	Detalhe do biofilme no geotêxtil GTX após 45 dias de ensaio de colmatação com fluxo de chorume.	91
Figura 4.23 -	Cinética de crescimento bacteriano para o geotêxtil GTX (ensaio com fluxo).	94
Figura 4.24 -	Cinética de crescimento bacteriano para o geotêxtil GTY (ensaio com fluxo).	94
Figura 4.25 -	Cinética de crescimento bacteriano para o geotêxtil GTZ (ensaio com fluxo).	94
Figura 4.26 -	Evolução temporal do coeficiente de permeabilidade dos geotêxteis GTX, GTY e GTZ.	96
Figura 4.27 -	Redução equivalente do volume de vazios do geotêxtil no tempo.	99
Figura 4.28 -	Variação temporal da DQO do chorume.	100
Figura 4.29 -	Contagem de microrganismos nos geotêxteis - por imersão (UFC/cm ²).	102
Figura 4.30 -	Formação de biofilme após 30 dias para o geotêxtil GTX - por imersão.	103
Figura 4.31 -	Formação de biofilme após 60 dias para o geotêxtil GTX - por imersão.	104
Figura 4.32 -	Formação de biofilme após 90 dias para o geotêxtil GTX - por imersão.	104
Figura 4.33 -	Formação de biofilme após 30 dias para o geotêxtil GTY - por imersão.	105
Figura 4.34 -	Formação de biofilme após 60 dias para o geotêxtil GTY - por imersão.	105
Figura 4.35 -	Formação de biofilme após 90 dias para o geotêxtil GTY - por imersão.	106
Figura 4.36 -	Formação de biofilme após 30 dias para o geotêxtil GTZ - por imersão.	106
Figura 4.37 -	Formação de biofilme após 60 dias para o geotêxtil GTZ - por imersão.	107
Figura 4.38 -	Formação de biofilme após 90 dias para o geotêxtil GTZ - por imersão.	107
Figura 4.39 -	Cinética de crescimento bacteriano para o geotêxtil GTX (ensaio por imersão).	109

Figura 4.40 -	Cinética de crescimento bacteriano para o geotêxtil GTY (ensaio por imersão).	110
Figura 4.41 -	Cinética de crescimento bacteriano para o geotêxtil GTZ (ensaio por imersão).	110
Figura 4.42 -	Variação do coeficiente de permeabilidade com o gradiente hidráulico (GTX).	111
Figura 4.43 -	Variação do coeficiente de permeabilidade com o gradiente hidráulico (GTY).	112
Figura 4.44 -	Variação do coeficiente de permeabilidade com o gradiente hidráulico (GTZ).	112
Figura 4.45 -	Permissividade (ψ) versus gradiente hidráulico (i) – (GTX).	113
Figura 4.46 -	Permissividade (ψ) versus gradiente hidráulico (i) – (GTY).	114
Figura 4.47 -	Permissividade (ψ) versus gradiente hidráulico (i) – (GTZ).	114
Figura 4.48 -	Aspectos de espécime de geotêxtil GTX antes e após ensaio de desobstrução de poros por aumento de carga hidráulica.	115
Figura 4.49 -	Variação do gradiente de desobstrução com a espessura do geotêxtil.	116
Figura 4.50 -	Distância média entre fibras versus gramatura do geotêxtil.	118

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Símbolo	Significado
A	Área
Å	Angstrom
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AOS	Abertura de Filtração
APHA	American Public Health Association
C ₁	Coeficientes para Cálculo de Permeabilidade (CFGG)
C ₂	Coeficientes para Cálculo de Permeabilidade (CFGG)
C ₃	Coeficientes para Cálculo de Permeabilidade (CFGG)
C ₄	Coeficientes para Cálculo de Permeabilidade (CFGG)
C ₅	Coeficientes para Cálculo de Permeabilidade (CFGG)
Ca	Cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
Ca ⁺	Íon Cálcio
CaCl ₂	Cloreto de Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CaSO ₄	Sulfato de Cálcio
Cd	Cádmio
CFGG	Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembrana
cm	Centímetro
CO ₂	Dióxido de Carbono
COT	Carbono Orgânico Total
CPD	Ponto Crítico Modelo
Cr	Cromo
CU	Coeficiente de Uniformidade
d ₁₅	Tamanho de abertura abaixo do qual se situam 15 % em peso das partículas do solo
d ₈₅	Tamanho de abertura abaixo do qual se situam 85 % em peso das partículas do solo
D ₉₅	Diâmetro de abertura abaixo do qual se situam 95 % em peso das partículas do solo
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DBO ₅	Demanda Biológica de Oxigênio aos cinco dias
d _f	Diâmetro da Fibra
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DM	Densidade Microbiana
dt	Variação de Tempo

dX	Varição da concentração de microorganismos
EPM	Escola Politécnica de Montreal
F	Força de Percolação
FC	Fator de Correção
Fe	Ferro
Fe(OH) ₃	Hidróxido de Ferro
Fe ⁻²	Íon Ferro
Fe ⁻³	Íon Ferro
FeS	Sulfeto de Ferro
FeSO ₄	Sulfato de Ferro
FHWA	Federal Highway Administration
FOS	Abertura de Filtração
FQ	Amostra Extraída para Análise Físico-Química
F _R	Fator de Redução
g	Aceleração da Gravidade
g	Gramma
GR	Gradiente Ratio
GTX	Geotêxtil Não-tecido Vêu de Poliéster
GTY	Geotêxtil Não-tecido OP30
GTZ	Geotêxtil Não-tecido OP60
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfato de Hidrogênio
HACH	Company of Analysis, Instruments & Chemistries for Water Analysis
i	Gradiente Hidráulico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IRIGM	Universidade de Grenoble
I _s	Gradiente Hidráulico no Solo
K	Permeabilidade do Geotêxtil
k	Permeabilidade do Geotêxtil
K ⁺	Íon Potássio
K _{ADM}	Permeabilidade Admissível do Elemento Drenante
KCl	Cloreto de Potássio
k _g	Coefficiente de Permeabilidade do Geotêxtil
k _G	Permeabilidade do Elemento Drenante
K _{REQ}	Permeabilidade Requerida do Elemento Drenante

K_S	Concentração do Substrato a uma Taxa de Crescimento Máximo Constante
K_2HPO_4	Fostato de Potássio
k_s	Coefficiente de Permeabilidade do Solo Protegido
kV	Kilovolt
L	Litro
m	metro
M	Mol
MB	Amostra Extraída para Análise Biológica
MC	Amostra Extraída para Análise Microscópica
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
mg	Miligrama
Mg	Magnésio
Mg ⁺	Íon Magnésio
MgSO ₄	Sulfato de Magnésio
mm	Milímetro
mmHg	Milímetro de Mercúrio
Mn	Manganês
MnSO ₄	Sulfato de Manganês
n	Porosidade Média do Geotêxtil
N ₂	Nitrogênio
Na	Sódio
Na ⁺	Íon Sódio
NaCl	Cloreto de Sódio
NaHSO ₃	Sulfito de Sódio
Na ₂ HPO ₄	Fosfato de Sódio Anidro
NBR	Norma Brasileira
n_{GT}	Espessura do Elemento Drenante
NH ₃	Nitrogênio Amoniacal
NH ₄ ⁺	Íon Amônio
Ni	Nítio
NMP	Número Mais Provável
NO ₂ ⁻	Nitrito
NO ₃	Nitrato
NO ₃ NH ₄ ⁺	Nitrato de Amônio
O ₂	Oxigênio
O ₉₅	Tamanho de abertura abaixo do qual se situam 95 % em peso das partículas do solo

°C	Graus Celsius
P	Fósforo Total
Pa	Pascal
PAA	Porcentagem de Área Aberta
Pb	Chumbo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PO ₄ ⁻³	Ortofosfato
Q	Vazão
S	Concentração do Substrato
s	Segundos
SCD	Sputter Coater Modelo
SO ₄ ⁻²	Íon Sulfato
SST	Sólidos Suspensos Totais
t	Tempo
t _G	Espessura do Geotêxtil
t _{GT}	Espessura do Geotêxtil
T _G	Espessura do Geotêxtil
TRC	Tubo de Raios Catódicos
TSA	Tryptic Soy Agar
UFC	Unidade Formadora de Colônia
UnB	Universidade de Brasília
USBR	United States Bureau of Reclamation
V	Volume
V _V	Volume de Vazios no Geotêxtil
X	Concentração de Microorganismos
Y	Coefficiente de Produção Celular
β	Fator de Forma
Δh	Carga hidráulica
θ	Transmissividade
μ	Taxa de Crescimento Específica
γ _f	Peso Específico do Fluido
ρ	Massa Específica do Fluido
η	Viscosidade Dinâmica do Fluido
μ _M	Taxa de Crescimento Específica Máxima
μm	Micrometro
ψ	Permissividade

INTRODUÇÃO | 1

Neste capítulo, apresentam-se as motivações que levaram à escolha do tema desta tese, os objetivos pretendidos e uma breve descrição do conteúdo dos demais capítulos.

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O aumento na produção de resíduos sólidos vem crescendo exponencialmente nos últimos tempos, fruto da intensa aceleração da ocupação do meio urbano e do crescimento do setor industrial. A disposição e tratamento desses resíduos são de grande importância social e ambiental, a qual normalmente é feita em “Lixões”. O lixo comum e entulhos de construção devem ser destinados em aterros sanitários quando não há a possibilidade de reciclagem.

Requisitos básicos de segurança devem ser considerados no projeto desses aterros de modo a reduzir os impactos ambientais por eles gerados, tais como: contaminação do lençol freático, do solo e a poluição do ar por meio de gases tóxicos. Dentre esses requisitos, a implantação de sistemas de drenagem e impermeabilização, construídos com materiais apropriados, naturais ou sintéticos, permite atender às exigências de qualidade e de vida útil desses aterros.

Os sistemas de drenagem, até pouco tempo, eram predominantemente constituídos com materiais naturais, principalmente areia e brita. Atualmente, os geossintéticos vêm sendo cada vez mais utilizados, devido às suas vantagens, como alta capacidade de fluxo, fácil transporte e armazenamento, além da redução de mão-de-obra e tempo de instalação.

Um sistema dreno-filtrante de um aterro sanitário pode ter o seu funcionamento bastante comprometido ao longo do tempo, seja pela colmatação parcial ou pela colmatação total. Esta colmatação provoca o acúmulo da coluna de percolado no interior da área de disposição, aumentando o gradiente de fluxo no sistema de impermeabilização e o volume de poluente capaz de atravessar este sistema por advecção, ou por defeitos do sistema, tais como trincas em camadas de argila compactada ou furos em camadas de geomembranas. Portanto, o aumento de fluxo gera aumento na contaminação do terreno natural e do lençol freático, sob a área de disposição.

Os mecanismos de colmatação de um sistema dreno-filtrante em uma obra geotécnica ou de proteção ambiental podem ser originados por fenômenos físicos, químicos ou biológicos, podendo ocorrer mais de um desses fenômenos simultaneamente.

No caso de sistemas de drenagem em obras de disposição de resíduos sólidos domésticos, os três mecanismos de colmatação podem ocorrer simultaneamente, face à heterogeneidade do lixo e à complexidade das condições físicas, químicas e biológicas presentes. Embora seja de

fundamental importância à compreensão do funcionamento de sistemas dreno-filtrantes em tais obras, ainda pouco se conhece sobre o comportamento destes e sobre formas de previsão da vida útil dos drenos e dos filtros em obras de disposição de resíduos.

1.2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS DA PESQUISA

Como exposto por KOSSENDEY & SCHMIDT (1996), pouco se sabe sobre o funcionamento de geotêxteis utilizados como meios filtrantes na base de aterros sob a ação de processos biológicos, reações químicas e colmatação física.

Em função do pouco conhecimento sobre esses fenômenos, este trabalho torna-se relevante na avaliação do impacto gerado em um sistema dreno-filtrante em aterros sanitários, por meio da sua colmatação biológica, a qual ocorre quando da proliferação dos microrganismos do lixo no sistema drenante. Tal proliferação pode ocorrer entupindo os vazios ou em sua superfície por meio da formação de um biofilme.

Fazendo uso de dois modelos experimentais reduzidos, que serão detalhados em momento oportuno, essa pesquisa objetivou avaliar a evolução temporal da formação do biofilme em geotêxteis não tecidos submetidos a fluxo de chorume e saturados com chorume onde:

- O primeiro modelo consiste na avaliação da colmatação biológica em três tipos de geotêxteis não tecidos, quando ensaiados sob fluxo de chorume em permeâmetros de carga constante.
- O segundo modelo objetivou conhecer o potencial de formação do biofilme em geotêxtil saturado com chorume, em condições anaeróbias e sem fluxo.

Decorrido o período determinado de cada ensaio, os geotêxteis foram exumados e fotografados em microscópio eletrônico de varredura e foram realizadas análises microbiológicas, nos geotêxteis ensaiados no período de 90 dias, com o intuito de quantificar e qualificar os microrganismos formadores do biofilme.

Segundo KOERNER & KOERNER (1990), quando da ocorrência de colmatação da camada de geotêxtil, ocorrerá o aumento da coluna de chorume sobre o sistema de drenagem. O

aumento de pressão e do gradiente provocado pela carga de chorume poderá desobstruir o dreno, limpando parcialmente os seus poros, e fazendo-o voltar a funcionar. Embora intuitivamente consistente, não há ainda evidência científica de que tal processo possa ocorrer e se repetir por muito tempo em obras reais. Portanto, após realizados os ensaios de colmatação com fluxo de chorume e feita uma análise prévia dos resultados surgiu o interesse de avaliar o potencial de recuperação da capacidade drenante dos geotêxteis já colmatados. Para isto foi montado um sistema de aplicação de pressão para simular o aumento da coluna de chorume no aterro sanitário, que estará descrito no Capítulo 3.

Diante das dificuldades requeridas pela montagem do experimento, como também pela exumação das amostras e pela bibliografia escassa sobre o assunto estudado, a motivação dessa pesquisa é contribuir para o avanço do conhecimento do comportamento de geotêxteis utilizados em sistemas drenantes em obras de disposição de resíduos, contribuindo para evitar ou minimizar os danos ao meio ambiente.

1.3. ESTRUTURA DA TESE

A tese está subdividida em seis capítulos, cujos conteúdos estão apresentados abaixo:

- Capítulo 1 – apresenta uma breve introdução do tema estudado, as justificativas e objetivos do trabalho e a estrutura da tese;
- Capítulo 2 – apresenta a revisão bibliográfica que serviu de base para a elaboração de parte das atividades realizadas, uma vez que ainda há pouca pesquisa sobre o tema aqui estudado e muitos procedimentos utilizados nos experimentos foram desenvolvidos durante as atividades do doutorado.
- Capítulo 3 – apresenta os materiais, os métodos e os equipamentos utilizados e desenvolvidos na pesquisa, suas características e propriedades relevantes ao presente estudo.
- Capítulo 4 – apresenta os resultados dos ensaios de colmatação com fluxo e colmatação por imersão de geotêxteis em chorume, como também os resultados das análises físico-químicas do chorume, microscópicas e microbiológicas dos geotêxteis, além da simulação do crescimento bacteriano. São apresentados também os resultados do coeficiente de permeabilidade, a redução percentual dos vazios dos geotêxteis submetidos ao ensaio de

colmatação com fluxo. São apresentados e discutidos, também, os resultados do ensaio de aumento de carga hidráulica que visa avaliar o potencial de recuperação da capacidade drenante dos geotêxteis utilizados.

Capítulo 5 – apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões para pesquisas futuras.

REVISÃO | 2

BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresentam-se as definições e discussões a respeito de conceitos, técnicas e processos que servem de embasamento para o desenvolvimento da tese e que são de suma importância para o bom entendimento da mesma.

2.1. RESÍDUOS SÓLIDOS

A ABNT, em sua norma NBR 10.004/04 define resíduos sólidos, também denominados lixo, da forma transcrita abaixo:

"Resíduos sólidos são resíduos no estado sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade, de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Consideram-se, também, resíduos sólidos 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 o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpo d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível."

Considerando aspectos práticos e de natureza técnica ligados principalmente às possibilidades de tratamento e disposição dos resíduos sólidos em condições satisfatórias do ponto de vista sanitário, ecológico e econômico, a Norma 10.004/04 distingue os resíduos sólidos em duas classes, sendo a Classe II subdividida em Classe II A e IIB:

Resíduos Classe I ou Perigosos – são aqueles que isoladamente ou por misturas podem apresentar riscos à saúde pública e ao meio ambiente por meio de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Resíduos Classe II-A ou Não Inertes – são os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde e ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I ou Classe III.

Resíduos Classe II-B ou Inertes – são aqueles que não se solubilizam ou que não têm nenhum de seus componentes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, quando submetidos a um teste-padrão de solubilização (conforme NBR 10.006 – Solubilização de Resíduos).

Com o desenvolvimento tecnológico, a quantidade de resíduos sólidos refugados pelo homem aumentou consideravelmente, associado a um aumento dos aglomerados urbanos e uma conseqüente diminuição dos prováveis locais para destinação destes resíduos. Dessa forma, os

locais de deposição de resíduos devem ser devidamente planejados e projetados de modo a se obter um ambiente seguro e que tenha uma vida útil adequada, promovendo, assim, uma otimização no tratamento desses resíduos. A Figura 2.1 mostra o crescimento populacional mundial ao longo dos anos, deixando claro o fenômeno de explosão demográfica após o século XVIII, que, por conseguinte, aumentou as demandas com relação ao suprimento de matérias-primas, alimento e energia, principalmente nas grandes cidades.

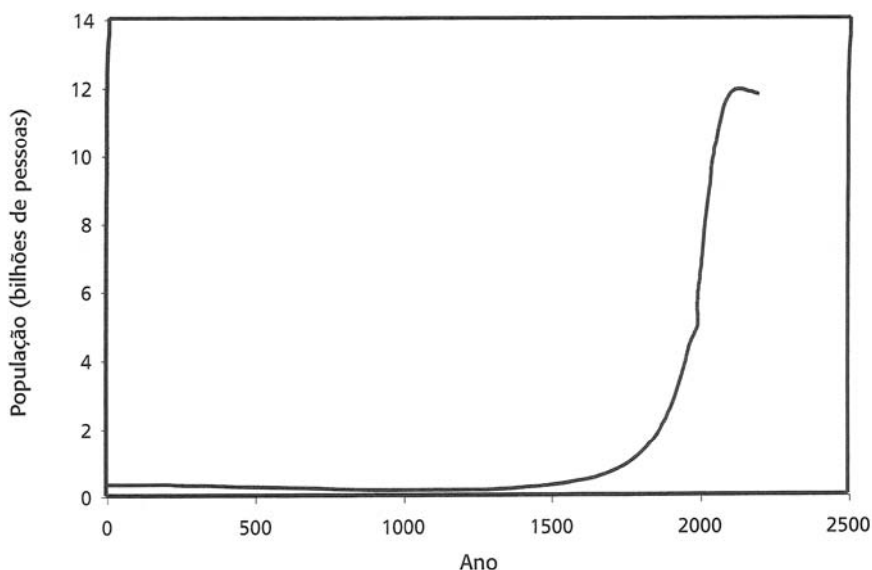


Figura 2.1: Evolução do crescimento populacional mundial (NEBEL, WROGHT, 1993 apud PHILIPPI, et al., 2004).

A composição física e química dos resíduos sólidos urbanos apresenta-se muito diversificada, pois está associada a diversos fatores, tais como: densidade populacional, poder aquisitivo, condições climáticas, hábitos e costumes da população, nível educacional, fatores culturais, grau de industrialização, dentre outros.

Para a determinação da composição física dos resíduos sólidos faz-se necessário determinar os principais componentes que formam a massa total dos resíduos, o que normalmente é feito considerando as categorias: matéria orgânica, plásticos, papel, papelão, metal, vidro, trapo, etc.

A Figura 2.2 apresenta a composição aproximada dos resíduos sólidos domiciliares brasileiros com base nos dados do IBGE (1998-2000).

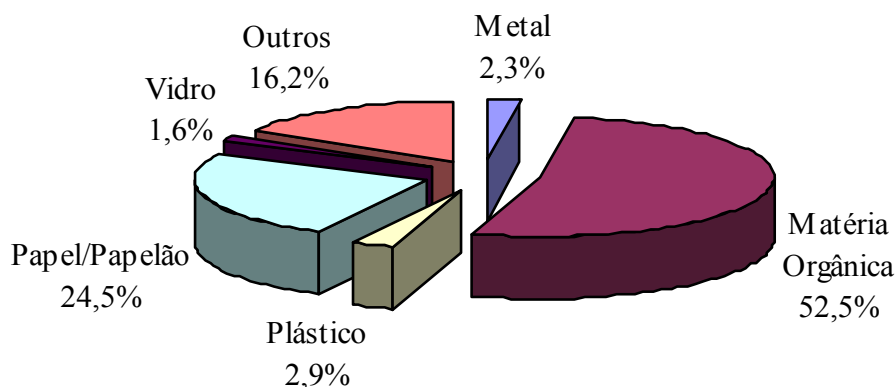


Figura 2.2: Composição dos resíduos sólidos domiciliares brasileiros (TIVERON, 2001).

A determinação da composição química dos resíduos sólidos pode ser realizada por meio dos parâmetros: sólidos totais, demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio, carbono orgânico total, pH, umidade, metais pesados, fósforo, dentre outros. Além das propriedades físicas e químicas, é de suma importância o conhecimento das características microbiológicas dos resíduos sólidos, pois podem trazer informações relevantes quanto ao grau de biodegradabilidade, a produção de gás e, conseqüentemente, ao ambiente predominante na massa de resíduos, seja este aeróbio ou anaeróbio. A relevância de tais informações se deve ao fato das reações existentes na massa de lixo se diferenciarem muito ao longo do seu processo de degradação, influenciando diretamente nos processos de produção e atenuação do chorume gerado.

2.1.1. ATERRO SANITÁRIO

A NBR 8419/92 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – 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-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário”.

Os aterros sanitários são basicamente locais onde os resíduos são confinados no terreno, livre do contato com o ar e cobertos com uma camada de solo. O terreno é impermeabilizado para permitir que os líquidos e os gases resultantes da decomposição que estes resíduos sofrem, principalmente por bactérias, sejam drenados e tratados, para evitar a contaminação do ambiente. A Figura 2.3 apresenta a representação esquemática de um aterro sanitário.

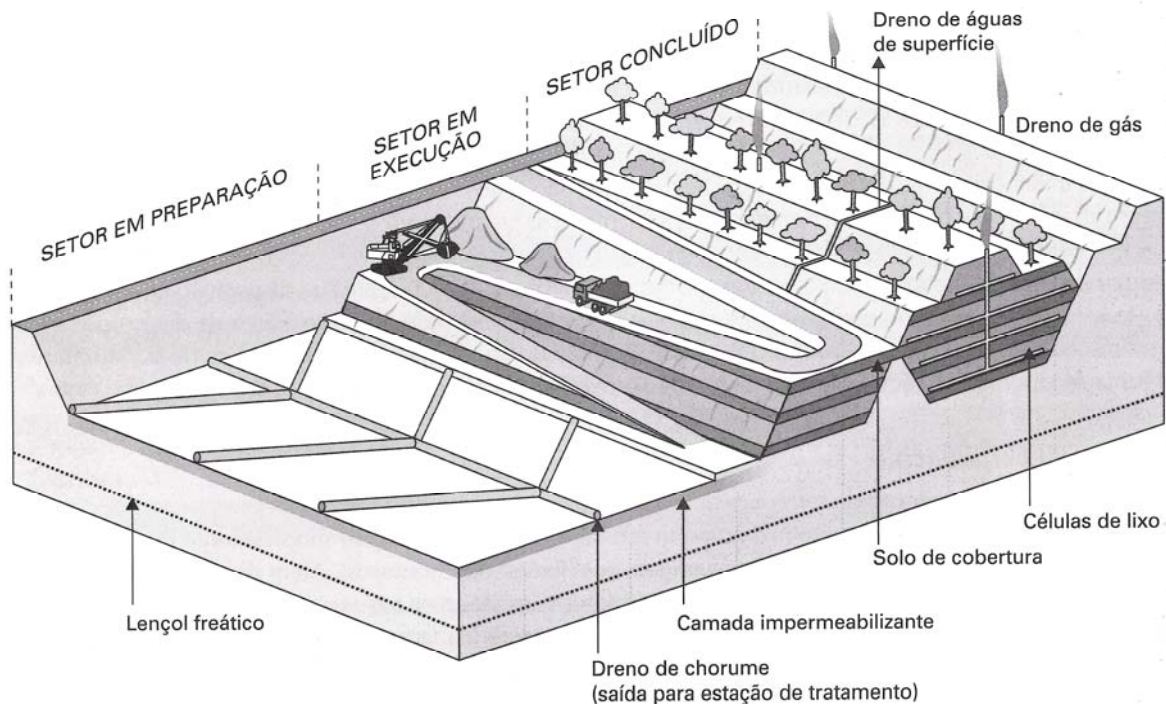


Figura 2.3: Representação de um aterro sanitário em várias fases (BRAGA, et al., 2005).

É cada vez maior o esforço, no mundo inteiro, para se alcançar a meta de um tratamento adequado dos resíduos sólidos gerados. O aterro sanitário é a forma mais adequada de dispor os resíduos sólidos, no entanto encontram-se grandes dificuldades na sua implantação, muitas vezes devido ao alto custo de operação, que pressupõem tratamento adequado de líquidos e gases efluentes, sistemas de impermeabilização, além de todos os cuidados previstos nas normas técnicas.

A Tabela 2.1 apresenta a quantidade de lixo coletado diariamente em cada região do Brasil, segundo IBGE (2002).

Tabela 2.1: Unidade de destino final do lixo coletado diariamente no Brasil (t/dia).

Região	Vazadouro a céu aberto (lixão)	Aterro Sanitário	Aterro Controlado	Outros	Total
Centro-Oeste	3.131,0	5.553,1	4.684,4	928,0	14.296,5
Norte	6.279,0	1.468,8	3.133,9	185,4	11.067,1
Nordeste	20.043,5	15.030,1	6.071,9	412,3	41.557,8
Sul	5.112,3	8.046,0	4.833,9	1882,6	19.874,8
Sudeste	13.755,9	52.542,3	65.851,4	9467,2	141.616,8
Brasil	48.321,7	82.640,3	84.575,5	12875,5	228.413,0

Fonte: PNSB (IBGE, 2002)

Os grandes centros urbanos, em sua maioria, apresentam graves problemas de disposição dos resíduos sólidos gerados. A Tabela 2.1 mostra que apenas 82.640,3 toneladas, ou seja, 36,2 % dos resíduos sólidos coletados no Brasil diariamente, são dispostos de forma adequada em aterros sanitários, não sendo avaliadas as condições de operação desses aterros.

Segundo CERQUEIRA (1999), a disposição equivocada dos resíduos sólidos urbanos traz três importantes agressões. A primeira, de ordem ambiental, principalmente pela contaminação do solo e do lençol freático por meio da percolação do líquido resultante da degradação do lixo. A segunda, sob o ponto de vista sanitário, permite a proliferação de vetores como ratos e insetos que podem ocasionar riscos à saúde pública. A última, de ordem social, pela existência de um número significativo de catadores que sobrevivem do lixo.

2.1.2. CHORUME

A NBR 8849/85 define chorume como sendo 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 BAGCHI (1990), os fatores que podem influenciar na qualidade do chorume são: a composição do resíduo, o seu tempo de degradação, a temperatura ambiente, a umidade e o oxigênio disponível.

GANDOLLA et al. (1995), citado por REICHERT (1999), apresentam os principais parâmetros utilizados na caracterização do chorume. São eles:

- *DBO (mg/L)* – definida como a quantidade de oxigênio requerida pelas bactérias para estabilizar a matéria orgânica degradável sob condições aeróbias (SAWYER et al., 1994).

- *DQO (mg/L)* – é amplamente utilizado como recurso para a medição da concentração poluidora de despejos domésticos e industriais. Quantifica toda a matéria orgânica quimicamente oxidada convertendo-a a dióxido de carbono e água (SAWYER et al., 1994).
- *pH* – expressa a intensidade de acidez ou alcalinidade de uma solução. É o modo de expressar a concentração ou, mais precisamente, a atividade dos íons hidrogênio.
- *Nitrogênio Amoniacal e Nitrogênio Nitrato (mg/L)* – os compostos de nitrogênio são de grande relevância para os engenheiros ambientalistas devido à sua importância na atmosfera e nos processos biológicos. Por exemplo, águas que contêm muito nitrogênio amoniacal e orgânico são consideradas de poluição recente e, portanto, de grande perigo potencial. Já as águas com maior parte do nitrogênio na forma de nitrato são consideradas de poluição antiga, oferecendo menor risco à saúde pública. A relação entre amônia e nitrato indica as condições em que o aterro se encontra: aeróbias ou anaeróbias (SAWYER et al., 1994).
- *Sólidos* – representam toda matéria que permanece como resíduo após evaporação e secagem a 103-105°C. Os sólidos podem se apresentar sob diversas formas: dissolvidos, suspensos, voláteis e fixos. (SAWYER et al., 1994).

Caso haja má operação do aterro sanitário e ocorra percolação do chorume em um corpo hídrico, este se tornará impróprio para a sobrevivência de peixes e organismos aeróbios em geral, assim como para o consumo humano e animal, além de causar a poluição do solo, acarretando sua esterilidade.

Segundo BATSTONE et al. (1989), os principais componentes do chorume podem ser convenientemente agrupados em quatro classes:

1ª – Íons e elementos maiores, tais como Ca, Mg, Fe, Na, amônia, carbonatos, sulfatos e cloretos.

2ª – Metais pesados, Mn, Cr, Ni, Pb e Cd.

3ª – Grande variedade de compostos orgânicos que usualmente são medidos como Carbono Orgânico Total (COT) ou Demanda Química de Oxigênio (DQO). Algumas espécies orgânicas individuais, como os fenóis, também podem ser consideradas.

4ª – Microrganismos.

Segundo GONZALEZ (1995), a composição química do chorume pode variar amplamente em função da idade do aterro sanitário ou em função de resíduos que tenham sofrido o processo de decomposição antes de sua disposição. Amostras de chorume coletadas durante a fase de decomposição ácida, onde o valor do pH é baixo e as concentrações de DBO, DQO, COT, nutrientes e metais pesados são altos. Já nas amostras coletadas durante a fase de fermentação metanogênica, o pH varia de 6,5 a 7,5 e as concentrações de DBO, DQO, COT, nutrientes e metais pesados tendem a valores significativamente baixos.

TCHOBANOGLIOUS et al. (1993) apresentam dados típicos da composição do chorume, tanto para aterros novos quanto para os mais antigos, na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Dados típicos da composição do chorume de aterros novos e antigos
(TCHOBANOGLIOUS et al. 1993).

Características	Valores (mg/L)		
	Aterros Novos (menos de 2 anos)		Aterros Antigos (mais de 10 anos)
	Faixa de Variação	Típico	
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO ₅)	2.000-30.000	10.000	100-200
Carbono Orgânico Total (COT)	1.500-20.000	6.000	80-160
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	3.000-60.000	18.000	100-500
Sólidos suspensos totais (SST)	200-2.000	500	100-400
Nitrogênio orgânico	10-800	200	80-120
Nitrogênio amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	5-40	25	5-10
Fósforo total (P)	4-100	30	5-10
Alcalinidade como CaCO ₃	1.000-10.000	3.000	200-1.000
pH	4,5-7,5	6	6,6-7,5
Ca	200-300	1.000	100-400
Mg	50-1.500	250	50-200
K	200-1.000	300	50-400
Sulfatos	50-1.000	300	20-50
Fe (total)	50-1.200	60	20-200
Cloretos	200-3.000	500	100-400

No entanto, deve-se levar em consideração que vários fatores podem influenciar no potencial de contaminação do chorume produzido em um aterro, como por exemplo: a composição dos

resíduos, o tempo decorrido desde o aterramento, a temperatura no interior da massa de lixo, a umidade e a quantidade de oxigênio disponível.

Portanto, faz-se necessário um criterioso projeto de drenagem do chorume gerado no aterro sanitário de modo a promover sua drenagem e a retenção de partículas que possam interferir no funcionamento do dreno.

2.2. GEOSSINTÉTICOS APLICADOS À ATERROS SANITÁRIOS

A utilização de geossintéticos em obras de proteção ambiental tem aumentado significativamente. KOERNER (1998) observou, a partir dos anos 80 (Fig. 2.4), um crescimento significativo do consumo de geossintéticos aplicáveis a obras de proteção ambiental. Algumas normas internacionais para disposição de resíduos obrigam a utilização de uma ou mais camadas de geomembrana no sistema de impermeabilização, dependendo do tipo e da periculosidade do resíduo, inclusive para disposição de resíduos domésticos.

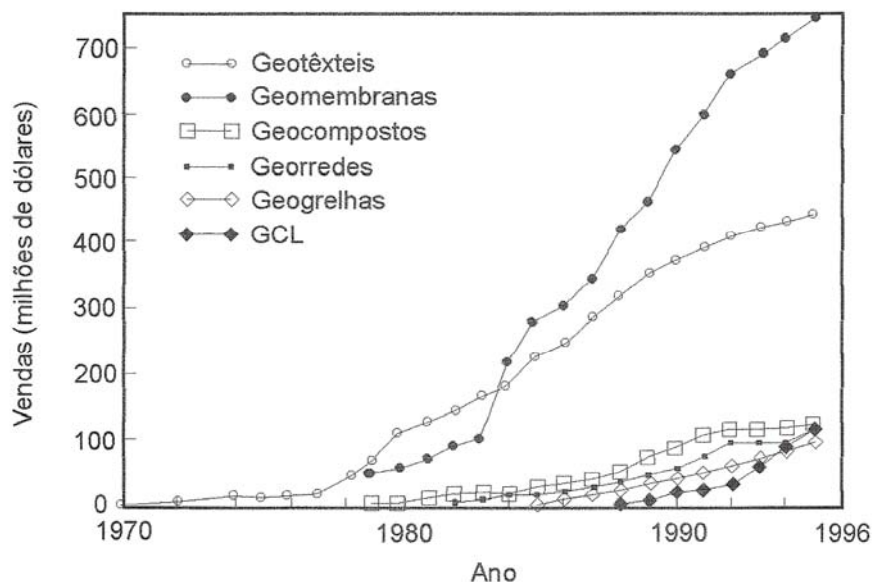


Figura 2.4: Evolução do consumo de geossintéticos na América do Norte ao longo dos anos (modificado de KOERNER, 1998)

Algumas das razões para o crescimento na utilização de geossintéticos em obras de disposição de resíduos sólidos são descritas a seguir:

- Os geossintéticos são produtos poliméricos que podem apresentar elevadas resistências mecânica e ao ataque de substâncias químicas. Embora a durabilidade de polímeros não ter sido largamente estudada, a literatura mostra que resultados de ensaios de envelhecimento acelerado realizados pela indústria petroquímica ou a observação do estado de conservação de elementos plásticos de uso domiciliar, como algumas exumações em aterros sanitários, corroboram com as expectativas de que tais materiais possam durar vários séculos, mesmo em condições de ambiente agressivo.
- São de fácil instalação em camadas drenantes e de impermeabilização, em comparação com similares naturais, diminuindo muito o tempo de execução da obra.
- Apresentam excelente controle de qualidade de suas características e o custo vêm diminuindo progressivamente.
- Os drenos e os sistemas de impermeabilização geossintéticos ocupam volumes muito menores na área de disposição de resíduos que os ocupados por camadas de areia, brita e argila compactada, promovendo uma maximização do volume útil da área de disposição do resíduo.
- Substituem os materiais naturais por escassez dos mesmos ou por restrições de legislação ambiental.

Segundo GOURC (1995), a concepção básica de um aterro sanitário moderno objetiva isolar ou confinar o lixo dentro de barreiras impermeáveis. Nesta concepção, os geossintéticos são de grande importância, uma vez que podem desempenhar as funções drenantes, como também prevenir a entrada de água no aterro e a contaminação do solo pelo chorume.

Os geossintéticos frequentemente utilizados em aterros sanitários são:

- *Geotêxteis* (tecidos e não tecidos) – usados como filtros sobre vários tipos de camadas drenantes ou como elemento de separação e/ou proteção.
- *Georredes* ou *geocompostos* – utilizados como drenos nos sistemas primário e secundário de coleta e remoção de chorume.
- *Geomembranas* – utilizadas para como barreiras para líquidos e gases.
- *Geogrelhas* – são utilizadas como elemento de reforço em taludes laterais.

2.2.1. SISTEMAS DRENANTES

Os sistemas dreno-filtrantes em obras geotécnicas devem apresentar, em princípio, um coeficiente de permeabilidade elevado, de forma a garantir a capacidade drenante necessária e uma distribuição de tamanhos de poros que seja capaz de reter as partículas do solo protegido.

Segundo MLYNAREK & ROLLIN (1995), o sistema de coleta de chorume é uma parte crucial do aterro. O propósito desse sistema é evacuar o chorume do lixo ou o líquido resultante da percolação e da precipitação através do resíduo durante a vida útil do aterro. O objetivo do sistema filtrante de chorume é realizar as funções de separação e de filtração, retendo as partículas. Os filtros também evitam movimento de partículas do resíduo para dentro do canal drenante. Ambos os requisitos (reter partículas e fluxo livre) têm que ser satisfeitos para evitar um aumento da pressão hidráulica dentro da célula de lixo e colmatção do dreno de coleta de chorume por partículas sólidas.

Segundo a NBR 13896/97, o sistema de drenagem para coleta e remoção de líquido percolado do aterro deve seguir os seguintes critérios:

- Ser instalado imediatamente acima do sistema de impermeabilização.
- Dimensionado de forma a evitar a formação de uma lâmina de líquido percolado superior a 30 cm sobre o sistema de impermeabilização.
- Ser construído com material quimicamente resistente ao resíduo e ao líquido percolado, e suficientemente resistente a pressões originárias da estrutura total do aterro, bem como dos equipamentos utilizados em sua operação.
- Deve ser projetado e operado de forma a não sofrer obstruções durante o período de vida útil e pós-fechamento do aterro.

Até a década de 80, aproximadamente, os sistemas de coleta de chorume eram construídos quase exclusivamente com material natural, ou seja, areia e cascalho. Todavia, a substituição dos materiais naturais pelos geossintéticos tem aumentado a liberdade de desenvolvimento de projetos para coletar eficientemente e remover o excesso de líquidos gerados no aterro sanitário (LANDRETH, 1990).

Segundo ROWE et al. (2004), existe uma larga variedade de sistemas de drenagem e impermeabilização de aterros sanitários, mas a maioria envolve algumas combinações de materiais tradicionais como areia, brita, argila e geossintéticos. ROWE (2005) apresenta uma possível alternativa de sistema drenante e de impermeabilização de aterros sanitários, a partir da construção de uma camada dupla de coleta de chorume, como apresentado na Figura 2.5.

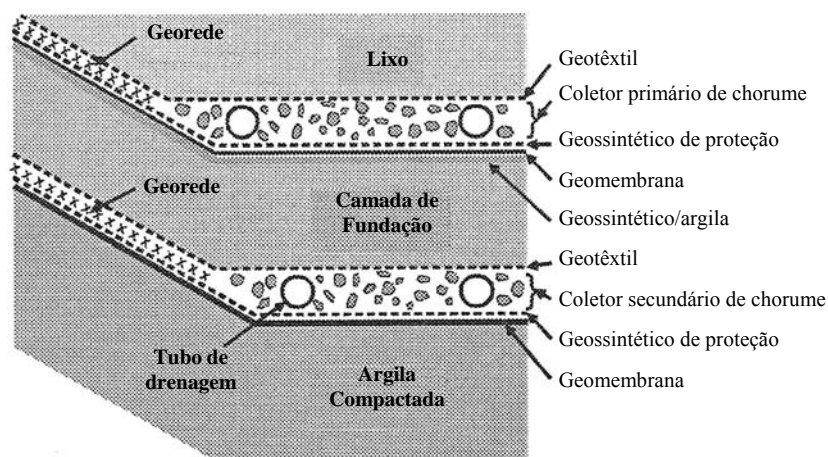


Figura 2.5: Sistema de drenagem e impermeabilização de aterro sanitário (ROWE, 2005).

A primeira camada consiste no sistema primário de coleta de chorume, vindo logo após a camada de lixo. Tal sistema compõe-se de uma camada horizontal espessa de material granular (cascalho). A superfície superior dessa camada é protegida por geotêxtil, com função de separador e filtro e, na inferior, para proteção da camada drenante, coloca-se geossintético e geomembrana. O sistema secundário de coleta de chorume é similar ao sistema primário, tendo como objetivo reduzir a carga hidráulica na camada secundária, caso haja vazamento no primeiro sistema. A drenagem dos taludes da célula de lixo é feita utilizando georredes.

2.2.2. FILTRO GRANULAR

O material que constitui um filtro granular é o solo, sendo este, normalmente de granulometria arenosa e/ou pedregulhosa. O filtro pode ser constituído de uma só camada ou por zonas de granulometrias diferentes, visando atender adequadamente a sua função de filtração.

Diversos critérios têm sido propostos para o dimensionamento de filtros, baseando-se nas granulometrias do solo protegido e do filtro, de forma a atender aos requisitos já

mencionados. A *United States Bureau of Reclamation* (USBR,1974) recomenda que o filtro não deve conter mais que 5% de partículas com diâmetro inferior a 75 µm e que o maior diâmetro das partículas seja menor ou igual a 75 mm. No entanto, para o presente projeto de pesquisa, esses critérios não se aplicam, uma vez que o material a ser retido é o lixo.

2.2.3. FILTRO SINTÉTICO

Os filtros geotêxteis são constituídos de mantas permeáveis e finas produzidas a partir de fibras sintéticas.

Os materiais comumente constituintes dos geotêxteis são polímeros do grupo dos termoplásticos, destacando-se o polietileno, o poliamida (nylon), o poliéster e o polipropileno. Os polímeros mais usados na indústria do geotêxtil são: o poliéster, o polipropileno e o polietileno. Durante a fabricação do geotêxtil pode-se acrescentar a esses polímeros aditivos que melhoram as propriedades do produto final.

As propriedades dos geotêxteis dependem do polímero utilizado, e da sua forma de fabricação, ou seja, da estrutura do material. O método de fabricação pode dar origem a três tipos de geotêxteis que são: tecido, não-tecido e tricotado.

Para a elaboração do geotêxtil tecido são utilizados arranjos de fitas, fios ou filamentos, podendo conter vários tipos de polímeros em sua constituição. Os processos de ligação das fibras para formação dos geotêxteis não tecidos podem ser mecânico, térmico ou químico. Quando utilizados como filtro, os geotêxteis não tecidos atuam como um meio tridimensional e não apenas como uma interface, por apresentar uma estrutura mais complexa.

A Figura 2.6 apresenta os tipos de geotêxteis tecido e não-tecido.

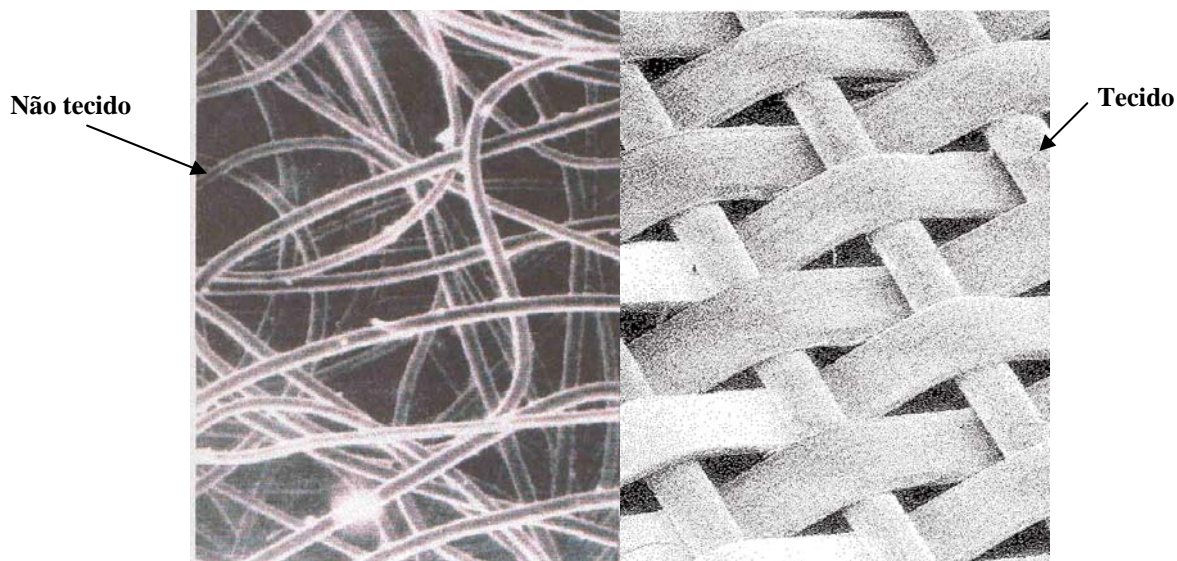
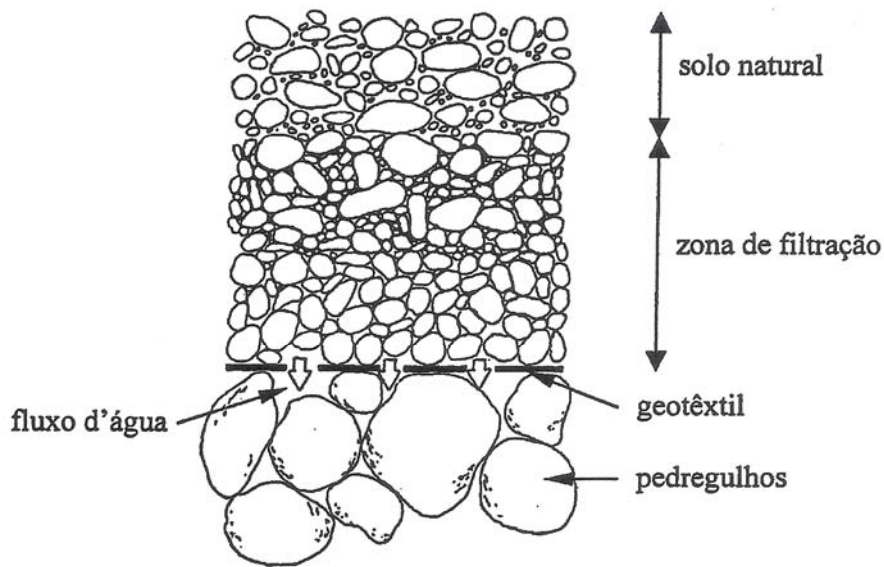


Figura 2.6: Tipos de Geotêxtil.

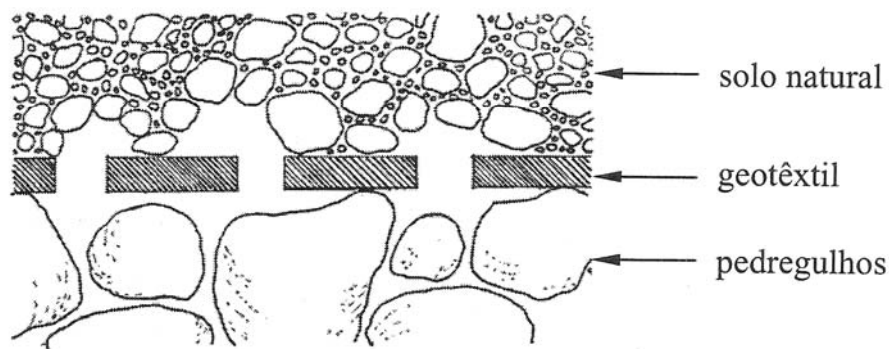
2.3. FILTRAÇÃO COM GEOTÊXTEIS

Visando desempenhar um papel semelhante ao de um filtro granular, o geotêxtil deve ser provido de aberturas pequenas o bastante para realizar a retenção das partículas do solo protegido e, ao mesmo tempo, garantir uma permeabilidade maior do que a do solo protegido de forma a cumprir a função drenante.

O fluxo de água num sistema drenante solo/geotêxtil induz um rearranjo de partículas onde se verificam dois mecanismos descritos a seguir: a auto-filtração e a formação de uma rede de arcos. A auto-filtração ocorre quando o processo de filtração não se limita ao geotêxtil e envolve o solo adjacente, que atua como filtro natural. Forma-se nessa condição, uma zona com estrutura de filtro graduado no interior do solo, nas proximidades do geotêxtil (Fig. 2.7(a)). Uma rede de arcos pode se desenvolver em função das aberturas do geotêxtil e do tipo de solo, conforme mostra a Figura 2.7(b). Esse arranjo permite que na região do solo anterior à rede de arcos se tenha a retenção das partículas com diâmetro menor do que a abertura de filtração do geotêxtil (SPADA, 1991).



(a) Fluxo graduado desenvolvido no solo sobrejacente ao geotêxtil (SPADA, 1991).



(b) Formação de arcos de solo sobre os poros do geotêxtil

Figura 2.7: Mecanismos de auto-filtração (SPADA, 1992).

2.3.1. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS GEOTÊXTEIS

As grandezas hidráulicas com especial relevância para projetos de drenos geossintéticos são a abertura de filtração, a permissividade, a transmissividade e a permeabilidade.

A abertura de filtração (AOS – “Aparent Opening Size”) representa a grandeza utilizada para avaliar o potencial de filtração do geotêxtil. Há algumas metodologias para a determinação da abertura de filtração, sendo descritas, a seguir, as mais usuais:

- *Peneiramento a seco* – desenvolvida pelo U.S. Army Corps of Engineers para obter o AOS, que define o tamanho de abertura (O_{95}) para o qual 95% dos poros do material são menores que aquele diâmetro (O_{95}).
- *Peneiramento úmido* – desenvolvida pelo Instituto Franzius de Hannover (Alemanha) e fornece o D_w que é definido a partir de uma relação entre a fração mais grosseira da areia que passa pelo geotêxtil e a fração que fica retida.
- *Peneiramento hidrodinâmico* – desenvolvida na França e determina o D_{95} , que é o valor correspondente ao D_{95} da curva de distribuição granulométrica do material que passa pelo geotêxtil durante o ensaio.

A permissividade (ψ) é definida como o coeficiente de permeabilidade do elemento drenante (k_G) dividido pela sua espessura (t_G). Esta grandeza fornece uma medida da obstrução ao fluxo normal ao plano causado pelo elemento drenante, sendo expressa pela Equação 2.1.

$$\psi = \frac{k_G}{t_G} \quad (2.1)$$

A transmissividade (θ) é definida como o produto do coeficiente de permeabilidade do elemento drenante (k_G) pela sua espessura (t_G), fornecendo uma medida da capacidade de descarga do elemento drenante ao longo do seu plano. Matematicamente, esta grandeza é expressa por:

$$\theta = k_G \times t_G \quad (2.2)$$

Onde:

- ψ é a permissividade do elemento drenante;
- k_G é a permeabilidade do elemento drenante (ao fluxo normal ao seu plano, no caso da permissividade, e ao longo do seu plano, no caso da transmissividade);
- t_G é a espessura do elemento drenante; e
- θ é a transmissividade do elemento drenante.

GARDONI e PALMEIRA (1998) efetuaram uma modelagem estatística com dados de ensaios de transmissividade com geossintéticos sob condições de tensão de compressão e

constataram que a gramatura possui influência na transmissividade dos geotêxteis não tecidos agulhados de poliéster. Nos casos estudados, os autores observaram que a tensão de compressão e a gramatura do produto são as variáveis de maior influência na transmissividade, sendo, também a espessura, um parâmetro físico de significativa influência na transmissividade.

SILVA et al. (2002) realizaram ensaios de permissividade ao chorume de geotêxteis e filtros granulares utilizando três permeâmetros de grandes dimensões. Os permeâmetros tinham 2m de altura e 0,3m de diâmetro, para permitir o acúmulo de chorume sobre o sistema drenofiltrante no caso de redução de sua permissividade. O chorume foi coletado no Aterro do Jóquei Clube, a 30 km da cidade de Brasília. O autor observou uma forte influência da sedimentação dos sólidos em suspensão nos resultados dos ensaios, pois estes mostraram reduções de permissividade da ordem de 2,5 vezes após cerca de 4 horas de ensaio. Em investigações microscópicas, de um dos geotêxteis, o autor percebeu que o mesmo ainda apresentava grande quantidade de vazios, indicando que a redução da permissividade foi ocasionada pelo cegamento por sedimentação de sólidos em suspensão no chorume.

A permeabilidade representa a facilidade com que um fluido atravessa um geotêxtil. MENDONÇA (2000) considera que a permeabilidade pode não ser uma propriedade acurada para comparar o funcionamento de diferentes geotêxteis, pois pode não haver proporcionalidade entre o gradiente hidráulico e a velocidade de fluxo, pois verifica-se que mesmo em condições de pequena carga hidráulica ao longo da espessura do geotêxtil, o fluxo pode não ser laminar.

Diante disso, pode-se obter um coeficiente de Darcy aparente que se aplique aos geotêxteis. Esse coeficiente pode ser dado por:

$$Q = kiA = k \frac{\Delta h}{t_{GT}} A \quad (2.3)$$

Onde:

Q = vazão que passa no geotêxtil;

k = coeficiente de permeabilidade do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil;

A = área transversal total atravessada pelo fluxo;

Δh = perda de carga no geotêxtil.

A permeabilidade é um parâmetro que pode variar com a tensão normal a qual o geotêxtil esteja submetido, principalmente no caso dos geotêxteis não tecidos. Portanto, pode-se verificar que geotêxteis com espessuras diferentes podem apresentar coeficientes de permeabilidade equivalentes, mas vazões diferentes para uma mesma carga hidráulica e mesma área drenante, dependendo da tensão atuante.

2.3.2. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GEOTÊXTEIS

As propriedades físicas dos geotêxteis são obtidas em ensaios de caracterização e são definidas a seguir:

- *Gramatura* – é definida como a massa por unidade de área, expressa em g/m^2 e simbolizada pela letra μ (NBR 12568/92 (a) – Geotêxteis – Determinação da Gramatura);
- *Espessura* – representa a distância entre duas superfícies rígidas paralelas que comprimem a amostra do geotêxtil. A espessura é expressa em mm e é simbolizada por t_{GT} (NBR 12569/92 (b) - Geotêxteis – Determinação da Espessura). Os geotêxteis não tecidos apresentam uma compressibilidade elevada e sua espessura é bastante dependente da tensão aplicada, variando, normalmente, de 0,2 a 10 mm;
- *Porosidade* – definida como sendo a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume total da amostra (V). É expressa em porcentagem e tem como símbolo n_{GT} .

$$n_{GT} = \frac{V_v}{V} \quad (2.4)$$

- *Porcentagem de Área Aberta (PAA)* - é definida pela relação entre soma da área individual das aberturas das fibras do geotêxtil tecido e o total da área do material, como mostra a Equação 2.5.

$$PAA = \frac{\text{Total da área individual das aberturas}}{\text{Total da área do material}} \quad (2.5)$$

2.3.3. CRITÉRIOS DE PROJETO DE FILTROS SINTÉTICOS

Na elaboração de projetos de filtros geotêxteis os critérios de projeto devem atender aos requisitos de eficiência hidráulica, capacidade de retenção e vida útil. Portanto, os critérios definem limites para o tamanho da abertura de filtração do geotêxtil a partir dos diâmetros característicos, da granulometria, da densidade do solo e do gradiente hidráulico.

SPADA (1991) e GARDONI (2000) realizaram ensaios de coluna de filtração para a escolha dos filtros geotêxteis e do solo protegido, empregando critérios de projeto como os apresentados a seguir.

2.3.3.1. Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (CFGG)

Quanto à abertura de filtração:

$$FOS < C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \times d_{85}$$

Onde:

FOS = abertura de filtração do geotêxtil.

Os valores dos coeficientes da desigualdade acima, bem como suas aplicações, são mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Valores e aplicação de C_1 , C_2 , C_3 e C_4 .

Coeficiente	Valor	Aplicação
C_1	1,0	solos bem graduados e contínuos
	0,8	solos uniformes e contínuos
C_2	1,25	solos densos e confinados
	0,8	solos fofos e não-confinados
C_3	1,0	gradiente hidráulico, $i < 5$
	0,8	gradiente hidráulico, $5 < i < 20$
	0,6	gradiente hidráulico, $20 < i < 40$
C_4	1,0	uso somente para filtração
	0,3	uso para filtração e drenagem

Quanto à permeabilidade:

$$k_g > Ak_s$$

Onde:

k_g = coeficiente de permeabilidade do geotêxtil;

k_s = coeficiente de permeabilidade do solo protegido;

$A = 10^3 T_g$, para gradiente hidráulico baixo e solo limpo, $10^4 T_g$ para gradientes baixos e solos com coeficiente de permeabilidade baixo, $10^5 T_g$ para gradientes elevados e obras de grande responsabilidade, sendo T_g a espessura do geotêxtil dada em metros.

2.3.3.2. Federal Highway Administration (FHWA)

Quanto à retenção, a Tabela 2.4 apresenta o critério de dimensionamento da abertura de filtração do geotêxtil.

Tabela 2.4: Critério de dimensionamento da abertura de filtração do geotêxtil - FHWA

Solo	Critério	Aplicação
< 50% passando na peneira 200	Fluxo permanente: $AOS \leq Bd_{85}$	$Cu^* < 2$ ou $Cu > 8 \Rightarrow B = 1$ $2 < Cu < 4 \Rightarrow B = 0,5Cu$ $4 < Cu < 8 \Rightarrow B = 8/Cu$
	Fluxo dinâmico, Fluxo em dois sentidos: $AOS < d_{15}$	-
> 50% passando na peneira 200	Fluxo permanente: $AOS < d_{85}$ $AOS < 1,8 d_{85}$	Geotêxteis tecidos Geotêxteis não tecidos
	Fluxo dinâmico, Fluxo em dois sentidos: $AOS < 0,5d_{85}$	-

* Cu é o coeficiente de uniformidade do solo

Quanto à permeabilidade tem-se:

$$K_g > Ck_s$$

Onde:

$C = 1,0$ para gradientes hidráulicos baixos e solos estáveis e 10 para gradientes elevados e solos instáveis.

2.3.3.3. Universidade de Grenoble e Escola Politécnica de Montreal (IRIGM/EPM)

Quanto à capacidade de retenção, tem-se;

- Para solos uniformes:

$$FOS < 1,5 d_{85}$$

- Para solos bem graduados:

$$1,5 < FOS/d_{85} < 3,0$$

Onde:

d_{85} = diâmetro abaixo do qual se situam 85% em peso das partículas do solo.

2.3.3.4. Giroud (1988)

Aplica-se a solos não coesivos, sendo conservativo para argilas de coesão elevada. A Tabela 2.5 apresenta o critério de GIROUD (1988).

Tabela 2.5: Critério de projeto de geotêxtil, quanto à capacidade de retenção (GIROUD, 1988).

Cu' do solo	Critério	Aplicação
$1 \leq Cu'^* \leq 3$	$AOS \leq (Cu')^{0,3} d_{85}$	solo fofo
	$AOS \leq 2(Cu')^{0,3} d_{85}$	solo compacto
$Cu' \geq 3$	$AOS \leq 9(Cu')^{-1,7} d_{85}$	solo fofo
	$AOS \leq 18(Cu')^{-1,7} d_{85}$	solo compacto

* Cu' é o coeficiente de uniformidade da curva granulométrica.

Quanto à permeabilidade deve-se atender à seguinte condição:

$$K_g > I_s k_s$$

Onde:

I_s = gradiente hidráulico no solo.

Recomenda-se um fator de segurança maior que 10, dependendo da gravidade das conseqüências ocasionadas pela perda de permeabilidade do filtro.

2.3.4. COMPROMETIMENTO DO SISTEMA DRENANTE

Para que um sistema drenante não esteja comprometido é necessário que este mantenha sua capacidade drenante/filtrante ao longo do tempo, em funcionamento, mantendo um nível de integridade desejável. Portanto, faz-se necessário cuidado quanto ao dimensionamento do filtro, suas características, como também do solo a ser protegido e a escolha de métodos construtivos.

O sistema drenante pode vir a ter seu desempenho comprometido por meio da ocorrência de erosão interna do solo, fenômeno denominado “piping”, ou pelo entupimento dos vazios do meio filtrante, também denominado colmatção. Tais fenômenos estarão melhor descritos a seguir.

2.3.4.1. Piping

O gradiente hidráulico ao qual o dreno está submetido promove o deslocamento das partículas do solo, junto com o fluido percolante, podendo formar tubos internos na massa do solo. Este fenômeno é denominado de “piping” e está relacionado às características geométricas das partículas do solo protegido e do filtro, bem como à magnitude das forças envolvidas.

A erosão interna é verificada pelo deslocamento de partículas do solo protegido com tamanhos variados, as quais atravessam o solo e promovem a formação de vazios no interior do mesmo. Com a progressão deste fenômeno formam-se canais, intensificando o fluxo e podendo resultar no colapso da estrutura do solo.

Segundo PALMEIRA (2003), o fenômeno de “piping” ocorre caso o filtro seja incapaz de reter as partículas de solo e de manter o sistema estável. No caso de geotêxteis não tecidos, a partícula que entra no geotêxtil pode ser retida ou atravessá-lo totalmente. Uma vez que um determinado canal de fluxo de geotêxtil é obstruído por uma partícula de solo, um novo canal de fluxo permitirá a continuidade do fluxo, porém caso tais partículas não possam ser retidas

pelo geotêxtil por uma estrutura de pontes de partículas nem por constrições, o “piping” ocorrerá.

LAFLEUR et al(1989) sugerem considerar o fracasso de uma obra por “piping”, quando a quantidade de solo que atravessa o geotêxtil atinge 2500 g/m² em ensaios de filtração de longa duração com geotêxteis.

A sufusão caracteriza-se pelo processo no qual as partículas finas se deslocam do interior da estrutura do solo protegido em direção à saída do sistema drenante, preservando a tecedura das partículas maiores, podendo manter a estabilidade mecânica do solo protegido. Não conduz, porém, ao colapso da estrutura do solo e podendo ter seus efeitos minimizados caso as partículas do solo passem através do filtro geotêxtil sem, assim, formar uma camada de finos sobre o mesmo, o que poderia provocar o cegamento do filtro, (MENDONÇA, 2000).

2.3.4.2. Colmatação

A colmatação consiste na redução da área transversal dos espaços vazios de um determinado meio poroso, disponíveis ao fluido percolante. É um processo que ocorre ao longo do tempo, comprometendo a eficiência do sistema drenante.

O fenômeno de colmatação afeta diretamente a capacidade drenante do meio poroso por onde o fluxo se dá, reduzindo-a a medida que os espaços disponíveis diminuem. Segundo JOHN (1987), a possibilidade de colmatação de um sistema drenante não é um fator muito preocupante tendo em vista a segurança no critério de permeabilidade para escolha do geotêxtil, uma vez que cerca de 75 % dos poros do geotêxtil podem estar colmatados sem que isto ocasione dificuldades para o seu funcionamento. Isto, se os critérios de permeabilidade forem estabelecidos com cautela.

A queda da capacidade drenante é um fenômeno puramente físico. No entanto, a colmatação do meio poroso pode se dar devido a causas físicas, químicas e microbiológicas, de acordo com o material que está sendo drenado ou filtrado. PALMEIRA (2003) ressalta que sistemas drenantes submetidos ao fluxo de fluidos contendo sólidos em suspensão, substâncias químicas ou orgânicas e fluidos, cujas características ou sentido de fluxo variam com o tempo, podem também ter sua vida útil consideravelmente reduzida.

No caso de sistemas de drenagem de obras de disposição de resíduos sólidos domésticos, diferentes mecanismos de colmatação podem ocorrer simultaneamente, face à heterogeneidade do lixo e à complexidade das condições físicas, químicas e biológicas presentes. Embora seja de fundamental importância a compreensão do funcionamento de sistemas dreno-filtrantes em tais obras, pouco ainda se conhece sobre o seu comportamento e sobre formas de previsão de vida útil de drenos e filtros em obras de disposição de lixo.

KOERNER et al. (1994), avaliam a colmatação de filtros em termos de fatores de redução (FR), como apresenta a Equação 2.6.

$$FR = \frac{K_{ADM}}{K_{REQ} * FC} \quad (2.6)$$

Sendo que o valor da permeabilidade admissível (K_{ADM}) é obtido por meio de ensaio de permeabilidade a carga constante com o material de filtro (geotêxtil ou areia), tendo o chorume como material permeante. Já o valor da permeabilidade requerida (K_{REQ}) é fixado a partir das vazões esperadas para as condições de operação do aterro. O valor do fator de segurança de correção dos filtros (FC) é função das diferentes configurações dos sistemas de drenagem de chorume.

A colmatação propriamente dita se caracteriza pelo fechamento dos poros do filtro. Em sua maioria, os critérios de colmatação relacionam a perda de permeabilidade de um filtro por fechamento dos vazios, independente do tipo de colmatação: física, química ou biológica.

Quanto à colmatação, a Federal Highway Administration faz as recomendações que estão apresentadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Critério de projeto do geotêxtil quanto à colmatação – FHWA

Critério	Geotêxtil	Aplicação
GR* < 3	tecido ou não-tecido	severa
Porosidade > 4%	tecido	não severa
Porosidade > 30%	não-tecido	não severa

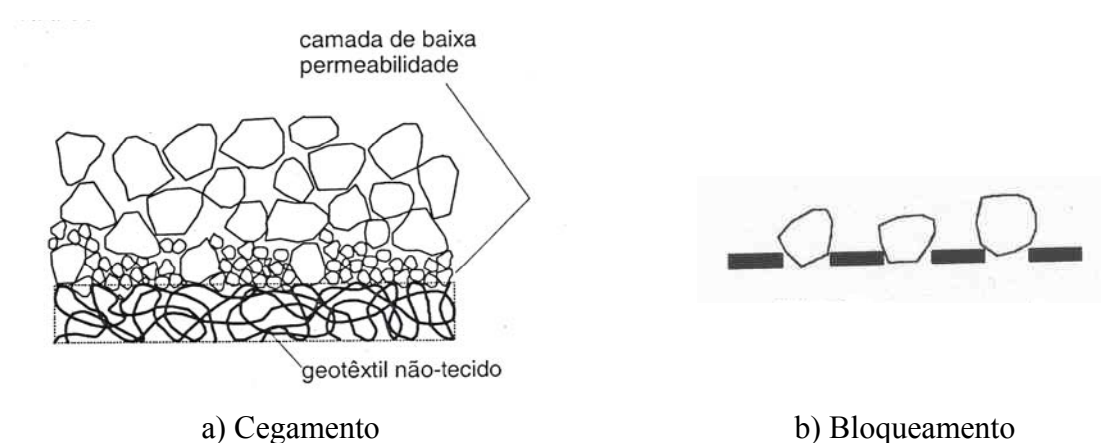
* GR= "Gradiene Ratio"- relação entre o gradiente hidráulico na camada de solo adjacente ao geotêxtil + geotêxtil e o gradiente hidráulico no solo mais afastada do geotêxtil em ensaio de filtração do sistema solo/geotêxtil.

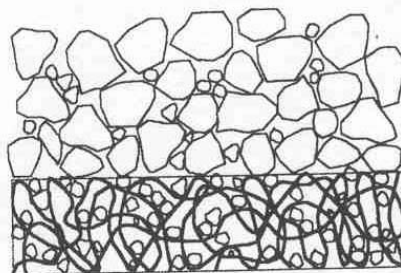
2.4. COLMATACÃO FÍSICA

Segundo PALMEIRA & GARDONI (2000), a colmatção de um filtro é causada por incompatibilidade entre as dimensões de partículas de solo e a dimensão dos poros do filtro, conduzindo a uma redução da capacidade de descarga do dreno, aumento da poropressão e perda do controle do fluxo pré-estabelecido.

Segundo PALMEIRA (2003), em filtros geotêxteis existem três formas distintas de colmatção física, como pode ser observado na Figura 2.8.

- *Cegamento* – As partículas finas do solo protegido migram, por sufusão, em direção ao geotêxtil. Caso as aberturas não sejam suficientes para permitir a passagem dessas partículas, estas se agruparão e formarão uma camada de baixa permeabilidade sobre a face do geotêxtil (Fig. 2.8a).
- *Bloqueamento* – As partículas de solo protegido se posicionam sobre as aberturas do filtro (Fig. 2.8b).
- *Colmatção Interna* – Partículas do solo protegido migram junto com o fluido percolante, penetrando no geotêxtil, ficando retidas ao longo de sua espessura (Fig. 2.8c).





c) Colmatação

Figura 2.8: Mecanismos de colmatação em filtros geotêxteis (PALMEIRA, 2003).

2.5. COLMATAÇÃO QUÍMICA

Podem-se citar como causas para a colmatação química, as reações químicas entre os elementos dissolvidos no fluido percolante, que resultam na formação de precipitados, diminuindo o espaço disponível para a passagem do fluido.

HALSE et al. (1987) realizaram uma campanha de ensaios para analisar o efeito da alcalinidade da água na capacidade drenante de diferentes tipos de geotêxteis, tecidos e não tecidos. Os ensaios foram realizados utilizando fluidos percolantes com pH igual a 7, 10 e 12, fazendo dissolver cálcio na água do abastecimento público. Ao final do experimento constatou-se por meio de observações microscópicas e por medidas da capacidade drenante ao longo do tempo, que ocorreu a colmatação devido à precipitação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e de CaCO_3 na estrutura dos geotêxteis ensaiados.

2.6. COLMATAÇÃO BIOLÓGICA

As causas microbiológicas da colmatação são aquelas resultantes da colonização microbiana no filtro. VANDEVIVERE et al. (1992) realizaram ensaios inoculando uma espécie de bactéria aeróbia, *Arthrobacter sp.*, em um fluido. O ensaio constou de percolar este fluido em uma amostra de areia saturada onde foi verificada uma severa colmatação devido ao aumento populacional das bactérias, alcançando uma redução do coeficiente de permeabilidade do solo da ordem de até três vezes.

A seguir são apresentadas as diversas formas sob as quais microrganismos podem provocar a colmatação (BAVEYE et al.,1998):

- *Acúmulo de células microbianas e seus produtos celulares* – as células microbianas podem ocupar os espaços vazios por meio da formação de biofilmes ou formando agregados de células.
- *Produção de gases* – os gases de origem microbiológica promovem a redução do espaço disponível para o fluxo do líquido percolante.
- *Acumulação de sais insolúveis de sulfeto* – os sulfetos são precipitados que resultam do processo químico de redução do sulfato catalisado pela ação de bactérias sulfato-redutoras. Esses processos são bastante comuns na natureza e ocorrem normalmente em meios anaeróbios ricos em matéria orgânica.
- *Atividade de ferrobactérias* – a colmatação provocada pela precipitação de compostos de ferro é resultante do processo de oxidação de íons ferrosos dissolvidos no fluido percolante em função das condições termodinâmicas do meio favorável ao processo.

2.6.1. ATIVIDADE MICROBIOLÓGICA

No universo dos microrganismos existem quatro grupos distintos: bactérias, algas, fungos e protozoários. As bactérias são organismos unicelulares procarióticos e apresentam maior abundância e diversidade entre as espécies. Também, apresentam uma taxa de crescimento elevada e alta capacidade de decomposição dos diferentes substratos, exercendo um importante papel na decomposição da matéria orgânica e na ciclagem de elementos. Apresentam tamanho de cerca de 0,5 - 1,0 μm x 1,0-2,0 μm e formas celulares variadas: esféricas, elípticas, cilíndricas, bastonetes, espiraladas e helicoidais. Segundo BIDONE & POVINELLI (1999), a função das bactérias pode ser resumida nas seguintes atividades: decompor a matéria orgânica seja ela animal ou vegetal; aumentar a disponibilidade de nutrientes; agregar partículas no solo e fixar o nitrogênio.

A bactéria pode se reproduzir por fissão binária, por um modo sexual ou por germinação. Geralmente, a fissão binária prevalece e o tempo requerido para cada fissão pode variar de

dias a menos de 20 minutos. No entanto, essa divisão celular não é indefinida, pois há várias limitações no ambiente, como concentração do substrato e dos nutrientes.

Os fungos são constituídos por células eucarióticas, podendo ser unicelulares como as leveduras, ou pluricelulares como os fungos filamentosos. Possuem filamentos tubulares ramificados com 3 a 10 μm de diâmetro, denominados de hifas e podem ser encontrados em solos com pH de 3 a 9. Não predominam na acidez por competição e produzem antibióticos que funcionam como mecanismos competitivos auxiliares na eliminação de outros microrganismos (BOLLEN, 1984; STORM et al., 1985).

As algas são microrganismos relativamente simples, sendo as mais primitivas as unicelulares e as outras constituídas por agregados de células similares. Frequentemente são encontradas em meio marinho ou solos úmidos (PELCZAR et al., 1997).

Os protozoários são unicelulares eucarióticos que desempenham um papel importante no controle das populações microbianas no solo. São aeróbios e podem ser encontrados em meios com pH de 3,5 a 9,0 (BRANDÃO, 1992).

2.6.2. CRESCIMENTO BACTERIANO

As células microbianas são constituídas de substâncias químicas, que para o seu crescimento tendem a aumentar em quantidade. Os elementos químicos que constituem a célula microbiana provêm do ambiente e são denominados de nutrientes, os quais são transformados por processos químicos dentro da célula, em constituintes específicos para cada tipo de microrganismo. Esse processo de biossíntese a partir de nutrientes é denominado de anabolismo. A outra demanda vital das células é a energia necessária para o desenvolvimento de atividades como a biossíntese, a mobilidade e o transporte de nutrientes. Essa energia é obtida também do meio, por energia luminosa ou da energia liberada pelas reações químicas e esse processo de obtenção de energia é denominado de catabolismo.

Os nutrientes, que são obtidos do meio ambiente, podem ser divididos em duas classes: os macronutrientes, necessários em grande quantidade e os micronutrientes, necessários em menores quantidades. A Tabela 2.7 mostra os macronutrientes e a forma sob as quais são encontrados na natureza.

Tabela 2.7: Macronutrientes existentes na natureza (MADIGAN et al., 1997)

Elemento	Forma sob a qual o elemento é normalmente encontrado na natureza
carbono	CO ₂ ; compostos orgânicos
hidrogênio	H ₂ O; compostos orgânicos
oxigênio	H ₂ O; O ₂ ; compostos orgânicos
nitrogênio	NH ₃ ; NO ₃ ; N ₂ ; compostos orgânicos
fósforo	PO ₄ ⁻³
enxofre	H ₂ S; SO ₄ ⁻² ; compostos orgânicos de enxofre; sulfetos metálicos
potássio	K ⁺ em solução; sais de potássio
magnésio	Mg ⁺ em solução; sais de magnésio
sódio	Na ⁺ em solução; NaCl; outros sais de sódio
cálcio	Ca ⁺ em solução; CaSO ₄ ; outros sais de cálcio
ferro	Fe ⁻² ou Fe ⁻³ em solução; FeS; Fe(OH) ₃ ; outros sais de ferro

Os principais macronutrientes são o carbono e o nitrogênio, este correspondendo a 12% do peso seco da célula e aquele correspondendo a 50%. Os principais micronutrientes encontrados na natureza são: cromo, cobalto, cobre, manganês, molibdênio, níquel, selênio, tungstênio, vanádio e zinco. Apesar de serem necessários em menor quantidade, eles são tão importantes quanto os macronutrientes para o desempenho das funções celulares, uma vez que cada microrganismo tem uma necessidade nutricional específica (MENDONÇA, 2000).

Para continuar a reprodução e as funções próprias de um organismo, este necessita de fonte de energia, carbono para a síntese de novo material celular e elementos inorgânicos (nutrientes) como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, enxofre e magnésio. Nutrientes orgânicos podem vir a ser requeridos para a síntese celular. Duas das mais comuns fontes de carbono para os microrganismos são a matéria orgânica e o dióxido de carbono. Os organismos que usam o carbono orgânico para a síntese celular são chamados de heterótrofos, já os que utilizam o dióxido de carbono são denominados autótrofos (METCALF & EDDY, 1990).

Os nutrientes, também conhecidos como fatores requeridos para o crescimento bacteriano, diferem de um microrganismo a outro e os principais fatores de crescimento estão apresentados em três classes: aminoácidos, vitaminas, purinas e pirimidinas.

O crescimento bacteriano pode ser dado em termos de números de organismos viáveis como também em termos de massa microbiana. Este crescimento, em termos de números tem quatro fases distintas (Fig. 2.9):

- *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 da sua capacidade de processar o substrato.
- *Fase Estacionária* – na qual a população bacteriana permanece estacionária. Atribuem-se as seguintes razões para este fenômeno: encerramento do substrato ou dos nutrientes necessários para o crescimento; e que o crescimento de novas células decorre da morte de outras.
- *Fase de Decaimento Logarítmico* – durante esta fase, a produção de novas células é excedida pela taxa de morte da bactéria, que usualmente é função da população viável e das características ambientais do meio. Em alguns casos, esta fase é o inverso da fase de crescimento logarítmico.

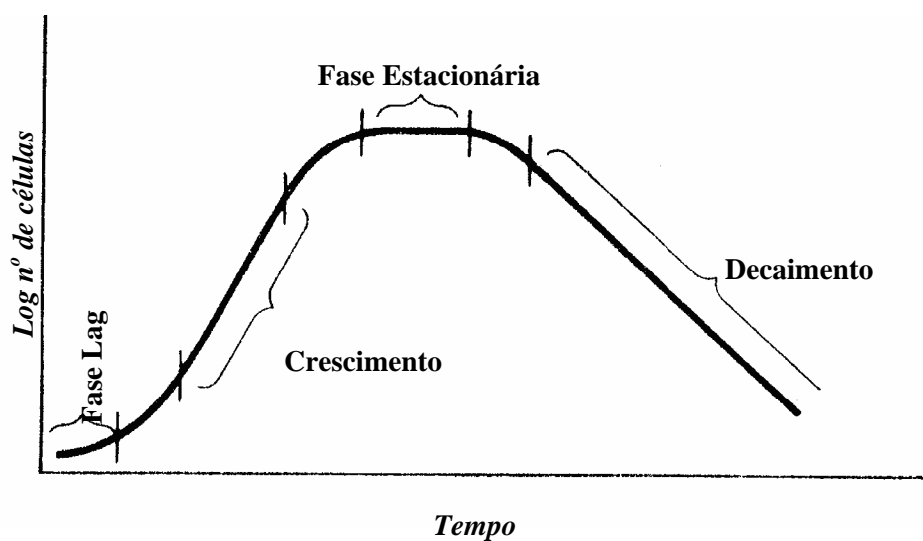


Figura 2.9: Curva típica de crescimento bacteriano (METCALF & EDDY, 1990).

A Figura 2.10 apresenta a curva de crescimento relativo dos microrganismos e sua sucessão no processo de estabilização da matéria orgânica em um líquido no meio ambiente.

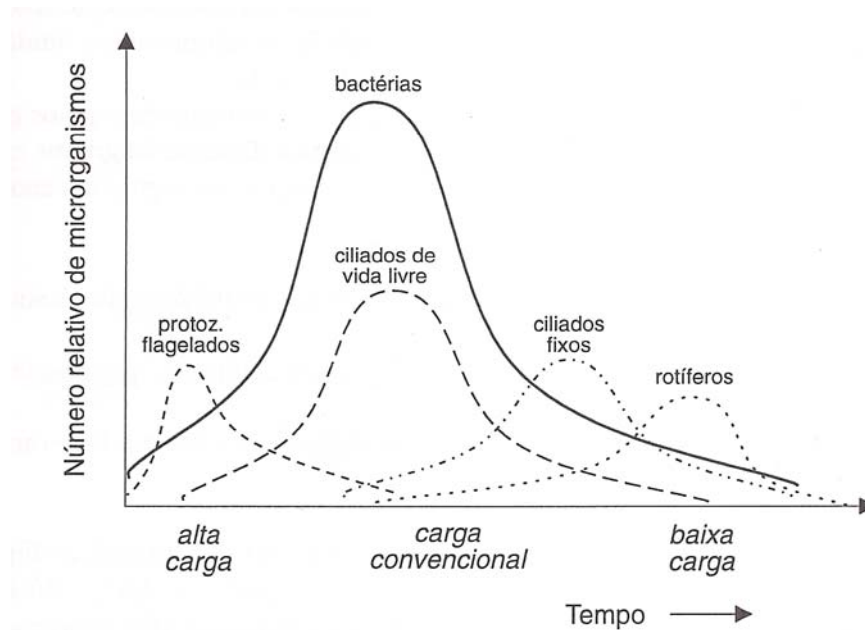


Figura 2.10: Seqüência da predominância relativa dos microorganismos no tratamento de esgotos (modificado de METCALF & EDDY, 1990).

2.6.2.1 Cinética do Crescimento Bacteriano (METCALF & EDDY, 1990)

As classes dos microorganismos importantes no tratamento de águas residuárias tem sido bastante discutida, principalmente no que se refere às características metabólicas e aos padrões de crescimento. Porém, quanto ao controle das condições do ambiente necessárias ao crescimento dos microorganismos pouco tem se dito. Os autores acreditam que as condições do ambiente podem ser controladas pela regulação do pH, da temperatura, da adição de nutrientes e elementos traçadores, da adição ou exclusão de oxigênio e da mistura destes de forma apropriada. Assumindo que as condições do ambiente são controladas adequadamente, a estabilização efetiva dos resíduos pode ser medida controlando a taxa de crescimento dos microorganismos.

Para certificar que os microorganismos crescerão, eles devem permanecer no sistema o tempo suficiente para se reproduzir. Este período depende da taxa de crescimento, que está diretamente relacionada com a taxa em que eles metabolizam ou utilizam os nutrientes presentes no resíduo. Assumindo que as condições do ambiente são adequadamente controladas, a estabilização efetiva pode ser certificada pelo controle da taxa de crescimento dos microorganismos.

A taxa de crescimento bacteriano é função do seu número, massa ou concentração em um dado instante. Matematicamente, tal relação pode ser expressa como:

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X \quad (2.7)$$

Onde:

X = concentração de microorganismos (mg/L);

μ = taxa de crescimento específica (dias⁻¹);

t = tempo (dias)

No entanto, é sabido que o crescimento bacteriano é função da disponibilidade de nutrientes no meio. Com a limitação dos nutrientes e do substrato, essenciais ao crescimento bacteriano, haverá uma depleção e o crescimento poderá cessar. Em uma cultura contínua o crescimento é limitado. Experimentalmente, tem sido encontrado que o efeito limitante do substrato e do nutriente pode ser frequentemente definido de forma adequada usando a seguinte expressão proposta por MONOD (1949).

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \quad (2.8)$$

Onde:

- μ = taxa de crescimento específico no tempo (*tempo*⁻¹);

- μ_m = taxa de crescimento máximo específico no tempo (*tempo*⁻¹);

- S = concentração do substrato limitante de crescimento na solução (*massa por unidade de volume*);

- K_s = concentração do substrato a uma taxa de crescimento máximo constante, (*massa por unidade de volume*), correspondente à velocidade média.

O efeito da concentração de nutrientes na taxa de crescimento específico está mostrado no gráfico da Figura 2.11.

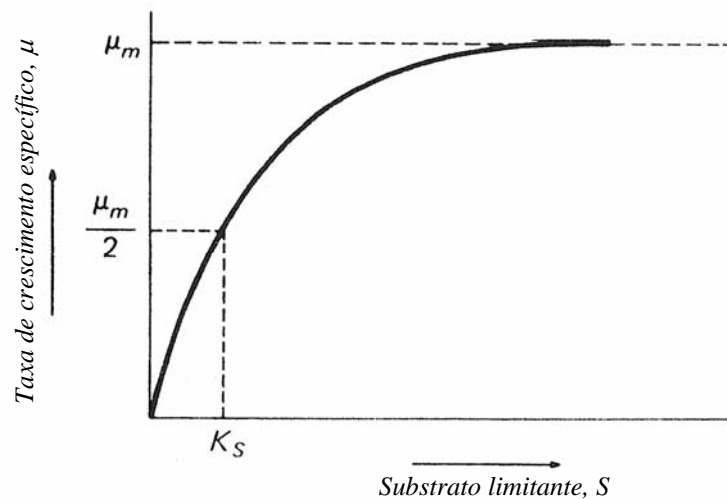


Figura 2.11: Efeito da concentração de nutrientes limitantes na taxa de crescimento específico (METCALF & EDDY, 1990).

2.6.3. 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.

A Conferência sobre Adesão Microbiana (*Dahlen Conference* – Berlim, 1984) estabeleceu que biofilme é uma coleção de microrganismos e seus produtos extracelulares ligados a uma superfície sólida (viva ou inanimada) denominada substrato.

A formação do biofilme sobre uma determinada superfície é um fenômeno dinâmico resultante de processos físicos, químicos e biológicos que, basicamente, podem ser separados nos seguintes estágios (CHARACKLIS, 1981):

- Transporte de moléculas orgânicas e células microbianas para a superfície úmida, pois uma vez que a superfície limpa entra em contato com um meio aquoso, o primeiro mecanismo a ocorrer é a migração de partículas (moléculas orgânicas e células microbianas) em direção a esta superfície.
- Adsorção de moléculas orgânicas para a superfície úmida promovendo uma superfície condicionada.

- Adesão de células microbianas à superfície condicionada, a qual depende das interações físico-químicas entre o substrato, a superfície do microrganismo e os polímeros extracelulares que constituem o material adesivo dos microrganismos.
- Metabolismo das células microbianas aderidas, assimilando os nutrientes do meio e promovendo o crescimento do biofilme.
- Desprendimento do biofilme, uma vez que à medida que o filme se torna mais espesso, a tensão cisalhante exercida pelo fluido em contato com o biofilme aumenta. Também, devido ao aumento da espessura, ocorre uma limitação no transporte difusional de nutrientes para as camadas mais profundas do biofilme, que se torna mais fraco e desprende-se.

O acúmulo de biofilme em um sistema de transporte de fluidos provoca um maior atrito entre o biofilme e o fluido em movimento, fazendo com que ocorra uma maior perda de carga em relação ao sistema sem biofilme. Portanto, o efeito da colonização microbiana é aumentar a resistência ao fluxo, podendo resultar em colmatção do sistema drenante devido à atividade microbiológica.

Segundo XAVIER et al. (2002), a formação e a acumulação de biofilmes é resultado de vários processos de natureza física e biológica. Dentre eles o autor considera:

- Transporte de células livres de meio líquido para uma superfície sólida e sua subsequente fixação.
- Crescimento e divisão de células fixas à custa de nutrientes provenientes do líquido circundante, conjuntamente com a produção e excreção da matriz de polímeros extracelulares.
- Fixação de células bacterianas flutuantes (e outras partículas), contribuindo para a acumulação do biofilme.
- Liberação de material celular segundo dois mecanismos diferentes: (a) erosão (perda de células individuais) ou (b) perda de agregados maiores.

A Figura 2.12 mostra os processos envolvidos na formação e crescimento de biofilmes, segundo XAVIER et al., (2002).

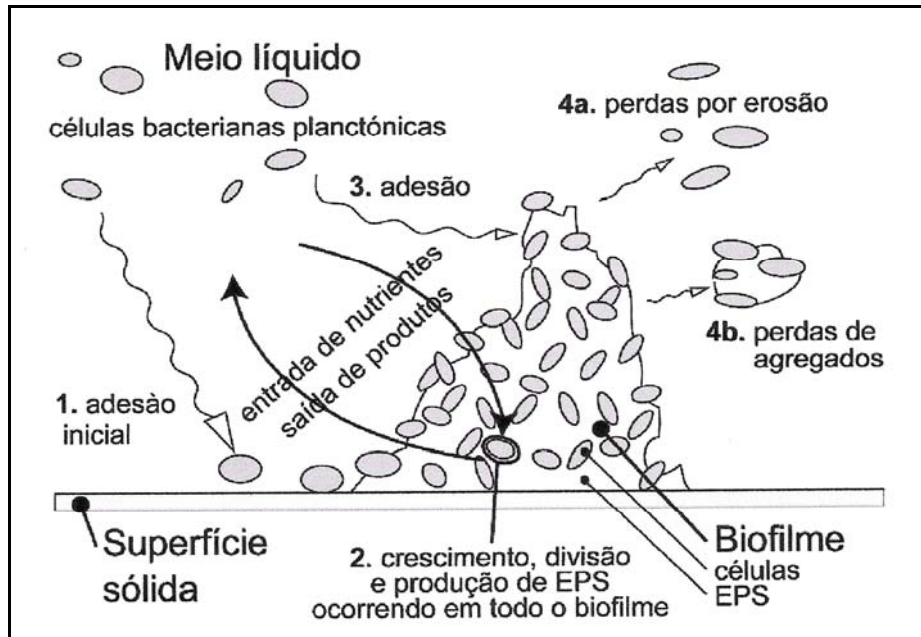


Figura 2.12: Processo de formação e crescimento de biofilmes (XAVIER et al., (2002).

Após a fixação inicial das células microbianas (processo 1), o resultado dos processos ocorrentes (processos 2, 3 e 4) definem tanto a estrutura como a atividade do biofilme. Estes processos incluem todos os fatores físicos envolvidos no desenvolvimento de biofilmes e alguns fatores biológicos, tais como crescimento e divisão celular e produção e excreção de substâncias poliméricas extracelulares.

2.6.3.1. Formação de Biofilme em Geotêxteis

Segundo MENDONÇA (2000), as propriedades físicas e químicas da superfície em contato com o fluido são muito importantes na formação do biofilme. No caso de geotêxteis, além do polímero empregado na sua fabricação, a estrutura física da manta também deve exercer uma forte influência sobre o fenômeno, devendo ser determinante a influência de características como: a distância entre as fibras, a porosidade, a superfície específica das fibras e a espessura da manta. Uma vez que os geotêxteis podem ser fabricados com diferentes polímeros e sob diferentes processos, esperam-se comportamentos diferentes quanto à formação de biofilme dependendo do produto utilizado.

KOERNER & KOERNER (1990) verificaram a tendência a se obstruir filtros de geotêxteis e de solo natural utilizando seis percolados provenientes de aterros sanitários. Foram ensaiados noventa e seis colunas-teste com 100 mm de diâmetro, sob condições aeróbias e anaeróbias,

‘para quatro diferentes geotêxteis, com solo (areia) e sem solo. Testes de fluxos com carga variável foram conduzidos em seis meses, observando as seguintes tendências (Tab. 2.8):

Tabela 2.8: Resultados de testes de fluxo em geotêxteis (KOERNER & KOERNER, 1990).

Nível de Colmatação	Redução de fluxo (%)	Número de colunas colmatadas	
		Total	%
Nenhum	0 – 25	6	7
Pequeno	25 – 50	4	4
Moderado	50 – 75	37	38
Alto	75 – 95	35	36
Severo	95 – 100	14	15

Os resultados apresentados na Tabela 2.8 mostram que 15% das colunas ensaiadas apresentaram redução da capacidade de fluxo do sistema da ordem de 95 a 100% , sendo que 38% das colunas ensaiadas apresentaram perda na capacidade de fluxo do sistema da ordem de 50 a 75%, considerada pelo autor como moderada.

FOURIE et al. (1994) realizaram ensaios fazendo percolar o fluido coletado em sistemas drenantes de aterros sanitários em permeâmetro, utilizando diferentes geotêxteis tecidos, com gramaturas variando entre 128 e 232 g/m², e não tecidos, com gramaturas de 150 g/m². Os resultados indicaram uma forte queda da capacidade drenante do sistema (Fig. 2.13), em função da formação de biofilme, o que foi comprovado por observações microscópicas.

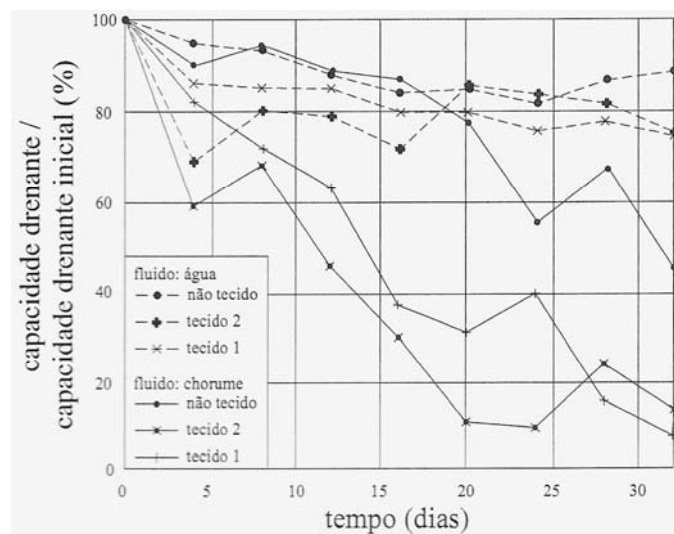


Figura 2.13: Variação da capacidade drenante de uma coluna de filtração percolada com chorume (FOURIE et al, 1994).

Segundo MLYNAREK & ROLLIN (1995) pode-se distinguir dois tipos de desenvolvimento de biofilme: crescimento de biofilme dentro do geotêxtil e crescimento de uma película de biofilme na superfície do geotêxtil, nas condições aeróbias ou anaeróbias. Segundo os autores, o crescimento do biofilme dentro do geotêxtil pode ser associado, em geral, à porosidade e à abertura dos geotêxteis. Quanto a esses aspectos, podem-se observar os seguintes fenômenos:

- Retenção de bactérias dentro de aglomerações de fibras, indicando que a distância entre fibras é um fator importante para o desenvolvimento do biofilme.
- Adesão de bactérias ao redor de quase toda a fibra.
- Adesão pontual de uma bactéria a fibra.

Os fenômenos acima mencionados podem conduzir ao início da formação de biofilme dentro da estrutura do geotêxtil. As Figuras 2.14 e 2.15 mostram os dois tipos de crescimento de biofilme apontados por MLYNAREK & ROLLIN (1995).

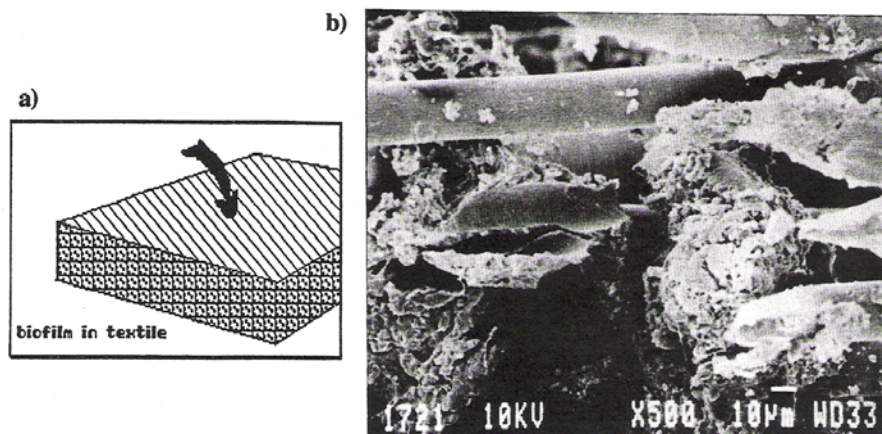


Figura 2.14: Crescimento do biofilme dentro do geotêxtil (MLYNAREK & ROLLIN, 1995).

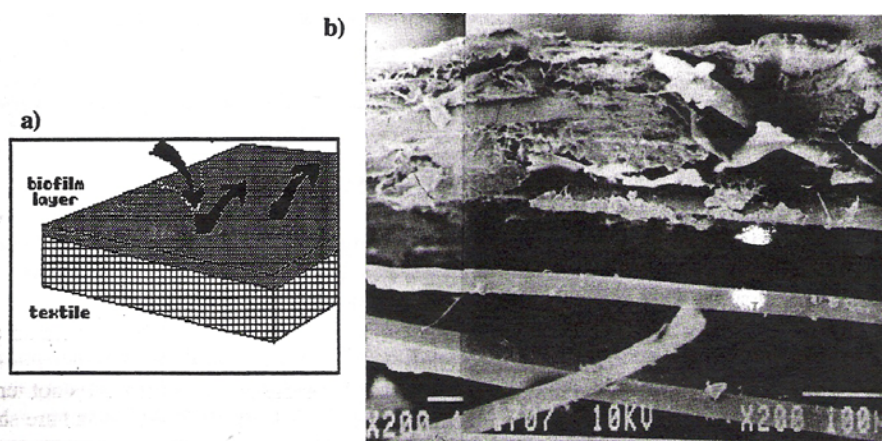


Figura 2.15: Crescimento do biofilme na superfície do geotêxtil (MLYNAREK & ROLLIN, 1995).

MENDONÇA (2002) realizou uma campanha experimental com o objetivo de simular o fenômeno de colmatação em geotêxteis por biofilme de ocre. Foram utilizados três tipos de geotêxteis, sendo um tecido e dois não tecidos e um filtro de areia. O experimento constituiu em fazer percolar, sob carga hidráulica constante, um fluido composto de água, ferro e outros nutrientes por uma coluna de filtração composta de solo protegido, geotêxtil e material drenante. Foram medidos a vazão e o teor de ferro no fluido percolante ao longo do tempo. Os resultados da pesquisa mostraram que apesar da intensa formação do biofilme de ocre entre as fibras dos geotêxteis, reduzindo os espaços disponíveis para a passagem da água, tal fato não foi suficiente para provocar a queda da capacidade drenante do sistema solo-filtro durante o tempo de ensaio.

MATERIAL E MÉTODOS

3

Neste capítulo, são apresentadas as metodologias e o material utilizado nos ensaios de laboratório propostos para este trabalho, buscando representar o fenômeno de colmatção biológica em sistemas dreno-filtrantes em aterros sanitários. A primeira condição buscou representar o sistema dreno-filtrante em pleno funcionamento, avaliando as condições que favorecem o fenômeno de colmatção biológica e o período no qual esta se efetiva. A segunda condição consiste na avaliação do processo de colmatção quando o meio filtrante está apenas saturado com chorume, sem fluxo, o que representaria épocas de seca, bem como a situação em áreas do aterro por onde, em algum instante, não houvesse percolação de chorume. Também são apresentados os procedimentos utilizados para as análises químicas, microbiológicas e microscópicas, bem como a simulação do crescimento bacteriano proposta por MONOD (1949) e o ensaio de aumento da carga hidráulica para avaliação da capacidade de recuperação do potencial drenante dos geotêxteis.

3.1. MATERIAL

3.1.1. GEOTÊXTIL

Para a realização dos ensaios dessa pesquisa foram utilizados geotêxteis não-tecidos, agulhados de filamentos contínuos, 100% poliéster, quais sejam: Vêu de Poliéster (GTX), Bidim OP30 (GTY) e Bidim OP60 (GTZ). Os geotêxteis utilizados nessa pesquisa foram fornecidos pela Bidim - BBA. A Tabela 3.1 apresenta as características relevantes dos geotêxteis utilizados.

Tabela 3.1: Características técnicas dos geotêxteis analisados (catálogo de fabricante).

Geotêxtil	Gramatura (g/m ²)	Permeabilidade Normal (cm/s)	Espessura (mm)	Transmissibilidade (cm ² /s)	Abertura de Filtração (mm)*
GTX	100	4,0·10 ⁻¹	1,4	-	0,153
GTY	300	2,2·10 ⁻¹	2,6	0,021	0,114
GTZ	600	2,2·10 ⁻¹	4,5	0,035	0,600

Nota: (*) Ensaio hidrodinâmico (MATHEUS, E., 1997).

Como a manta de geotêxtil apresenta áreas de gramatura variável, para os ensaios desenvolvidos neste trabalho utilizaram-se espécimes, cujas gramaturas apresentassem variações máximas de 10 %, para mais ou para menos, em relação à gramatura especificada no catálogo do fabricante. Os valores das gramaturas dos geotêxteis ensaiados estão apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2: Gramatura dos geotêxteis utilizados nos ensaios de colmatação com fluxo.

Geotêxtil	Gramatura (g/m ²) para cada período de incubação (dias)				
	15	30	45	60	90
GTX₁	106,25	106,25	104,68	103,77	106,25
GTX₂	104,68	103,12	101,56	105,35	104,68
GTX₃	105,35	105,35	103,12	105,35	106,25
GTY₁	306,25	289,93	304,68	301,89	309,37
GTY₂	301,89	297,50	301,89	300,31	310,06
GTY₃	297,50	300,31	296,87	305,03	296,87
GTZ₁	585,94	593,75	589,06	595,91	589,06
GTZ₂	593,75	593,75	585,94	603,77	593,75
GTZ₃	603,12	597,48	585,67	597,48	609,37

Tabela 3.3: Gramatura dos geotêxteis utilizados nos ensaios de colmatação por imersão.

Geotêxtil	Gramatura (g/m ²) para cada período de incubação (dias)				
	15	30	45	60	90
GTX	101,56	101,56	103,12	104,68	100,00
GTY	312,50	310,00	315,62	297,50	300,00
GTZ	585,67	589,06	592,19	598,44	603,12

3.1.2. CHORUME

O chorume utilizado neste trabalho foi coletado em uma célula experimental construída no Aterro do Jóquei Clube, em Brasília, a qual foi construída por SILVA (2004) para desenvolvimento da sua tese de doutorado.

A coleta do chorume foi realizada no mês de outubro de 2004 para a realização dos ensaios de colmatação por imersão, como também para o ensaio de colmatação com fluxo nos períodos de operação de 15, 30 e 45 dias. Em março de 2005 fez-se uma nova coleta de chorume para a realização dos ensaios com tempo de operação de 60 dias e em julho de 2005 fez-se a coleta do chorume que foi utilizado no ensaio de colmatação com fluxo, com tempo de operação de 90 dias.

Depois de realizada a coleta, o chorume foi levado para o Laboratório de Geotecnia retirando-se uma amostra para caracterização de parâmetros físico-químicos: DQO; nitrato; amônia; ortofosfato e pH, sendo então o restante armazenado em *freezer*, para sua posterior utilização.

Após iniciado o ensaio de colmatação com fluxo, como o chorume poderia interagir com o ambiente, sua caracterização passou a ser quinzenal. No caso do ensaio de colmatação por imersão, a caracterização do chorume foi realizada no início e no final de cada ensaio. A temperatura do chorume, durante os ensaios, apresentou-se na faixa de 25 a 28 °C.

3.1.3. AREIA

Devido ao processo de formação do chorume, há sólidos em suspensão. Dessa forma, para eliminar a presença desses sólidos, o que provocaria a colmatação física do geotêxtil, o chorume atravessou um filtro de areia antes de percolar através do geotêxtil. Escolheu-se

preparar o filtro de areia misturando-se 50 % em peso de areia fina e 50 % em peso de areia média. As curvas granulométricas desta areia estão apresentadas na Figura 3.1.

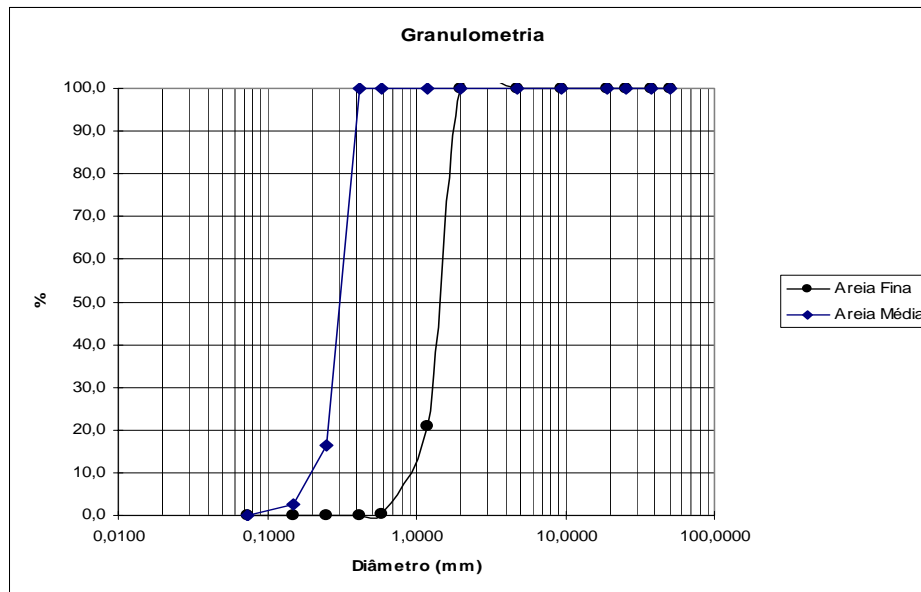


Figura 3.1: Curva granulométrica da areia.

3.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

3.2.1. ENSAIO DE COLMATAÇÃO COM FLUXO

Esse ensaio visa representar o fluxo de chorume através do geotêxtil para um sistema drenofiltrante em aterro sanitário, avaliando-se o potencial de colmatação biológica ao qual o mesmo está submetido. Para a realização do ensaio, confeccionou-se um sistema constituído de três reservatórios, um filtro de areia e nove permeâmetros.

O equipamento, apresentado nas Figuras 3.2 e 3.3, está montado no laboratório de Geotecnia Ambiental (UnB), onde, também, foi feita a análise granulométrica da areia que constituiu o filtro (Fig. 3.1). Por outro lado, as análises do chorume foram realizadas no Laboratório de Análise de Águas do Departamento de Recursos Hídricos (UnB) e as análises de microscopia e microbiologia ocorreram no Laboratório de Microscopia Eletrônica, do Departamento de Biologia (UnB), e no Laboratório de Microbiologia do Solo, da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (UnB), respectivamente.

O passo inicial desse ensaio consiste em armazenar o chorume no reservatório primário, antes do filtro de areia. Ao iniciar o ensaio, o chorume percola por todo o sistema, passando primeiramente pelo filtro de areia [1] – (Fig. 3.2) para retenção de partículas sólidas, o que poderia provocar a colmatção física do dreno, não sendo esse o objetivo do presente estudo.

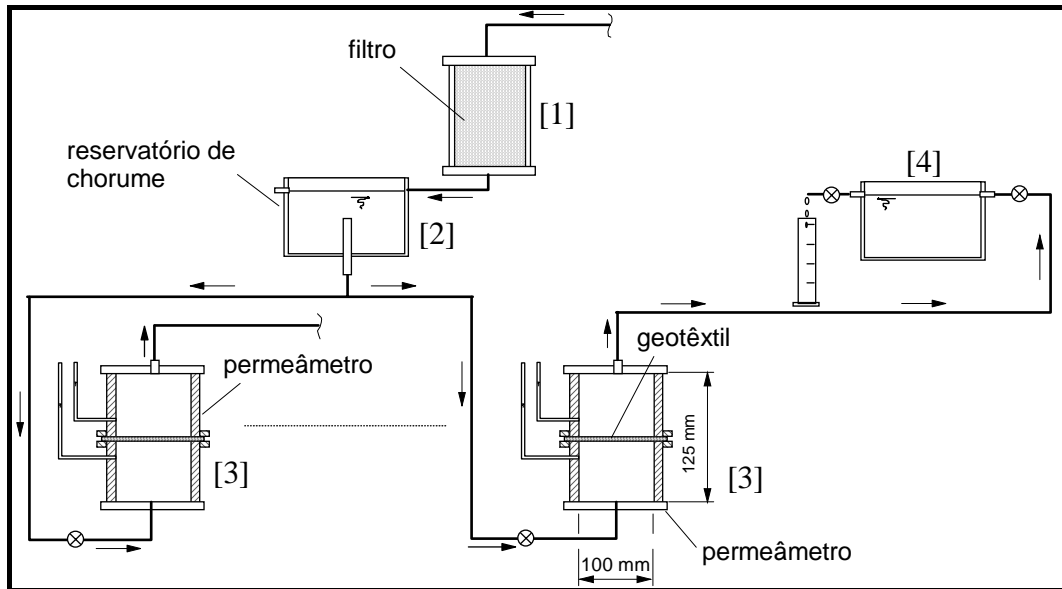


Figura 3.2: Equipamento para ensaio de colmatção com fluxo.

Ao sair do filtro de areia, o chorume é direcionado para o reservatório secundário [2], que abastece os permeômetros [3] a uma velocidade baixa e constante, buscando promover a formação do biofilme no geotêxtil. Ao sair dos permeômetros o chorume é levado para o reservatório terciário [4] e depois re-circulado ao sistema por meio de uma bomba de aquário até o reservatório secundário [2] (Fig. 3.2).

Cada espécime ensaiado foi submetido a uma carga hidráulica de 15 cm. Os ensaios foram realizados em tempos de observação crescentes (15, 30, 45, 60 e 90 dias) e após o final de cada ensaio foram efetuadas análises químicas, microbiológicas e de microscopia. Durante a realização dos ensaios foram feitas medidas de vazão semanal do fluido que passava pelos permeômetros, com o objetivo de acompanhar a redução de permeabilidade do sistema, o que indiretamente traduz a evolução temporal da colmatção biológica do geotêxtil.

Para cada período analisado (15, 30, 45, 60 e 90 dias), foram ensaiados três espécimes de geotêxtil, de forma a obter maior representatividade dos resultados. O fluxo de chorume alimentou os permeômetros de maneira ascendente para evitar a colmatção por sedimentação de partículas sólidas eventualmente ainda presentes no chorume após a passagem pelo filtro

de areia. O ensaio foi realizado sob carga hidráulica constante e o chorume era re-circulado para o reservatório secundário, que tinha a função de distribuir o fluido para os nove permeômetros instalados no sistema.

Para a exumação dos geotêxteis, foram definidas áreas (Fig. 3.5) para a retirada de amostras: uma central, e uma periférica. Foram retiradas quatro amostras, sendo duas da área central e duas da área periférica do geotêxtil para a realização das análises de microscopia eletrônica de varredura, com o objetivo de avaliar o potencial de colmatção biológica dos geotêxteis e quantificar a DQO (*Demanda Química de Oxigênio*) do meio, de forma a se inferir o crescimento bacteriano no geotêxtil ao longo do tempo. As análises microbiológicas foram realizadas nos geotêxteis que estiveram imersos em chorume (*Ensaio de Colmatção por Imersão*) e, nos submetidos ao fluxo de chorume por 90 dias (*Ensaio de Colmatção com Fluxo*), período este em que praticamente se deu a total colmatção no filtro geotêxtil do ensaio com fluxo.

A Figura 3.3 apresenta a vista do equipamento para ensaio de colmatção com fluxo de chorume montado no Laboratório de Geotecnia Ambiental da UnB. A Figura 3.4 apresenta em detalhe o permeômetro utilizado nos ensaios de colmatção com fluxo.



Figura 3.3: Ensaio de colmatção com fluxo de chorume montado no Laboratório de Geotecnia Ambiental da UnB.

3.2.2. ENSAIO DE COLMATAÇÃO POR IMERSÃO

O objetivo deste ensaio é conhecer o potencial de formação do biofilme de bactérias em um geotêxtil saturado com chorume, nas condições que representem o ambiente em uma célula de aterro sanitário. Para isto, foram colocados três espécimes de gramaturas diferentes (100, 300 e 600 g/cm²), com 90 mm de diâmetro em um recipiente fechado. Posteriormente, o geotêxtil foi saturado com chorume, deixando apenas uma pequena lâmina de líquido acima de sua superfície, isto porque os microrganismos poderiam preferir permanecer no líquido e não colonizarem as fibras do geotêxtil, não formando, assim, o biofilme que é objetivo deste estudo.

Em seguida, foi aplicado um vácuo de 500 mmHg por 20 minutos no recipiente, para retirar, ao máximo, o oxigênio do ambiente, de forma a simular uma condição anaeróbia. Esta condição seria obtida também devido a remoção do oxigênio dissolvido, inicialmente presente no chorume, pelas bactérias aeróbias. Manteve-se, no recipiente – Figura 3.6, uma lâmina d'água constante, buscando, com isso, introduzir ao ambiente uma condição de umidade, própria de um aterro sanitário.



Figura 3.6: Recipiente utilizado no ensaio de colmatação por imersão.

Após os tempos de operação pré-definidos (15, 30, 45, 60 e 90 dias), o geotêxtil foi examinado em microscópio eletrônico de varredura para avaliar o comprometimento do seu potencial drenante pela formação do biofilme. O chorume foi analisado prévia e

posteriormente, para conhecer todas suas características químicas (DQO, pH, nitrogênio (nitrato e amônia) e fósforo (ortofosfato)). Nos geotêxteis que ficaram saturados em chorume por 90 dias, foram realizados ensaios microbiológicos com o intuito de identificar e quantificar os microrganismos responsáveis pelo biofilme formado. A Figura 3.7 representa o equipamento utilizado neste ensaio.



Figura 3.7: Ensaio de colmatação por imersão.

3.3. ANÁLISE QUÍMICA DO CHORUME

Análises químicas para caracterizar o chorume foram realizadas, buscando aferir a quantidade de nutrientes e sua conseqüente carga orgânica. As análises foram realizadas no início e no final de cada ensaio, como também em intervalos determinados de 15 dias. As análises realizadas foram: DQO, ortofosfato (fósforo reagente), amônia, nitrato e pH. Todas as análises são baseadas em métodos colorimétricos, utilizando equipamentos e reagentes produzidos pela HACH Company, seguindo metodologias determinadas por APHA (1992). Porém, no geotêxtil foram feitas apenas análises de DQO para se inferir o crescimento bacteriano. A Tabela 3.4 resume os métodos utilizados nas análises.

Tabela 3.4: Métodos utilizados nas análises de chorume.

Elemento	Método
Nitrato	Método de Redução por Cadmiun N° 8039
Amônia	Método de Nessler N° 8038
Ortofosfato	Método Phosver 3 N° 8048
DQO	Método de Digestão em Dicromato N°. 8000

A Figura 3.8 apresenta o espectrofotômetro, equipamento onde foi feita a determinação dos teores obtidos nas análises físico-químicas.

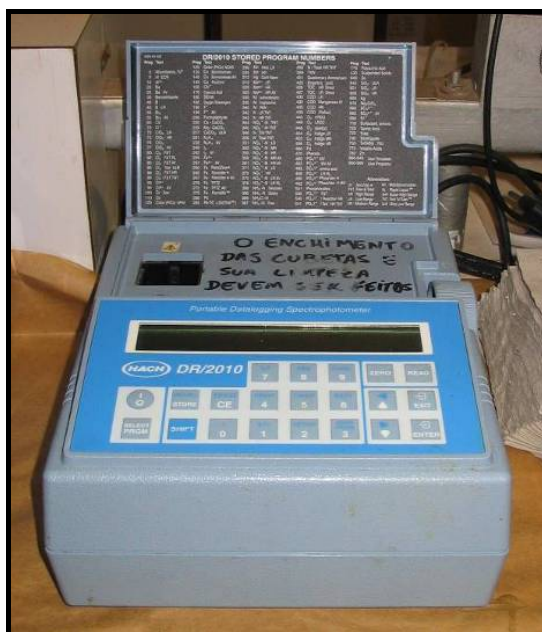


Figura 3.8: Espectrofotômetro.

3.3.1. DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO - DQO

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um teste muito utilizado para medir a quantidade de compostos orgânicos existentes em um determinado meio. O método baseia-se no fato de que a quase totalidade dos compostos orgânicos pode ser oxidada pela ação de um poderoso agente oxidante sob condições ácidas, sendo o resultado expresso em termos de quantidade total de oxigênio necessário para a oxidação da matéria orgânica em dióxido de carbono (CO₂) e água. Para a realização do ensaio de DQO utiliza-se o equipamento mostrado na Figura 3.9, no qual se deixa o reagente já inoculado com 2 mL da amostra a ser aferida a 150°C, por 2 horas.

As tonalidades apresentadas nos reagentes para ensaio de DQO, após o término de 2 horas de aquecimento, apresentam variações de verde de acordo com os teores de demanda química de oxigênio. As tonalidades verdes mais fortes indicam teores mais elevados (Fig. 3.10).



Figura 3.9: Aparelho de aquecimento das amostras para determinação da DQO.

As tonalidades apresentadas nos reagentes para ensaio de DQO, após o término de 2 horas de aquecimento, apresentam variações de verde de acordo com os teores de demanda química de oxigênio. As tonalidades verdes mais fortes indicam teores mais elevados (Fig. 3.10).

Na caracterização do chorume utilizou-se a metodologia acima referida. No entanto, para a quantificação da DQO presente no geotêxtil isso não foi possível, uma vez que o reagente, por ser muito ácido, corroeu todo o geotêxtil. Assim, para que se pudesse quantificar a DQO foi necessário diluir uma pequena amostra de geotêxtil com 1 cm² em 9 mL de água destilada para extrair do geotêxtil a fração orgânica contida neste.



Figura 3.10: Diferentes tonalidades das amostras inoculadas.

3.3.2. NITRATO E AMÔNIA

O controle do nitrogênio torna-se importante em projetos e operações de estações de tratamento de águas residuárias, uma vez que este controla o grau de purificação produzido em tratamentos biológicos. Segundo SAWYER (1994), o nitrogênio originalmente presente em análises químicas de resíduos e de águas poluídas apresenta-se na forma de nitrogênio orgânico e amônia. Com o passar do tempo, este nitrogênio orgânico é convertido, gradualmente, a nitrogênio amoniacal e mais tarde, em condições aeróbias, a amônia é oxidada a nitrito e este a nitrato. Na análise de nitratos, o metal cádmio (Cd) reduz os nitratos presentes na amostra para nitritos. Em um ambiente ácido (reagentes) ocorre uma série de reações dando origem a uma tonalidade âmbar para a amostra, que é detectada pela unidade ótica de leitura, que fornece os teores de nitrato.

Para a determinação do teor de nitrato no chorume fez-se uma diluição de 10 vezes, para atingir a faixa de leitura do espectrofotômetro. Para a determinação do teor de amônia no chorume fez-se uma diluição de 1000 vezes.

3.3.3. ORTOFOSFATO

Os microrganismos envolvidos nos processos de tratamentos biológicos requerem fósforo para reprodução e para a síntese de novas células. A determinação de ortofosfato é importante na avaliação do potencial de produtividade biológica dos microrganismos presentes no chorume.

Para a determinação do teor de ortofosfato no chorume, utilizou-se o método colorimétrico, diluindo-se o chorume 100 vezes, para atingir a faixa de leitura do espectrofotômetro.

3.3.4. PH

O potencial hidrogeniônico (pH) expressa a intensidade de acidez ou de alcalinidade de uma determinada solução, representando a concentração dos íons hidrogênio. Os processos físico-químicos que controlam a retenção ou a liberação no solo de determinados elementos

dissolvidos no chorume podem ser afetados pelo pH, tanto do solo quanto do chorume. A Figura 3.11 apresenta o aparelho utilizado no Laboratório de Análise de Águas da UnB para determinação de pH.

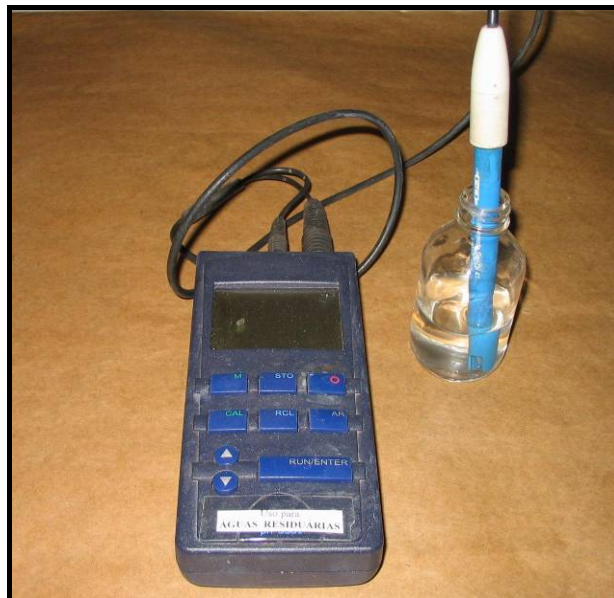


Figura 3.11: Aparelho para leitura de pH

De acordo com a fase de decomposição e conseqüente idade em que se encontre a massa de lixo, o pH pode estar na escala ácida ou na alcalina. Na fase anaeróbia ácida o chorume apresenta valores baixos de pH. Em aterros jovens o pH normalmente é baixo tornando o ambiente alcalino com o passar do tempo.

3.4. ANÁLISE MICROBIOLÓGICA

A análise microbiológica tem como objetivo identificar e quantificar os microrganismos formadores do biofilme no geotêxtil. Optou-se por fazer esta análise apenas nos geotêxteis que obtiveram uma maior perda de permeabilidade no ensaio com fluxo, onde ocorreu maior colmatação, e nos geotêxteis dos ensaios por imersão, com tempo de ensaio de 90 dias. Portanto, uma vez encerrado o período de ensaio cortou-se uma amostra de 1 cm² da região central do geotêxtil, para análise no Laboratório de Microbiologia do Solo da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília.

Considerou-se que os ensaios realizados, tanto o de colmatação com fluxo quanto o por imersão, estavam em condições anaeróbias. Fez-se a contagem dos microrganismos

relacionando-a com a área superficial em planta das amostras de geotêxtil ensaiadas. Os microrganismos identificados estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Importância e técnica de identificação dos microrganismos analisados.

MICROORGANISMO	IMPORTÂNCIA	TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO
<i>Bactéria</i>	Bactérias totais presentes no chorume.	Plaqueamento em profundidade (“pour plate”), com resultado expresso em UFC/mL
<i>Amilolítico</i>	São microrganismos degradadores de amido.	Plaqueamento em profundidade (“pour plate”), com resultado expresso em UFC/mL
<i>Amonificador</i>	São degradadores de nitrogênio orgânico e produtoras de amônia, representam a importância desse nutriente no desenvolvimento do biofilme.	Tubos Múltiplos
<i>Solubilizador de Fosfato</i>	Solubilizam fosfato insolúvel em solúvel, sendo bio-indicadores da quantidade de fósforo disponível para o crescimento bacteriano.	Plaqueamento em profundidade (“pour plate”), com resultado expresso em UFC/mL
<i>Celulolítico</i>	São microrganismos degradadores de celulose.	Plaqueamento em profundidade (“pour plate”), com resultado expresso em UFC/mL
<i>Oxidante de Amônia</i>	São microrganismos oxidantes da amônia.	Tubos Múltiplos
<i>Oxidante de Nitrito</i>	São oxidantes do nitrito.	Tubos Múltiplos

Para o ensaio de colmatção com fluxo analisaram-se três amostras de cada tipo de geotêxtil (GTX, GTY e GTZ) e para o ensaio de colmatção por imersão analisou-se apenas uma, perfazendo um total de doze amostras. Para cada amostra foi feita uma série de três repetições, com o objetivo de melhor aferir os resultados da contagem dos microrganismos e para cada repetição foram preparadas seis diluições (10^{-1} a 10^{-6}). Todo esse procedimento foi adotado para os sete grupos funcionais de microrganismos analisados, perfazendo um total de 1512 dados de contagem de microrganismo.

No preparo da diluição da amostra (Fig. 3.12), foi utilizada uma amostra de 1 cm^2 de área, diluída em 99 mL de uma solução salina, denominada solução de Ringer para a obtenção das múltiplas diluições a serem utilizadas na contagem dos microrganismos. Potes de vidro de 100 mL, contendo 99 mL de Solução Salina, foram colocados em autoclave por 30 minutos a 120°C . Após a esterilização do material, iniciou-se a diluição em série e plaqueamento utilizando-se os meios de cultura supracitados. As placas e tubos inoculados foram incubados por um período variável (4 - 60 dias), de acordo com o grupo de microrganismo estudado.

Após o período de incubação, as colônias foram contadas e utilizou-se a seguinte fórmula para a quantificação da densidade microbiana:

$$DM = (UFC \times 10 \times \text{diluição}) / A$$

Onde:

DM = Densidade Microbiana

UFC = Unidade Formadora de Colônia

A = Área de geotêxtil (1 cm²)

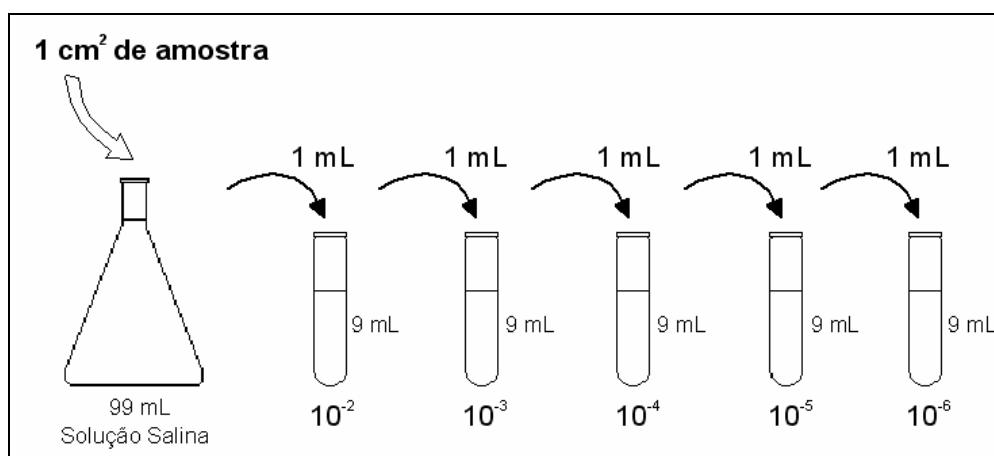


Figura 3.12: Esquema representativo do procedimento das diluições em série.

A Tabela 3.6 apresenta a formulação da solução de Ringer.

Tabela 3.6: Formulação da solução de Ringer.

REAGENTE	QUANTIDADE
NaCl	8.50 g/L
KCl	0.25 g/L
CaCl ₂	0.30 g/L
NaHCO ₃	0.20 g/L
Água Destilada	1.000 mL

Após misturar todos os componentes apresentados na Tabela 3.6, promove-se a agitação dos mesmos, até que o sal esteja completamente dissolvido e, posteriormente, a solução é esterilizada em autoclave a 121°C por 20 minutos. Na realização das análises dos microrganismos, utilizou-se a autoclave (Fig. 3.13) para a esterilização dos meios de cultura e soluções utilizadas em seu preparo, como também para esterilizar tubos, placas, pipetas,

beckers, enfim todo material utilizado nas análises. As placas de Petri foram esterilizadas em estufa a 120 °C por pelo menos 3 horas.



Figura 3.13: Autoclave utilizado na esterilização do material.

A inoculação do material a ser analisado em placas de Petri e em tubos foi realizada em uma câmara de fluxo laminar (Fig. 3.14) para evitar ao máximo o risco de contaminação das amostras. Todos os reagentes e meios de cultura utilizados tiveram seus valores de pH aferidos.



Figura 3.14: Câmara de fluxo laminar para análise microbiológica (Capela).

Foram selecionados sete meios para contagem de microrganismos, e as formulações destes são apresentadas nas Tabelas de 3.7 a 3.13.

1) Amilolítico (PONTECORVO et al., 1953)

No preparo do meio misturam-se todos os reagentes e procede-se ao ajuste do pH do meio para 7,0. O bactoagar é dissolvido anteriormente para ser incorporado ao meio, completando a solução com um litro de água destilada. A seguir, coloca-se a solução num erlemeyer de 2 litros e esteriliza-se em autoclave a 121 °C por 20 minutos. Decorrido este período, colocam-se aproximadamente 20 mL da solução, ainda morna, em placas de Petri, aguardando-se o tempo necessário para o endurecimento do meio.

O passo seguinte foi inocular 0,1 mL de cada diluição preparada no centro de cada placa e homogeneizar com o auxílio de uma alça de Drigalski. Após o crescimento das colônias (aproximadamente uma semana), para se observar a degradação de amido, adiciona-se uma solução à base de iodo (lugol) à superfície do meio de cultura, removendo-se o excesso e, em seguida, contam-se as colônias envolvidas por um círculo, denominado halo. As formadoras de halo transparente são as degradadoras de amido. Os reagentes utilizados para o preparo desse meio de cultura são mostrados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Reagentes utilizados para o meio de cultura Amilolítico (PONTECORVO et al., 1953).

REAGENTE	QUANTIDADE
Amido solúvel	10 g
Caseína	10 g
Glucose	1 g
Na ₂ HPO ₄	3 g
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,1 g
Bacto Agar	15 g
Água Destilada	1,000 mL

A Figura 3.15 mostra as placas inoculadas e prontas para a aplicação do lugol nas diluições de 10⁻² a 10⁻⁶.



Figura 3.15: Placas de contagem de amilolíticos antes da aplicação do lugol.

Na Figura 3.16, mostram-se as placas inoculadas após a aplicação do lugol, e as colônias de microrganismos envolvidas pelo halo.

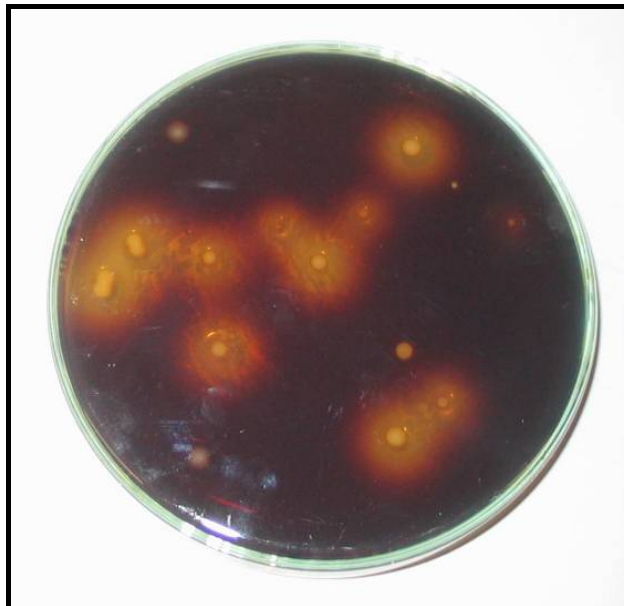


Figura 3.16: Placas de contagem de amilolíticos após a aplicação do lugol.

2) Celulolíticos (WOOD, 1980)

Inicialmente, faz-se a preparação do extrato de solo, deixando em suspensão o solo com água destilada (1:1) – 1 kg solo para 1 litro de água destilada. Agita-se bem e após a decantação do

solo filtra-se a solução com papel filtro. Os reagentes da Tabela 3.8 são adicionados à solução.

Tabela 3.8: Reagentes utilizados para o meio de cultura Celulolítico (WOOD, 1980).

REAGENTE	QUANTIDADE
Carboximethyl cellulose	5 g
NO_3NH_4^+	1 g
Solução salina (0,8 %)	50 mL
Extrato de solo	950 mL

Depois, deve-se colocar o meio de cultura em um erlemeyer de 2 litros e esterilizar em autoclave a 121 °C por vinte minutos. Após retirar da autoclave, coloca-se aproximadamente 20 mL da solução em placas de Petri. Após inocular a amostra no meio de cultura, aguarda-se aproximadamente 10 dias para a formação das colônias e, para observar a formação de halo, adiciona-se uma solução de 1M NaCl (58,5 g/1000 mL) ao meio de cultura por cinco minutos.

Posteriormente, joga-se fora, adiciona-se uma solução de 0,1 % de vermelho congo e aguarda-se por trinta minutos. Decorrido este tempo, lava-se a superfície do meio com água destilada e observam-se os halos formados em volta das colônias.

3) Amonificadores (SARATCHANDRA, 1978)

Os reagentes utilizados para o preparo desse meio de cultura são mostrados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Reagentes utilizados para o meio de cultura Amonificadores (SARATCHANDRA, 1978).

REAGENTE	QUANTIDADE
Caseína hidrolisada	10 g
Yeast extract	0,1 g
K_2HPO_4	1 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,1 g
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,01 g
$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0,01 g
Phenol Red	0,02 g
Água Destilada	1,000 mL

Misturam-se todos os reagentes e completa-se com um litro de água destilada. Procede-se ao ajuste do pH do meio para 6,5. A seguir, coloca-se em tubos de ensaio de 10 mL, 4 mL da solução e esteriliza-se em autoclave à 121 °C por vinte minutos. Após retirar da autoclave, espera-se esfriar, depois se inocula 1 mL da amostra e deixa-se incubado por 4 dias. Decorrido este período, contam-se as unidades formadoras de colônias dos microrganismos utilizando o método de número mais provável (NMP). A Figura 3.17 apresenta o meio de cultura após sair da autoclave e antes de inocular a amostra. Depois de decorrido o tempo de incubação de 4 dias a coloração do meio se modifica de acordo com a ausência ou a presença de microorganismo (Fig. 3.18).



Figura 3.17: Meio de Cultura antes de inocular a amostra.



Figura 3.18: Coloração de diferentes diluições de uma mesma amostra de geotêxtil, indicando a ausência (-) ou presença (+) de microrganismos.

A Figura 3.18 mostra a coloração de diferentes diluições de uma mesma amostra de geotêxtil, sendo que, quando não há mudança da coloração do meio (10^{-5} e 10^{-6}), estas permanecem cor de laranja e implicam em ausência de microorganismos. Quando o meio muda de cor (10^{-2} , 10^{-3} e 10^{-4}) identificam-se presenças de microorganismos amonificadores.

4) Nitrificadores

Para o crescimento das bactérias oxidantes utiliza-se o meio de cultura inorgânico líquido. Basicamente, os descritos por SORIANO & WALKER (1968, 1973) são utilizados para os oxidantes de amônio (NH_4^+) e o de BELSER (1977) para os oxidantes do nitrito (NO_2^-), ambos modificados por SCHIMIDT & BELSER (1982). As Tabelas 3.10 e 3.11 apresentam os meios de cultura para oxidantes de amônio (NH_4^+) e nitrito (NO_2^-), respectivamente.

Tabela 3.10: Reagentes utilizados para o meio de cultura para oxidantes de amônio (NH_4^+).

REAGENTE	QUANTIDADE
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	1 g
KH_2PO_4	0,2 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,04 g
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,020 g
FeSO_4	0,0069 g
NaCl	0,5 g
EDTA-Na	0,0093 g
Água Destilada	1,000 mL

Tabela 3.11: Reagentes utilizados para o meio de cultura para oxidantes de nitrito (NO_2^-).

REAGENTE	QUANTIDADE
NaNO_2	1 g
KH_2PO_4	0,1 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,05 g
CaCO_3	0,01 g
NaCl	0,5 g
FeSO_4	0,0069 g
EDTA-Na	0,0093 g
$\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,00005 g
Água Destilada	1,000 mL

Para o preparo do meio, adicionam-se 4 mL por tubo de ensaio (10 mL) e esteriliza-se em autoclave à 121 °C por quinze minutos. Em seguida, transfere-se com uma pipeta estéril, 1 mL de cada diluição da amostra (geotêxtil) para cada um dos tubos de ensaio contendo o meio de cultura, incubando-os por seis a oito semanas no escuro para evitar fotonitrificação. A Figura 3.19 mostra o meio de cultura após sair da autoclave, pronto para ser inoculado.



Figura 3.19: Meio de cultura após sair da autoclave.

Para proceder a avaliação, decorrido o período de incubação, utilizam-se os reagentes de Griess-Hosvay modificados para verificar a densidade de nitrificadores. Inicialmente, coloca-se 0,1 mL da amostra na bandeja e pinga-se uma gota do reagente de Griess-Hosvay. Havendo mudança da coloração para roxo significa que há microorganismos oxidantes de amônio, porém se a amostra permanecer incolor significa que os microorganismos presentes são os oxidantes de nitrito. Este procedimento é realizado para todas as diluições preparadas, de 10^{-2} a 10^{-6} . A Figura 3.20 mostra a bandeja onde é colocada a amostra para determinação dos microorganismos oxidantes de amônio e de nitrito.

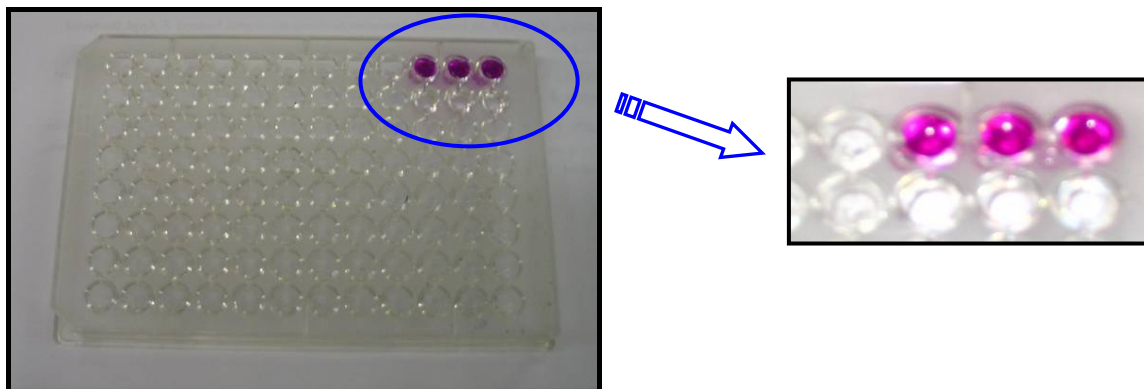


Figura 3.20: Bandeja com amostra para determinação dos organismos oxidantes de amônio e de nitrito (lado esquerdo). Detalhe do meio de cultura com coloração roxa e incolor (lado direito).

6) Bactérias:

O meio de cultura utilizado para determinação das bactérias permite a quantificação de bactérias totais (Fig. 3.21), não identificando, portanto, espécies. O meio utilizado foi Tryptic Soy Agar (TSA), sendo o apresentado na Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Formulação do meio de cultura de bactérias totais.

REAGENTE	QUANTIDADE
Casein Pancreatic Digest	17 g
Soybean Meal Papaic Digest	3 g
NaCl	5 g
K ₂ HPO ₄	2.5 g
Dextrose	2.5 g
Agar	15.0 g
Água Destilada	1,000 mL

Todos os reagentes são misturados, exceto o Agar, que é preparado separadamente, completando o recipiente com um litro de água destilada e procede-se ao ajuste do pH para 7,0. Em seguida, coloca-se a solução num erlemeyer de 2 litros, adiciona-se o Agar e esteriliza-se em autoclave à 121°C por vinte minutos.



Figura 3.21: Colônias de bactérias totais.

A solução, depois de esterilizada, é colocada em placas de Petri (aproximadamente 20 mL) e em seguida incubada a 28°C por 48 horas. Depois de decorrido o tempo, faz-se a contagem das colônias de bactérias que cresceram neste meio.

7) Solubilizador de Fosfato Inorgânico – P (SYLVESTER-BRADLEY et al., 1982, modificado)

O meio de cultura para a quantificação de solubilizadores de fosfato é formado por três soluções diferentes, como mostrados na Tabela 3.13 (SYLVESTER-BRADLEY et al., 1982, modificado).

Tabela 3.13: Reagentes utilizados para o meio de cultura solubilizador de fosfato (SYLVESTER-BRADLEY et al, 1982, modificado).

SOLUÇÃO	REAGENTE	QUANTIDADE
A	KNO ₃	0,1 g
	Dextrose	10,0 g
	Extrato de Levedura	5,0 g
	MgSO ₄ .7H ₂ O	0,2 g
	CaCl ₂	0,02 g
	NaCl	0,1 g
	Solução de Micronutrientes	2,0 mL
	Solução FeEDTA	4,0 mL
	Agar	15,0 g
	Água Destilada	910 mL
B	CaCl ₂	6,0 g
	Água Destilada	60 mL
C	K ₂ HPO ₄	3,0 g
	Água Destilada	30 mL

Para o preparo desse meio, dilui-se cada reagente separadamente em pequenos beakers para evitar, com isso, que reajam entre si o que poderia tornar o processo mais lento. As soluções A, B e C são esterilizadas em autoclaves, separadamente, e somente misturadas na câmara de fluxo laminar seguindo a seguinte ordem: primeiro coloca-se a solução C na solução A, misturando-as cuidadosamente e, em seguida, acrescenta-se a solução B. Depois de misturadas as soluções, verte-se o meio em placas de Petri o suficiente para cobrir todo o fundo da placa (aproximadamente 20 mL).

Os reagentes Solução de Micronutrientes e a Solução de FeEDTA que fazem parte da composição química da Solução A, têm suas composições como descrito na Tabela 3.14 (SYLVESTER-BRADLEY et al, 1982, modificado).

Tabela 3.14: Reagentes utilizados para a Solução de Micronutrientes e a Solução FeEDTA (SYLVESTER-BRADLEY et al, 1982, modificado).

Solução de Micronutrientes	
Reagentes	Quantidade
Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	0,10g
MnSO ₄ .H ₂ O	0,13 g
H ₃ BO ₃	0,14 g
CuSO ₄ .5H ₂ O	0,004 g
ZnSO ₄ .7H ₂ O	0,012 g
Água Destilada	100 mL
Solução FeEDTA	
Reagente	Quantidade
NA-EDTA	3,035 g
FeSO ₄ .7H ₂ O	3,085 g
Água Destilada	500 mL

3.5. ANÁLISE MICROSCÓPICA

As análises de microscopia foram feitas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV - Fig. 3.22), o qual foi desenvolvido a partir de 1930 e comercializado inicialmente por volta de 1960. Este aparelho atinge resoluções normais de 30-50 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-7} \text{ mm}$). O poder de resolução indica a distância mínima na qual dois pontos podem ser distintos. É indicado para a observação de superfícies de materiais, onde, com acessórios adequados, pode analisar seções espessas ou transformar-se em um micro analisador de raios-X.

**Figura 3.22:** Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV.

A formação de imagens no microscópio eletrônico de varredura é feita a partir de um feixe de elétrons produzido por um filamento de tungstênio, que é aquecido por uma corrente auxiliar. O aquecimento excita os elétrons do filamento, que se libertam deste. Para produzir um feixe contínuo de elétrons, aplica-se ao filamento um potencial negativo entre 5 e 40 kV, o que faz com que os elétrons sejam repelidos do filamento e desçam pela coluna. Por meio de lentes eletrônicas condensadoras, cria-se um campo magnético dentro da coluna, que converge o feixe de elétrons, cujo diâmetro pode ser regulado, definindo a resolução do equipamento. O feixe de elétrons incide sobre a amostra e, devido a pulsações programadas do campo magnético entre as duas lentes condensadoras, realiza um zigue-zague internamente sobre a superfície da amostra, varrendo a sua área. A cada ponto da área varrida, uma quantidade de elétrons secundários, proporcional à topografia do material estudado, é emitida. Os elétrons secundários são capturados pelo detector de elétrons secundários (uma grade metálica com carga positiva). Os elétrons passam pela grade e incidem sobre o cintilador (placa metálica coberta por substância fluorescente), provocando cintilações luminosas. As cintilações são amplificadas e convertidas em sinal eletrônico, que é interpretado pelo tubo de raios catódicos (TRC), gerando uma imagem na tela. Como a varredura é relativamente rápida, a imagem formada é o conjunto da soma dos diversos pontos que se formam sucessivamente na tela do TRC.

A fixação das amostras é uma das etapas mais importantes para a microscopia eletrônica, pois preserva a estrutura do tecido de maneira que as alterações provocadas pelas etapas posteriores (desidratação ao ponto crítico, metalização e bombardeamento com feixe de elétrons) sejam minimizadas. A fixação é feita utilizando uma mistura de glutaraldeído, paraformaldeído e uma solução tampão.

Como o microscópio eletrônico trabalha sob vácuo, toda a água deve ser retirada das amostras. A desidratação da amostra pode ser feita em etanol ou acetona, até a concentração de 100%, dependendo do protocolo que esteja sendo utilizado para fazer a desidratação até o ponto crítico. No Laboratório de Microscopia Eletrônica da Biologia da UnB, a desidratação é feita em acetona. O ponto crítico de uma substância refere-se a certas condições de temperatura e pressão que a mesma deve ser submetida para que suas fases líquida e gasosa coexistam. No aparelho de ponto crítico modelo CPD 030 (Balzers), a acetona líquida é substituída por CO₂ em seu estado líquido (temperatura entre 3 e 4° C). A secagem ao ponto crítico das amostras ocorre pela simples passagem do CO₂ do estado líquido para o gasoso,

sem formação de tensão superficial e, portanto, sem provocar deformações no material. Após a desidratação ao ponto crítico, as amostras são montadas sobre suportes metálicos (stubs) (Fig. 3.23), que permitem que as mesmas não se desprendam dentro do microscópio eletrônico para a observação.

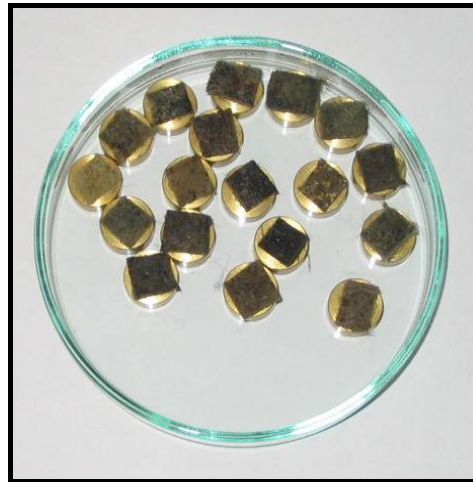


Figura 3.23: Amostras dos geotêxteis prontas para metalizar em ouro.

As amostras biológicas, em geral, não são boas condutoras de elétrons e, desta forma, não emitem elétrons secundários facilmente. Para resolver este problema, as amostras são cobertas com uma fina camada de ouro (entre 10-15 Å). A metalização consiste em uma cobertura da superfície da amostra com ouro, num processo realizado no aparelho Sputter Coater Modelo SCD 050 (Balzers) (Figura 3.24).



Figura 3.24: Equipamento utilizado para realizar a metalização em ouro do geotêxtil.

Inicialmente, para a realização das análises microscópicas, fez-se todo o procedimento descrito anteriormente com o geotêxtil. No entanto, percebeu-se que após a desidratação ao ponto crítico, o geotêxtil apresentou-se expandido, fato que poderia comprometer a interpretação das fotos e dos resultados esperados. Portanto, decidiu-se por apenas secar o geotêxtil em estufa a 55°C e em seguida colar as amostras com uma cola especial, feita à base de carbono em peças de bronze, denominadas “stubs”. Após a colagem, as amostras foram metalizadas em ouro, para então serem realizadas as fotos no microscópio eletrônico de varredura. Para a realização destas análises retiraram-se duas amostras de aproximadamente 1 cm² de cada geotêxtil, sendo uma do centro e outra da borda.

3.6. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

3.6.1. SIMULAÇÃO DA LEI DE CRESCIMENTO BACTERIANO PROPOSTA POR MONOD (1949)

Com o objetivo de simular a lei de crescimento bacteriano proposta por MONOD (1949), foi monitorada a DQO, que quantifica a matéria orgânica quimicamente degradável presente ou aderida ao geotêxtil. O modelo proposto por MONOD (1949) é representado pela equação abaixo.

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \quad (3.1)$$

Onde:

- μ = taxa de crescimento específico no tempo (*tempo*⁻¹);
- μ_m = taxa de crescimento máximo específico no tempo (*tempo*⁻¹);
- S = concentração do substrato limitante de crescimento na solução (*massa por unidade de volume*);
- K_s = velocidade média, concentração do substrato a uma taxa de crescimento máximo constante (*massa por unidade de volume*).

Escolheu-se a DQO para representar a fração orgânica do substrato presente no modelo. A Figura 3.25 mostra os geotêxteis encubados em tubos para a realização das análises.



Figura 3.25: Geotêxtil incubado para análise da DQO.

Para a determinação da DQO foi necessário colocar uma fração conhecida (área de 1cm^2) do geotêxtil em 9 mL de água destilada, submetê-la a agitação, e incubar por 5 dias para a partir de então, proceder-se a análise. Esse período de incubação foi necessário para a obtenção da faixa de leitura da DQO (0 a 150 mg/L e 0 a 1500 mg/L), como também para uma maior transferência da matéria orgânica presente no geotêxtil para a água destilada. Esse procedimento foi adotado porque não houve como medir a DQO diretamente da amostra do geotêxtil impregnada, uma vez que o reagente é muito ácido. Com esses resultados buscou-se representar o consumo desse substrato pelos microorganismos e seu conseqüente crescimento.

Com este procedimento de quantificação da DQO aderida ao geotêxtil buscou-se inferir quanto à formação do biofilme decorrente do crescimento bacteriano sobre a manta ou entre suas fibras, promovendo assim a colmatação biológica do sistema drenante.

Os resultados da dinâmica do crescimento bacteriano usada para representar a formação do biofilme nos geotêxteis ensaiados estão apresentados no Capítulo 4.

3.7. ENSAIO DE DESOBSTRUÇÃO DOS POROS DO GEOTÊXTIL POR AUMENTO DE CARGA HIDRÁULICA

Com o objetivo de acompanhar a evolução da colmatação dos geotêxteis submetidos ao ensaio de colmatação com fluxo de chorume ao longo do tempo, foi feito o monitoramento da permeabilidade dos espécimes. Portanto, ao longo dos quinze primeiros dias do ensaio, mediu-se a vazão diária nos permeômetros e após este período, esta vazão foi medida semanalmente.

Com o monitoramento do coeficiente de permeabilidade ao longo do tempo de ensaio pôde-se acompanhar a sua redução, e com isso avaliar, o comprometimento do sistema drenante pelo efeito da colmatação biológica ocasionado pelos microrganismos presentes no chorume.

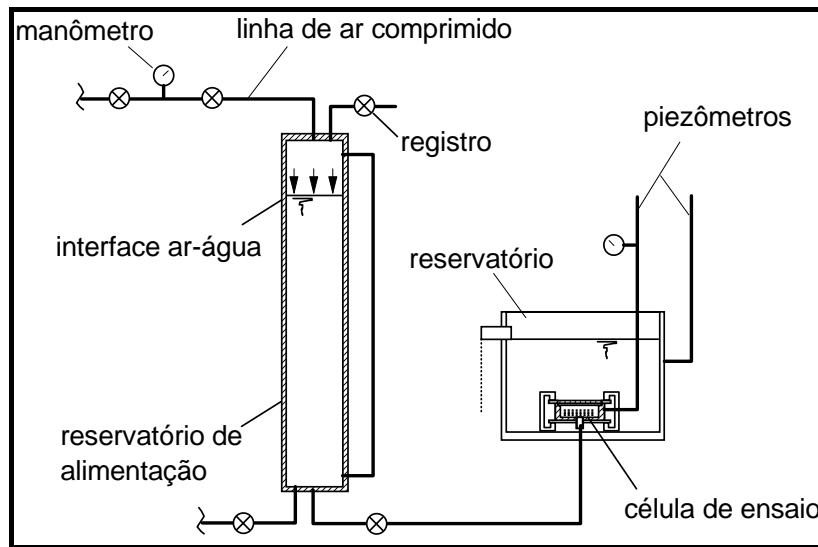
A literatura apresenta alguns casos de estudos sobre o comprometimento de sistemas dreno/filtrantes em aterros sanitários por colmatação seja esta física, química ou biológica. Também, acredita-se que uma vez colmatado, este sistema pode vir a ter sua capacidade drenante recuperada caso haja um aumento da coluna de chorume dentro da massa de lixo. Tal coluna pode ser suficiente para romper o filme gerado pela colmatação, por aumento da carga hidráulica no sistema.

No entanto, ainda não há informações sobre as condições em que esse fenômeno ocorre e quais os valores das cargas hidráulicas necessárias para desobstrução da camada drenante. Buscando investigar este mecanismo, realizou-se ensaio de aumento de carga hidráulica sobre os geotêxteis colmatados, aplicando pressões em estágios com auxílio de um sistema ar/água. As pressões foram aplicadas de forma a se variar o gradiente hidráulico sobre o geotêxtil. Para cada pressão aplicada era feita a leitura de vazão do geotêxtil e a diferença de carga hidráulica acima e abaixo do geotêxtil.

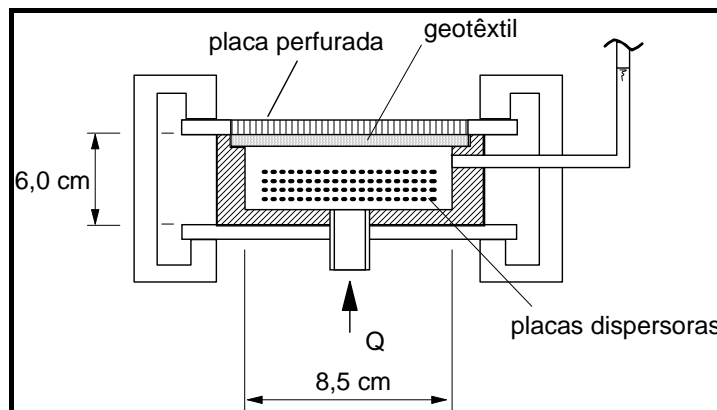
As Figuras 3.26 (a) e (b) apresentam o equipamento utilizado nos ensaios de desobstrução do geotêxtil por aumento de pressão. O fluxo sob pressão era provocado pelo aumento da pressão de ar comprimido no reservatório da interface ar-água (Fig. 3.26a).

O espécime de geotêxtil era acondicionado na célula de ensaio (Fig. 3.26b), sob e sobre telas metálicas. A tela inferior servia para repouso do geotêxtil e a superior para evitar a penetração

de partes do geotêxtil na placa rígida perfurada superior. Para cada estágio de pressão eram medidas a vazão de fluxo através do espécime de geotêxtil e a perda de carga no geotêxtil.



(a) Esquema geral do ensaio.



(b) Célula do ensaio.

Figura 3.26: Equipamento de ensaio de fluxo sob pressão.

Como o regime de fluxo no ensaio em questão era turbulento, ensaios sob as mesmas condições foram realizados em amostras de geotêxteis virgens, para efeito de comparação entre resultados de geotêxteis virgens e colmatados.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4

Neste capítulo, apresentam-se os resultados dos ensaios realizados para avaliar o potencial de colmatção biológica de três tipos de geotêxteis, por meio do fluxo de chorume e da imersão desses materiais em chorume. Apresentam-se também a caracterização físico-química do chorume utilizado, bem como os resultados das análises microbiológica, microscópica e físico-química provenientes da exumação dos geotêxteis analisados. Ensaio de aumento de carga hidráulica sobre as amostras de geotêxteis ensaiadas foram também efetuados para avaliar o potencial de desobstrução dos poros desses materiais sob condições de acúmulo de chorume sobre o sistema drenante em aterros sanitários, em decorrência da perda de permeabilidade do geotêxtil. Finalmente, apresenta-se a cinética de crescimento bacteriano no meio em epígrafe, a partir da avaliação da concentração de DQO gerada no geotêxtil. Os resultados estão dispostos em forma de tabelas e gráficos, com suas respectivas discussões.

4.1. ENSAIO DE COLMATAÇÃO COM FLUXO

4.1.1. ANÁLISE QUÍMICA DO CHORUME

O chorume foi caracterizado antes do início de cada ensaio e em seguida foram feitas caracterizações quinzenais no chorume coletado no reservatório terciário, para acompanhar a evolução temporal das suas características ao longo da duração de cada ensaio. A Tabela 4.1 mostra as características do chorume utilizado nos ensaios para os períodos de duração de ensaios iguais a 15, 30 e 45 dias. A Tabela 4.2 apresenta a variação com o tempo das características do chorume utilizado no ensaio realizado com duração de 60 dias. A Tabela 4.3 apresenta as características do chorume utilizado no ensaio com duração de 90 dias. Portanto, foram efetuadas três coletas de chorume para a realização dos ensaios nos 5 períodos apresentados.

Tabela 4.1: Caracterização química do chorume dos ensaios de 15, 30 e 45 dias.

Data	DQO (mg/L)	pH	Amônia (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Ortofosfato (mg/L)
Início	3986	8,79	1890	15,0	42,5
15 dias	3670	8,20	1170	13,2	38,2
30 dias	3150	7,80	910	12,0	33,5
45 dias	2410	6,95	230	11,0	11,4

Tabela 4.2: Caracterização química do chorume do ensaio de 60 dias.

Data	DQO (mg/L)	pH	Amônia (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Ortofosfato (mg/L)
Início	3350	8,84	1720	22	19
15 dias	2290	8,87	100	20	20
30 dias	1720	8,52	29	30	26
45 dias	1230	8,32	10	37	10
60 dias	970	8,30	10	32	15

Tabela 4.3: Caracterização química do chorume do ensaio de 90 dias.

Data	DQO (mg/L)	pH	Amônia (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Ortofosfato (mg/L)
Início	4160	8,92	690	23	16
15 dias	3420	8,76	400	30	12
30 dias	2270	8,80	120	31	10
45 dias	1040	8,25	650	26	10
60 dias	760	8,20	1000	116	13
90 dias	470	7,90	430	38	15

Os chorumes utilizados nos três períodos ensaiados apresentam concentrações iniciais de DQO aproximadas, o que se deve ao fato de terem sido coletados de uma mesma fonte, com pequena diferença no tempo entre cada coleta, de forma a se ter uma maior repetibilidade das condições de ensaio. A Figura 4.1 mostra que no decorrer de cada ensaio a concentração da DQO diminuiu, uma vez que estava ocorrendo a degradação do chorume. O que pode ser observado ainda é que o chorume utilizado nos ensaios com tempo de duração de 90 dias apresentou maior taxa de degradação que o utilizado nos ensaios de 60 e 45 dias respectivamente. Para o ensaio de 90 dias, com 45 dias já decorridos, a DQO consumida ou degradada foi de 3120 mg/L, enquanto que no ensaio de 60 dias o valor encontrado foi de 2120 mg/L e, por fim, no ensaio de 45 dias o valor da DQO foi de 1576 mg/L. Percebeu-se que a degradação do chorume deu-se de forma diferenciada entre os ensaios.

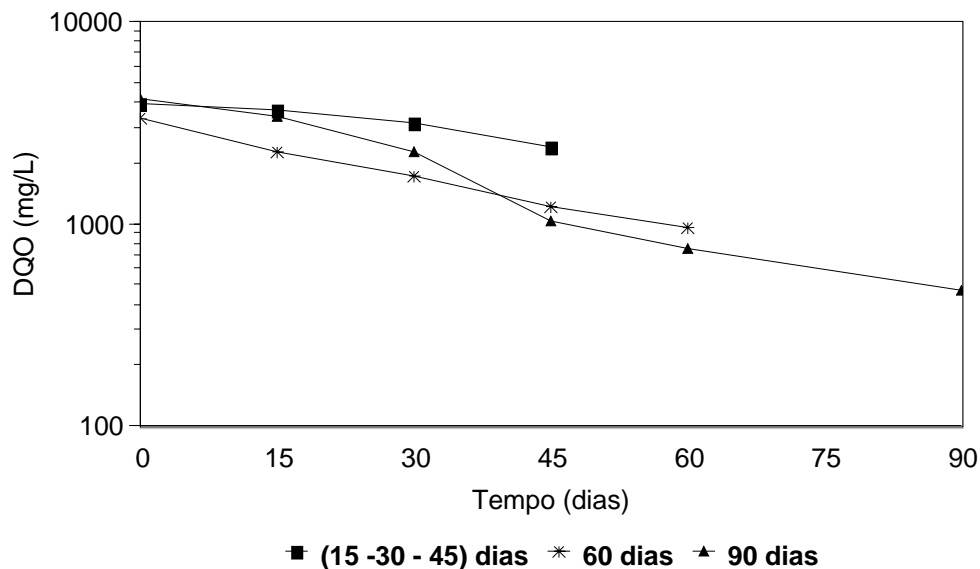


Figura 4.1: Evolução temporal da DQO (mg/L) do chorume utilizado em cada ensaio.

O comportamento do pH do chorume utilizado nos três ensaios ao longo do tempo mostra que este se encontra na fase metanogênica, o que pode ser devido ao fato de se tratar de um chorume proveniente de uma célula com mais de 5 anos de existência. A variação do pH dos chorumes utilizados com o tempo nos três ensaios está apresentada na Figura 4.2.

Silva (2004) apresenta valores de pH do chorume da mesma célula entre 7,5 a 8,5 e reforça que a mesma já se encontrava na fase metanogênica.

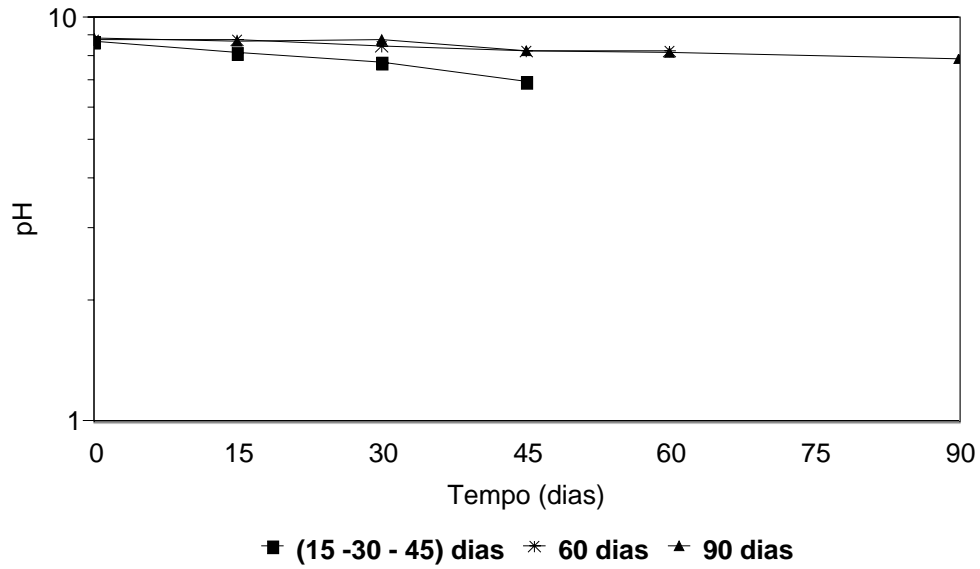


Figura 4.2: Evolução temporal do pH do chorume utilizado em cada ensaio.

A conversão da amônia e do nitrato ao longo do tempo de cada ensaio está apresentada nas Figuras 4.3. e 4.4.

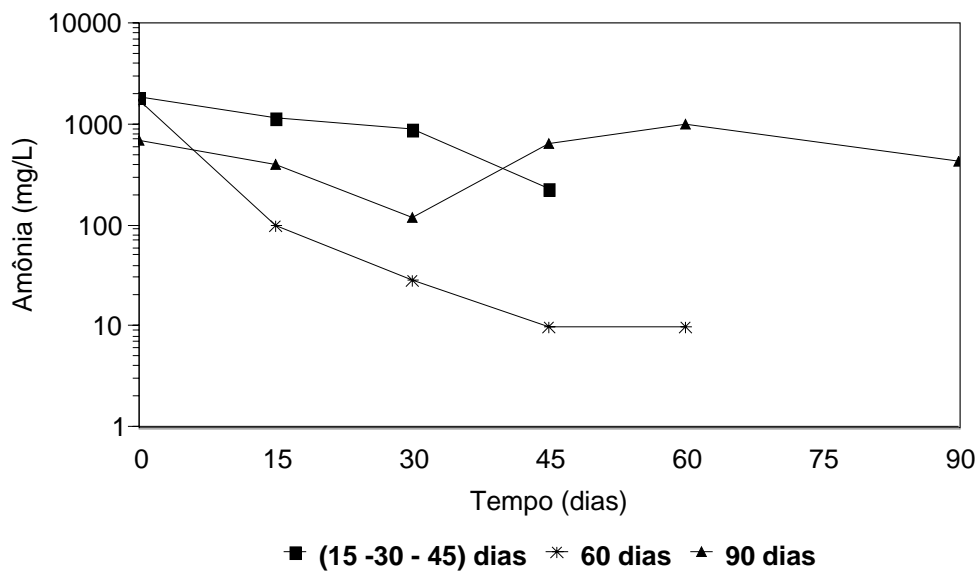


Figura 4.3: Evolução temporal da amônia (mg/L) do chorume utilizado em cada ensaio.

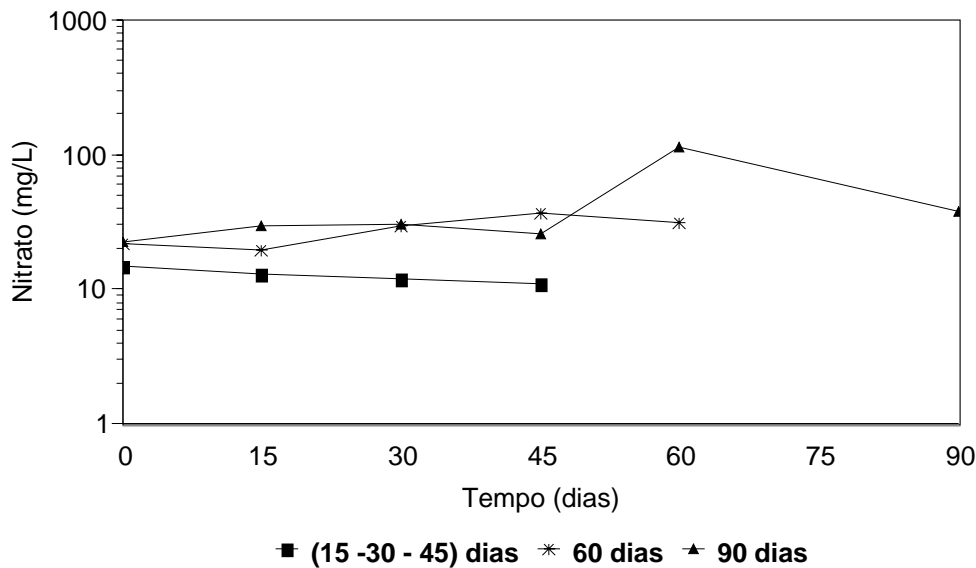


Figura 4.4: Evolução temporal do nitrato (mg/L) do chorume utilizado em cada ensaio.

A concentração de nitrato do chorume durante os ensaios apresentou-se praticamente constante nos primeiros 45 dias de ensaio. No entanto, no ensaio com duração de 60 dias apresentou um leve aumento e para o ensaio com duração de 90 dias aumentou bastante após 45 dias de ensaio. Acredita-se que esse fato pode está relacionado à ausência dos microrganismos redutores de amônia a nitrato, uma vez que também neste período foi observado (Fig. 4.3) aumento na concentração de amônia, a qual também não foi consumida. Logo, o aumento de amônia pode está relacionado com a presença de microrganismos unicamente conversores de nitrogênio a amônia, já os que convertem amônia a nitrato podem ainda não ter entrado em atividade ou não estarem presentes.

A Figura 4.5 apresenta o comportamento da concentração de ortofosfato ao longo dos ensaios de colmatação com fluxo. Os chorumes utilizados apresentaram concentrações de ortofosfato diferentes entre si, sendo o chorume usado no ensaio com duração de 45 dias o que apresentou maiores concentrações. Percebe-se que a concentração do ortofosfato no chorume do ensaio com duração de 60 dias foi consumido até aproximadamente os 45 dias de duração do ensaio, onde, para este período, a concentração de ortofosfato para os ensaios de 45, 60 e 90 dias foi semelhante (10 mg/L). Para o ensaio com duração de 90 dias, a concentração deste nutriente foi aproximadamente constante durante todo o período de ensaio. De acordo com a Figura 4.5, acredita-se que as bactérias redutoras de ortofosfato não se apresentam em quantidade suficiente para consumir este nutriente.

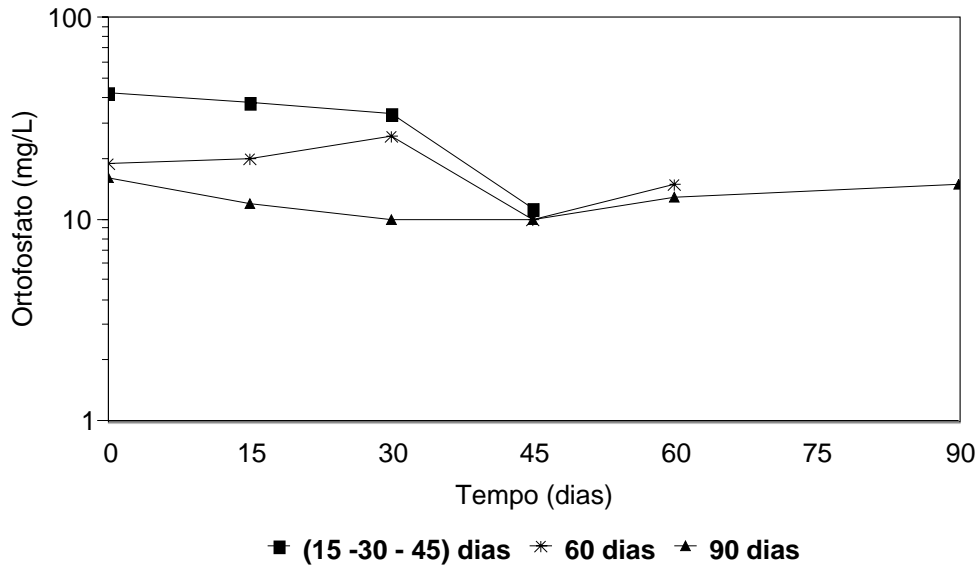


Figura 4.5: Evolução temporal do ortofosfato (mg/L) do chorume utilizado em cada ensaio.

4.1.2. ANÁLISE MICROBIOLÓGICA

A degradação dos resíduos sólidos em aterro sanitário ocorre por meio da grande quantidade e diversidade de microrganismos presentes na massa de lixo e essa diversidade está relacionada às características do resíduo. Portanto, para avaliar a formação do biofilme no geotêxtil submetido a fluxo de chorume, foram escolhidos os grupos funcionais considerados mais representativos da degradação do chorume em um aterro sanitário.

As análises microbiológicas foram feitas nos geotêxteis que estiveram submetidos ao ensaio de colmatção com fluxo com período de 90 dias. Foram analisadas amostras obtidas no centro de cada espécime de geotêxtil (GTX, GTY ou GTZ). No entanto, como o ensaio de colmatção com fluxo foi realizado com três repetições para cada tipo de geotêxtil, há três resultados de cada microrganismo analisado.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos para cada grupo funcional dos microrganismos pesquisados nos geotêxteis submetidos aos ensaios de colmatção com fluxo. Nesta tabela pode-se observar que em todos os geotêxteis ensaiados foram encontrados os microrganismos analisados, a exceção dos oxidantes do íon amônio (NH_4^+) nos geotêxteis GTX₁, GTX₂, GTY₁, GTY₂, GTZ₁ e GTZ₃ e dos oxidantes de nitrito (NO_2^-) nos geotêxteis GTX₁ e GTX₂. A ausência de oxidante do íon amônio identifica que o processo de nitrificação já está mais

avançado, ou seja, o íon amônio já foi convertido em nitrito e a ausência deste outro mostra que o nitrito já foi convertido em Nitrato (NO₃).

Tabela 4.4: Contagem de microrganismos nos geotêxteis (UFC/cm²).

Amostra	MICROORGANISMO						
	Bactéria	Amilolítico	Celulolítico	Solubilizador de Fosfato	Amonificador	Oxidante de NH ₄ ⁺	Oxidante de NO ₂ ⁻
GTX ₁	3,47x10 ⁷	4,85x10 ⁵	2,35x10 ⁴	4,10x10 ⁴	7,48x10 ⁶	0,00	0,00
GTX ₂	2,66x10 ⁷	2,50x10 ⁶	1,30x10 ⁴	4,00x10 ⁴	2,15x10 ⁷	0,00	0,00
GTX ₃	0,92x10 ⁷	7,00x10 ⁴	4,50x10 ⁴	6,00x10 ³	1,47x10 ⁵	9,40x10 ⁵	5,98x10 ⁵
GTY ₁	1,12x10 ⁷	7,75x10 ⁶	4,50x10 ⁶	2,20x10 ⁴	2,40x10 ⁶	0,00	1,59x10 ⁴
GTY ₂	0,37x10 ⁷	9,05x10 ⁶	4,50x10 ⁶	1,70x10 ⁴	2,15x10 ⁷	0,00	2,55x10 ⁵
GTY ₃	1,21x10 ⁷	9,85x10 ⁶	2,00x10 ⁵	0,95x10 ⁴	1,10x10 ⁸	2,55x10 ⁵	1,59x10 ⁴
GTZ ₁	1,12x10 ⁷	3,20x10 ⁶	6,65x10 ⁵	4,40x10 ⁴	4,27x10 ⁵	0,00	2,55x10 ⁴
GTZ ₂	0,85x10 ⁷	3,50x10 ⁶	2,55x10 ⁵	4,20x10 ⁴	4,27x10 ⁵	7,23x10 ⁵	1,13x10 ⁴
GTZ ₃	0,94x10 ⁷	2,70x10 ⁶	8,00x10 ⁴	2,10x10 ⁴	1,10x10 ⁸	0,00	5,98x10 ⁵

A Figura 4.6 mostra os valores médios de unidades formadoras de colônias por área dos geotêxteis (UFC/cm²) obtidos.

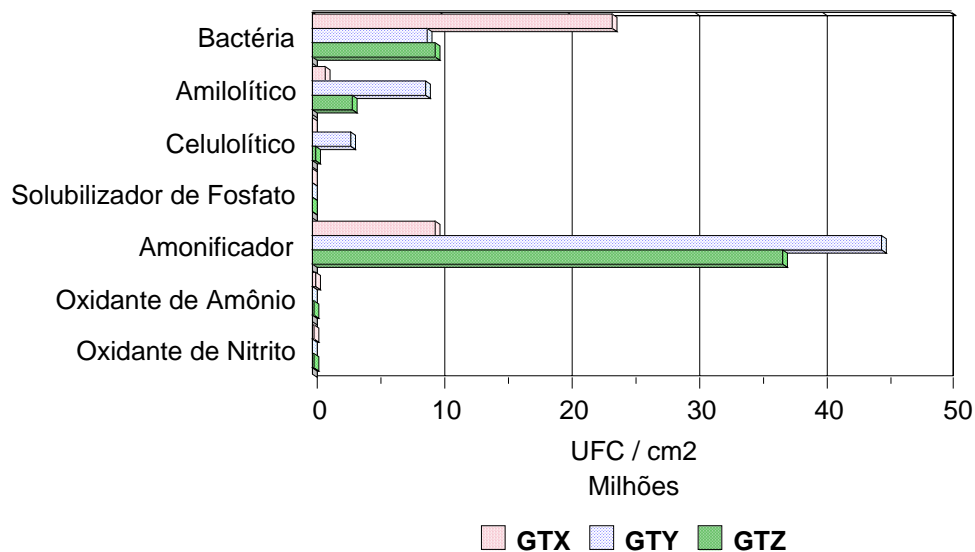


Figura 4.6: Contagem de microrganismos nos geotêxteis – com fluxo (UFC/cm²).

No geotêxtil GTX identificaram-se todos os microrganismos sob estudo, porém os mais frequentes foram as bactérias com uma concentração média de 2,35E+07 UFC/cm², seguidas dos amonificadores, com 9,7E+06 UFC/cm², e dos amilolíticos, com 1,02E+06 UFC/cm². Os outros microrganismos analisados apresentaram concentração média da ordem de 2,0E+05 UFC/cm².

O geotêxtil GTY apresentou os amonificadores como os microrganismos identificados em maior quantidade, com concentração média de $4,46E+07$ UFC/cm² seguidos de bactérias com $9,00E+06$ UFC/cm², amilolíticos com $8,88E+06$ UFC/cm² e celulolíticos com $3,07E+06$ UFC/cm². Os outros microrganismos apresentaram concentração média da ordem de $2E+04$ UFC/cm².

No geotêxtil GTZ os microrganismos que apresentaram maior concentração média foram os amonificadores, com $3,69E+07$ UFC/cm², seguidos das bactérias, com $9,70E+06$ UFC/cm², e dos amilolíticos, com $3,13E+06$ UFC/cm². Os demais microrganismos analisados apresentaram concentração média da ordem de $2,0E+05$ UFC/cm².

COLMANETTI (2000) realizou análises de contagem de grupos funcionais de bactérias, fungos e actinomicetos em geotêxteis GTY e GTZ utilizados como sistemas drenantes em células com lixo e encontrou concentrações médias de bactérias de $4,98E+06$ UFC/cm² para o GTY e $9,43E+05$ UFC/cm² para o GTZ. Estes valores são cerca da metade do valor obtido para o geotêxtil GTY na presente pesquisa e bem próximo do valor obtido para o geotêxtil GTZ.

ROLLIN (1996) estudou a colmatação biológica de geotêxteis em reatores com culturas, identificando a contagem de bactérias por área dos geotêxteis ensaiados em sua pesquisa. Para os geotêxteis T-11, com características equivalentes similares ao GTY da presente pesquisa, este autor encontrou $7,4E+06$ UFC/cm² e para o geotêxtil T-9, com características semelhantes ao geotêxtil GTZ, foi encontrado o valor $9,1E+06$ UFC/cm².

O valor encontrado para o geotêxtil T-11 é um pouco inferior ao valor encontrado na presente pesquisa para o geotêxtil GTY e o valor encontrado para o geotêxtil T-9 é aproximadamente igual ao valor obtido para o geotêxtil GTZ.

4.1.3. ANÁLISE MICROSCÓPICA

A análise microscópica, neste trabalho, buscou avaliar a formação de biofilme no geotêxtil ao longo dos períodos de ensaio e complementar os resultados encontrados na simulação do crescimento bacteriano. Visou também se tentar associar a perda de permeabilidade dos geotêxteis ensaiados com o nível de formação de biofilme em cada caso.

Para esse tipo de análise foi necessário fazer a preparação das amostras de modo a serem avaliadas no microscópio. Para isso, fez-se a fixação do material, processo este que visa preservar a estrutura do material em análise de maneira que as alterações provocadas pelas demais etapas do processo sejam minimizadas, utilizando uma mistura de glutaraldeído, paraformaldeído e uma solução tampão. Em seguida, metalizou-se o espécime com ouro em uma frequência de 200 nm. Após este procedimento percebeu-se que houve uma leve mudança na estrutura do geotêxtil, ou seja, o mesmo teve suas fibras ligeiramente expandidas. Diante disto, optou-se por não mais fazer a fixação das amostras, mas apenas secá-las ao ar livre e metalizar com ouro, de modo a preservar a estrutura do geotêxtil.

A análise de microscopia de varredura para os geotêxteis submetidos aos ensaios de colmatção com fluxo mostrou que já aos 15 dias há uma relativa formação de biofilme, processo que evoluiu até os 90 dias de ensaio de forma crescente, como será visto nos ensaios nos três geotêxteis estudados.

As Figuras 4.7 a 4.21 apresentam as fotos obtidas em microscópio de varredura com o intuito de melhor compreender e acompanhar a formação de biofilme nos geotêxteis GTX, GTY e GTZ durante os ensaios de colmatção com fluxo de chorume. A evolução temporal da formação do biofilme no geotêxtil GTX está apresentada nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11.

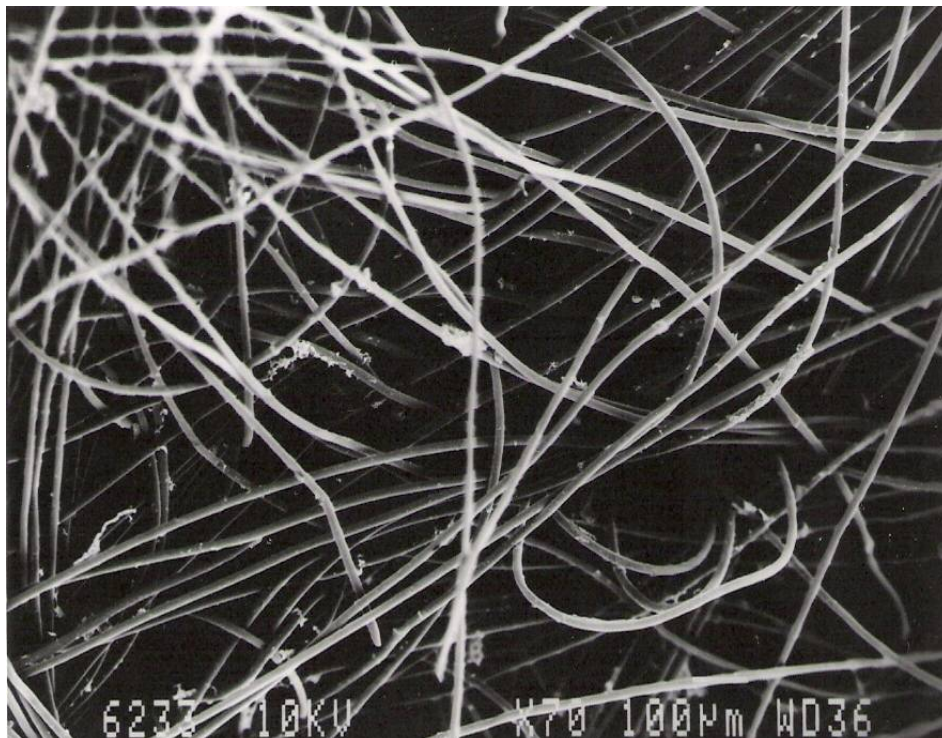


Figura 4.7: Formação de biofilme após 15 dias para o geotêxtil GTX – com fluxo.

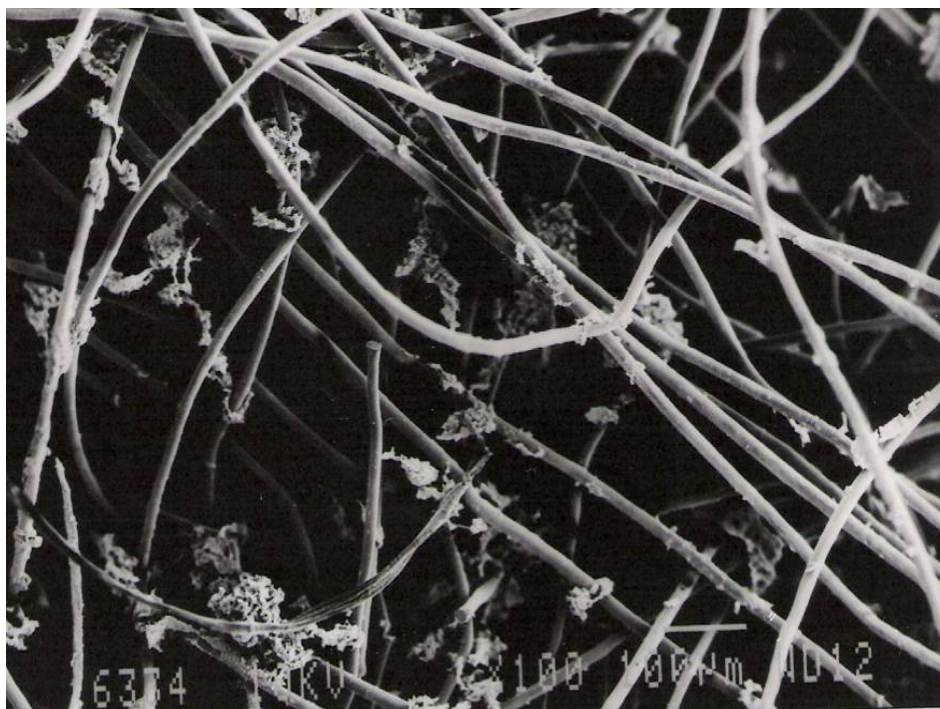


Figura 4.8: Formação de biofilme após 30 dias para o geotêxtil GTX – com fluxo.

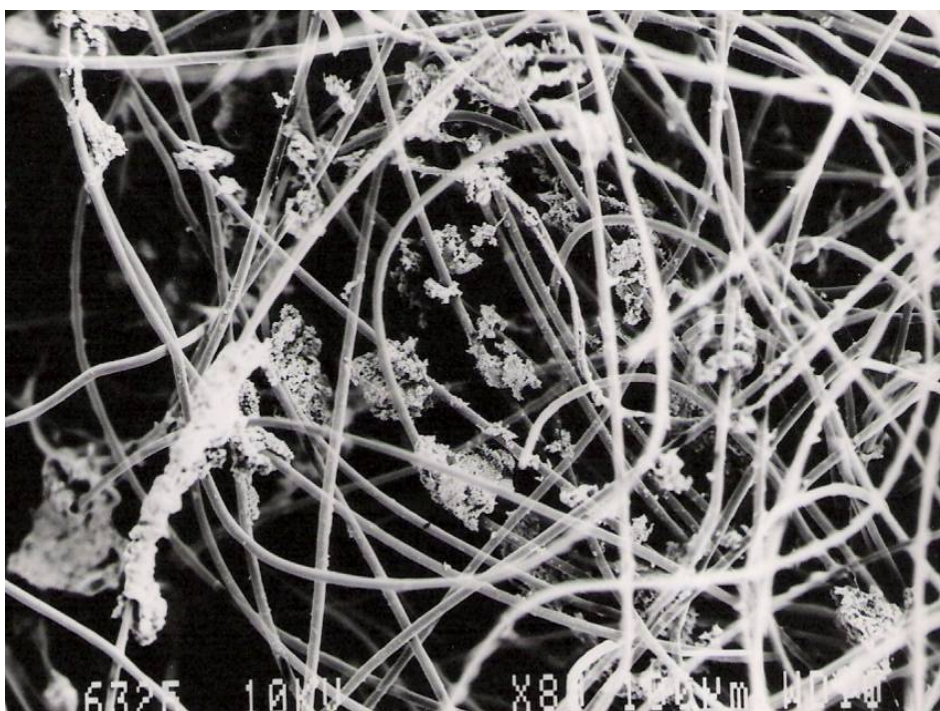


Figura 4.9: Formação de biofilme após 45 dias para o geotêxtil GTX – com fluxo.

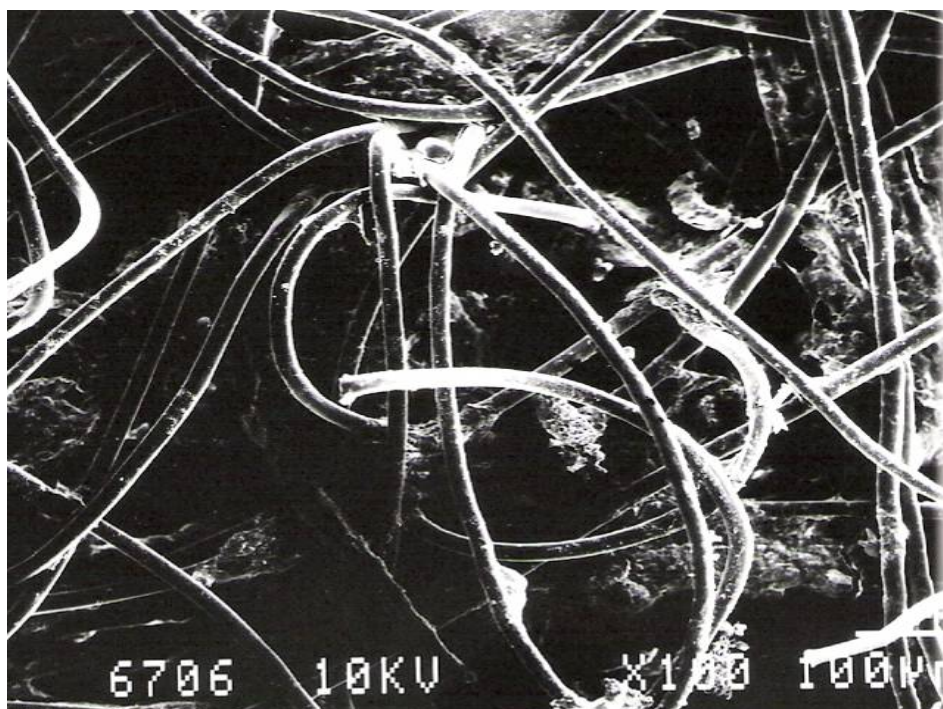


Figura 4.10: Formação de biofilme após 60 dias para o geotêxtil GTX – com fluxo.

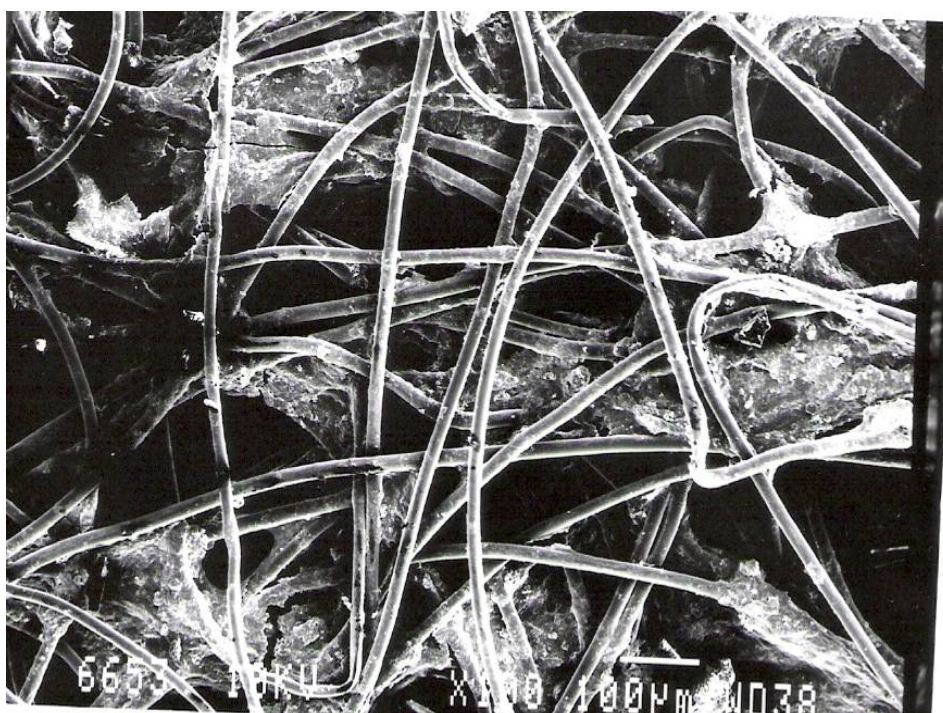


Figura 4.11: Formação de biofilme após 90 dias para o geotêxtil GTX – com fluxo.

As Figuras 4.12 a 4.16 apresentam a evolução temporal da formação do biofilme no geotêxtil GTY no ensaio de colmatação com fluxo.

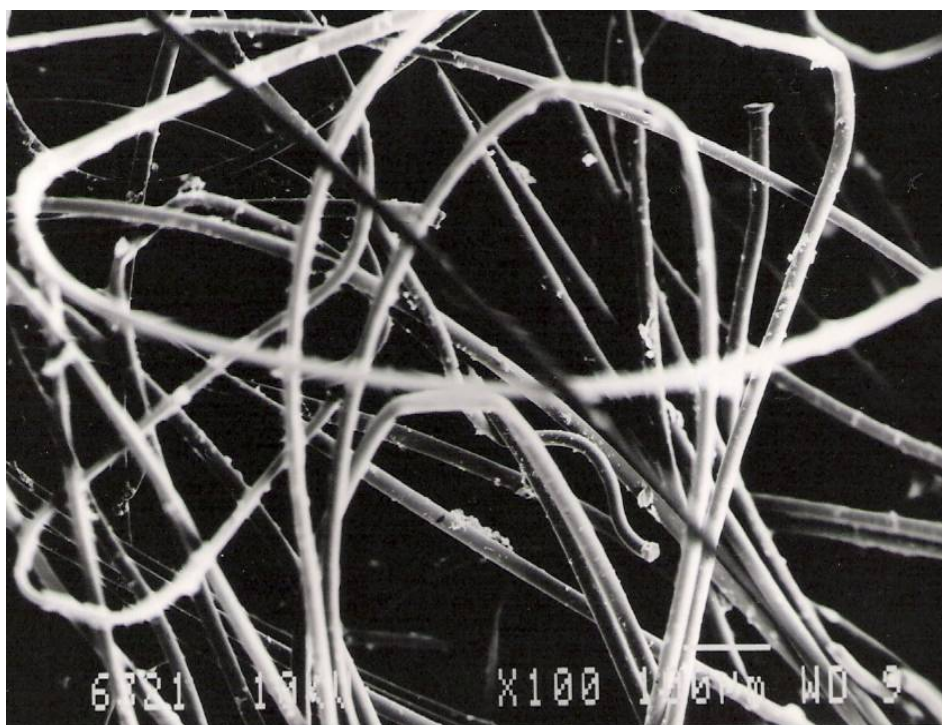


Figura 4.12: Formação de biofilme após 15 dias para o geotêxtil GTY – com fluxo.



Figura 4.13: Formação de biofilme após 30 dias para o geotêxtil GTY – com fluxo.

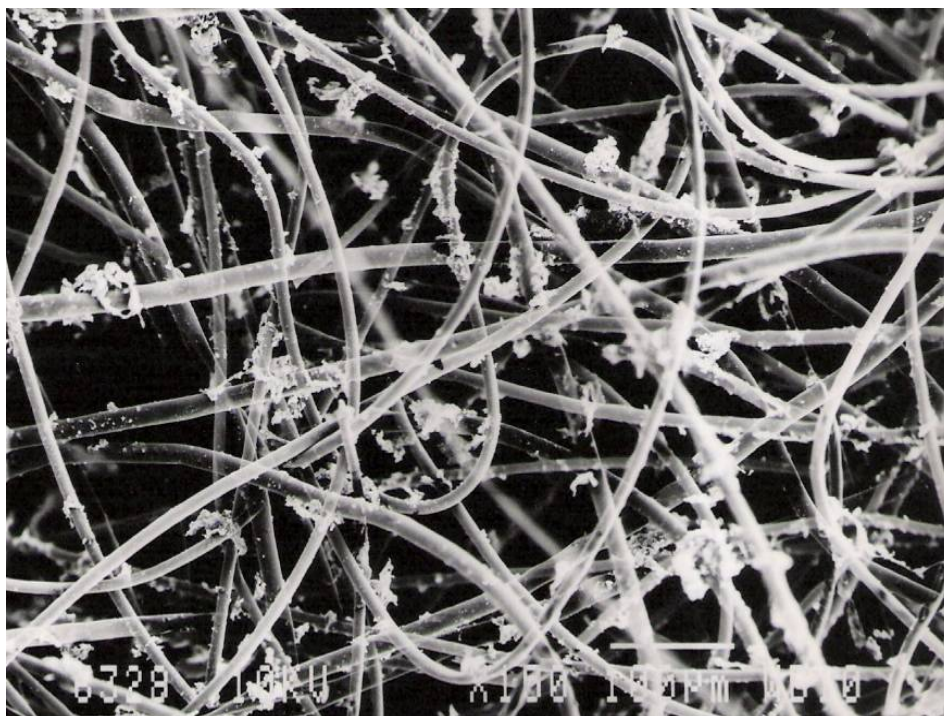


Figura 4.14: Formação de biofilme após 45 dias para o geotêxtil GTY – com fluxo.

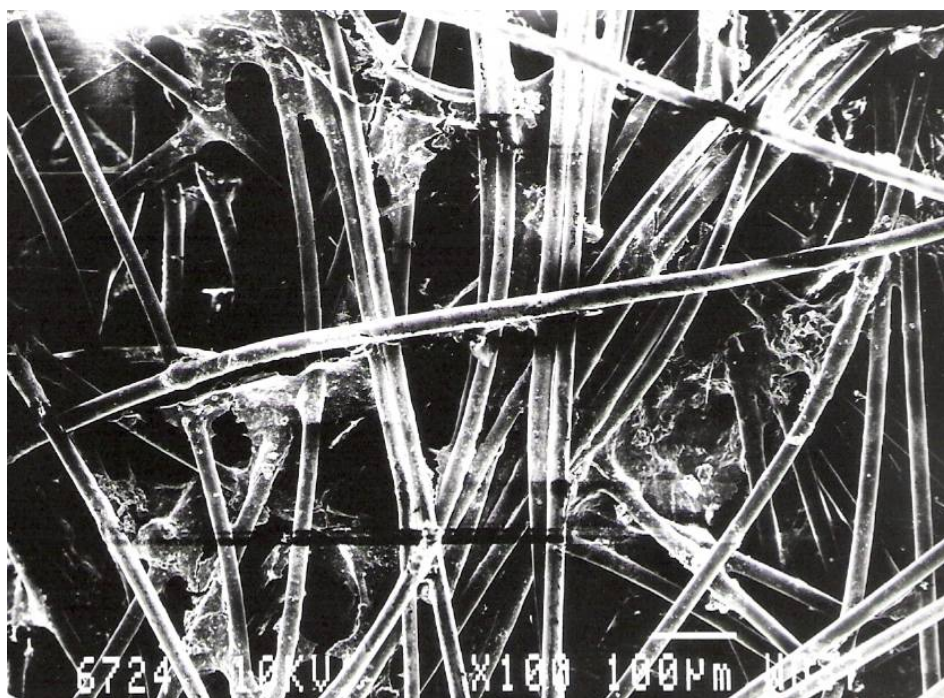


Figura 4.15: Formação de biofilme após 60 dias para o geotêxtil GTY – com fluxo.

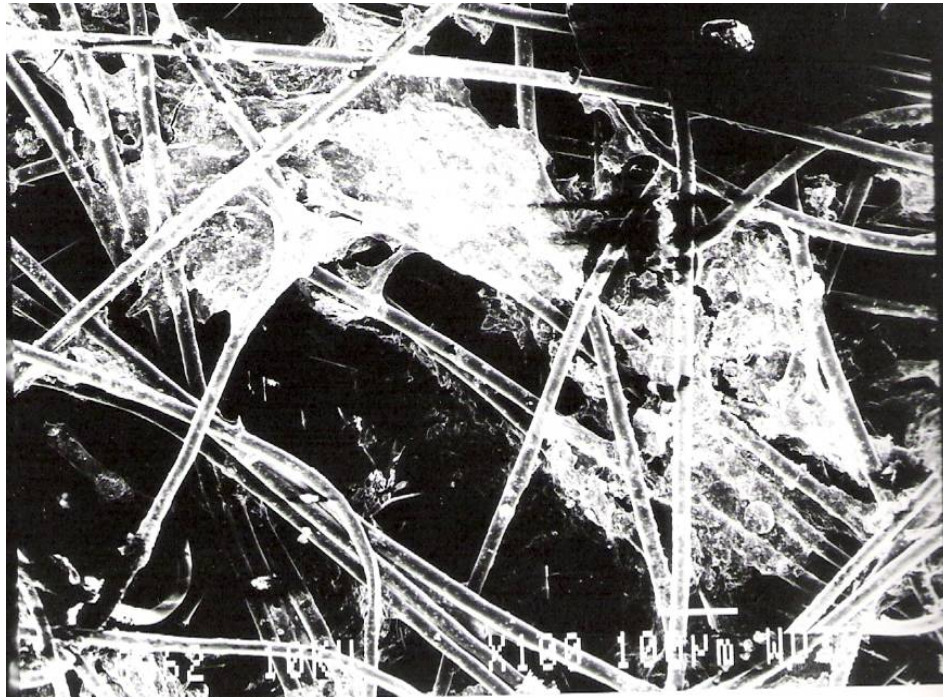


Figura 4.16: Formação de biofilme após 90 dias para o geotêxtil GTY – com fluxo.

As Figuras 4.17 a 4.21 apresentam a evolução temporal da formação do biofilme no geotêxtil GTZ no ensaio de colmatção com fluxo.

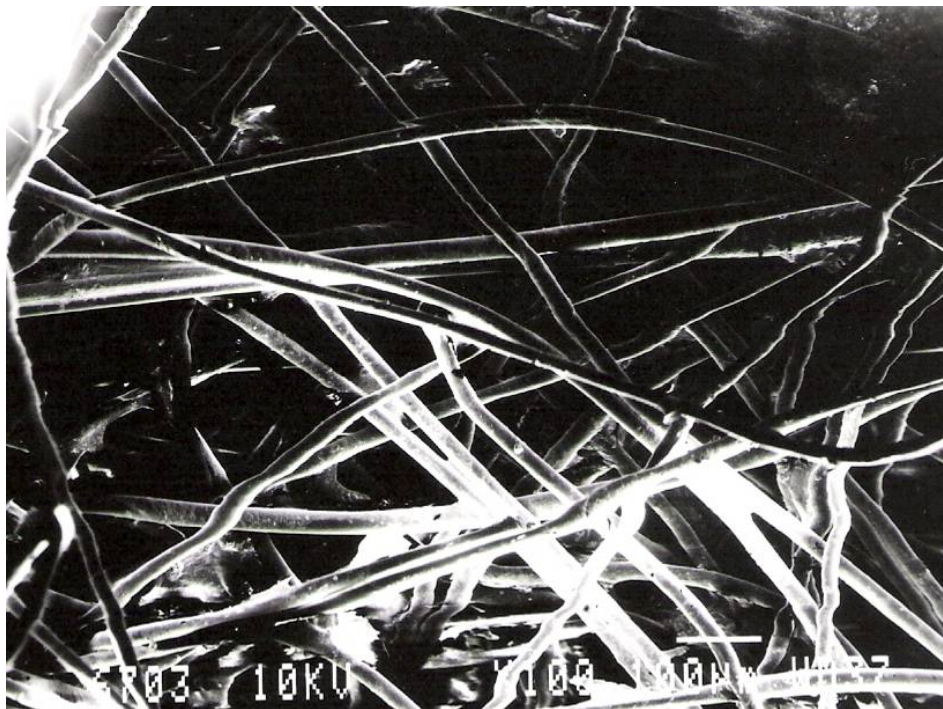


Figura 4.17: Formação de biofilme após 15 dias para o geotêxtil GTZ – com fluxo.



Figura 4.18: Formação de biofilme após 30 dias para o geotêxtil GTZ – com fluxo.

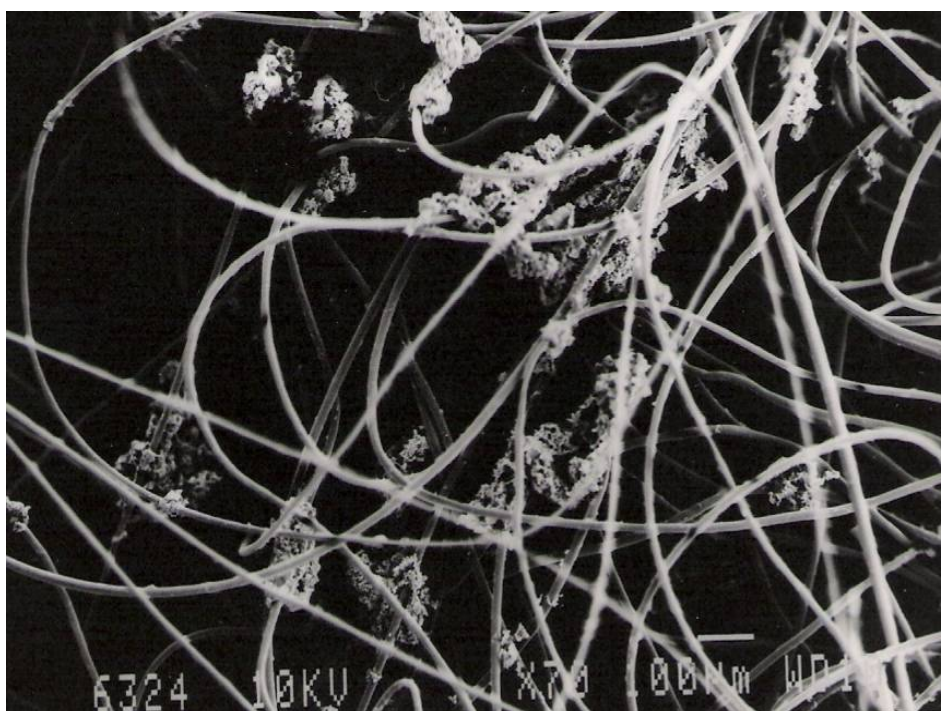


Figura 4.19: Formação de biofilme após 45 dias para o geotêxtil GTZ – com fluxo.

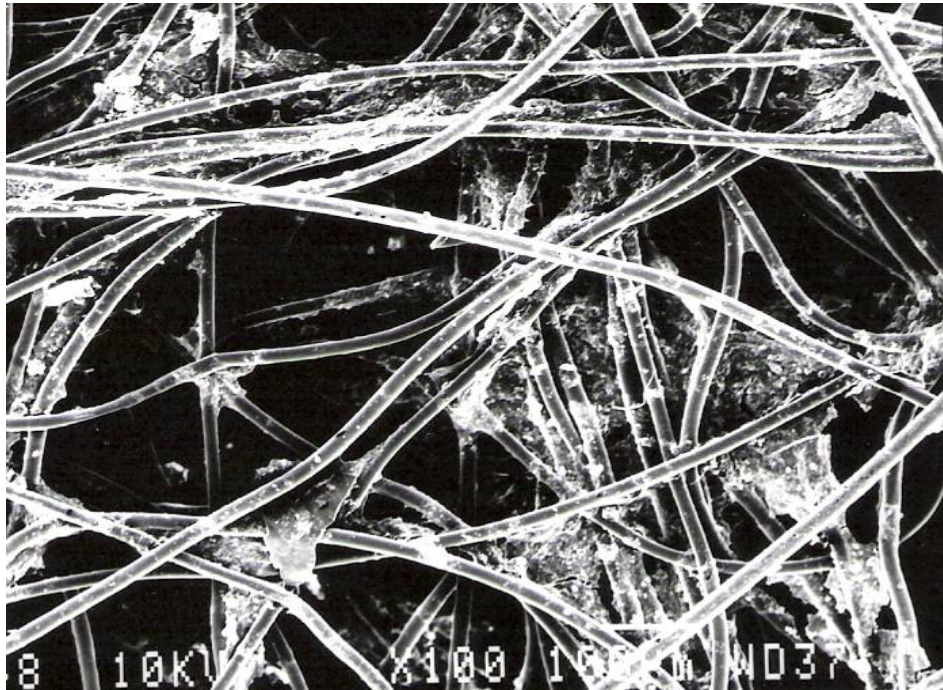


Figura 4.20: Formação de biofilme após 60 dias para o geotêxtil GTZ – com fluxo.

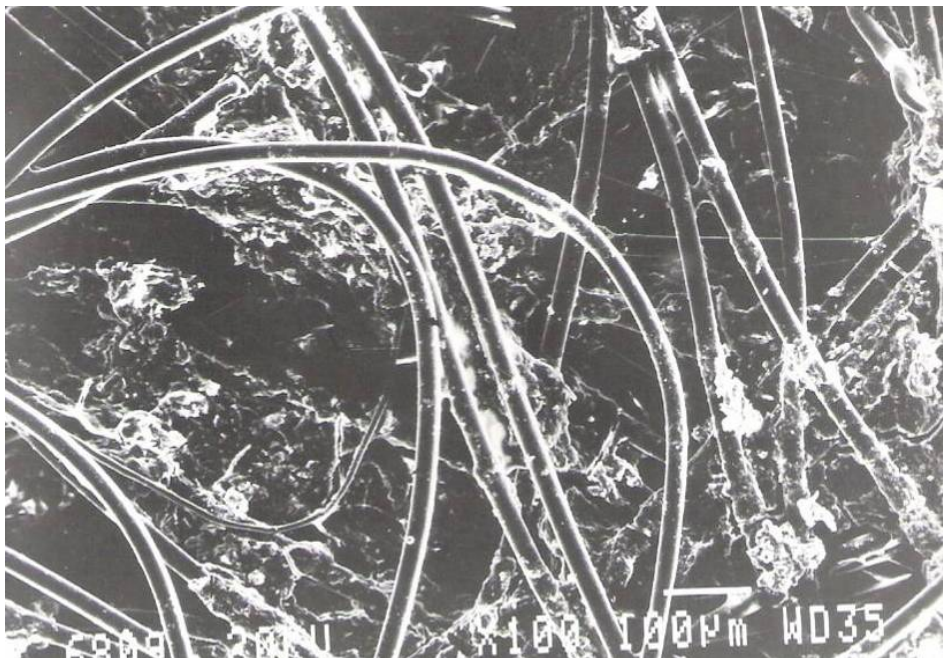


Figura 4.21: Formação de biofilme após 90 dias para o geotêxtil GTZ – com fluxo.

Analisando as Figuras 4.7 a 4.21 pode-se entender o processo de formação do biofilme no geotêxtil e percebe-se que este se dá inicialmente em pontos localizados, com a formação de

pontos de acumulação de bactérias sobre a superfície das fibras do geotêxtil até o período de 15 dias. A partir dos 30 dias de ensaio pode-se perceber (Figuras 4.8, 4.13 e 4.18) que o biofilme começa a se formar ao longo das fibras, com propagação espacial mostrando alguns pontos de maior concentração. Isto acontece de modo mais acentuado até os 45 dias, como se pode observar nas Figuras 4.9, 4.14 e 4.19. As Figuras 4.10, 4.15 e 4.20 mostram que a partir dos 60 dias de ensaio o biofilme já passou a preencher os vazios do geotêxtil e aos 90 dias do ensaio pode-se observar uma concentração mais acentuada ainda de biofilme, com estes ocupando uma maior porção dos vazios do geotêxtil (Figuras 4.11, 4.16 e 4.21). No entanto, ainda pode-se observar uma razoável quantidade de vazios desimpedidos nos geotêxteis.

A Figura 4.22 apresenta um detalhe da estrutura do biofilme identificado no geotêxtil GTX após 45 dias de ensaio de colmatção com fluxo.

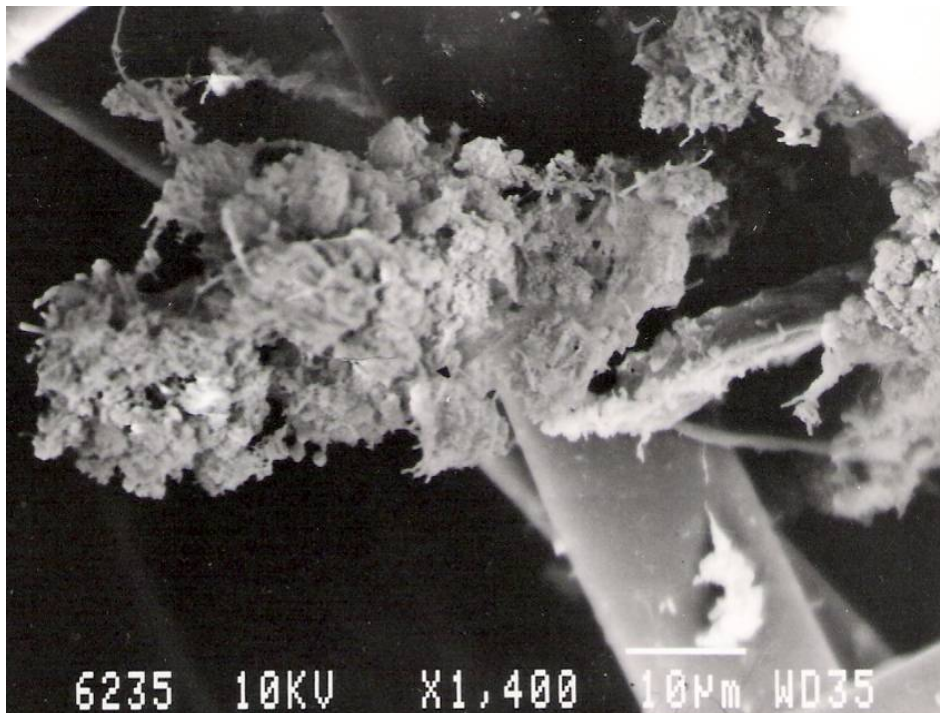


Figura 4.22: Detalhe do biofilme no geotêxtil GTX após 45 dias de ensaio de colmatção com fluxo de chorume.

A tendência mostrada nas fotos de microscopia de varredura pode ser muito importante no estudo da formação do biofilme ao longo do tempo, além de auxiliar nas análises da perda de permeabilidade dos geotêxteis, uma vez que aos noventa dias de ensaio de colmatção com fluxo encontraram-se valores de redução de coeficiente de permeabilidade da ordem de 99%, como será visto adiante.

MLYNAREK & ROLLIN (1995) fizeram análises microscópicas de geotêxteis utilizados em um aterro sanitário e verificaram que a formação de biofilme em geotêxteis pode ser dada tanto dentro da estrutura do geotêxtil, obstruindo os vazios, como na face do geotêxtil em contato com o lixo. No caso da formação do biofilme dentro do geotêxtil, os autores observaram três mecanismos: formação entre as fibras, ao longo da superfície da fibra e pontual. A formação mais severa no ponto de vista de MLYNAREK & ROLLIN (1995) é a que se dá na face do geotêxtil, pois esta pode causar o cegamento do dreno, reduzindo muito sua capacidade drenante, mesmo que os vazios entre as fibras não estejam preenchidos pelo biofilme. Os mecanismos descritos por estes autores são semelhantes aos observados no presente trabalho.

FOURIE et al. (1994) realizaram ensaios fazendo percolar o fluido coletado em sistemas drenantes de aterros sanitários em permeâmetro, utilizando diferentes geotêxteis tecidos e não-tecidos. Os resultados indicaram uma forte queda da capacidade drenante do sistema, em função da formação de biofilme, o que também foi comprovado por análises por microscopia.

4.1.4. SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO BACTERIANO

Para fazer a simulação da curva proposta por MONOD (1949) para o crescimento bacteriano no geotêxtil, foram retiradas do geotêxtil ensaiado com fluxo, amostras de aproximadamente 1cm², e colocadas em 9 mL de água destilada para obtenção da DQO. Com os valores de DQO foi plotado o gráfico de consumo do substrato e de conseqüente crescimento bacteriano, no qual se pôde perceber a tendência de decaimento do substrato limitante analisado, neste caso a DQO, e o crescimento da biomassa presente no geotêxtil. A Tabela 4.5 apresenta os valores de DQO obtidos para cada geotêxtil após ensaios de colmatação por fluxo de chorume.

Tabela 4.5: DQO dos geotêxteis após ensaios de colmatação com fluxo de chorume.

Tempo (dias)	DQO (mg/L)		
	GTX	GTY	GTZ
15	82,5	111,5	109,5
30	75,5	107	81,5
45	60,5	73,5	60,5
60	605,0	770,7	1403,0
90	1591,7	1590,0	1396,7

A cinética de crescimento bacteriano foi simulada a partir da equação de MONOD (1949). O crescimento bacteriano, ou seja, a produção de biomassa, pode ser expressa em função do substrato utilizado. Quanto mais substrato for assimilado, maior a taxa de crescimento bacteriano. Essa relação pode ser expressa como:

Taxa de crescimento = Y (taxa de remoção de substrato) ou:

$$\frac{dX}{dt} = Y \cdot \frac{dS}{dt} \quad (4.1)$$

Onde:

X: concentração de microorganismos (mg/L);

Y: coeficiente de produção celular (mg biomassa/ mg de DQO removida). Esse valor foi retirado da literatura (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994) e adotado igual a 0,2;

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

t: tempo (dias).

A teoria de MONOD (1949) já está bem consolidada para o tratamento de esgotos. Portanto, o coeficiente de produção celular (Y) é considerado na literatura tanto em tratamento aeróbio quanto anaeróbio e para cada tratamento tem valores diferentes para a fase acidogênica e metanogênica. Assim, nesse trabalho foi considerado que o chorume esteve submetido a condições anaeróbias. Utilizando-se os valores de Y propostos por van Haandel e Lettinga (1994) para as fases acidogênica (Y = 0,15) e metanogênica (Y = 0,03) plotou-se a curva da biomassa que seria formada nessas duas fases com relação ao substrato utilizado (DQO). A curva de conversão do substrato foi plotada considerando-se a DQO consumida em cada período ensaiado, ou seja, aos 15, 30, 45, 60 e 90 dias.

Para gerar a curva de biomassa aderida ao geotêxtil, foi feita uma simplificação, assumindo-se que toda a DQO encontrada no geotêxtil foi convertida em biomassa (X) e encontrando-se os valores de Y em cada período ensaiado com relação a DQO do substrato. Os gráficos apresentados nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 mostram o comportamento descrito pela equação de MONOD (1949), em que à medida que o substrato presente no meio, no caso a DQO, está sendo consumido ou removido pelos microorganismos, acontece o aumento da biomassa no geotêxtil, o que resulta na formação do biofilme.

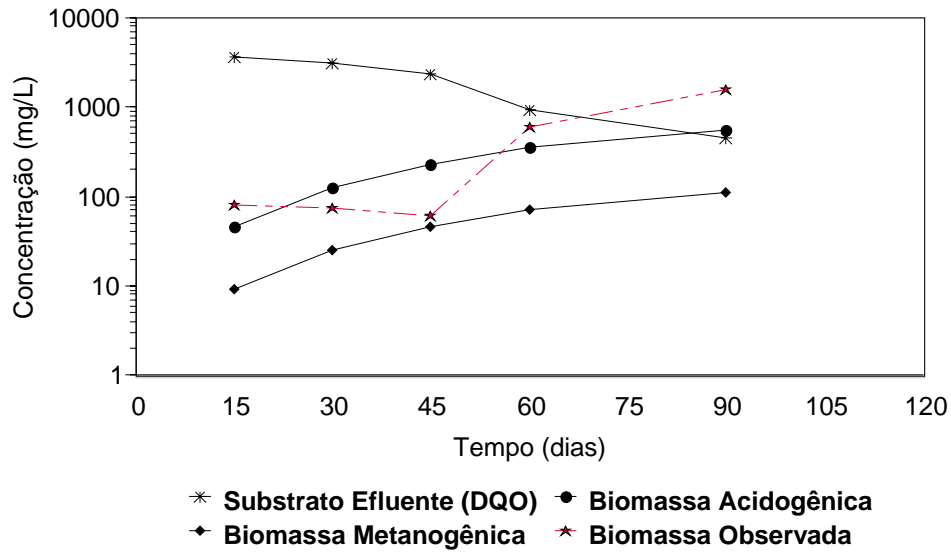


Figura 4.23: Cinética de crescimento bacteriano para o geotêxtil GTX (ensaio com fluxo).

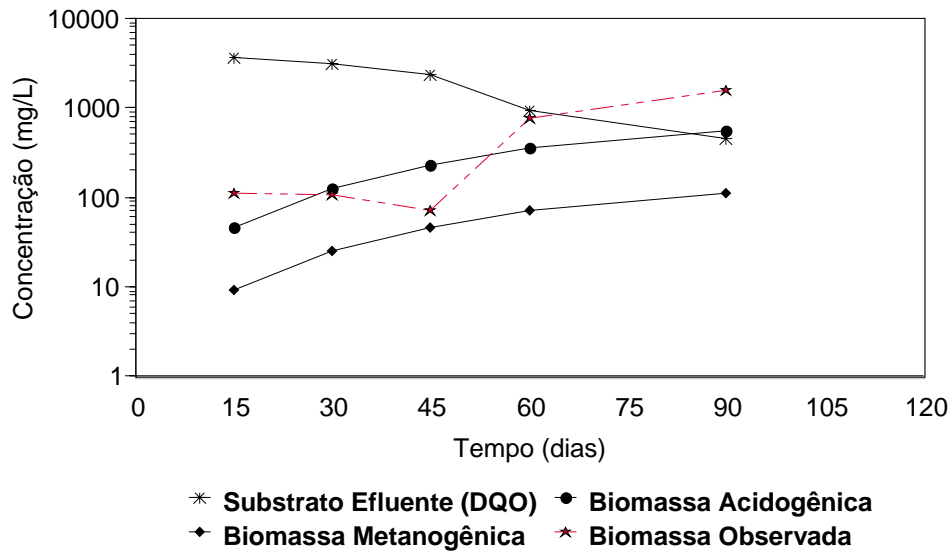


Figura 4.24: Cinética de crescimento bacteriano para o geotêxtil GTY (ensaio com fluxo).

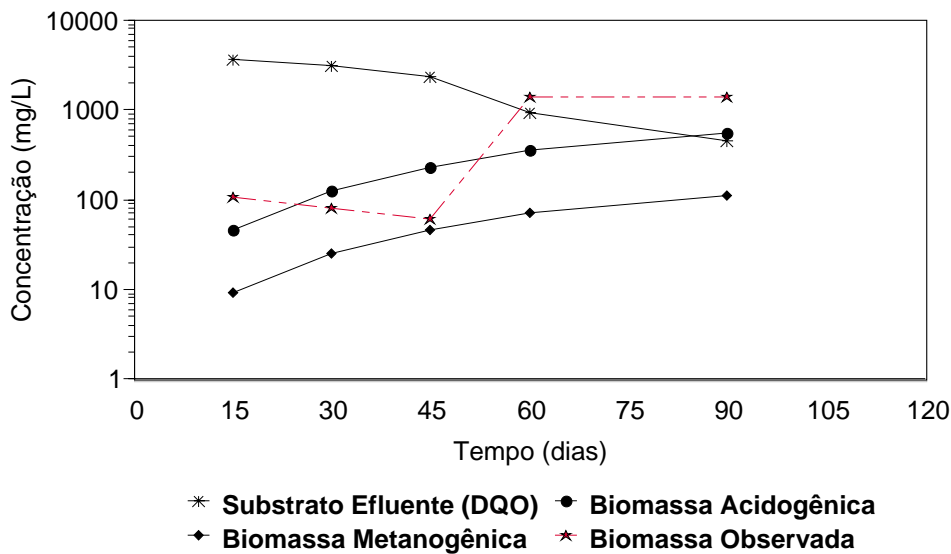


Figura 4.25: Cinética de crescimento bacteriano para o geotêxtil GTZ (ensaio com fluxo).

Analisando as Figuras 4.23, 4.24 e 4.25, pode-se perceber que para os três geotêxteis estudados a curva de biomassa observada está variando entre as curvas de biomassa plotadas para as condições acidogênica e metanogênica, o que indica que o chorume passou por um tratamento anaeróbio. Porém, para que a curva observada possa ser aferida, e se ajuste ao modelo estudado, faz-se necessário um monitoramento detalhado da degradação do chorume e conseqüente formação de biomassa. Dessa forma, poder-se-ão encontrar valores do coeficiente de produção celular (Y) adequados ao chorume e ao geotêxtil.

As Figuras 4.23 e 4.24 mostram que o substrato passou a ser um fator limitante no crescimento da biomassa por volta dos 70 dias de ensaio, quando a DQO continuou diminuindo, embora se tenha percebido um contínuo crescimento da biomassa observada, mesmo que de forma mais lenta. Já no ensaio com o geotêxtil GTZ (Fig. 4.25), o substrato passou a ser limitante por volta dos 60 dias de ensaio e, mesmo com a diminuição da DQO, não houve aumento significativo na biomassa observada.

4.1.5. VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS GEOTÊXTEIS COM O TEMPO

Para avaliar a eficiência do geotêxtil como elemento drenante sob as condições ensaiadas nesta pesquisa foram feitas leituras da vazão na saída dos permeâmetros, bem como leituras da carga hidráulica por meio de piezômetros no permeâmetro antes e após o geotêxtil. Essas leituras permitiram calcular a permeabilidade de cada geotêxtil ensaiado e avaliá-la ao longo do período de duração dos ensaios, que foram realizados com três amostras de cada tipo de geotêxtil. Os ensaios foram realizados em cinco períodos diferentes com três repetições dos três tipos de geotêxteis GTX, GTY e GTZ. Para avaliar a tendência do comportamento de cada amostra de geotêxtil nos períodos ensaiados preparou-se um gráfico com todos os valores médios da permeabilidade ao longo do tempo para cada tipo de geotêxtil ensaiado, conforme mostra a Figura 4.26.

De acordo com a Figura 4.26, percebe-se que nos primeiros dez dias de ensaio os valores dos coeficientes de permeabilidade dos geotêxteis oscilam bastante, e isso pode ter sido causado principalmente pelo fato de os geotêxteis ainda não se encontrarem completamente saturados.

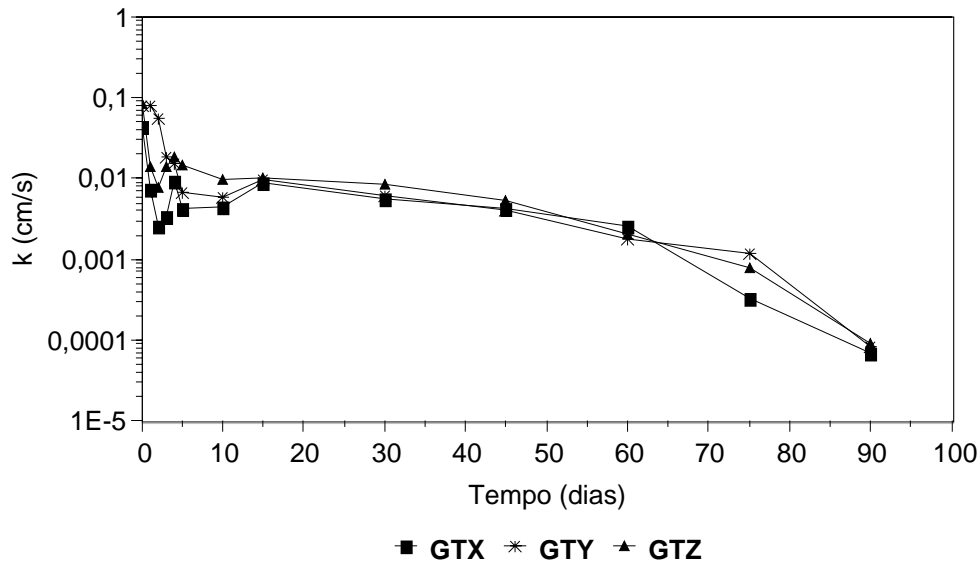


Figura 4.26: Evolução temporal do coeficiente de permeabilidade dos geotêxteis GTX, GTY e GTZ.

A variação encontrada no valor do coeficiente de permeabilidade das amostras de GTX, GTY e GTZ pode estar relacionada ao processo de formação do biofilme gerado em cada uma das amostras. A distribuição espacial do biofilme no geotêxtil não necessariamente segue uma mesma tendência para todas as amostras. Enquanto em algumas amostras pode-se ter biofilme predominantemente no interior dos vazios do geotêxtil, em outras o biofilme pode ter se concentrado na superfície do geotêxtil, provocando o seu cegamento.

A Figura 4.26 mostra claramente que os geotêxteis GTX, GTY e GTZ apresentaram tendência similar para a variação do coeficiente de permeabilidade com o tempo, sendo GTX o que apresentou um comportamento mais uniforme, ou seja, teve uma redução na permeabilidade menos acentuada e mais uniforme ao longo do tempo que os geotêxteis GTY e GTZ, que se comportaram de forma bem similar. Esta variação no comportamento dos geotêxteis pode estar relacionada às distintas gramaturas entre eles, como também as respectivas dimensões de vazios e constrições. No entanto, para que possamos determinar qual o geotêxtil mais adequado para ser utilizado como dreno de chorume em aterro sanitários ainda faz-se necessário um maior número de pesquisas, de modo a se aumentar o conhecimento do comprometimento causado pela colmatação biológica em cada tipo de geotêxtil, levando em consideração suas propriedades físicas e hidráulicas.

As reduções de permeabilidade ao longo do tempo para os geotêxteis GTX, GTY e GTZ durante os períodos ensaiados foram significativas, principalmente no ensaio com duração de

90 dias, para o qual se detectou a maior perda de permeabilidade dos espécimes ensaiados, da ordem de 99%.

COLMANETTI (2000) avaliou a permeabilidade de amostras de geotêxteis GTY e GTZ após estas terem sido utilizadas como parte do sistema drenante de tanques com lixo doméstico, com alto teor de matéria orgânica, operados durante seis meses. Os valores da permeabilidade encontrados foram comparados aos valores encontrados por GARDONI & PALMEIRA (1999) e por PALMEIRA (1997) para a permeabilidade desses geotêxteis no estado virgem, se observando uma redução na ordem de seis vezes, tanto para o geotêxtil GTY quanto para o geotêxtil GTZ. Porém, segundo COLMANETTI (2000), esta redução não influenciou de forma significativa a capacidade drenante dos sistemas, para o período monitorado.

KOERNER & KOERNER (1990) verificaram a tendência de obstrução de filtros de geotêxteis e solo natural utilizando seis percolados provenientes de aterros sanitários em 96 ensaios de coluna. Observaram-se reduções de vazão de fluxo superiores a 75 % em 49 colunas do experimento.

Os resultados obtidos no presente estudo e em outros estudos na literatura sugerem as condições de ensaios em que espécimes de geotêxteis são submetidos a fluxo de chorume podem ser bem mais severas que aquelas observadas quando o geotêxtil é colocado diretamente em contato com o lixo. Isso em parte pode ser devido ao lixo se comportar como um pré-filtro para o fluido que atinge a camada drenante. É de se esperar que o mesmo ocorra no campo, como foi observado por JUNQUEIRA (2000) e SILVA (2004).

4.1.6. AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DE VOLUME DE VAZIOS DOS GEOTÊXTEIS

A redução de permeabilidade do geotêxtil devido à formação de biofilme pode ser associada a uma redução dos seus poros. Para avaliar a redução equivalente do volume de vazios do geotêxtil, ocasionada pela formação do biofilme ao longo do período de ensaio, que provocaria a mesma perda de permeabilidade observada, utilizou-se a Equação 4.2 proposta por GIROUD (1996):

$$K = \frac{\beta \rho g}{16\eta} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_f^2 \quad (4.2)$$

Onde:

K é o coeficiente de permeabilidade;

β é o fator de forma, que é função da tortuosidade do caminho através do meio. GIROUD (1996) sugere um valor médio de β igual a 0,11 para os geotêxteis não tecidos;

g é a aceleração da gravidade;

ρ é a massa específica do fluido;

η é a viscosidade dinâmica do fluido;

d_f é o diâmetro da fibra;

n é a porosidade média do geotêxtil.

GARDONI (2000) estudou o efeito da impregnação dos geotêxteis não tecidos nas suas propriedades físicas e hidráulicas com ensaios de transmissividade utilizando o mesmo modelo acima, proposto por GIROUD (1996). A pesquisadora percebeu que o modelo mostrou uma acurácia satisfatória para a previsão do coeficiente de permeabilidade normal de geotêxteis virgens ou impregnados sob confinamento, evidenciando o potencial de utilização da expressão desenvolvida por GIROUD.

A equação (4.3) pode ser reescrita como:

$$K = \chi \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (4.3)$$

Sendo que:

$$\chi = \frac{\beta \rho g}{16\eta} d_f^2 \quad (4.4)$$

Os valores de massa específica e viscosidade do chorume foram admitidos equivalentes aos da água para o cálculo de χ . Para estimar a variação da porosidade do geotêxtil com o tempo usaram-se os valores da permeabilidade média medidos durante os ensaios. A Figura 4.27 mostra a redução equivalente do volume de vazios (em %) devido à colmatção biológica no tempo para os geotêxteis ensaiados.

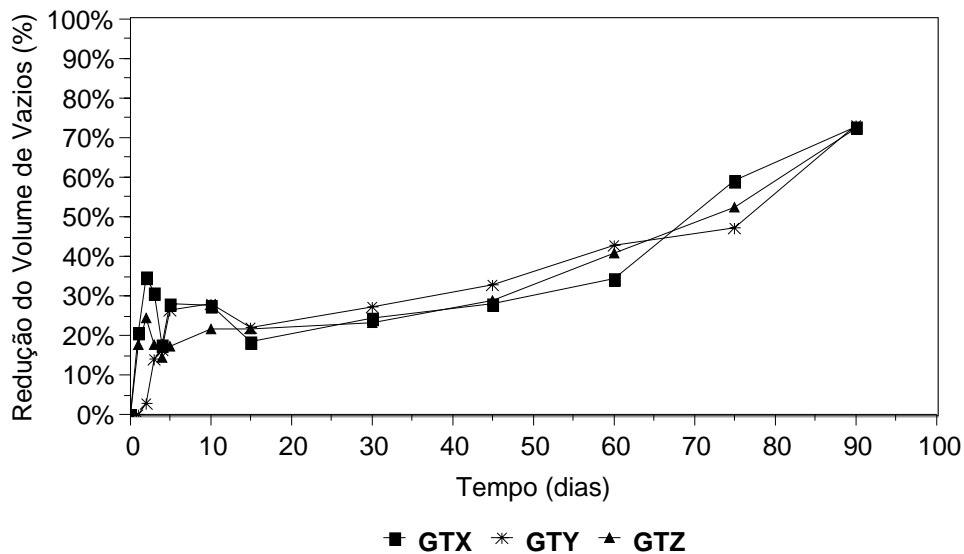


Figura 4.27: Redução equivalente do volume de vazios do geotêxtil no tempo.

A Figura 4.27 mostra que após 90 dias de ensaio o processo de colmatção biológica pode ser equivalente a uma redução do volume de vazios do geotêxtil de 72,9% para o GTX, 73,0% para GTY e 72,4% para o GTZ. Pode-se associar a redução do volume de vazios dos geotêxteis ensaiados à formação do biofilme de bactérias na superfície dos poros sem necessariamente ocupar todo o interior dos vazios, uma vez que a redução percentual de permeabilidade encontrada para os três geotêxteis foi da ordem de 99% ao final de 90 dias de ensaio. As variações iniciais da redução de vazios do geotêxtil deveu-se à variação do coeficiente de permeabilidade ocorrida neste período, estando relacionada também a não saturação completa do geotêxtil.

4.2. ENSAIO DE COLMATÇÃO POR IMERSÃO

4.2.1. ANÁLISE QUÍMICA DO CHORUME

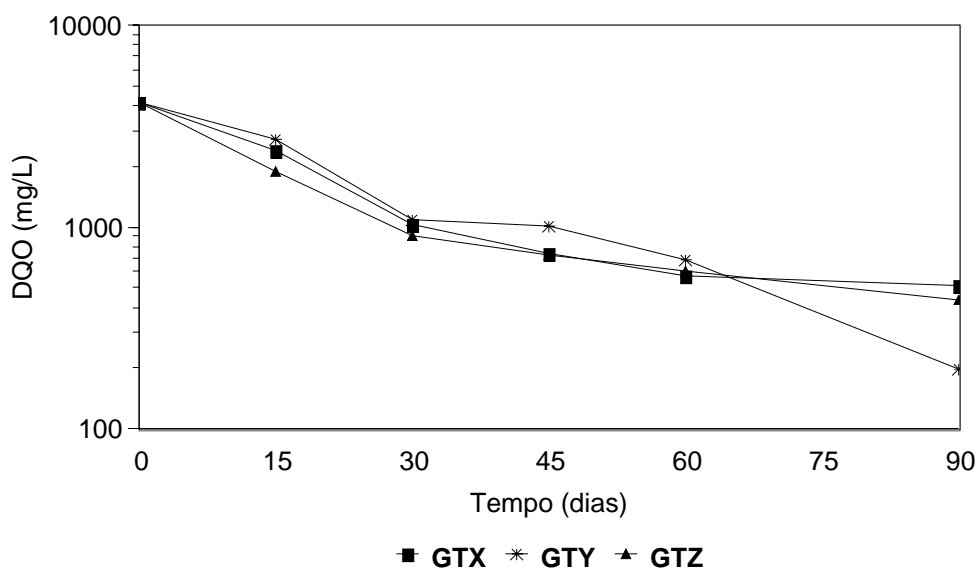
Para o ensaio de colmatção por imersão, o chorume foi caracterizado no início do ensaio e no final de cada período de 15, 30, 45, 60 e 90 dias. Como a quantidade de chorume remanescente na placa utilizada para armazenar o geotêxtil não era suficiente para fazer as determinações de nitrato, amônia e ortofosfato, fez-se apenas as análises de DQO, que é o parâmetro utilizado para simular o crescimento bacteriano. A Tabela 4.6 apresenta os resultados da caracterização do chorume utilizado neste ensaio e ao longo de cada período ensaiado.

Tabela 4.6: Caracterização química do chorume.

Período	Chorume do GTX	Chorume do GTY	Chorume do GTZ
	DQO (mg/L)		
Início	4160	4160	4160
15 dias	2400	2730	1890
30 dias	1030	1100	910
45 dias	740	1020	730
60 dias	580	690	610
90 dias	520	200	440

Como neste ensaio não houve fluxo de chorume através do geotêxtil, tomou-se o cuidado de ao final de cada período ensaiado obter a DQO do chorume remanescente para acompanhar a evolução da degradação do chorume que foi utilizado como substrato para a formação do biofilme no geotêxtil em condições de saturação.

A Figura 4.28 mostra que o chorume utilizado nestes ensaios apresentou a mesma tendência de degradação para os três tipos de geotêxtil ensaiados, com exceção do valor obtido para o geotêxtil GTY após 90 dias. Considera-se que parte da carga orgânica presente no chorume, que foi monitorada pela DQO, foi convertida pelos microrganismos em biomassa bacteriana, aderida às fibras do geotêxtil, podendo promover a colmatção biológica deste. Portanto, o monitoramento da DQO deste chorume é de grande importância para a avaliação da biomassa gerada no geotêxtil.

**Figura 4.28:** Variação temporal da DQO do chorume.

4.2.2. ANÁLISE MICROBIOLÓGICA

As análises microbiológicas foram feitas nos geotêxteis que estiveram submetidos ao ensaio de colmatção por imersão após 90 dias. Foram analisadas amostras centrais de cada geotêxtil GTX, GTY e GTZ. No entanto, no ensaio de colmatção por imersão analisou-se uma única amostra para cada tipo de geotêxtil.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos para cada grupo funcional dos microrganismos pesquisados nos geotêxteis submetidos aos ensaios de colmatção por imersão.

Tabela 4.7: Contagem de microrganismos nos geotêxteis (UFC/cm²).

Amostra	MICROORGANISMO						
	Bactéria	Amilolítico	Celulolítico	Solubilizador de Fosfato	Amonificador	Oxidante de NH ₄ ⁺	Oxidante de NO ₂ ⁻
GTX	5,40x10 ⁴	3,00x10 ⁴	1,35x10 ⁴	2,00x10 ³	7,36x10 ⁴	2,55x10 ⁵	1,57x10 ⁴
GTY	3,55x10 ⁷	6,50x10 ⁷	1,00x10 ⁶	2,05x10 ⁴	2,31x10 ⁴	2,55x10 ⁵	4,84x10 ⁴
GTZ	3,31x10 ⁷	1,74x10 ⁷	3,85x10 ⁴	3,95x10 ⁴	4,62x10 ⁷	5,19x 0 ⁵	4,10x10 ⁴

Na Tabela 4.7 observa-se que em todos os geotêxteis ensaiados foram encontrados os microrganismos analisados, inclusive os oxidantes do íon amônio (NH₄⁺) e os oxidantes de nitrito (NO₂⁻).

A presença do oxidante do íon amônio identifica que o processo de nitrificação neste ensaio se deu de forma mais lenta do que no ensaio de colmatção com fluxo, uma vez que o íon amônio ainda não foi convertido em nitrito e este conseqüentemente não foi convertido em nitrato (NO₃). Acredita-se que este fato deve-se a ausência de fluxo do chorume neste ensaio, o que pode ter dificultado a ação dos microrganismos responsáveis pelo processo de nitrificação.

A Figura 4.29 apresenta os valores médios de unidades formadoras de colônias por área dos geotêxteis (UFC/cm²) GTX, GTY e GTZ no ensaio de colmatção por imersão em chorume com tempo de duração de 90 dias.

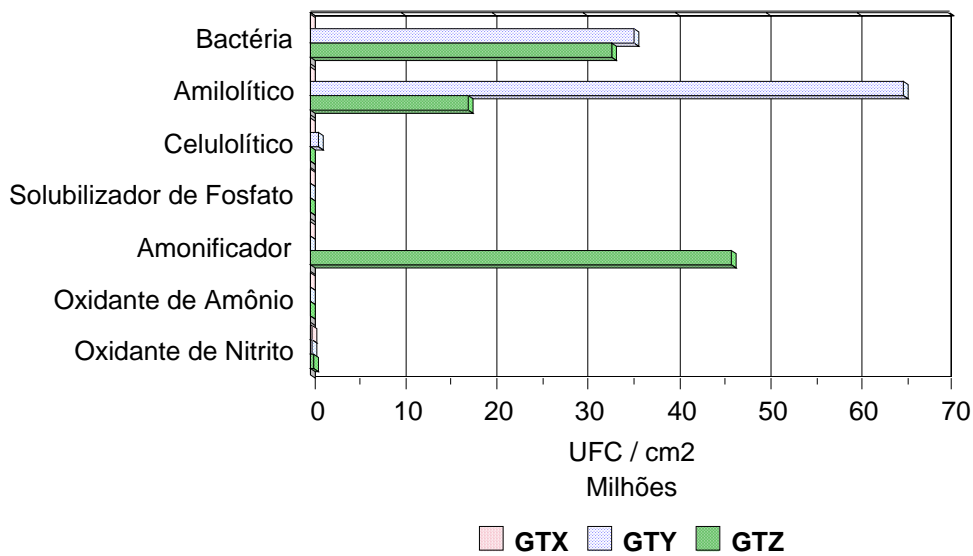


Figura 4.29: Contagem de microrganismos nos geotêxteis – por imersão (UFC/cm²).

A Figura 4.29 mostra que além de haver uma variação da quantidade de microrganismos presentes nos geotêxteis analisados nesse período, o número de unidades formadoras de colônias por área é inferior ao encontrado no ensaio de colmatação com fluxo.

No geotêxtil GTX identificaram-se todos os microrganismos analisados, porém os mais frequentes foram os oxidantes de amônio, com $2,55E+05$ UFC/cm², e os outros microrganismos analisados apresentaram concentração média da ordem de $3,0E+04$ UFC/cm².

O geotêxtil GTY apresentou os amilolíticos como os microrganismos identificados em maior quantidade, com concentração de $6,5E+07$ UFC/cm², seguidos de bactérias, com $3,55E+07$ UFC/cm², celulolíticos, com $1,11E+06$ UFC/cm². Os outros microrganismos apresentaram concentração média da ordem de $2,4E+04$ UFC/cm².

No geotêxtil GTZ os microrganismos que apresentaram maior concentração foram os amonificadores, com $4,62E+07$ UFC/cm², seguidos das bactérias, com $3,31E+07$ UFC/cm², e dos amilolíticos, com $1,74E+07$ UFC/cm². Os demais microrganismos analisados apresentaram concentração média da ordem de $3,0E+04$ UFC/cm². A tendência do crescimento dos microrganismos no geotêxtil GTZ no ensaio de colmatação por imersão apresentou-se semelhante ao observado no ensaio de colmatação com fluxo.

4.2.3. ANÁLISE MICROSCÓPICA

Também para essa análise foi necessário fazer a preparação das amostras de modo a serem avaliadas no microscópio, da mesma forma como foi descrito para o ensaio de colmatção com fluxo.

A análise de microscopia de varredura para os geotêxteis submetidos ao ensaio de colmatção por imersão mostrou que a formação de biofilme evolui de forma muito reduzida e lenta ao longo dos períodos ensaiados. Por essa razão, a seguir são apresentadas somente as fotos relativas aos períodos de 30, 60 e 90 dias de ensaio, para os três geotêxteis ensaiados, GTX, GTY e GTZ.

As Figuras 4.30 a 4.38 apresentam as fotos obtidas em microscópio de varredura com o intuito de melhor compreender e acompanhar a formação do biofilme nos geotêxteis GTX, GTY e GTZ durante o ensaio de colmatção por imersão. A evolução temporal da formação do biofilme no geotêxtil GTX está apresentada nas Figuras 4.30, 4.31 e 4.32.

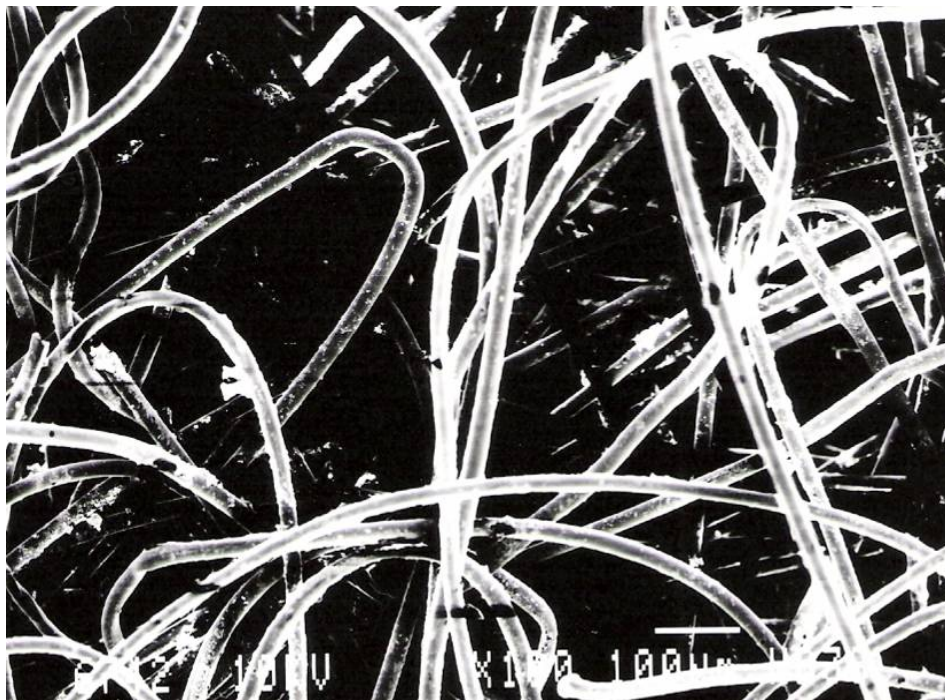


Figura 4.30: Formação de biofilme após 30 dias para o geotêxtil GTX – por imersão.



Figura 4.31: Formação de biofilme após 60 dias para o geotêxtil GTX – por imersão.



Figura 4.32: Formação de biofilme após 90 dias para o geotêxtil GTX – por imersão.

As Figuras 4.33 a 4.35 apresentam a evolução temporal da formação do biofilme no geotêxtil GTY no ensaio de colmatação por imersão.

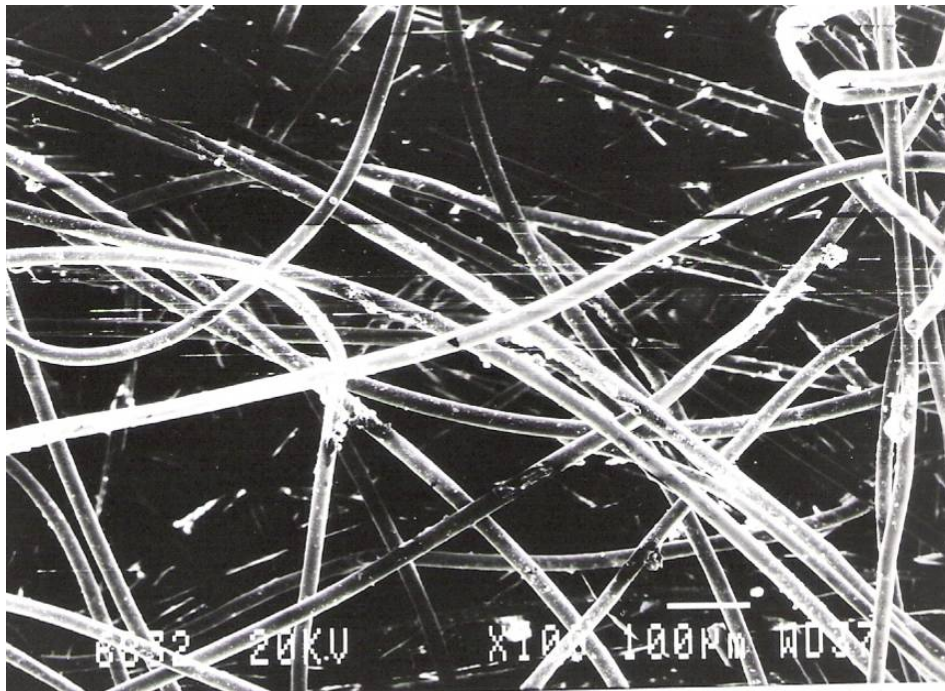


Figura 4.33: Formação de biofilme após 30 dias para o geotêxtil GTY – por imersão.

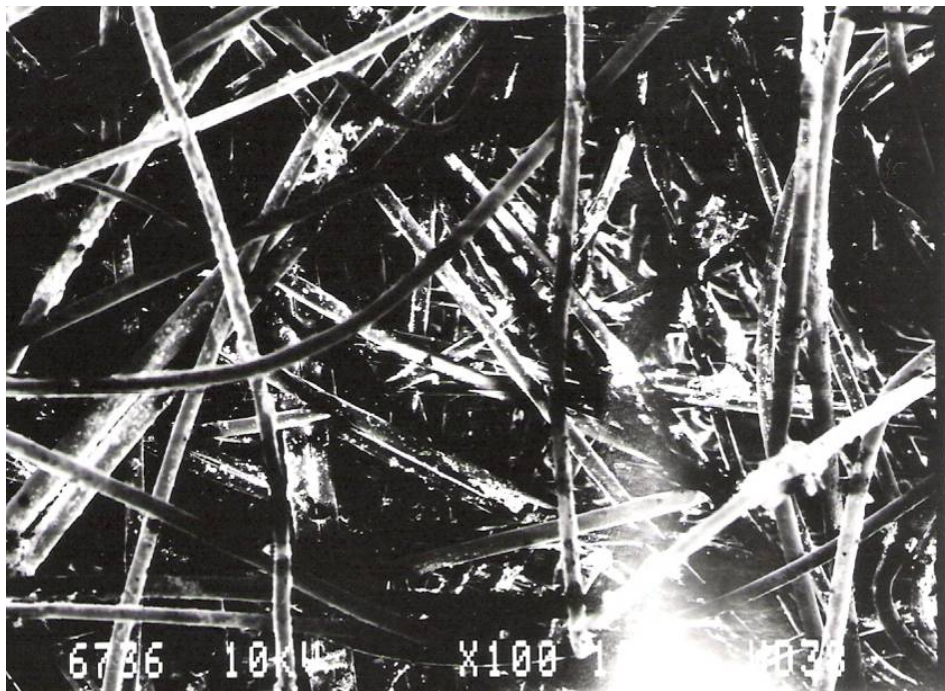


Figura 4.34: Formação de biofilme após 60 dias para o geotêxtil GTY – por imersão.

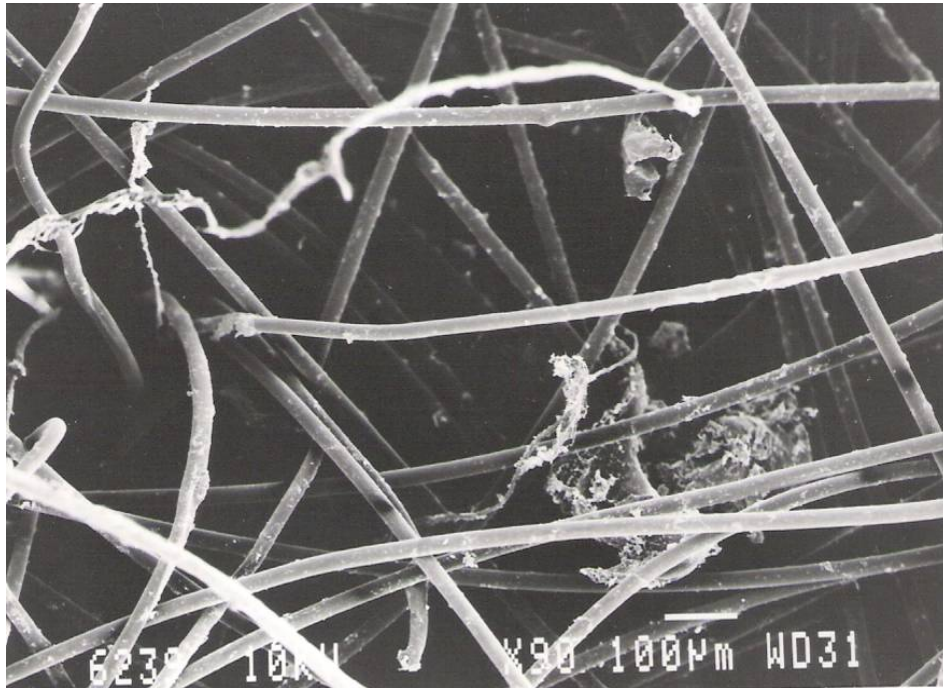


Figura 4.35: Formação de biofilme após 90 dias para o geotêxtil GTY – por imersão.

As Figuras 4.36 a 4.38 apresentam a evolução temporal da formação do biofilme no geotêxtil GTZ no ensaio de colmatção por imersão.



Figura 4.36: Formação de biofilme após 30 dias para o geotêxtil GTZ – por imersão.



Figura 4.37: Formação de biofilme após 60 dias para o geotêxtil GTZ – por imersão.



Figura 4.38: Formação de biofilme após 90 dias para o geotêxtil GTZ – por imersão.

Analisando as Figuras 4.30 a 4.38 pode-se perceber que o processo de formação do biofilme no geotêxtil se dá de modo semelhante ao observado no ensaio de colmatção com fluxo. No entanto, este processo evolui mais lentamente, uma vez que ao final de 90 dias de ensaio a maioria dos vazios do geotêxtil ainda não estava preenchida pelo biofilme de forma significativa, havendo apenas algumas obstruções pontuais. Acredita-se que a formação do biofilme, neste ensaio, aconteceu de forma muito lenta devido às condições do próprio ensaio. Em não havendo fluxo e chorume, a ingestão de nutrientes para os microrganismos foi prejudicada, fazendo com que estes precisassem lutar pelo alimento, o que pode ter diminuído os seus tempos de vida.

Buscando uma relação com o que pode acontecer em escala real, em pontos do sistema drenante ou em épocas do ano onde praticamente não haja fluxo de chorume, espera-se que a sobrevivência dos microrganismos seja reduzida e, possivelmente, haja um retardo na formação do biofilme ou até um rompimento do biofilme já presente no dreno.

4.2.4. SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO BACTERIANO

Para fazer a simulação da curva proposta por MONOD (1949), para o crescimento bacteriano no geotêxtil, foi retirada do geotêxtil ensaiado sob imersão amostras de aproximadamente 1cm^2 e colocadas em 9 mL de água destilada para extração da DQO, como também realizado para os espécimes ensaiados sob fluxo de chorume. Com os valores de DQO foi plotado o gráfico de consumo do substrato e de conseqüente crescimento bacteriano, no qual se percebe a tendência de decaimento do substrato limitante analisado (DQO) e o crescimento da biomassa presente no geotêxtil. A Tabela 4.8 apresenta a DQO do geotêxtil no ensaio de colmatção por imersão.

Tabela 4.8: DQO do geotêxtil no ensaio de colmatção por imersão.

Tempo (dias)	DQO (mg/L)		
	GTX	GTY	GTZ
15	87,5	70,0	112,0
30	80,0	78,5	100,0
45	570,0	840,0	1020,0
60	830,0	1255,0	1290,0
90	1175,0	1120,0	1180,0

A cinética de crescimento bacteriano foi simulada a partir da equação de MONOD (1949). O crescimento bacteriano, ou seja, a produção de biomassa pode ser expressa em função do substrato utilizado. Quanto mais substrato for assimilado, maior a taxa de crescimento bacteriano. Como visto para os ensaios de colmatação com fluxo, essa relação pode ser expressa como:

Taxa de crescimento = Y (taxa de remoção de substrato), ou:

$$\frac{dX}{dt} = Y \cdot \frac{dS}{dt} \quad (4.1)$$

Onde:

X: concentração de microorganismos (mg/L);

Y: coeficiente de produção celular (mg biomassa/ mg de DQO removida). Esse valor foi retirado da literatura (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994): $Y = 0,2$;

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

t: tempo (dias).

As Figuras 4.39, 4.40 e 4.41 apresentam a remoção de substrato e o conseqüente crescimento bacteriano sobre o geotêxtil no ensaio por imersão, para as durações de ensaios de 15, 30, 45, 60 e 90 dias. Para o ensaio de colmatação por imersão foram feitas as mesmas considerações e simplificações quanto à teoria de MONOD (1949) utilizadas para a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios de colmatação com fluxo de chorume.

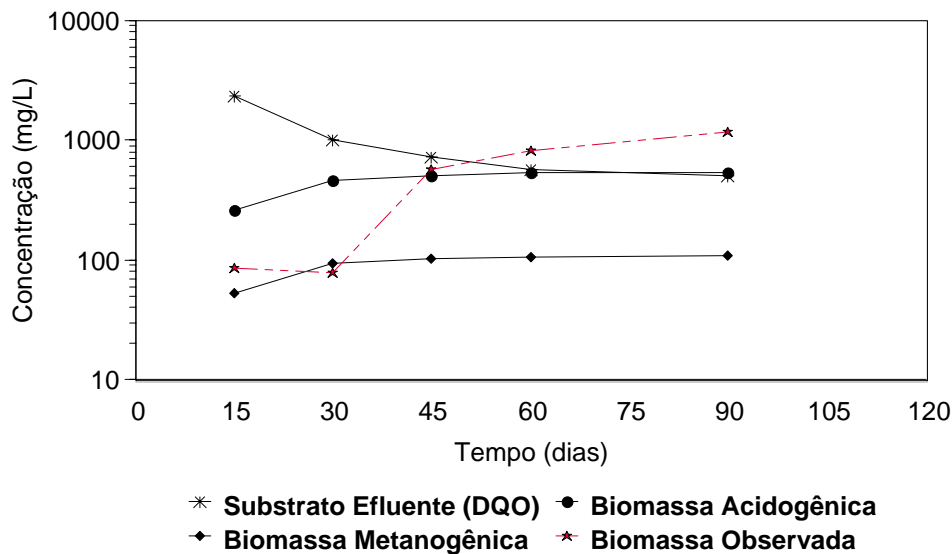


Figura 4.39: Cinética de crescimento bacteriano para o geotêxtil GTX (ensaio por imersão).

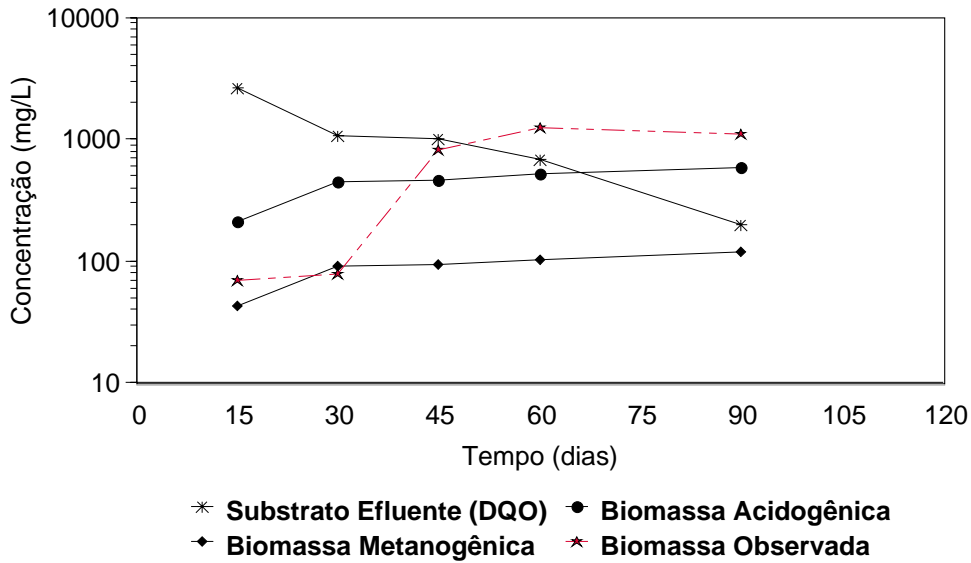


Figura 4.40: Cinética de crescimento bacteriano para o geotêxtil GTY (ensaio por imersão).

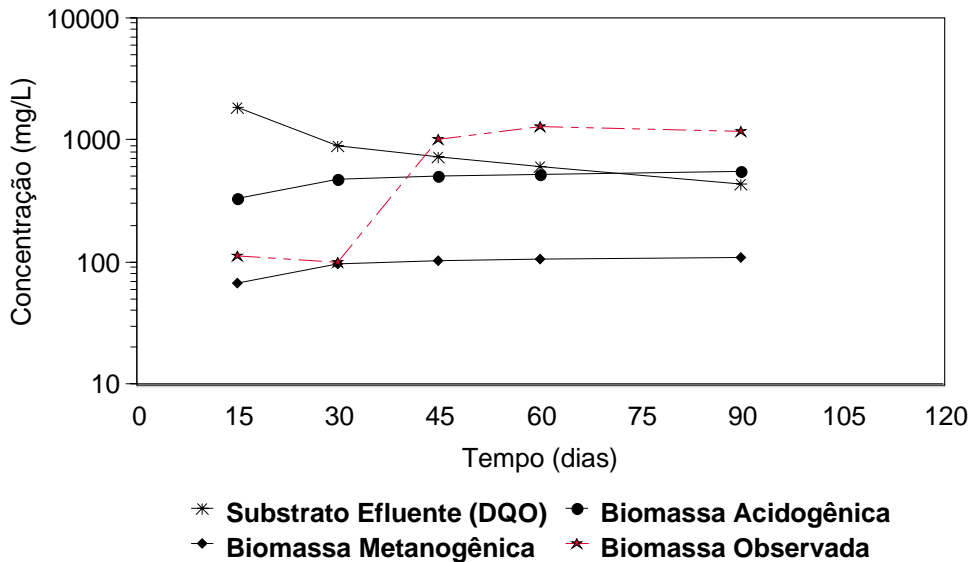


Figura 4.41: Cinética de crescimento bacteriano para o geotêxtil GTZ (ensaio por imersão).

Analisando as Figuras 4.39, 4.40 e 4.41, pode-se notar que para os três geotêxteis estudados a curva de biomassa observada está variando entre as curvas de biomassa acidogênica e metanogênica, como também observado para os ensaios com fluxo. Isso indica que o chorume passou por uma degradação anaeróbia. No entanto, percebe-se que o substrato passou a ser um fator limitante no crescimento da biomassa de forma mais rápida para esse ensaio, o que pode ser atribuído à ausência de recirculação do chorume, pois não há aporte contínuo de alimento.

Nos geotêxteis GTX e GTY observa-se que o substrato passou a ser um fator limitante por volta dos 50 dias de ensaio, sendo que no geotêxtil GTX após esse período ainda houve um

ligeiro aumento da biomassa até os 90 dias do ensaio. Já no geotêxtil GTY percebe-se que, quando a DQO passou a ser limitante ao crescimento, houve um pequeno crescimento da biomassa até os 60 dias do ensaio e depois esta permaneceu estável até os 90 dias. Para o ensaio com o geotêxtil GTZ (Fig. 4.41), o substrato passou a ser limitante por volta dos 45 dias de ensaio e, mesmo com a diminuição da DQO, praticamente não houve aumento na biomassa observada.

4.3. ENSAIO DE DESOBSTRUÇÃO DOS POROS DO GEOTÊXTEL POR AUMENTO DE CARGA HIDRÁULICA

Para avaliar a capacidade de recuperação da capacidade drenante dos geotêxteis colmatados submetidos ao fluxo de chorume, realizaram-se ensaios de aumento de carga hidráulica em amostras destes geotêxteis, a partir do aumento do gradiente hidráulico de fluxo por meio de equipamento específico, descrito no capítulo 3. O mesmo sistema foi utilizado para se obter a curva características de permeabilidade dos geotêxteis virgens (GTX, GTY e GTZ) sob as mesmas condições de fluxo (turbulento). Foram realizados ensaios com espécimes de geotêxteis submetidos aos ensaios de colmatção por fluxo de chorume após ensaios com 90 dias de duração.

As Figuras 4.42, 4.43 e 4.44 apresentam os resultados de coeficientes de permeabilidade em função do gradiente hidráulico para os geotêxteis GTX, GTY e GTZ virgens e colmatados.

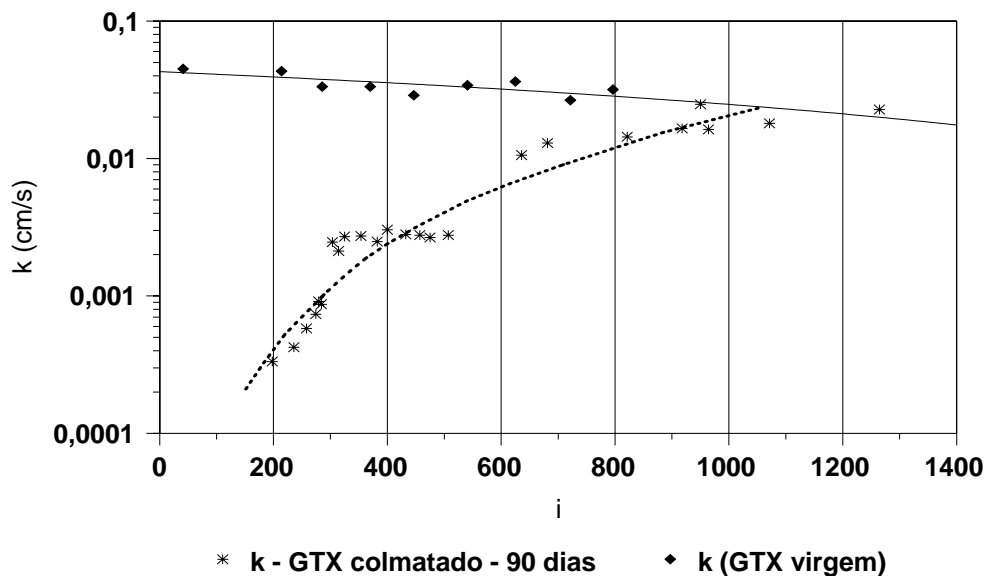


Figura 4.42: Variação do coeficiente de permeabilidade com o gradiente hidráulico (GTX).

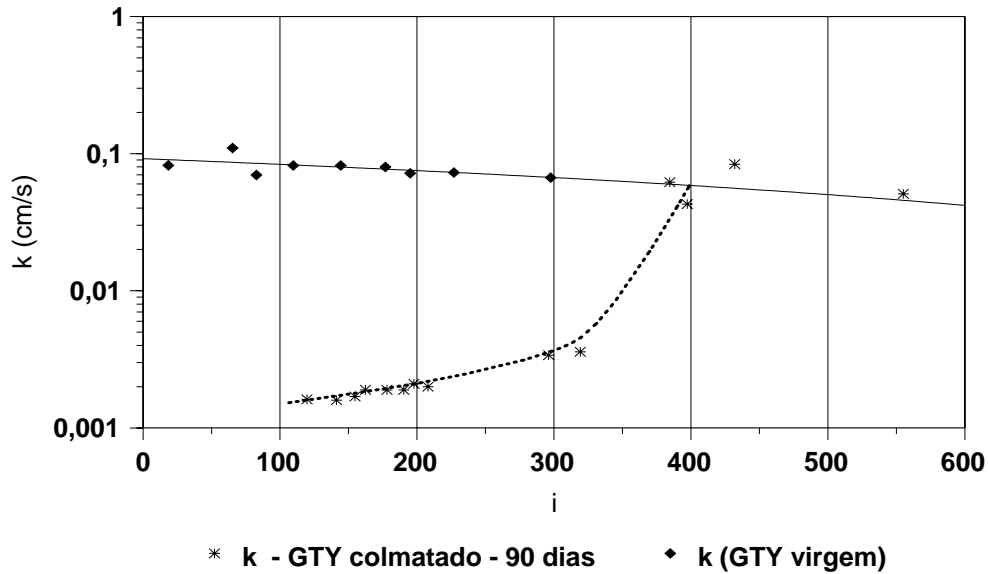


Figura 4.43: Variação do coeficiente de permeabilidade com o gradiente hidráulico (GTY).

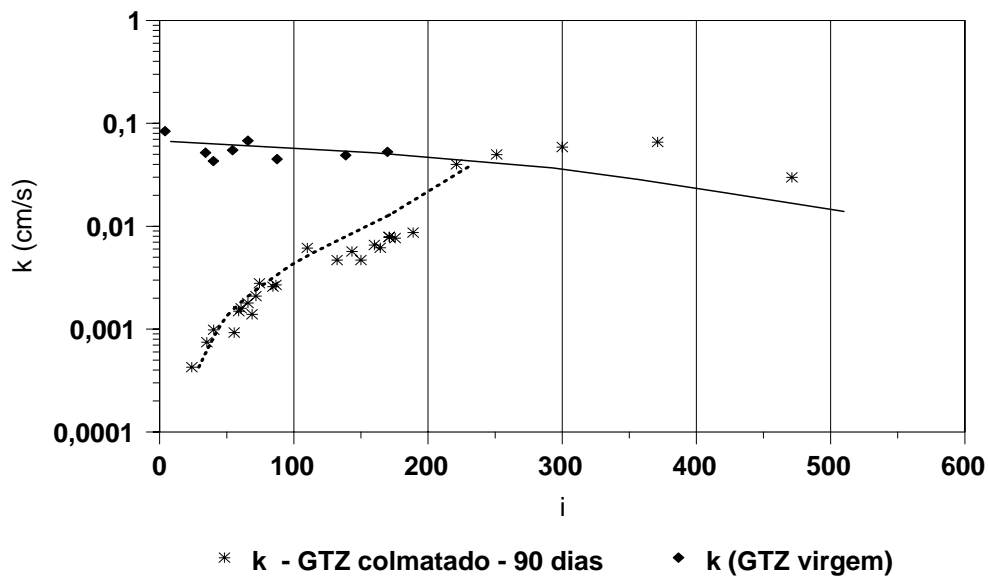


Figura 4.44: Variação do coeficiente de permeabilidade com o gradiente hidráulico (GTZ).

Os resultados obtidos mostram os coeficientes de permeabilidade dos geotêxteis virgens reduzindo ligeiramente com o aumento do gradiente para as condições de fluxo turbulento. Os valores obtidos foram também inferiores aos observados em ensaios de permissividade sob condições de fluxo laminar.

As Figuras 4.42, 4.43 e 4.44, mostram que os geotêxteis inicialmente colmatados apresentaram uma significativa recuperação da capacidade drenante quando submetidos ao aumento de gradiente hidráulico. Em alguns casos, chegou-se a atingir o coeficiente de permeabilidade do geotêxtil virgem, como por exemplo, o GTY e o GTZ que apresentaram

maior recuperação da capacidade drenante, o que pode ser atribuído talvez a um processo de formação de biofilme mas significativo nas superfícies destes geotêxteis. Observações visuais mostraram que o geotêxtil menos espesso (GTX) apresentava coloração escura nas duas faces. Para os geotêxteis GTY e GTZ, mais espessos, apenas uma face apresentava-se visivelmente tomada por biofilme. Dessa forma, para esses últimos, o biofilme pode não ter se desenvolvido em toda a sua espessura, se concentrando mais na face inferior, podendo então ser rompido mais facilmente com o aumento do gradiente de fluxo.

Foi observado na Figura 4.42 que o geotêxtil GTX necessitou de gradiente hidráulico da ordem de 1000 para que os resultados se aproximassem dos obtidos para o mesmo geotêxtil no estado virgem. Já para o geotêxtil GTY necessitou-se de um gradiente hidráulico da ordem de 400 e para o geotêxtil GTZ da ordem de 250. Intuitivamente, acredita-se que ao se aumentar o gradiente hidráulico sobre um geotêxtil colmatado devido ao acúmulo de chorume sobre o sistema drenante, o geotêxtil recupere parcialmente, ou totalmente, a sua capacidade drenante. Porém, na literatura não há registro de ensaios que possam fornecer a ordem de grandeza de gradientes ao qual deve ser submetido um determinado geotêxtil de forma a que o biofilme seja rompido e a sua permeabilidade aumentada. Portanto, esse tipo de experimento pode ser importante em estudos sobre a capacidade de recuperação do potencial drenante de geotêxteis colmatados.

As Figuras 4.45, 4.46 e 4.47 apresentam os permissividade do geotêxtil versus gradiente hidráulico, para os geotêxteis GTX, GTY e GTZ.

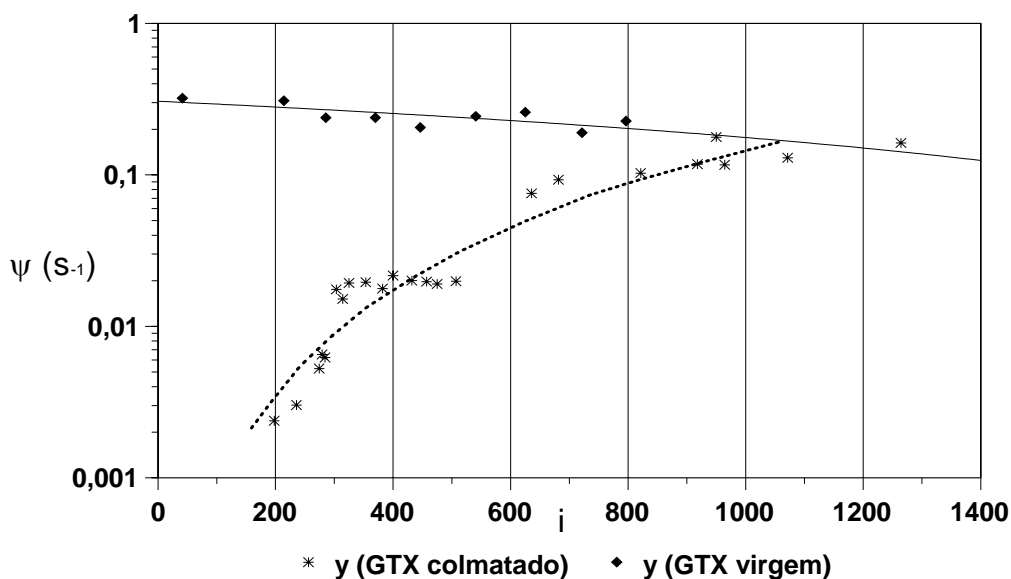


Figura 4.45: Permissividade (ψ) versus gradiente hidráulico (i) – (GTX).

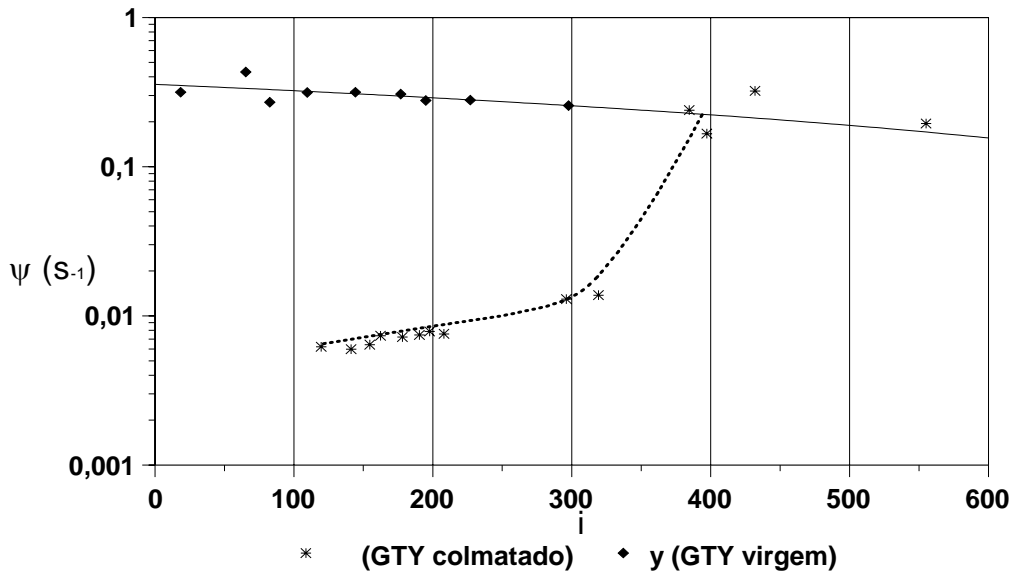


Figura 4.46: Permissividade (ψ) versus gradiente hidráulico (i) – (GTY).

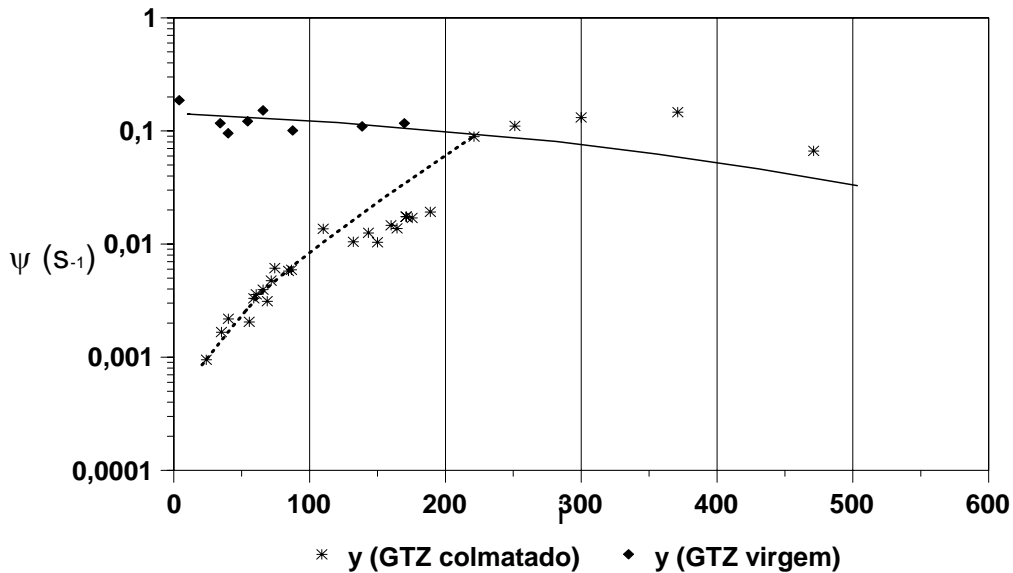
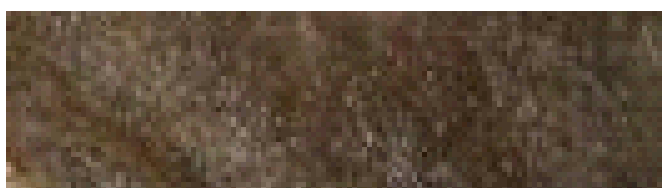


Figura 4.47: Permissividade (ψ) versus gradiente hidráulico (i) – (GTZ).

A relação entre permissividade e gradiente hidráulico (Fig. 4.45, 4.46 e 4.47), é útil para auxiliar no dimensionamento de drenos sintéticos, uma vez que permite estimar a magnitude do gradiente hidráulico ao qual este dreno deve ser submetido de modo a recuperar sua capacidade drenante. Nos ensaios realizados, observou-se que a recuperação total da capacidade drenante se deu segundo um valor de gradiente hidráulico de 1000 (GTX), 400 (GTY) e 250 (GTZ). Os valores dos gradientes hidráulicos obtidos sugerem que alturas de chorume entre 1 e 2 m acima da camada de geotêxtil seriam suficientes para o restabelecimento de boa parte da capacidade drenante inicial dos geotêxteis, para as condições dos ensaios realizados. Entretanto, é importante lembrar que no campo, o geotêxtil está

confinado pelo resíduo sobrejacente, o que reduz a sua espessura e facilita as condições de colmatção biológica.

Percebe-se que para promover a recuperação da capacidade drenante do geotêxtil GTX, o gradiente hidráulico deve ser da ordem de 2,5 e 4 vezes superior aos valores necessário observado para os geotêxteis GTY e GTZ, respectivamente. Tal fato sugere que, apesar de apresentar uma maior permeabilidade no estado virgem, o geotêxtil GTX necessitou de maiores gradientes hidráulicos para o restabelecimento de condições de fluxo similares a que esse geotêxtil apresenta quando no estado virgem. Isso é decorrência de uma maior ocupação dos vazios desse geotêxtil pelos filmes de bactérias, como comentado anteriormente. A Figura 4.48 mostra o aspecto de um dos espécimes de geotêxtil GTX antes e após o ensaio de desobstrução dos poros por aumento de carga hidráulica. Esta figura mostra o quão o geotêxtil se encontrava mais limpo após o ensaio, embora ainda se observem resíduos do processo de colmatção.



(a) Antes do ensaio.



(b) Após ensaio.

Figura 4.48: Aspectos de espécime de geotêxtil GTX antes e após ensaio de desobstrução de poros por aumento de carga hidráulica.

A Figura 4.49 apresenta a variação do gradiente (i) para desobstrução dos poros do geotêxtil versus a espessura (t_{GT}) do geotêxtil. Para os resultados obtidos, quanto mais fino o geotêxtil maior foi o gradiente necessário para re-estabelecer condições de fluxo próximas às dos espécimes virgens. Os resultados sugerem que a menor espessura do geotêxtil pode favorecer uma ocupação mais efetiva dos poros do geotêxtil pelos filmes de bactérias. Por outro lado, em geotêxteis mais espessos (pelo menos para a duração dos ensaios realizados) os filmes de bactérias podem ter se desenvolvido mais superficialmente.

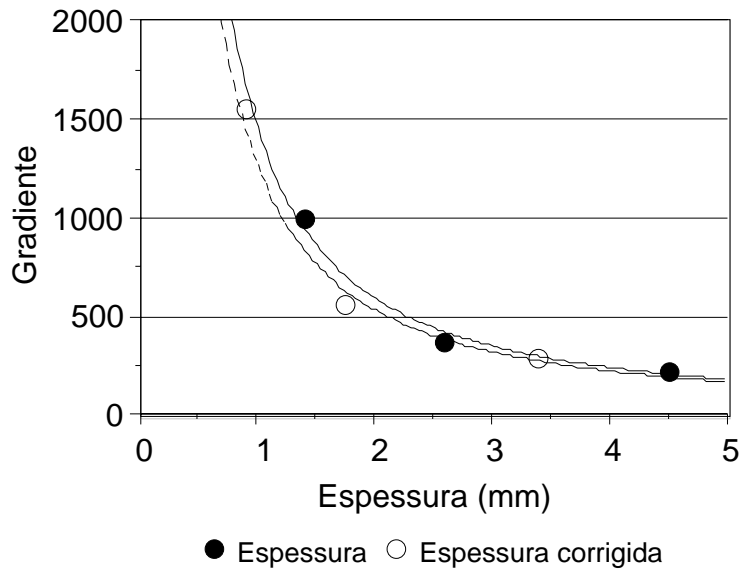


Figura 4.49: Variação do gradiente de desobstrução com a espessura do geotêxtil.

Na Figura 4.49 duas curvas são apresentadas, em função da espessura considerada para o geotêxtil. Uma delas se refere à variação de i com a espessura nominal de catálogo do geotêxtil. Entretanto, para elevados gradientes, a força de percolação exercerá uma pressão sobre o geotêxtil que tenderá a comprimi-lo. Esta tensão vertical pode ser estimada de acordo com o raciocínio apresentado a seguir.

A força de percolação é dada pela expressão:

$$F_p = \gamma_f i V \quad (4.5)$$

onde:

F é a força de percolação

γ_f é o peso específico do fluido

i é o gradiente hidráulico

V é o volume do material

Para o geotêxtil, tem-se que

$$V = A t_{GT} \quad (4.6)$$

onde

A é a área em planta do espécime;

t_{GT} é a espessura do geotêxtil.

Combinando as expressões 4.5 e 4.6, obtém-se:

$$\sigma = \gamma_f i t_{GT} \quad (4.7)$$

onde σ é tensão normal devida à força de percolação.

PALMEIRA (1997) apresentou valores de espessuras dos geotêxteis ensaiados no presente trabalho versus tensão normal. Admitindo-se o peso específico da água nas estimativas, para os valores de gradientes hidráulicos e espessuras de geotêxtil utilizados, os valores estimados para σ foram iguais a 14kPa, para o geotêxtil GTX e aproximadamente 10kPa para os geotêxteis GTY e GTZ. Assim, na Figura 4.49, a curva referente a espessura corrigida leva em conta a compressão do geotêxtil decorrente da atuação da força de percolação.

Seria de se esperar que o desenvolvimento dos filmes de bactérias fosse função da distância entre fibras do geotêxtil. Seria lógico supor que quanto mais próximas as fibras, mais rapidamente a ligação de fibras vizinhas por filmes de bactérias. Os resultados apresentados na Figura 4.50 mostram a variação da distância média entre fibras de geotêxteis do mesmo fabricante dos geotêxteis utilizados no presente trabalho versus gramatura do geotêxtil. Tais resultados foram obtidos a partir de medições por análises de imagens (GARDONI & PALMEIRA, 2002). Em função dos resultados da Figura 4.50, pode-se inferir que as distâncias médias entre fibras dos geotêxteis GTX, GTY e GTZ seriam aproximadamente 0,071mm, 0,061mm e 0,048mm, respectivamente. Assim, apesar das distâncias médias entre fibras serem significativamente diferentes (particularmente para os geotêxteis GTX e GTZ), os gradientes de desobstrução foram maiores para o geotêxtil mais leve (GTX). Isso pode levar a crer que a distância entre fibras, tem menor importância que a espessura do geotêxtil na proliferação das bactérias, ou que para a variação de distância entre fibras dos produtos testados este parâmetro não foi importante. Entretanto, é provável que a distância entre fibras seja um fator relevante no início do processo de formação dos filmes de bactérias.

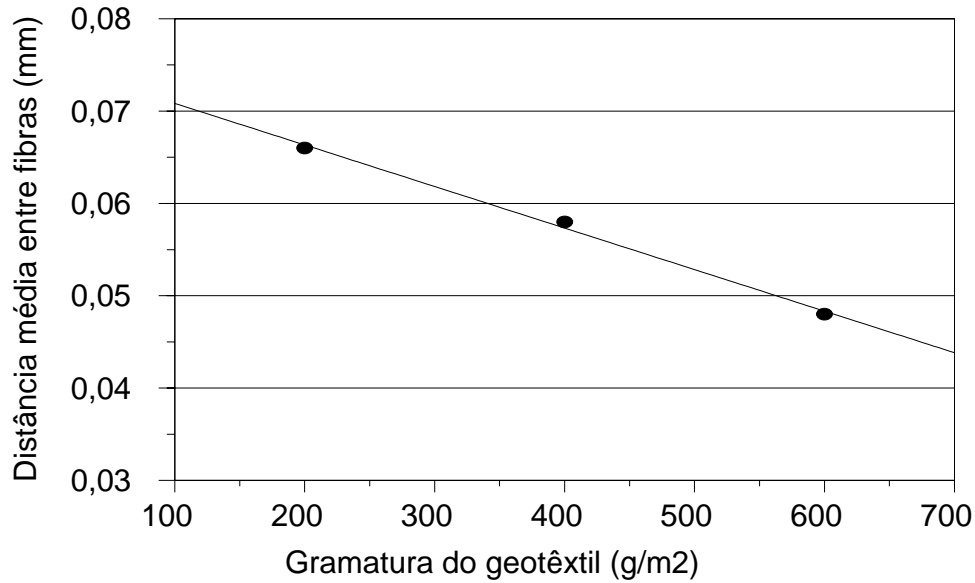


Figura 4.50: Distância média entre fibras versus gramatura do geotêxtil.

É interessante notar que os resultados de gradientes para desobstrução dos geotêxteis obtidos estão coerentes com os valores médios de contagem de bactérias apresentados da Tabela 4.4. Em função dos dados nesta tabela, obtêm-se contagens de bactérias iguais a $2,35 \times 10^7$ UFC/cm², $0,9 \times 10^7$ UFC/cm² e $0,97 \times 10^7$ UFC/cm² para os geotêxteis GTX, GTY e GTZ, respectivamente. Em função desses valores, seria de se esperar que o gradiente de desobstrução de poros do geotêxtil GTX fosse maior que para os demais geotêxteis.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5

Neste capítulo, apresentam-se as conclusões formadas a partir dos resultados encontrados nos experimentos e análises desenvolvidas neste trabalho, bem como as sugestões para pesquisas futuras.

5.1. ENSAIO DE COLMATAÇÃO COM FLUXO

Com relação ao comportamento do chorume durante os ensaios de fluxo, as principais conclusões foram as seguintes:

- No decorrer de cada ensaio a concentração da DQO dos chorumes utilizados diminuiu ao longo do tempo, mostrando que este sofreu degradação, sendo que o chorume utilizado nos ensaios com tempo de duração de 90 dias apresentou maior taxa de degradação que o utilizado nos ensaios de 60 e 45 dias respectivamente.
- O pH dos chorumes ficou situado na faixa de 6,95 a 8,92, o que caracteriza que este se encontra na fase metanogênica.
- A degradação da amônia deu-se de forma diferenciada para os três chorumes utilizados nos ensaios, tal fato pode estar relacionado à presença ou à ausência dos microrganismos e das condições favoráveis para o consumo e conversão do mesmo.
- A concentração de nitrato do chorume durante os ensaios apresentou-se praticamente constante nos primeiros 45 dias decorridos dos ensaios, no entanto, no ensaio de 60 dias este nutriente apresentou um leve aumento. Por outro lado, houve um aumento considerável de nitrato nos primeiros 45 dias do ensaio de 90 dias.
- As variações nas concentrações de amônia e nitrato no chorume podem ser explicadas pelo fato de os microrganismos presentes serem apenas os conversores de nitrogênio a amônia, já os que convertem amônia a nitrato podem ainda não ter entrado em atividade ou não estarem presentes.
- Os chorumes utilizados apresentaram concentrações de ortofosfato diferentes entre si, sendo o chorume usado no ensaio com duração de 45 dias o que apresentou maiores concentrações. Percebe-se que a concentração do ortofosfato dos ensaios com 45 e 60 dias foram consumidos até aproximadamente os primeiros 45 dias e, após esse período, passam a ter uma concentração constante sendo muito próxima da apresentada pelo ensaio com duração de 90 dias.

Quanto aos mecanismos de proliferação de bactérias e colmatação dos geotêxteis, as principais conclusões foram:

- As análises microbiológicas mostram que em todos os geotêxteis ensaiados foram encontrados os microrganismos analisados, a exceção dos oxidantes do íon amônio (NH_4^+) nos geotêxteis GTX₁, GTX₂, GTY₁, GTY₂, GTZ₁ e GTZ₃ e dos oxidantes de nitrito (NO_2^-) nos geotêxteis GTX₁ e GTX₂.
- No geotêxtil GTX identificaram-se todos os microrganismos analisados, porém os mais freqüentes foram as bactérias com uma concentração média de $2,35\text{E}+07$ UFC/cm² seguidas dos amonificadores com $9,7\text{E}+06$ UFC/cm² e dos amilolíticos com $1,02\text{E}+06$ UFC/cm². Os outros microrganismos analisados apresentaram concentração média da ordem de $2,0\text{E}+05$ UFC/cm².
- O geotêxtil GTY apresentou os amonificadores como os microrganismos identificados em maior quantidade, com concentração média de $4,46\text{E}+07$ UFC/cm² seguidos de bactérias com $9,00\text{E}+06$ UFC/cm², amilolíticos com $8,88\text{E}+06$ UFC/cm² e celulolíticos com $3,07\text{E}+06$ UFC/cm². Os outros microrganismos apresentaram concentração média da ordem de $2\text{E}+04$ UFC/cm².
- No geotêxtil GTZ os microrganismos que apresentaram maior concentração média foram os amonificadores com $3,69\text{E}+07$ UFC/cm² seguidos das bactérias com $9,70\text{E}+06$ UFC/cm² e dos amilolíticos com $3,13\text{E}+06$ UFC/cm². Os demais microrganismos analisados apresentaram concentração média da ordem de $2,0\text{E}+05$ UFC/cm².
- As análises microscópicas dos geotêxteis permitiram observar que o processo de formação do biofilme no geotêxtil se dá inicialmente de forma pontual, com a formação de pontos de acumulação de microrganismos sobre a fibra do geotêxtil até o período de 15 dias. A partir dos 30 dias decorridos do ensaio percebeu-se o início da formação do biofilme ao longo das fibras acontecendo de modo mais acentuado até os 45 dias. A partir dos 60 dias de ensaio o biofilme já passa a preencher os vazios do geotêxtil e aos 90 dias do ensaio observou-se a maior concentração de biofilme, ocupando uma maior porção dos vazios do geotêxtil.
- A simulação do crescimento bacteriano mostrou que para os três geotêxteis estudados a curva de biomassa observada variou entre as curvas de biomassa acidogênica e metanogênica, encontrando-se valores de Y (coeficiente de produção celular) diferentes para cada período de ensaio, variando entre 0,04 e 0,59.

- Nos geotêxteis GTX e GTY o substrato passou a ser um fator limitante no crescimento da biomassa por volta dos 70 dias de ensaio, quando a DQO continuou diminuindo, porém a biomassa observada continuou aumentando, mesmo que de forma mais lenta. Já no geotêxtil GTZ o substrato passou a ser limitante por volta dos 60 dias do ensaio e, mesmo com a diminuição da DQO, não houve aumento significativo na biomassa observada.
- Os geotêxteis GTX, GTY e GTZ apresentaram tendência similar para a variação do coeficiente de permeabilidade, sendo que o GTX teve uma redução na permeabilidade menos acentuada e mais uniforme ao longo do tempo do que os geotêxteis GTY e GTZ, que se comportaram de forma bem similar.
- A redução do coeficiente de permeabilidade encontrada nos geotêxteis GTX, GTY e GTZ durante os períodos ensaiados foi significativa, ao longo do tempo, principalmente no ensaio com duração de 90 dias, no qual se detectou a maior perda de permeabilidade dos espécimes ensaiados, chegando a ser da ordem de 99%.
- A redução equivalente do volume de vazios dos geotêxteis submetidos ao fluxo de chorume durante 90 dias foi de 72,9% para o GTX, 73,0% para GTY e 72,4% para o GTZ e está associada ao processo de formação do biofilme de bactérias na superfície dos poros e/ou no interior dos vazios do geotêxtil.

5.2. ENSAIO DE COLMATAÇÃO POR IMERSÃO

Com relação ao comportamento do chorume, pôde-se observar que:

- O chorume utilizado neste ensaio apresentou a mesma tendência de degradação para os três tipos de geotêxtil ensaiados, considerando-se que parte da carga orgânica presente no chorume, que foi monitorada pela DQO, foi convertida pelos microrganismos em biomassa bacteriana nas fibras do geotêxtil.
- Nas análises microbiológicas observou-se que em todos os geotêxteis ensaiados foram encontrados os microrganismos analisados inclusive os oxidantes do íon amônio (NH_4^+) e os oxidantes de nitrito (NO_2^-). Houve uma variação da quantidade de microrganismos presentes nos geotêxteis analisados nesse período, encontrando-se um número de unidades

formadoras de colônias por área de geotêxtil inferior ao encontrado no ensaio de colmatação com fluxo.

- No geotêxtil GTX identificaram-se todos os microrganismos analisados, porém os mais frequentes foram os oxidantes de amônio, com $2,55E+05$ UFC/cm². Os outros microrganismos analisados apresentaram concentração média da ordem de $3,0E+04$ UFC/cm².
- O geotêxtil GTY apresentou os amilolíticos como os microrganismos identificados em maior quantidade, com concentração de $6,5E+07$ UFC/cm², seguidos de bactérias com $3,55E+07$ UFC/cm², celulolíticos com $1,11E+06$ UFC/cm². Os outros microrganismos apresentaram concentração média da ordem de $2,4E+04$ UFC/cm².
- No geotêxtil GTZ os microrganismos que apresentaram maior concentração foram os amonificadores, com $4,62E+07$ UFC/cm², seguidos das bactérias, com $3,31E+07$ UFC/cm², e dos amilolíticos, com $1,74E+07$ UFC/cm². Os demais microrganismos analisados apresentaram concentração média da ordem de $3,0E+04$ UFC/cm². A tendência do crescimento dos microrganismos no geotêxtil GTZ no ensaio de colmatação por imersão apresentou-se semelhante à observada no ensaio de colmatação com fluxo.
- As análises microscópicas dos geotêxteis submetidos ao ensaio de colmatação por imersão de chorume mostraram que o processo de formação do biofilme no geotêxtil se dá de modo semelhante ao percebido no ensaio de colmatação com fluxo. No entanto, este processo evoluiu mais lentamente, uma vez que ao final de 90 dias de ensaio a maior parte dos vazios do geotêxtil não estava preenchida pelo biofilme, havendo apenas algumas obstruções pontuais.
- A simulação do crescimento bacteriano nos geotêxteis do ensaio de colmatação por imersão de chorume apresentou comportamento semelhante ao encontrado para o ensaio de colmatação com fluxo. Para os três geotêxteis estudados a curva de biomassa observada variou entre as curvas de biomassa acidogênica e metanogênica, apresentando valores de Y entre 0,03 e 0,36. No entanto, percebeu-se que o substrato passou a ser um fator limitante para um crescimento mais rápido da biomassa nesse ensaio e isso se deveu a ausência de recirculação do chorume, pois não havia aporte contínuo de alimento.

Com relação ao desenvolvimento de bactérias nos geotêxteis, observou-se que:

- Nos geotêxteis GTX e GTY observou-se que o substrato passou a ser um fator limitante por volta dos 50 dias de ensaio, sendo que no geotêxtil GTX, após esse período, ainda houve um ligeiro aumento da biomassa observada até os 90 dias de ensaio. Já no geotêxtil GTY observou-se que quando a DQO passou a ser limitante ao crescimento houve um pequeno crescimento da biomassa até os 60 dias de ensaio, que depois permaneceu estável até os 90 dias. Para o ensaio com o geotêxtil GTZ, o substrato passou a ser limitante por volta dos 45 dias de ensaio e, mesmo com a diminuição da DQO, praticamente não houve aumento na biomassa observada.
- Conclui-se, nesse trabalho, que de certa forma, tanto nos ensaios de colmatção com fluxo como nos ensaios por imersão, os geotêxteis utilizados funcionaram também como filtros do chorume, promovendo o tratamento do mesmo. Portanto, pode-se pensar que em aterros que utilizam geotêxteis como camadas intermediárias de coberturas (em substituição a camadas de solo) o chorume também é, até certo ponto, pré-tratado, antes de atingir o sistema principal de drenagem.

5.3. ENSAIO DE DESOBSTRUÇÃO DOS POROS DO GEOTÊXTIL POR AUMENTO DE CARGA HIDRÁULICA

Nos ensaios por aumento de carga hidráulica, observou-se que:

- Os geotêxteis estudados apresentaram uma significativa recuperação da capacidade drenante quando submetidos ao aumento de gradiente hidráulico, sendo que os geotêxteis GTY e GTZ foram os que apresentaram maiores recuperações da capacidade drenante. O geotêxtil GTX necessitou de gradiente hidráulico da ordem de 1000 para resultados próximos aos obtidos para geotêxtil virgem nas mesmas condições de fluxo, enquanto que o geotêxtil GTY necessitou de gradiente hidráulico da ordem de 400 e o geotêxtil GTZ da ordem de 250.
- O ensaio de aumento de carga hidráulica nos geotêxteis colmatados permitiu conclusões preliminares importantes quanto à capacidade de recuperação do potencial drenante de geotêxteis colmatados, pois se pôde perceber que estes podem voltar a funcionar e desenvolver sua função de drenos nos aterros sanitários após um acúmulo relativamente pequeno de altura (máximo em torno de 2,0 m) de chorume sobre a sistema de drenagem.

O questionamento que ainda permanece é quantos ciclos de acúmulo e escoamento de chorume pelo geotêxtil ocorreriam no campo, antes de uma ocorrência de colmatção definitiva do geotêxtil.

- A relação entre permissividade e gradiente hidráulico sob condições de fluxo turbulento pode ser útil no dimensionamento de drenos sintéticos em obras de disposição de resíduos, uma vez que esse regime de fluxo prevalecerá após uma limpeza abrupta dos poros do geotêxtil em decorrência do acúmulo de chorume.
- Percebeu-se que para promover a recuperação da capacidade drenante do geotêxtil GTX, o gradiente hidráulico foi da ordem de 2,5 e 4 vezes superior ao necessário para limpar os geotêxteis GTY e GTZ, respectivamente. Tal fato mostra que, apesar de apresentar uma maior permeabilidade na condição virgem, o geotêxtil GTX apresentou-se mais colmatado ao final dos ensaios com fluxo. Uma vez que os três geotêxteis foram manufaturados pelo mesmo fabricante, não se esperaria que alguma diferença de características físicas fosse responsável por essa diferença de comportamento, embora no presente momento essa hipótese também não possa ser inteiramente descartada. Neste sentido, crê-se que o maior nível de colmatção possa estar associado à menor espessura desse geotêxtil em relação aos demais.

5.4. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados obtidos nessa pesquisa são apresentadas as seguintes sugestões:

- Em relação aos ensaios de colmatção com fluxo e por imersão sugere-se que sejam realizados mais ensaios com os geotêxteis GTX, GTY e GTZ, com maior duração, além de utilizar outros tipos de geotêxteis para avaliar os mecanismos de colmatção biológica destes materiais.
- Quanto aos ensaios de colmatção com fluxo sugere-se que sejam utilizados permeâmetros individuais e maiores para permitir a utilização de uma maior quantidade de chorume.

- Para a avaliação dos microrganismos envolvidos no processo de formação do biofilme, deve ser feito um acompanhamento ao longo de todo o processo para buscar conhecer a sucessão dos microrganismos presentes no chorume em degradação.
- Sugere-se que sejam feitos ensaios com uma célula piloto de aterro sanitário para avaliar o processo de formação do biofilme em uma escala maior, implantando-se tubulações para aplicação de contra-fluxo ou verificar efeitos do acúmulo de chorume no comportamento do sistema drenante.
- Quanto à simulação do crescimento bacteriano deve ser feito um acompanhamento detalhado do processo de formação do biofilme e aferir a metodologia desenvolvida nesse trabalho para obter a DQO dos geotêxteis, permitindo aferir os valores de Y aplicados ao tratamento de chorume.

**REFERÊNCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

- ABNT (1984). *Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos- Procedimento*. NBR-8419, Rio de Janeiro, RJ, 13p.
- ABNT (1985). *Apresentação de Projetos de Aterros Controlados de Resíduos Sólidos Urbanos*. NBR 8849, Rio de Janeiro, RJ, 9p.
- ABNT (1992). *Geotêxteis – Determinação da Gramatura*. NBR-12568, Rio de Janeiro, RJ, 2p.
- ABNT (1992). *Geotêxteis – Determinação da Espessura*. NBR-12569, Rio de Janeiro, RJ, 2p.
- ABNT (2004). *Resíduos sólidos – Classificação*. NBR-10.004, São Paulo, SP, 71p.
- ABNT (1997). *Solubilização de Resíduos - Procedimentos*. NBR-10.006, São Paulo, SP, 63p.
- ABNT (1997). *Aterro de Resíduos Não-perigosos: critérios para projetos, implantação e operação*. NBR-13.896, Rio de Janeiro, RJ, 12p.
- APHA, AWWA, WPCF, 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18^a Ed., New York.
- BAGCHI, A. (1990). *Desing, Construction, and Monitoring of Sanitary Landfill*, John Wiley & Sons, New York, 284p.
- BATSTONE, R., SMITH, J. and WILSON, D. (1989). *The Safe Disposal of Hazardous Wastes – The Special Needs and Problems of Developing Countries*. World Bank Technical N^o 93. Volumes 1 e 2. Washington D.C.
- BAVEYE, P.; VANDEVIVERE, P.; HOYLE, B.L. et al (1998). *Environmental Impact and Mechanisms of Biological Clogging of Saturated Soils and Aquifer Materials*, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v.28, n.2, pp. 123-191.
- BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. (1999). *Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos*, EESC/USP, São Carlos, SP, 120p.
- BRANDÃO, E. M. , (1991). *Os Componentes da Comunidade Microbiana do Solo*. In Cardoso, E. J. B. N., Tsai, S. M., Neves, M. C. P., *Microbiologia do Solo*, Capítulo 1, Campinas, SP, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

- CAMMAROTA, M.C., (1998). *Produção de Exopolossacarídeos e Adesão Microbiana*. Tese de D.Sc., Instituto de Química/UFRJ.
- CERQUEIRA, D. A. ; EMÍDIO, P. A., (1999). *Ferrobactérias em Poços Tubulares: ocorrências e técnicas simplificadas de detecção*. In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, pp. 1245-1250, Rio de Janeiro.
- CHARACKLIS, W.G., (1981). *Fouling Biofilm Development: A Process Analysis*, Biotechnology and Bioengineering, v.XXIII, pp. 1923-1960.
- COLMANETTI, J. P.(2000). *Comportamento de Filtros Geotêxteis em Sistemas de Drenagem Para Resíduos Sólidos Municipais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília/UnB, Brasília, DF, Brasil.
- FOURIE, A.B.;KUSHENA, S.M.; BLIGHT, G.E. (1994). *Effect of Biological Clogging on the Filtration Capacity of Geotêxteis*, Fifth International Conference on Geotêxteis, Geomembranes and Related Products, Singapura, 2: 721-724.
- GANDOLA, M. (1995). *Tratamento Biológico de Resíduos Sólidos Urbanos*. Texto Básico do Curso: Técnicas, Exploração e Gestão dos Aterros Controlados. Belo Horizonte, MG – pp 1-189.
- GARDONI, M. G. A.; MATSUSHITA, R. Y.; JACQUES, M. A. P.;PALMEIRA, E. M. (1998). *Estudo da Transmissividade dos Geotêxteis Não Tecidos sob Elevadas Pressões*. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Brasília, DF 1: 1109-1117.
- GARDONI, M.G. & PALMEIRA, E.M. (1999). *Long Term Filtration Tests of Tropical Soil-Geotextile Systems*. XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz de Iguaçu, Brasil, 1:67-73.
- GARDONI, M.G. & PALMEIRA, E.M. (2002). *Microstructure and Pore Characteristics of Synthetic Filters Under Confinement*. Geotechnique, Vol. 52, No. 6, p. 405-418.
- GIROUD, J. P. (1988). *Review of Geotextile Filter Criteria*. Proceedings of First Indian Geotextiles Conference, Bombay, India, Indian Institue of Technology, Bombay, pp. 1-6.

- GIROUD, J. P. (1996). *Granular Filters and Geotextiles Filters*. Geofilter's 96, Jean Lafleur and Andre L. Rollin (eds), Montreal, Quebec, Canadá, pp. 565-678.
- GONZALEZ, J. M. S. (1995). *Comportamiento Geotécnico de Vertederos Controlados de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- GOURC, J.P. (1995). *Application of Geosynthetics in Landfills*, 2º Simpósio Brasileiro sobre Aplicações de Geossintéticos (Palestras Especiais), São Paulo, pp. 49-62.
- HALSE, Y., KOERNER, R. M., LORD, JR., A. E., (1987). *Effect of High Levels of Alkalinity on Geotextiles. Part 1: Ca(OH)₂ Solutions*, Geotextiles and Geomembranes, 5, pp. 261-282.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE, (2000) *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*, Rio de Janeiro, 397p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE, (2002) *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*, www.ibge.gov.br.
- JOHN, N. W. M. (1987). *Geotextiles*. Blackie and Son Ltda. Glasgow and London, 347.
- JUNQUEIRA, F. F. (2000). *Análise do Comportamento de Resíduos Sólidos Urbanos e Sistema de Dreno-Filtrante, com Referência ao Aterro do Jóquei Clube-DF*. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 288p.
- KOERNER, G.R.; KOERNER, R. M. (1990). Biological Activity and Potencial Remediation Involving Geotextile Landfill Leachate Filters. ASTM STP 1081. R. M. Koerner (ed.) Philadelphia, PA, USA.
- KOERNER, G.R.; KOERNER, R.M. & MARTIN, J.P. (1994). *Geotêxtil Filters Used for Leachate Collection Systems: Testing, Desing and Field Behaviour*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE.
- KOERNER, R. M. (1998). *Designing with Geotextiles*, In: Horton M., Designing with Geosynthetics, 4 ed, Chapter 2, New Jersey, USA, Prentice Hall.
- KOSSENDEY, E. G.; St.SCHIMIDT (1996). *Microbiological Influences on the Long-Term Performance of Geotêxtil Filters*. Geofilters'96, École Polytechnique Montréal, Queceb, Canadá, 1: 115-124.

- LAFLEUR, J.; MLYNAREK, J.; ROLLIN, A. L. (1989). *Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils*, Journal of Geotechnical Engineering, v. 115, n. 12, pp. 1747-1768.
- LANDRETH, R. E. (1990). *Landfill Containment Systems Regulations*. Waste Containment Systems: Construction, Regulation, and Performance, 26 (1): 1-13.
- MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; PARKER, J.(1997). *Biology of Microorganisms*. 8 ed., New Jersey, Prentice Hall.
- MATHEUS, E. (1997). *Comportamento de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaio de Filtração sob Condições Severas*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 121p.
- McKINNEY, R. E. (1962). *Microbiology for Sanitary Engineers*. New York, McGraw-Hill Book Company, INC. 293p.
- MENDONÇA, M.B. (2000). *Avaliação da Formação do Ocre no Desempenho de Filtros Geotêxteis*. Tese de Doutorado, Coppe/UFRJ, 320 p.
- MENDONÇA, M.B.; EHRLICH, M. (2002). *Ochre Biofilm Formation in Geotextile Filters – a theoretical and experimental approach*. Geosynthetics – 7th ICG, Delmas, Gourc and Girard (eds). pp. 1003-1006.
- METCALF & EDDY (1990). *Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse*. Metcalf & Eddy, Inc. 3. Ed., 1334pp.
- MLYNAREK, J.; ROLLIN, A. L.(1995). *Bacterial Clogging of Geotêxteis – Overcoming Engineering Concerns*. Geosynthetics'95 Conference Proceedings, Nashville, Tennessee, USA, 1: 177-188.
- MONOD, j. (1949). *The Growth of Bacterial Cultures*. Ann. Rev. Microbiol., vol 3.
- PALMEIRA, E.M. (1997). *Propriedades Físicas e Hidráulicas de Geotêxteis Não-Tecidos Sob Pressão*. Revista Solos e Rochas, ABMS/ABGE, Vol. 20, No. 2, p. 69-78.
- PALMEIRA, E. M.; & GARDONI, M. G. (2000). *Geotêxteis in Filtration: a state of the art review and remaining challenges*. International Symposium on Geosynthetics, GeoEng'2000, Melbourne, Austrália, pp. 85-110.

- PALMEIRA, E. M. (2003). *Fatores Condicionantes do Comportamento de Filtros Geotêxteis*. IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Volume 1, Porto Alegre, pp. 49-67.
- PELCZAR, M., REID, R., CHAN, E. C. S. (1997). *Microbiologia – Conceitos e Aplicações*. Vol. 1, São Paulo, Mc. Graw-Hill, 2 Ed., Brasil, 524p.
- PHILIPPI, JR. A.; ROMÉRO, M. A.; BRUNA, G. C. (2004). *Curso de Gestão Ambiental*, USP, Barueri, São Paulo, 1045p.
- PONTECORVO, G.; ROPER, J. A.; HEMONS, L. M.; MACDONALDS, K. D.; BUFFON, A. W. J. (1953). *The Genetic of Aspergillus nidulans*. Adv. Gen., 5, pp. 141-238.
- REICHERT, G. A. (1999). *Aterro Sanitário – Projeto, Implantação e Operação*, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, RS, 99p.
- ROLLIN, A. L. (1996). *Bacterial Clogging of Geotextiles*. In Proceedings of Geofilter's 96, Montreal / Quebec – Canadá. pp 125-134.
- ROWE, R. K. & VANGULCK, J. F. (2004). *Filtering and Drainage of Contaminant Water*. Proc. 4th Int. Conf. on GeoFilters, Stellen-bosch, pp. 1-63.
- ROWE, R. K. (2005). *Long-term Performance of Contaminant Barrier Systems*. Geotechnique 55, N^o 9, pp. 631-678.
- SARATCHANDRA, S. V. (1978). *Nitrification Activities and the Changes in the Population of Nitrifying Bacteria in Soil Prefused with Two Different H-ion Concentrations*. Plant and Soil, 50: 99-111.
- SAWYER, C. N.; McCARTY, P.L.; PARKIN, G.F. (1994). *Chemistry for Environmental Engineering*, McGraw Hill, series in water resources and environmental engineering. 4th ed. New York, 655p.
- SCHIMIDT, E. L.; BELSER, L. W. (1982). Nitrifying Bacteria. In: PAGE, A. L. Ed. *Methods of Soil Analysis; part 2, chemical and microbiological properties*. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, pp. 1027-1042.
- SILVA, A. R. L.; PALMEIRA, E. M. ; VIEIRA, G. R. (2002). *Large Filtration Tests on Drainage Systems Using Leachate*. 4th International Congress on Environmental Geotechnics, Vol. 1 pp. 125-128.

- SILVA, A. R. L. (2004). *Estudo do Comportamento de Sistemas Dreno-Filtrantes em Diferentes Escalas em Sistemas de Drenagem de Aterros Sanitários*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 329p.
- SYLVESTER-BRADLEY, R.; AKASAWA, N.; LA TORRANCA, S.; MAGALHÃES, F. M. M.; OLIVEIRA, L. A.; PEREIRA, R. M. (1982). *Levantamento Quantitativo de Microrganismos Solubilizadores de Fosfatos na Rizosfera de Gramíneas e Leguminosas Forrageiras na Amazônia*. Acta Amazônica 12: 15-22.
- SORIANO, S.; WALKER, N. (1968). Isolation of Ammonia Oxidizing Autotrophic Bacteria. J. Appl. Bacteriol., Vol. 31, pp. 493-497.
- SORIANO, S.; WALKER, N. (1973). The Nitrifying Bacteria in Soils from Rothamsted Classical Fields and Elsewhere. J. Apple. Bacteriol., Vol. 36, pp.523-529.
- SPADA, J. (1992). *Princípios da Filtração com Geotêxtil*. Geossintéticos'92, UnB, Brasília, DF, 1:93-120.
- SPADA, J. L. G.(1991). *Ensaio de Filtração em Solos com Geotêxteis*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SYLVESTER-BRADLEY, R.; AKASAWA, N.; LA TORRANCA, S.; MAGALHÃES F. M. M.; OLIVEIRA, L. A.; PEREIRA, R. M. (1982). *Levantamento Quantitativo de Microrganismos Solubilizadores de Fosfatos na Rizosfera de Gramíneas e Leguminosas Forrageiras na Amazônia*. Acta Amazônica 12: 15-22.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISERN, H.; VIGIL, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management. Engineering Principals and Management Issues*. Mc. Graw-Hill, Book Co., Inc., New York. N. Y. 975 pp.
- TIVERON, V. P. M. (2001). *Gestão de Resíduos Sólidos no Município de São Paulo n Período de 189 a 2000: atores em processo e conflito*. Dissertação de Mestrado, São Paulo, SP: Procam – Interunidades em Ciência Ambiental/USP.
- USBR (1974). *Earth Manual*. United States Bureau of Reclamation, US, Government Printer, 2 ed., Washington.
- VANDEVIVERE, P.; BAVEYE, P. (1992). *Saturated Hydraulic Conductivity Reduction Caused by Aerobic Bacteria in Sand Columns*, Soil Science of America Journal, Vol. 56, N. 1.

- VAN HAANDEL, A.C., LETTINGA,G. (1994). *Tratamento Anaeróbio de Esgotos. Um Manual para Regiões de Clima Quente.*
- VON SPERLING, M. (1996). *Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos.* Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Vol. 2, 211p.
- WOOD, P. J. (1980). *Specify in the Interactions of Direct Dyes with Polysaccharides.* Carbohydrate. Res., 85: 271-287.
- XAVIER, J. B.; PICIOREANU, C.; ALMEIDA, J. S.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. (2003). Monitorização e Modelação da Estrutura de Biofilmes. Boletim de Biotecnologia, N. 76, pp. 2-13.