

BIOFILTRAÇÃO E MICROFILTRAÇÃO TANGENCIAL PARA TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS

FLÁVIO RUBENS LAPOLLI

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de "Doutor em Engenharia Civil - Área Hidráulica e Saneamento".



DEDALUS - Acervo - EESC



31100017210

ORIENTADOR: Prof. José Roberto Campos, Dr.
CO-ORIENTADOR: Prof. Alain Grasmick, Dr.

São Carlos
1998

Class. TESE/EESC
Cutt. 2957 ✓
Tombo T233/98

31100017210

st 0993928

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

L315b Lapolli, Flávio Rubens
Biofiltração e microfiltração tangencial para
tratamento de esgotos sanitários / Flávio Rubens
Lapolli. -- São Carlos, 1998.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. José Roberto Campos.
Co-orientador: Prof. Dr. Alain Grasmick.

1. Biofiltração. 2. Microfiltração tangencial.
3. Esgoto sanitário. 4. Reuso de águas. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **FLÁVIO RUBENS LAPOLLI**

Tese defendida e aprovada em 14.08.1998
pela Comissão Julgadora:



Prof. Tit. **JOSÉ ROBERTO CAMPOS (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Dr. **MARCO ANTONIO PENALVA REALI**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Dr. **LUIZ ANTONIO DANIEL**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Profa. Dra. **CÉLIA REGINA GRANHEN TAVARES**
(Universidade Estadual de Maringá - UEM)



Profa. Dra. **REJANE HELENA RIBEIRO DA COSTA**
(Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC)



Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



JOSÉ CARLOS A CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

“Todo o nosso saber tem suas origens em nossas percepções”.

Leonard da Vinci.

Dedico este trabalho:

à Édis, exemplo de dinamismo,

**à Juliana e à Mariana, guerreiras natas,
motivos de orgulho.**

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Roberto Campos que, com sua experiência profissional e de vida, possibilitou o desenvolvimento deste trabalho, agradeço os ensinamentos transmitidos e a confiança em mim depositada.

Ao professor Alain Grasmick, um agradecimento especial pela oportunidade de desenvolvimento da parte experimental deste trabalho no "L.M.P.M. - Laboratoire des Materiaux et Procédés Membranaires" da Universidade de Montpellier II - França e, principalmente, pelas discussões relativas ao trabalho.

À Édís por toda ajuda e pelo encorajamento durante todos esses anos e, que muito contribuiu para que este trabalho chegasse ao seu término.

À Juliana e à Mariana que heroicamente souberam enfrentar o desconhecido, e que mesmo nos momentos mais difíceis sempre encontravam palavras de incentivo e muito carinho.

À professora Célia Regina Granhen Tavares, agradeço as sugestões e discussões, que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Às professoras Rejane Helena Ribeiro da Costa e Célia Regina Granhen Tavares, aos professores Marco Antonio Penalva Reali e Luiz Antonio Daniel, membros da comissão julgadora, agradeço os comentários e sugestões tão valiosos ao trabalho desenvolvido.

Aos amigos Fernando Hermes Passig e Romeu Francisco Gadotti, agradeço pelo companherismo, que tornou muito mais agradável nosso período de permanência em São Carlos.

Ao Angel Leon Cruz e a Rosangela Bergamasco, amigos de todas as horas, pela ajuda, discussões e incentivo.

À Christelle Wisniewiski e Henry Barral, pelo apoio encontrado no L.M.P.M.

Aos muitos amigos encontrados na França, em especial, Del, Edson, Ivana e Paulinho, pelo carinho e atenção.

Aos professores da Escola de Engenharia de São Carlos pelos ensinamentos e aos funcionários pela atenção.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina que, direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela bolsa de estudo concedida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FOTOGRAFIAS.....	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xix
RESUMO.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	04
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
3.1 Apresentação.....	05
3.2 Processos biológicos para tratamento de esgotos.....	05
3.2.1 Considerações gerais.....	05
3.2.2 Tratamento biológico de esgotos.....	06
3.2.2.1 Processos aeróbios.....	08
3.3 Filtração em membranas.....	14
3.3.1 Considerações gerais.....	14
3.3.2 Materiais das membranas.....	16
3.3.3 Classificação das membranas.....	18
3.3.4 Características das membranas.....	19
3.3.4.1 Espessura.....	20
3.3.4.2 Porosidade.....	20
3.3.4.3 Seletividade.....	21
3.3.4.4 Permeabilidade.....	23
3.3.5 Colmatação.....	25
3.3.5.1 Polarização por concentração.....	26
3.3.5.2 Camada de gel.....	28
3.3.5.3 Colmatação (bloqueamento dos poros).....	29
3.3.6 Condições de operação.....	31

3.4	Aplicações da tecnologia de membranas.....	34
3.4.1	Considerações gerais.....	34
3.4.2	Processos específicos para águas de abastecimento e águas residuárias.....	35
3.4.2.1	Osiose reversa.....	35
3.4.2.2	Eletrodialise.....	36
3.4.3	Utilização de membranas acopladas a outros processos para tratamento de águas residuárias.....	36
3.4.3.1	Associação da microfiltração ou ultrafiltração.....	36
3.4.3.2	Biorreator à membrana.....	38
3.4.4	A utilização de membranas e a desinfecção.....	38
3.4.4.1	Águas para abastecimento.....	38
3.4.4.2	Águas residuárias.....	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
4.1	Apresentação.....	42
4.2	Instalações experimentais.....	43
4.2.1	Floculador com leito de lodo fluidizado associado a decantador lamelar inclinado.....	43
4.2.2	Biofiltro.....	46
4.2.2.1	Condições operacionais dos ensaios no biofiltro.....	48
4.2.3	Piloto A de membranas.....	48
4.2.3.1	Condições operacionais do piloto A de membranas.....	50
4.2.4	Piloto B de membranas.....	52
4.2.4.1	Condições operacionais do piloto B de membranas.....	54
4.2.5	Célula de filtração SARTORIUS.....	55
4.2.5.1	Tratamento das membranas com polímero.....	56
4.2.5.2	Modo de operação para realização dos ensaios com a célula SARTORIUS.....	57
4.2.5.3	Modelo de HERMIA aplicado a filtração.....	57
4.3	Método para limpeza química das membranas.....	58
4.4	Métodos de análises e equipamentos utilizados para determinação das características dos esgotos.....	59
4.4.1	Determinação do pH.....	61
4.4.2	Turbidez.....	61
4.4.3	Demanda química de oxigênio (DQO).....	61
4.4.4	Matéria em Suspensão.....	62

4.4.5	Nitrogênio amoniacal.....	62
4.4.6	Nitrato.....	62
4.4.7	Nitrito.....	63
4.4.8	Exames bacteriológicos.....	63
4.4.9	Caracterização granulométrica.....	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
5.1	Apresentação.....	64
5.2	Biofiltro.....	65
5.2.1	Influência da velocidade de passagem no biofiltro.....	65
5.2.1.1	Remoção da concentração de matéria orgânica.....	66
5.2.1.2	Remoção da turbidez.....	69
5.2.1.3	Remoção da matéria em suspensão.....	71
5.2.1.4	Remoção do nitrogênio amoniacal.....	73
5.2.1.5	Evolução das cargas eliminadas para os diferentes parâmetros....	75
5.2.1.6	Influência da velocidade média de passagem sobre o tempo de funcionamento do biofiltro.....	78
5.2.2	Análise estatística do desempenho do biofiltro.....	78
5.3	Piloto A de microfiltração.....	85
5.3.1	Evolução do fluxo do permeado.....	86
5.3.2	Evolução da qualidade do permeado.....	88
5.3.3	Avaliação das resistências das membranas nos ensaios realizados com o piloto A de microfiltração.....	91
5.3.3.1	Avaliação das resistências da membrana com tamanho de poros de 0,05 μm	91
5.3.3.2	Avaliação das resistências da membrana com tamanho de poros de 0,20 μm	92
5.4.	Piloto B de microfiltração (MEMBRALOX).....	94
5.4.1	Evolução do fluxo do permeado.....	94
5.4.2	Evolução da qualidade do permeado.....	97
5.4.3	Coliformes.....	100
5.4.4	Avaliação das resistências das membranas para os ensaios realizados no piloto B de microfiltração.....	101
5.4.4.1	Avaliação das resistências da membrana com tamanho de poros de 0,05 μm	102
5.4.4.2	Avaliação das resistências da membrana com tamanho de poros de 0,20 μm	103

5.4.5	Influência do tempo de recirculação e do uso de coadjuvantes no desempenho das membranas.....	104
5.5	Ensaio de filtrabilidade de suspensões utilizando a célula de filtração SARTORIUS.....	107
5.5.1	Filtração de suspensão do tipo lodos ativados.....	108
5.5.1.1	Ensaio de filtração utilizando lodos ativados em membrana tratada com polímero - Cálculo das resistências.....	108
5.5.1.2	Ensaio de filtração utilizando sobrenadante de lodos ativados após decantação.....	110
5.5.2	Filtração utilizando o efluente do biofiltro.....	111
5.5.3	Influência do pH e o uso do polímero por filtração à vácuo.....	112
5.5.3.1	Influência do pH.....	112
5.5.3.2	Utilização de polímero por filtração à vácuo.....	113
5.5.4	Utilização do modelo de HERMIA aplicado à filtração do efluente do biofiltro.....	114
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	117
6.1	Conclusões.....	117
6.2	Sugestões.....	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
	ANEXO A - BIOFILTRAÇÃO.....	128
	ANEXO B - BIOFILTRAÇÃO/ MICROFILTRAÇÃO	
	Piloto A de Microfiltração.....	137
	ANEXO C - BIOFILTRAÇÃO/ MICROFILTRAÇÃO	
	Piloto B de Microfiltração.....	147
	ANEXO D - ENSAIOS DE GRANULOMETRIA.....	181

LISTAS DE FIGURAS

FIGURA 3.1	Fluxograma representativo do metabolismo aeróbio.....	08
FIGURA 3.2	Processos de biofiltração.....	12
FIGURA 3.3	Diferentes tipos de filtração segundo o tamanho das partículas.....	15
FIGURA 3.4	Diferenças entre os processos de osmose reversa, ultrafiltração e microfiltração.....	16
FIGURA 3.5	Estrutura esquemática de membrana isótropa.....	18
FIGURA 3.6	Estrutura esquemática de membrana anisótropa.....	19
FIGURA 3.7	Estrutura esquemática de membrana “composite”.....	19
FIGURA 3.8	Repartição dos diâmetros de poros de uma membrana.....	21
FIGURA 3.9	Zona e ponto de corte de uma membrana.....	23
FIGURA 3.10	Mecanismos envolvidos na colmatação de membranas.....	26
FIGURA 3.11	Perfis de concentração e velocidade tangencial nas proximidades da parede de uma membrana.....	27
FIGURA 3.12	Camada de gel e perfil de concentração para uma membrana.....	29
FIGURA 3.13	Fatores de colmatação de uma membrana.....	30
FIGURA 3.14	Riscos de colmatação de uma membrana.....	31
FIGURA 3.15	Relação pressão-fluxo do permeado para solvente puro e solução de macromoléculas.....	32
FIGURA 4.1	Floculador-piloto de manto de lodo associado à um decantador lamelar.....	44
FIGURA 4.2	Esquema do piloto de biofiltração.....	46
FIGURA 4.3	Esquema do piloto A de membranas.....	49
FIGURA 4.4	Esquema do piloto B de membranas.....	52
FIGURA 4.5	Célula de filtração SARTORIUS.....	56
FIGURA 4.6	Análises realizadas nas diferentes etapas de trabalho.....	59
FIGURA 5.1	Evolução da DQO para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,25m/h.....	67
FIGURA 5.2	Evolução da DQO para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,50m/h.....	68
FIGURA 5.3	Evolução da DQO para o ciclo de biofiltração com velocidade de 1,00m/h.....	68

FIGURA 5.4	Evolução da turbidez para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,25m/h.....	69
FIGURA 5.5	Evolução da turbidez para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,50m/h.....	70
FIGURA 5.6	Evolução da turbidez para o ciclo de biofiltração com velocidade de 1,00m/h.....	70
FIGURA 5.7	Evolução da matéria em suspensão para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,25 m/h.....	71
FIGURA 5.8	Evolução da matéria em suspensão para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,50 m/h.....	72
FIGURA 5.9	Evolução da matéria em suspensão para o ciclo de biofiltração com velocidade de 1,00 m/h.....	72
FIGURA 5.10	Evolução do nitrogênio amoniacal, nitratos e nitritos para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,25 m/h.....	73
FIGURA 5.11	Evolução do nitrogênio amoniacal, nitratos e nitritos para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,50 m/h.....	74
FIGURA 5.12	Evolução do nitrogênio amoniacal, nitratos e nitritos para o ciclo de biofiltração com velocidade de 1,00 m/h.....	75
FIGURA 5.13	Carga eliminada de DQOt em função da carga aplicada de DQOt.....	76
FIGURA 5.14	Carga eliminada de SST em função da carga aplicada de SST.....	77
FIGURA 5.15	Carga eliminada de nitrogênio amoniacal em função da carga aplicada de nitrogênio amoniacal.....	77
FIGURA 5.16	Carta de controle para os diversos parâmetros analisados (0,25 m/h).....	80
FIGURA 5.17	Carta de controle do biofiltro para a velocidade de 0,25 m/h	81
FIGURA 5.18	Carta de controle para os diversos parâmetros analisados (0,50 m/h).....	82
FIGURA 5.19	Carta de controle do biofiltro para a velocidade de 0,50 m/h	83
FIGURA 5.20	Carta de controle para os diversos parâmetros analisados (1,00 m/h).....	84
FIGURA 5.21	Carta de controle do biofiltro para a velocidade de 1,00 m/h	85
FIGURA 5.22	Evolução do fluxo do permeado (Q_p) em $L/m^2.h$ para as membranas $0,20 \mu m$ (M200) e $0,05 \mu$ (M50) com água de torneira (AT) e com os diferentes efluentes do biofiltro (B).	87

FIGURA 5.23	Evolução do fluxo do permeado (Q_p) em $L/m^2.h$ para as membranas $0,20 \mu m$ (M200) e $0,05 \mu m$ (M50) com os diferentes efluentes do biofiltro (B).....	88
FIGURA 5.24	Evolução da matéria em suspensão do biofiltro (B) e dos permeados (P) para as membranas $0,20 \mu m$ (M200) e $0,05 \mu m$ (M50).....	89
FIGURA 5.25	Evolução da turbidez dos efluentes do biofiltro (B) e dos permeados (P) para as membranas $0,20 \mu m$ (M200) e $0,05 \mu m$ (M50).....	90
FIGURA 5.26	Evolução da DQO para os efluentes do biofiltro (B) e dos permeados (P) para as membranas $0,20 \mu m$ (M200) e $0,05 \mu m$ (M50).....	90
FIGURA 5.27	Evolução do fluxo do permeado (Q_p) em $L/m^2.h$ com água de torneira (AT).....	96
FIGURA 5.28	Evolução do fluxo do permeado (Q_p) em $L/m^2.h$ com os efluentes do biofiltro (B).....	97
FIGURA 5.29	Evolução da turbidez do efluente do biofiltro (B) e do permeado (P).....	99
FIGURA 5.30	Evolução da DQO dos efluentes do biofiltro (B) e do permeado (P).....	100
FIGURA 5.31	Regressão linear sobre os resultados da filtração.....	115
FIGURA D.1	Caracterização granulométrica: esgoto bruto.....	182
FIGURA D.2	Caracterização granulométrica: esgoto decantado.....	183
FIGURA D.3	Caracterização granulométrica: Efluente do biofiltro ($1,00m/h$).....	184
FIGURA D.4	Caracterização granulométrica: Efluente do biofiltro ($0,50m/h$).....	185
FIGURA D.5	Caracterização granulométrica: Efluente do biofiltro ($0,25m/h$).....	186

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	Algumas características do esgoto sanitário bruto.....	06
TABELA 3.2	Classificação geral dos microrganismos de acordo com as fontes de energia e de carbono.....	07
TABELA 3.3	Principais processos com membranas e a força motriz necessária à separação	16
TABELA 3.4	Efeitos dos parâmetros de operação no desempenho de membranas.....	33
TABELA 4.1	Condições operacionais do biofiltro.....	48
TABELA 4.2	Condições operacionais para os ensaios com membranas do piloto A	51
TABELA 4.3	Condições operacionais para os ensaios com membranas do piloto B	54
TABELA 5.1	Resultados médios dos parâmetros controlados no biofiltro.....	65
TABELA 5.2	Tempo médio de funcionamento do biofiltro.....	78
TABELA 5.3	Fluxos dos permeados obtidos no piloto A de microfiltração.....	86
TABELA 5.4	Características dos efluentes do biofiltro (B) e dos permeados (P) obtidos no piloto A de microfiltração.....	87
TABELA 5.5	Resistências das membranas para o piloto A de microfiltração.....	93
TABELA 5.6	Média dos resultados do fluxo de permeado (Qp) obtidos para as membranas com tamanho de poros 0,20 μm e 0,05 μm utilizando água de torneira (AT).....	95
TABELA 5.7	Média dos resultados do fluxo de permeado (Qp) obtidos para as membranas com tamanho de poros 0,20 μm e 0,05 μm utilizando os vários efluentes do biofiltro.....	96
TABELA 5.8	Médias dos resultados experimentais da turbidez e sólidos suspensos dos efluentes do biofiltro utilizados nos ensaios com o piloto B de microfiltração.....	98
TABELA 5.9	Médias dos resultados experimentais da turbidez do permeado.....	98

TABELA 5.10	Média dos resultados experimentais para DQOt e DQOs dos vários efluentes do biofiltro.....	99
TABELA 5.11	Média dos resultados experimentais da DQOt do permeado.....	99
TABELA 5.12	Resultados de exames bacteriológicos.....	101
TABELA 5.13	Resistências das membranas nos ensaios com piloto B de microfiltração.....	104
TABELA 5.14	Súmula dos resultados obtidos nas membranas variando o tempo de recirculação e pelo uso de coadjuvantes.....	106
TABELA 5.15	Influência do pH sobre as resistências da membrana.....	112
TABELA 5.16	Resultados da filtração com o efluente do biofiltro.....	115
TABELA A.1	Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,25 m/h).	129
TABELA A.2	Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,25 m/h).	129
TABELA A.3	Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,25 m/h).	130
TABELA A.4	Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,25 m/h).	130
TABELA A.5	Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,50 m/h).	131
TABELA A.6	Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,50 m/h).	132
TABELA A.7	Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,50 m/h).	133
TABELA A.8	Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,50 m/h).	134
TABELA A.9	Resultados experimentais obtidos no biofiltro (1,00 m/h).	135
TABELA A.10	Resultados experimentais obtidos no biofiltro (1,00 m/h).	135
TABELA A.11	Resultados experimentais obtidos no biofiltro (1,00 m/h).	136
TABELA A.12	Resultados experimentais obtidos no biofiltro (1,00 m/h).	136
TABELA B.1	Resultados experimentais obtidos com a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	138
TABELA B.2	Resultados experimentais obtidos com a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B) (V = 1,00 m/h)...	138
TABELA B.3	Resultados experimentais obtidos com a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B) (V = 1,00 m/h)...	139
TABELA B.4	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	139
TABELA B.5	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B) (V = 1,00 m/h)...	140
TABELA B.6	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B) (V = 1,00 m/h)...	140

TABELA B.7	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	141
TABELA B.8	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	141
TABELA B.9	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	142
TABELA B.10	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	142
TABELA B.11	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	143
TABELA B.12	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	143
TABELA B.13	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	144
TABELA B.14	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	144
TABELA B.15	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	145
TABELA B.16	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	145
TABELA B.17	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	146
TABELA C.1	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	148
TABELA C.2	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	148
TABELA C.3	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	148
TABELA C.4	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	149
TABELA C.5	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	149
TABELA C.6	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	149
TABELA C.7	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	150

TABELA C.8	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	150
TABELA C.9	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	150
TABELA C.10	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	151
TABELA C.11	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	151
TABELA C.12	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	151
TABELA C.13	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	152
TABELA C.14	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	152
TABELA C.15	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	152
TABELA C.16	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	153
TABELA C.17	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	153
TABELA C.18	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	153
TABELA C.19	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	154
TABELA C.20	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	154
TABELA C.21	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	154
TABELA C.22	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	155
TABELA C.23	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	155
TABELA C.24	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	155
TABELA C.25	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	156

TABELA C.26	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	156
TABELA C.27	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	156
TABELA C.28	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	157
TABELA C.29	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	157
TABELA C.30	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	157
TABELA C.31	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	158
TABELA C.32	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	158
TABELA C.33	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	158
TABELA C.34	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	159
TABELA C.35	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	159
TABELA C.36	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	159
TABELA C.37	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	160
TABELA C.38	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	160
TABELA C.39	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	160
TABELA C.40	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	161
TABELA C.41	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	161
TABELA C.42	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	161
TABELA C.43	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	162

TABELA C.44	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	162
TABELA C.45	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	162
TABELA C.46	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	163
TABELA C.47	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	163
TABELA C.48	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	163
TABELA C.49	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	164
TABELA C.50	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	164
TABELA C.51	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	164
TABELA C.52	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	165
TABELA C.53	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	165
TABELA C.54	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	165
TABELA C.55	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	166
TABELA C.56	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	166
TABELA C.57	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o permeado (P).....	166
TABELA C.58	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	167
TABELA C.59	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o permeado (P).....	167
TABELA C.60	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	167
TABELA C.61	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	168

TABELA C.62	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	168
TABELA C.63	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	168
TABELA C.64	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	169
TABELA C.65	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	169
TABELA C.66	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	169
TABELA C.67	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	170
TABELA C.68	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	170
TABELA C.69	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	170
TABELA C.70	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	171
TABELA C.71	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	171
TABELA C.72	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	171
TABELA C.73	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	172
TABELA C.74	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	172
TABELA C.75	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	172
TABELA C.76	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	173
TABELA C.77	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	173
TABELA C.78	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	173
TABELA C.79	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	174

TABELA C.80	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	174
TABELA C.81	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	174
TABELA C.82	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	175
TABELA C.83	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	175
TABELA C.84	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	175
TABELA C.85	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	176
TABELA C.86	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	176
TABELA C.87	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	176
TABELA C.88	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	177
TABELA C.89	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	177
TABELA C.90	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	177
TABELA C.91	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	178
TABELA C.92	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	178
TABELA C.93	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	178
TABELA C.94	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com água de torneira (AT).....	179
TABELA C.95	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	179
TABELA C.96	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	179
TABELA C.97	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o efluente do biofiltro (B).....	180

TABELA C.98	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com água de torneira (AT).....	180
TABELA C.99	Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μ m com o permeado (P).....	180

LISTA DE FOTOGRAFIAS

FOTOGRAFIA 4.1	Floculador com leite de lodo fluidizado associado à decantador lamelar inclinado.....	45
FOTOGRAFIA 4.2	Instalação do biofiltro.....	47
FOTOGRAFIA 4.3	Piloto A de membranas.....	50
FOTOGRAFIA 4.4	Piloto B de membranas (MEMBRALOX).....	53
FOTOGRAFIA 4.5	Laboratório de análises.....	60
FOTOGRAFIA 4.6	Laboratório de análises - vista geral.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AT	- Água de Torneira
B	- Efluente do biofiltro
BR	- Bomba de recirculação
BRM	- Bioreator à membrana
D	- Efluente do decantador
De	- Descolmatador
ED	- Esgoto Decantado
FTU	- Formazine Turbidity Units
ETE	- Estação de Tratamento de Esgotos
IREPOLIA	- Institute de Recherche sur Pollution Industrielle et Agricole
LMPM	- Laboratoire des Materiaux et Procédés Membranaires
M	- Manômetro
NA	- Nitrogênio amoniacal
P	- Permeado
R	- Registro
RP	- Regulador de pressão
SCT	- Sociéte des Céramiques Techniques
s.d	- Sem dimensão
T	- Termômetro
Turb	- Turbidez
UCF	- Unidade de Coliforme Fecal
UCT	- Unidade de Coliforme Total
VR	- Válvula de retenção

LISTA DE SÍMBOLOS

C	- Concentração de soluto na camada de difusão (mol/m^3)
C_g	- Concentração da camada de gel (mol/m^3)
C_{lim}	- Concentração de soluto próximo à superfície da membrana (mol/m^3)
C_0	- Concentração de soluto fora da camada de polarização (mol/m^3)
C_p	- Concentração de soluto no permeado (mol/m^3)
DBO_5	- Demanda Bioquímica de Oxigênio (5 dias) (mg/L)
DM	- Densidade da membrana (kg/m^3)
dp	- Diâmetro de poro (m)
DP	- Densidade do polímero (kg/m^3)
D_s	- Coeficiente de difusão do soluto (m^2/s)
DQO	- Demanda Química de Oxigênio (mg/L)
DQOt	- Demanda Química de Oxigênio total (mg/L)
DQOs	- Demanda Química de Oxigênio solúvel (mg/L)
J	- Fluxo do solvente ou do permeado ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
J_p	- Fluxo do permeado sem considerar a pressão osmótica ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
K_m	- Coeficiente de transferência de massa (m/s)
M	- Massa seca do depósito (kg)
N	- Número de poros por unidade superfície (m^{-2})
NMP	- Número mais provável
P	- Pressão aplicada (Pa)
pH	- Potencial hidrogeniônico
Q_p	- Vazão do permeado ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
r	- Raio do poro (m)
R_a	- Taxa de retenção absoluta (s.d)
R_c	- Resistência devido à colmatção (m^{-1})
R_g	- Resistência da camada de gel (m^{-1})
R_m	- Resistência total da membrana (m^{-1})
R_p	- Resistência da zona de polarização (m^{-1})
R_C	- Resistência total à colmatção (m^{-1})
R_T	- Resistência total da membrana (m^{-1})
SST	- Sólidos Suspensos Totais (mg/L)
SSV	- Sólidos Suspensos Voláteis (mg/L)
t	- Tempo de filtração (s)
v	- Volume do filtrado (mL)
V	- Velocidade aparente de passagem no biofiltro (m/h)

V_t	- Velocidade de circulação tangencial (m/s)
W	- Massa seca do depósito na membrana (kg/m^3)
X	- Espessura da camada de difusão (m)
γ	- Tensão interfacial (Pa.m)
α	- Resistência específica do depósito (kg/m)
ϑ	- Ângulo de contato (grau)
ΔP	- Pressão transmembrana (Pa)
$\Delta\pi$	- Pressão osmótica (Pa)
μ	- Viscosidade dinâmica (Pa.s)
ℓ	- Comprimento do poro (m)
ε	- Porosidade (s.d)
δ	- Espessura máxima da camada de difusão (m)
Ω	- Área de filtração (m^2)
τ	- Fator de tortuosidade (s.d)
γ	- Fator de polarização (s.d)
λ	- Comprimento de onda (nm)

RESUMO

O comprometimento dos recursos hídricos tem levado à pesquisas abordando a reutilização das águas. Entre as alternativas existentes para viabilizar o reuso das águas, observa-se que o desenvolvimento das técnicas de separação dos materiais contaminantes por membranas, evoluíram de simples ensaios laboratoriais, ganhando, rapidamente, destaque como uma técnica atual, alcançando soluções eficientes e economicamente viáveis de muitos problemas de filtração, separação e/ou clarificação. Neste trabalho, estudou-se a viabilidade da associação da microfiltração tangencial com a biofiltração para tratamento de esgotos sanitários. Foram realizadas diversas atividades experimentais (“Laboratoire des Matériaux et Procédés Membranaires” na Universidade de Montpellier II - França) por um período de seiscentos dias, através de ensaios utilizando membranas cerâmicas microporosas. Nesses ensaios foram utilizados efluentes do biofiltro operado com diferentes velocidades de passagem do esgoto (0,25m/h; 0,5m/h e 1,0m/h). Verificou-se que para todas velocidades utilizadas o valor da DQOt no efluente foi, na sua maioria, inferior aqueles especificados pelas normas européias (125 mg/L) para lançamentos de esgotos sanitários e, também, pela Resolução n° 20 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). O desempenho do biofiltro foi melhor quando se utilizou a velocidade de 0,25 m/h, tanto em relação a qualidade final do efluente, quanto a durabilidade dos ciclos de biofiltração. Nos ensaios de microfiltração, tanto o fluxo como a qualidade do permeado parecem estar relacionados aos efluentes do biofiltro. Através de ensaios em escala laboratorial, em que estudou-se a influência de uso de coadjuvantes (sulfato de alumínio, cloreto férrico, etc) foram verificadas melhorias no desempenho das membranas. A associação do processo biológico, mais especificamente, o processo de biofiltração com a microfiltração tangencial apresenta-se como uma alternativa eficaz para tratamento de esgotos sanitários. A qualidade do efluente final, torna possível a reutilização desse tipo de efluente, seja no meio agrícola, seja no meio industrial. Essa reutilização poderá conduzir uma mudança na gestão global dos recursos hídricos, podendo os esgotos sanitários passar a serem encarados como um produto de valor.

Palavras-chave: biofiltração; microfiltração tangencial; esgoto sanitário; reuso de águas.

ABSTRACT

Non rational and non scientific exploration of water resources can cause great damage. However, thanks to an evolution of general conciusness, there has been investment in researching treatment and conservation. Natural water resources being endangered have influenced research into water recycling. Among the existing alternatives to render water recycling viable, it's possible to see that the development of contaminants material separation techniques, evolved from simple laboratories studies, gained recognition swiftly as a modern technique, reaching efficient and economically viable solutions to many filtration, separation and clarification problems. This work studied the coupling of cross-flow microfiltration with a biofiltration for wastewater treatment. Several activities were experimented ("Laboratoire des Materiaux et Procédés Membranaires - Université de Montpellier II - France") for six hundred day period, using microporous ceramic membranes. Biofilter effluents operated under different velocities (0,25 m/h; 0,5 m/h and 1,0 m/h) were use in these experiments. It was observed then in all velocities the Total Chemical Oxygen Demand in the effluent was inferior to European Norms and also to CONAMA - "Conselho Nacional do Meio Ambiente". The biofilter performance was better at 0,25 m/h velocity with regard effluent quality and the biofiltration cycle duration. The permeate flux and the permeate quality in the microfiltration experiments seems to be related to biofilter effluents utilized. On a laboratory scale, where was studied the influence of coagulant utilization (aluminum sulfate, chloride ferric, etc) there was an improvement of the membranes performance. The coupling of a biofilter and a microfiltration shows up a reliable and effective alternative to wastewater treatment. The reutilization of final effluent is possible, in agriculture or industrial ambiance. This reutilization can lead to changes on global management of water resources and, therefore, wastewater can be seen like a valuable product.

Keywords: biofiltration; cross-flow-microfiltration; wastewater treatment; water reuse.

1 INTRODUÇÃO

O crescente interesse por temas ambientais faz parte do cotidiano na maioria dos países. Desde a primeira Conferência das Organizações Unidas sobre o impacto do processo de desenvolvimento no meio ambiente, em 1972, em Estocolmo (Suécia), até a do Rio-92 (Brasil), em 1992, ocorreu significativo avanço na conscientização dos líderes governamentais e empresariais em todo o mundo.

Com o passar dos anos, tornou-se clara a necessidade de se criar novo modelo de desenvolvimento em que o homem, a sociedade e a natureza fossem encarados como um conjunto harmônico e indissociável. A manutenção e o aperfeiçoamento do complexo e frágil equilíbrio ambiental envolve governos, entidades públicas e privadas, especialistas e a comunidade em geral. Todos buscando de forma coordenada o desenvolvimento auto sustentável.

A humanidade precisa viver dentro da capacidade de suporte do planeta Terra. A longo prazo, se não forem utilizadas as reservas da Terra, de maneira sustentável e prudente, corre-se o risco de se estar negando o futuro à humanidade.

A água é uma substância essencial para a vida do planeta e todos os seres que nele habitam.

A utilização dos recursos hídricos pode ser vista sob diversos ângulos: abastecimento, recreação através de parques e áreas de lazer, uso industrial, etc. Entretanto, a exploração de forma não racional e não científica dos recursos hídricos pode acarretar prejuízos volumosos. Contudo, graças a evolução da conscientização geral, pesquisas e investimentos têm sido realizados, principalmente, destinados ao seu tratamento e a sua conservação. O comprometimento dos recursos hídricos tem levado à pesquisas abordando a reutilização das águas.

O reuso planejado das águas residuárias não é um conceito novo e já é praticado há muitos anos. No entanto, com o crescimento concomitante do binômio demanda da água - população, o reuso intencional de água deve ser cada vez mais considerado no planejamento e na exploração de novos mananciais, pois o reuso da água reduz a demanda sobre os mananciais de água bruta.

As imagens mais comuns associadas ao reuso da água são, normalmente, aquelas ligadas ao abastecimento doméstico, industrial e agrícola. O reuso da água, entretanto, pode afetar outras utilizações dos recursos hídricos, como a da diluição dos despejos nos cursos receptores de águas, o uso de mananciais para abastecimento, a navegação, as atividades de recreação, a pesca e mesmo a geração de energia. Torna-se, assim, recomendável que o reuso da água seja abordado sob a ótica dos usos múltiplos dos recursos hídricos.

Entre as alternativas existentes para viabilizar o reuso das águas, observa-se que nos últimos trinta anos, o desenvolvimento das técnicas de separação dos materiais contaminantes por membranas evoluíram de simples ensaios laboratoriais, ganhando, rapidamente, destaque como uma técnica atual para se lograr soluções eficientes e economicamente viáveis de muitos problemas de filtração, separação e/ou clarificação. As técnicas de separação por membranas apresentam as vantagens de serem operadas sem aditivos e possibilitar separação seletiva de materiais. Dessa forma, é possível recuperar materiais com alto grau de pureza, de maneira que esses possam ser reaproveitados, principalmente, em processos industriais.

Os sistemas de tratamento de esgotos sanitários, em geral, são constituídos de unidades de tratamento sequencialmente dispostas, em que ocorrem operações de separação e processos de transformação dos resíduos. Normalmente, isso resulta em bom nível de redução de carga orgânica. No entanto, somente, tratamentos avançados levam a uma significativa redução bacteriológica, e a remoção de contaminantes que permitem reuso para fins mais nobres.

O crescente aumento do rigor das normas e, também, de desastres no meio ambiente elevam a pressão sobre a análise dos desempenhos das estações de tratamento de esgotos sanitários.

A biofiltração foi o processo de tratamento secundário escolhido para este trabalho. A eficiência de seu tratamento serviu para caracterizar as águas a serem utilizadas nos experimentos com membranas.

O recente desenvolvimento da tecnologia de membranas, já efetiva no tratamento de águas para abastecimento, contribui para resolver os problemas de ordem sanitárias ligados aos esgotos. Essa técnica de tratamento evita, também, a geração de

subprodutos (trihalometanos) pela interação de moléculas não biodegradáveis com oxidantes clorados.

A principal limitação no desenvolvimento industrial dessa tecnologia encontra-se nos problemas de colmatação, dificilmente reversíveis, das membranas que dependem da estrutura do material filtrante utilizado e da natureza das águas à tratar. Para otimizar o emprego da tecnologia de membranas é, então, necessário conhecer os mecanismos de colmatação para minimiza-los em função da qualidade das águas à tratar.

Neste trabalho, são de maior interesse os processos que utilizam membranas microporosas como a microfiltração e a ultrafiltração. A microfiltração e a ultrafiltração são processos de separação de macromoléculas ou de partículas em suspensão de pequeno tamanho que podem ser separadas da fase contínua sob ação de um gradiente de pressão que assegura à membrana o papel de barreira seletiva.

A tecnologia utilizando membranas, no Brasil, é ainda considerada emergente, principalmente, a associação dessa tecnologia aos processos biológicos para tratamento de esgotos. Dessa forma, buscou-se um local adequado para o desenvolvimento das atividades experimentais, optando-se pelo “Laboratoire des Materiaux et Procédés Membranaires” (LMPM) da Universidade de Montpellier II - França, no qual vem ocorrendo pesquisas e experiências nesta área. O LMPM é um laboratório especializado em pesquisas envolvendo os seguintes temas: a) caracterização e síntese de novas membranas; b) investigação e modelação dos mecanismos de transferência; c) estudo de sistemas módulo-membranas; d) desenvolvimento de processos individuais e associação com outros processos.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral deste trabalho é o de estudar a associação da biofiltração com a microfiltração tangencial, para o tratamento de esgotos sanitários.

Como objetivos específicos têm-se:

- avaliar o desempenho da biofiltração em função da variação da velocidade de passagem do esgoto através do leito;
- avaliar o desempenho da microfiltração tangencial frente aos diferentes efluentes resultantes da biofiltração;
- verificar os problemas de colmatação em membranas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Apresentação

Este capítulo apresenta uma revisão da bibliografia preliminar na área e que serviu de base para o desenvolvimento deste trabalho.

A presente revisão é composta de três partes, a saber:

- a primeira apresenta os princípios básicos do tratamento biológico dos esgotos sanitários;
- a segunda aborda os principais processos que utilizam membranas, com ênfase para a microfiltração e a ultrafiltração, seus princípios e seus parâmetros operacionais, bem como os fenômenos envolvidos durante o processo;
- a terceira e última parte, trata das aplicações do processo de membranas para tratamento de águas de abastecimento e águas residuárias, destacando a associação da biofiltração e microfiltração para o tratamento terciário de esgotos domésticos.

3.2 Processos biológicos para tratamento de esgotos

3.2.1 Considerações gerais

Os esgotos domésticos e industriais contêm grande número de substâncias contaminantes, e que podem ser separadas em três categorias principais (ROQUES, 1980):

- as matérias dissolvidas, orgânicas ou minerais, biodegradáveis ou não;
- as materiais coloidais e/ou emulsões (graxas, óleos solúveis, etc);
- as matérias em suspensão, orgânicas ou minerais.

Os teores desses diferentes tipos de contaminantes são extremamente variáveis no tempo, e dependem, da origem dos esgotos. A determinação da natureza e da quantidade de cada uma das substâncias presentes pode ser realizada, mas, na maioria dos casos, aliada à longas e custosas análises. Dessa forma, procura-se caracterizar os esgotos através de testes, tais como, DQO, DBO₅, pH, temperatura,

sólidos em suspensão, entre outros. A Tabela 3.1 apresenta algumas características médias do esgoto sanitário bruto.

TABELA 3.1 - Algumas características do esgoto sanitário bruto

Parâmetro	Esgoto Sanitário Bruto
SST (mg/L)	400 a 600
DBO ₅ (mg/L)	250 a 400
DQO (mg/L)	500 a 900

Fonte: CHAIZE, 1990

Os métodos de tratamento em que fenômenos físicos predominam, são conhecidos como operações unitárias. Métodos de tratamento em que a remoção de contaminantes é alcançada através de reações químicas ou biológicas são denominados processos unitários. Operações unitárias são associadas aos processos para proporcionar o que é conhecido como tratamento primário, secundário e avançado (terciário) (METCALF & EDDY, 1991).

No tratamento primário, operações físicas, tais como, o gradeamento e a sedimentação são usadas para remoção de sólidos flutuantes e sedimentáveis encontrados no esgoto. No tratamento secundário, os processos químicos e biológicos são usados para remoção da matéria orgânica. No tratamento avançado são utilizadas combinações de unidades de operação e processos para remover outros constituintes, tais como, nitrogênio e fósforo.

3.2.2 Tratamento biológico de esgotos

O tratamento biológico é utilizado, principalmente, para remover as substâncias orgânicas biodegradáveis (coloidal ou dissolvida) presentes no esgoto. Basicamente, estas substâncias são convertidas em gases, que podem escapar para a atmosfera ou, então, serem transformadas em tecido celular, sendo posteriormente removidas através da sedimentação. O tratamento biológico pode, também, ser utilizado para remover nutrientes (nitrogênio e fósforo) do esgoto. O entendimento das atividades bioquímicas dos microrganismos envolvidos no processo de tratamento

biológico é de fundamental importância na escolha do processo. Dois aspectos devem ser considerados:

- as necessidades nutricionais dos microrganismos;
- a natureza do metabolismo microbiano.

Para sua reprodução e funções propriamente ditas, os microrganismos devem possuir uma fonte de energia-carbono para síntese de novo material celular e elementos inorgânicos (nutrientes), tais como, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio. Os nutrientes orgânicos (fatores de crescimento) são também necessários para síntese celular.

Duas das mais comuns fontes de carbono celular para os microrganismos são a matéria orgânica e o CO_2 . Os organismos que usam o carbono orgânico para formação de tecido celular são chamados heterotróficos. Os organismos que utilizam o CO_2 são chamados autotróficos. A classificação dos microrganismos de acordo com a fonte de energia e fonte de carbono é mostrada na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - Classificação geral dos microrganismos de acordo com as fontes de energia e de carbono

CLASSIFICAÇÃO	FONTE DE ENERGIA	FONTE DE CARBONO
Autotróficos:		
- Fotoautotróficos	Luz	CO_2
- Quimioautotróficos	Reação inorgânica oxid-red.	CO_2
Heterotróficos:		
- Quimioheterotróficos	Reação orgânica oxid-red.	Carbono orgânico
- Fotoheterotróficos	Luz	Carbono orgânico

Fonte: METCALF & EDDY, 1991

Entre os processos de tratamento biológico de esgotos destacam-se os aeróbios e os anaeróbios.

Os processos anaeróbios são processos biológicos de tratamento em que a estabilização da matéria orgânica ocorre sem a presença de oxigênio livre e pela sua conversão em metano (CH_4) e produtos inorgânicos dentre os quais CO_2 e NH_3 .

Aplicados a determinados efluentes, esses processos para tratamento possuem algumas vantagens, como: baixa produção de lodo, cargas orgânicas aplicadas elevadas, baixa produção de biomassa, portanto menor necessidade de nutrientes e produção de energia na forma de gás (metano).

Entretanto, em muitos casos, a partida do processo e o seu controle são bastante delicados, se comparados com os processos aeróbios. Além disso, o substrato carbonáceo não é suficientemente degradado. Como a maioria dos processos naturais de fermentação, a biodigestão anaeróbia depende muito mais de mecanismos reguladores intrínsecos que de controles externos.

3.2.2.1 Processos aeróbios

Os processos aeróbios são processos biológicos de tratamento que ocorrem com a presença de oxigênio. Esses são os mais comumente aplicados para o tratamento da matéria carbonácea solúvel. A Figura 3.1 mostra, esquematicamente, o princípio da transformação da matéria orgânica através da metabolização aeróbia.

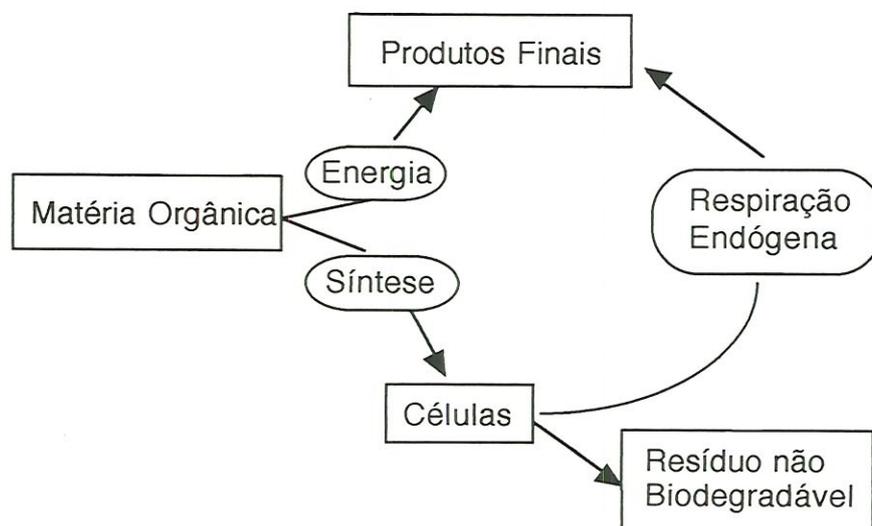


FIGURA 3.1 - Fluxograma representativo do metabolismo aeróbio
Fonte: ECKENFELDER, 1982

Como sistemas aeróbios de tratamento de esgotos, destacam-se:

- a) sistemas com biomassa livre, em que as bactérias se encontram em suspensão;

b) sistemas com biomassa fixa, em que as bactérias se encontram fixas sobre um meio suporte.

a) Sistemas com biomassa livre

Estes sistemas englobam o processo de lodos ativados e suas variantes. A degradação da matéria orgânica ocorre por oxidação, mediante a ação dos microrganismos presentes. Parte da biomassa serve para síntese de novos materiais celulares. As condições da cultura induzem os microrganismos à se aglomerarem em flocos para que estes possam ser posteriormente removidos através da decantação. O restante da poluição carbonácea é transformada em substâncias minerais gasosas (CO_2) ou solúveis.

b) Sistemas com biomassa fixa

Existe grande diversidade de sistemas à biomassa fixa: leitos bacterianos, biofiltros, discos biológicos, etc. No caso de leitos bacterianos, o suporte é constituído de rochas fragmentadas ou, ainda, de material plástico com uma grande superfície específica. O efluente percola através do meio, sendo a matéria orgânica metabolizada progressivamente pelos micro e macrorganismos presentes (bactérias, fungos, protozoários, larvas de insetos, etc).

Os discos biológicos são parcialmente imersos no efluente à ser tratado, basicamente, consistindo de um empilhamento de discos girando lentamente (algumas rotações por minuto). Esse tipo de tratamento corresponde a um tratamento de lodos ativados a meia carga.

De acordo com LAZAROVA & MANEN (1994), tem-se estudado biofilmes, através de: condições ideais para o metabolismo das bactérias, controle da espessura do biofilme, e uma melhor transferência de oxigênio.

Biofiltração é um tipo de tratamento biológico que, ao contrário dos processos em que a biomassa se encontra livre, em suspensão (lodos ativados, por exemplo) a biomassa está fixa sobre um material suporte.

Estes processos utilizam biofilmes aderidos a suportes e têm se mostrado como uma alternativa para resolver os problemas de limitação dos processos de biomassa em suspensão (BERGAMASCO, 1996).

As pesquisas de alternativas de se trabalhar com processos que além de eficientes tivessem seus custos operacionais reduzidos, levaram ao desenvolvimento de processos que combinavam as vantagens dos processos de filme fixo com processos de microrganismos suspensos (TAVARES, 1992).

A partir de 1970 surgiram as primeiras instalações do processo de leiteo fluidizado. Atualmente existe grande número desses reatores em escala laboratorial e piloto, os quais ainda são objetos de análise (LAZAROVA & MANEN, 1994). Observa-se que a grande maioria dos trabalhos existentes foi realizada em escala laboratorial e em pequenas instalações semi-industriais, colocando estes resultados na condição de resultados preliminares (BERGAMASCO, 1996).

Os filtros biológicos são, também, muito utilizados. As principais vantagens desses filtros estão na sua simplicidade e, também, no baixo custo operacional. Apresentam, porém, algumas desvantagens, tais como: eficiências no tratamento não muito elevadas, problemas de colmatação do leiteo e odores desagradáveis.

Basicamente o filtro biológico aeróbio (“trickling filters”) consta de um leiteo ou de meios de outros materiais inertes com forma, tamanho e interstícios adequados, que permitem a livre circulação natural (ou forçada) de ar, sobre o qual dispositivos de distribuição (geralmente giratórios) lançam os esgotos sanitários que percolam por entre o material suporte que formam o referido recheio (CAMPOS, 1994). Esse tipo de tratamento teve origem na Inglaterra, em meados do século XIX.

Nos últimos vinte anos tem ocorrido grande aumento de esforços para o desenvolvimento dos biofiltros imersos. Os biofiltros apresentam vantagens importantes quando utilizados como processo para tratamento de águas residuárias. O desempenho do tratamento é elevado se considerada a remoção de matéria em suspensão e solúvel. Uma das principais vantagens deste processo é o de apresentar instalações de tratamento limpas, podendo serem cobertas, livres de problemas de odores e ruídos e, portanto, sendo possível localizá-las no meio urbano (ROGALLA et al, 1992). Outras características citadas são a sua compacidade, o aspecto modular,

caracterizando uma montagem rápida e, também, a ausência da clarificação secundária (PUJOL, CANLER & IWENA, 1992).

Um biofiltro é constituído de um tanque preenchido com material granular de pequeno diâmetro. A água à ser tratada atravessa o meio (recheio) que serve de suporte para as colônias de microrganismos e também como filtro para a retenção da matéria em suspensão. A grande concentração da biomassa fixa permite que os biofiltros trabalhem sob forte carga quando compara-se esse processo ao de biomassa livre.

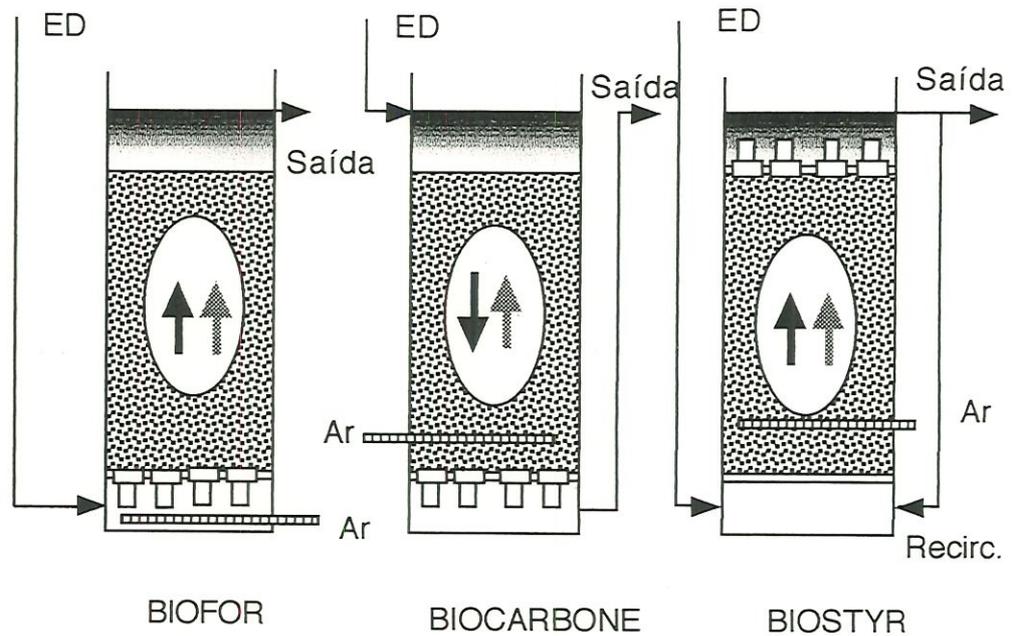
A retenção de biomassa e de matéria em suspensão no leito filtrante permite que este processo seja operado sem a etapa de clarificação secundária, mas, por outro lado, exige lavagens periódicas para eliminação do excesso de biomassa acumulada. Essas lavagens são realizadas, geralmente, por fortes lavagens hidráulicas seguidas de ar e água atravessando o leito filtrante. As águas das lavagens, normalmente, são enviadas para o início da estação de tratamento, ou seja, antes do decantador primário.

Na maioria dos casos, é necessário o tratamento primário para eliminar parte da matéria em suspensão. Essa operação visa limitar a variação da perda de carga no biofiltro, podendo se constituir de:

- decantador convencional ou lamelar;
- precipitação físico-química;
- ou processo de lodos ativados com elevada taxa volumétrica de carregamento orgânico.

Para a maioria dos processos de biofiltros existentes, a duração de um ciclo de filtração se situa entre 24 e 48 horas. Esse período depende da natureza da suspensão submetida ao tratamento.

Existem, atualmente, várias combinações entre o tipo de material suporte, o sentido do fluxo hidráulico (ar + água) e o procedimento de lavagem do biofiltro. A Figura 3.2 mostra exemplos de processos de biofiltração utilizados.



ED: Esgoto Decantado

FIGURA 3.2 - Processos de biofiltração

Fonte: GONÇALVES, 1993

Apesar da evolução do conhecimento sobre os mecanismos fundamentais que governam o processo de depuração no biofilme (GRASMICK, ELMALEH & IAHI, 1984; ARVIN & HARREMÕES, 1990; CAPDEVILLE & N'GUYEN, 1990), sua modelagem se encontra, ainda, em desenvolvimento, não permitindo, dessa forma, uma aplicação direta para o dimensionamento dos biofiltros. O parâmetro mais utilizado para o dimensionamento dos biofiltros é o relacionado à carga volumétrica aplicada ($\text{kg poluente}/\text{m}^3 \text{ reator.dia}$) (PUJOL, 1990).

As primeiras estações de tratamento de esgotos utilizando biofiltros tinham como objetivo principal a eliminação da matéria carbonácea e da matéria em suspensão. Dados de literatura situam a capacidade de tratamento entre 5 e 10 $\text{kg de DQO}/\text{m}^3 \text{ de reator.dia}$ (LAZAROVA & MANEN, 1993).

Um estudo sobre um conjunto de doze estações de tratamento utilizando biofiltros com capacidades para atender populações variando entre 7500 e 15000 habitantes mostrou que os processos BIOFOR e BIOCARBONE são capazes de produzir efluentes com DQO menor que 90 mg/l para taxas volumétricas de

carregamentos orgânicos aplicadas inferiores a 7,0 kg DQO/m³.dia (CANLER & PERRET, 1993).

Além da eliminação da matéria orgânica e matéria em suspensão, os biofiltros são, atualmente, também utilizados para nitrificação secundária ou terciária, desnitrificação secundária ou terciária e desfosfatação (GONÇALVES, 1993; ABEYSINGHE, SHANABLEH & RIGDEN, 1996; LE TALLEC & LESOUËF, 1997; GONÇALVES & ARAÚJO, 1997).

A nitrificação secundária nos biofiltros pode ser alcançada, principalmente, controlando-se a carga volumétrica de matéria orgânica aplicada ao biofiltro e através da aplicação de aeração conveniente. Os biofiltros são, também, utilizados para a nitrificação terciária, como etapa de polimento do efluente de outros processos de tratamento para eliminar a matéria carbonácea. Essa solução evita a possibilidade de competição entre os autotróficos e os heterotróficos ao seio do biofilme e, facilita a otimização do processo de nitrificação no biofiltro (GONÇALVES, 1993).

A eliminação quase que completa do nitrogênio é possível utilizando-se biofiltros em duas etapas (nitrificação/desnitrificação). O efluente tratado é recirculado e injetado no biofiltro anóxico, no início do processo, tendo como fonte de carbono o esgoto afluente. A desnitrificação pode ser realizada, também, em uma etapa terciária, por biofiltros não aerados. Essa solução elimina despesas com a energia necessária para a recirculação do efluente, mas o seu uso ou não, depende do custo da fonte carbonácea suplementar para a desnitrificação.

Uma solução disponível para a desfosfatação na biofiltração, atualmente, é realizada através de processo de tratamento físico-químico. A pré-precipitação e a precipitação terciária são duas técnicas empregadas (GONÇALVES, 1993).

3.3 Filtração em membranas

3.3.1 Considerações gerais

As propriedades das membranas são conhecidas desde o início do século 18, mas suas aplicações em laboratório e também na indústria começaram a se desenvolver a partir da metade do século 19, ganhando rapidamente destaque como uma técnica que obtém soluções eficientes e economicamente viáveis em problemas de filtração, separação e/ou clarificação (BRUN, 1989).

A utilização de membranas tem por objetivo principal realizar a separação de substâncias de diferentes propriedades (tamanho, forma, difusibilidade, etc). O trabalho prático dessas barreiras fundamenta-se nas propriedades das membranas semi-permeáveis que podem ser definidas como o conjunto de métodos e propriedades concernente ao transporte de matéria através de materiais com permeabilidades seletiva. Uma membrana semi-permável é, portanto, uma barreira que permite certas transferências de matéria entre dois meios que ela separa. A Figura 3.3 apresenta os diferentes tipos de filtração segundo o tamanho médio das partículas e o tamanho dos poros da membrana.

Tamanho	Microscopia eletrônica		Microscopia ótica		Visível a olho nú	
	Íon	Molécula	Macro molécula	Micro partícula	Macro partícula	
	0,001	0,01	0,1	1,0	10,0	100,0 1000,0
Micrometro (escala logarítma)						
Peso molecular	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	
(sem escala)						
Separação por Membranas	Osmose reversa		Microfiltração		Ultrafiltração	
					Filtração	
Separação Gravimétrica			Ultracentrifugação		Centrifugação	
					Decantação	

FIGURA 3.3 - Diferentes tipos de filtração segundo o tamanho das partículas

Fonte: LACOSTE, 1992

Vários são os processos de separação por membranas e estes podem ser classificados de acordo com a força motriz necessária à separação (Tabela 3.3).

Não são observadas diferenças significativas entre os processos de microfiltração e ultrafiltração, a não ser pelo maior diâmetro dos poros das membranas de microfiltração e da pressão menor, normalmente utilizada para se promover a separação e/ ou concentração de moléculas. Comparadas com a osmose reversa as diferenças, no entanto, são acentuadas.

Na osmose reversa, a membrana é relativamente densa e praticamente sem poros. A pressão de trabalho é bem superior em relação a microfiltração e a ultrafiltração. Na Figura 3.4, observa-se as diferenças básicas entre os três processos citados, sendo que essas diferenças estão relacionadas aos limites de separação e às pressões de trabalho normalmente utilizados.

TABELA 3.3 - Principais processos com membranas e a força motriz necessária à separação

PROCESSO	FORÇA MOTRIZ
Osmose Reversa	Diferença de Pressão
Ultrafiltração	Diferença de Pressão
Microfiltração	Diferença de Pressão
Pervaporação	Diferença de Pressão (Vácuo)
Diálise	Diferença de Concentração
Eletrodíálise	Diferença de Potencial Elétrico

Fonte: PETRUS, 1997

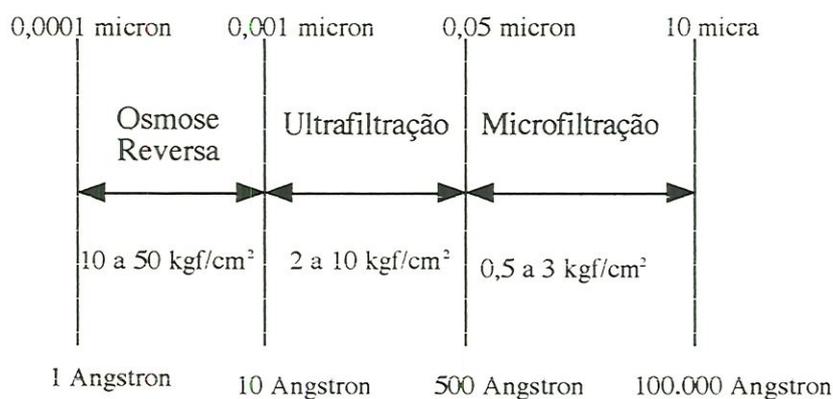


FIGURA 3.4 - Diferenças entre os processos de osmose reversa, ultrafiltração e microfiltração
Fonte: PETRUS, 1997

3.3.2 Materiais das Membranas

As membranas apresentam grande diversidade de texturas físicas (densas ou porosas) e de origem (natural ou artificial). Elas podem ser inorgânicas (cerâmicas), orgânicas (polímeros sintéticos), mistas, neutras ou trocadoras de íons, homogêneas ou de estrutura assimétrica.

Uma membrana densa se caracteriza pela ausência de porosidade. Ela é fabricada a base de polímero de alta densidade e se apresenta sob a forma de camadas finas de material cerâmico ou metálico. A transferência de moléculas através da membrana se desenvolve segundo mecanismo de solução - difusão.

Uma membrana porosa deve possuir boa resistência mecânica, porém espessura fina que permita vazão de permeação elevada. Essas duas exigências contraditórias são resolvidas através da construção de membranas com estruturas assimétricas. A essa categoria pertencem as membranas 'composites' que são construídas a partir da superposição de várias camadas diferenciadas por seu estado físico. Assimétricas ou "composites", as membranas são formadas de um suporte poroso que assegura as funções mecânicas e de uma película ativa de pouca espessura que assegura as funções separativas (RESEAU NOVELECT - INNOVATION ÉNERGÉTIQUE ÉLECTRICITÉ, 1993).

As membranas homogêneas são sólidos microporosos ou densos constituídos de diferentes camadas de porosidade constante, ou de porosidade decrescente ou, ainda, de estrutura assimétrica. A região superficial (película) apresenta uma porosidade mais fraca. Essas membranas são constituídas por polímeros (acetato de celulose) ou por substâncias inorgânicas (vidro ou metais cozidos). As membranas trocadoras de íons pertencem a esse grupo. Suas propriedades residem na presença de cargas elétricas fixadas em certos pontos de sua estrutura. Os íons de sinais opostos aqueles desse grupo se deslocam livremente na membrana enquanto que aqueles de mesmo sinal são rejeitados por eles.

Todas as membranas minerais são de estrutura assimétrica. O suporte e a película ativa podem ser compostos de diferentes materiais (membrana "composite") ou de materiais de mesma natureza. A preparação é realizada em várias etapas. A partir de um suporte macroporoso que assegura a resistência mecânica (espessura de 0,5 a 2,0 mm), é colocado uma ou várias camadas que asseguram a separação propriamente dita (espessura de alguns microns). O diâmetro dos poros é escolhido em função do tamanho das partículas a serem separadas. Essas membranas, são as mais recentes no mercado. Suas características de resistência mecânica, térmica e química são bastante favoráveis. Sua duração chega a vários anos e podem ser facilmente limpas por contra-pressão. |Elas suportam bem a esterilização, e são resistentes ao ataque bacteriano. |Apresentam configuração tubular ou multicanaís. Essa forma é que lhes confere uma melhor resistência mecânica e condições hidrodinâmicas homogêneas

quando o líquido circula tangencialmente no interior do tubo (RESEAU - NOVELECT INNOVATION ÉNERGÉTIQUE ÉLECTRICITÉ, 1993).

3.3.3 Classificação das membranas

De acordo com a ESMST (European Society of Membrane Science and Technology) as membranas classificam-se em:

- membranas isótropas, que possuem “diâmetro” de poro regular em toda sua espessura. São pouco utilizadas em aplicações industriais pois, as perdas de carga são consideráveis. Essas membranas são sensíveis aos ataques de microrganismos. São chamadas de primeira geração. Seus principais inconvenientes são um fraco fluxo do permeado ligado às fortes perdas de carga devido a grande espessura e uma duração de vida relativamente curta, devido a sua sensibilidade à hidrólise e aos ataques bacterianos (LACOSTE, 1992). Na Figura 3.5 pode-se ver a estrutura esquemática de uma membrana isótropa.

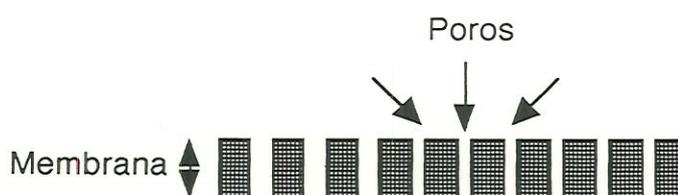


FIGURA 3.5 - Estrutura esquemática de membrana isótropa

Fonte: MOULIN, 1987

- membranas anisótropas, que possuem “diâmetro” de poro que aumenta a medida que se aprofunda a camada filtrante, apresentam boas propriedades mecânicas e proporcionam um melhor fluxo de permeado (camada filtrante muito fina sobre uma estrutura mais espessa e mais porosa). São compostas de material cerâmico hidrófobo, resistem bem aos ataques químicos e bacterianos, não suportando, porém, altas temperaturas e valores extremos de pH. São fabricadas a base de polímeros orgânicos como as poliamidas, polisulfonas, policarbonatos ou polifluoreto de vinilideno. Essas membranas são denominadas de membranas de segunda geração. A Figura 3.6 mostra um esquema de uma membrana anisótropa.

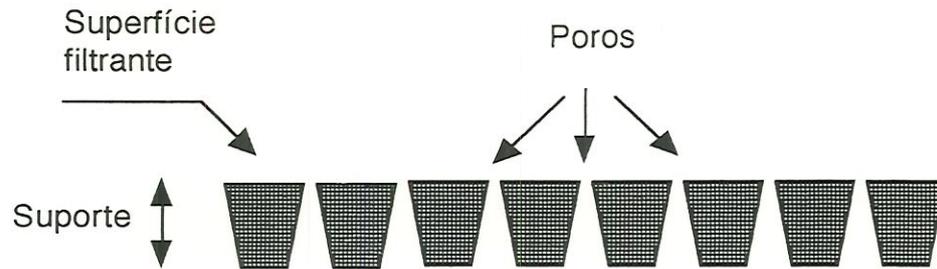


FIGURA 3.6 - Estrutura esquemática de membrana anisótropa

Fonte: MOULIN, 1987

- membranas “composites” (orgânicas ou minerais) são formadas de uma camada filtrante sobre um suporte, sendo frequentemente assimétricas (Figura 3.7). Essas membranas são ditas de terceira geração. São as mais recentes e que apresentam melhor desempenho. As membranas minerais são confeccionadas em óxido de zircônio sobre suporte de fibra de carbono ou de alumina (Al_2O_3). Elas apresentam boa resistência aos agentes químicos ($1 < pH < 14$), aos solventes, aos oxidantes, a fortes pressões e a altas temperaturas (MOULIN, 1987).



FIGURA 3.7 - Estrutura esquemática de membrana “composite”

Fonte: MOULIN, 1987

3.3.4 Características das Membranas (PETRUS, 1997)

As características mais importantes das membranas são: espessura, porosidade, seletividade e permeabilidade.

3.3.4.1 Espessura

Em membranas com as mesmas características morfológicas, quanto maior a espessura da subcamada, maior a sua resistência ao fluxo e, menor a taxa de permeação.

Para aumentar a resistência das membranas utilizadas industrialmente, elas apresentam suporte macroporoso. A nova resistência apresentada pelas membranas é sempre inferior a da subcamada. Dessa forma, a camada filtrante, a subcamada e o suporte macroporoso funcionam com resistências decrescentes e em série.

3.3.4.2 Porosidade

Porosidade é a relação existente entre a parte sólida e os poros da membrana, isto é, pode ser considerada como a quantidade de vazios em sua estrutura. A porosidade pode ser considerada apenas da parte superficial da membrana, ou seja, da camada filtrante, e neste caso, será expressa em poros/m², ou ainda, pode ser referida a toda a membrana e ser expressa como:

$$\varepsilon = 1 - DM/DP \quad (3.1)$$

Em que:

ε : Porosidade (s.d)

DM: Densidade da membrana (kg/m³)

DP : Densidade do polímero (kg/m³)

Quanto maior a porosidade da subcamada, menor a resistência ao fluxo do solvente através da membrana.

A porosidade de uma membrana relaciona-se diretamente com o processo utilizado em sua preparação ou em seu pós-tratamento.

3.3.4.3 Seletividade

A seletividade depende da distribuição dos diâmetros dos poros. A sua determinação para uma membrana é de fundamental importância para sua caracterização. No entanto, não encontram-se membranas com diâmetros de poros único, e sim, com uma certa distribuição em torno de um diâmetro médio (Figura 3.8).

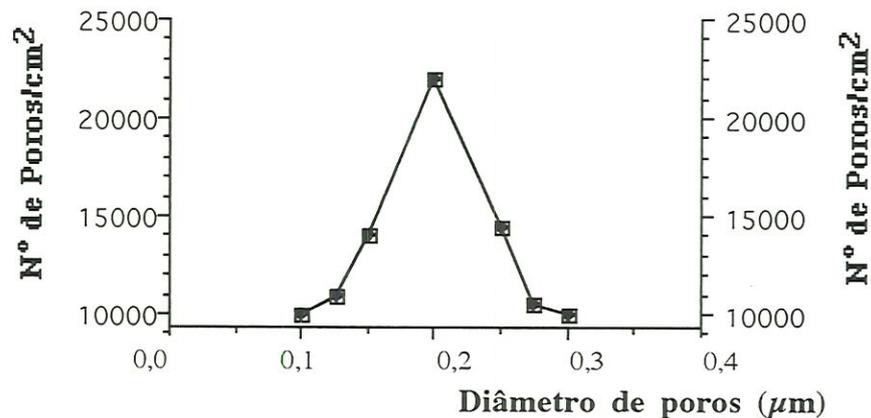


FIGURA 3.8 - Repartição dos diâmetros de poros de uma membrana
FONTE: Adaptado de PETRUS, 1997

Vários são os métodos para determinação do diâmetro médio dos poros de uma membrana, entre os mais utilizados pode-se citar:

- a) medida direta com auxílio do microscópio eletrônico de varredura;
- b) porosimetria de mercúrio;
- c) porosimetria de deslocamento de líquido;
- d) uso de soluções de polímeros polidispersos.

a) Medida direta com auxílio do microscópio eletrônico de varredura

Neste método, a imagem é registrada com o uso de um microscópio eletrônico e com o auxílio de uma estação de tratamento de imagens, podendo-se medir os diâmetros dos poros na superfície. Porém, esse método apresenta limitações quando os poros são muito pequenos e com variedade de tamanhos e, também, quando ocorrem fraturas na superfície que podem ser confundidas com poros.

b) Porosimetria de mercúrio

Este método baseia-se na intrusão de mercúrio nos poros da membrana. A força necessária é diretamente proporcional ao diâmetro dos poros, do ângulo de contato entre o líquido e a membrana e da tensão interfacial do material constituinte da membrana. Pode ser expressa de acordo com a equação de Cantor:

$$r = 2y \cdot \cos\phi / P \quad (3.2)$$

Em que:

r : raio do poro (m)

y : tensão interfacial (Pa.m)

ϕ : ângulo de contato

P : pressão aplicada (Pa)

Desta forma pode-se calcular o perfil de distribuição do diâmetro dos poros.

c) Porosimetria de deslocamento de líquido

O método utiliza dois líquidos imiscíveis com tensões interfaciais conhecidas, sendo que a membrana é preenchida com um dos líquidos e, o outro, é forçado gradualmente e sob pressão através da membrana. Mede-se o fluxo de permeado e a pressão de equilíbrio. Através da combinação da equação de Cantor com a equação de Hagen-Poiseuille, pode-se determinar o perfil de distribuição do diâmetro dos poros de uma membrana.

De acordo com BOTTINO et al (1991) este método apresenta a vantagem de trabalhar com baixas pressões.

d) Uso de soluções de polímeros polidispersos

Os poros de uma membrana estão distribuídos de forma binodal em função de seus diâmetros na superfície da membrana. Em vista disso, a retenção de

macromoléculas apresenta dependência na forma sigmoïdal frente a sua massa molecular (Figura 3.9).

Este método é mais utilizado para determinar a zona e o ponto de corte de uma membrana, sendo que a zona de corte representa a região em que macromoléculas de diferentes massa moleculares são parcialmente retidas e o ponto de corte é expresso como a massa molecular da menor molécula retida.

Como todos os demais métodos, este, também, apresenta limitações, sendo que a principal delas é que a retenção de macromoléculas depende fundamentalmente das condições operacionais do experimento, tais como: temperatura, pressão e turbulência.

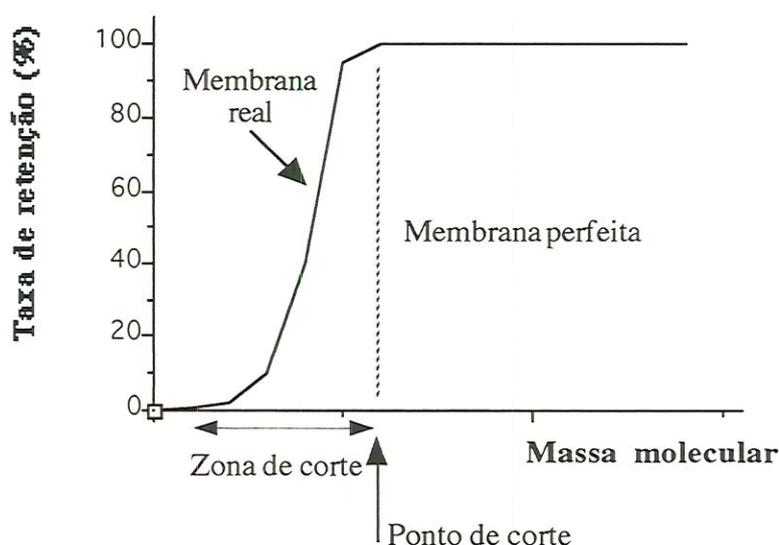


FIGURA 3.9 - Zona e ponto de corte de uma membrana

Fonte: LACOSTE, 1992

3.3.4.4 Permeabilidade

O material que atravessa a membrana pode ser medido pela sua permeabilidade. O mecanismo de transporte é o do fluxo capilar convectivo, em que cada poro é assimilado a um capilar e a soma de todos os escoamentos fornece o fluxo total (DUCLERT, 1989).

A permeabilidade à água permite avaliar a porosidade superficial e da subestrutura da membrana, fornecendo informações sobre as propriedades hidrofílicas-hidrofóbicas, portanto, sendo fundamental para a sua caracterização.

A lei de Hagen-Poiseuille permite expressar o transporte de solvente por uma membrana. A relação a seguir fornece o fluxo de solvente:

$$J = N \cdot \pi \cdot dp^4 \cdot \Delta P / 128 \cdot \mu \cdot \ell \quad (3.3)$$

Em que:

J : fluxo de solvente (normalmente expresso em $m^3/m^2 \cdot s$)

N : número de poros por unidade de superfície (m^{-2})

dp : diâmetro de poros (m)

ΔP : pressão transmembrana (Pa)

μ : viscosidade dinâmica (Pa.s)

ℓ : comprimento do poro (m)

Sendo:

$$N = (4 \cdot \varepsilon) / (\pi \cdot \tau \cdot dp^2) \quad (3.4)$$

Em que:

ε : porosidade (s.d)

τ : fator de tortuosidade (s.d)

dp : diâmetro dos capilares (m)

Substituindo a equação 3.4 na equação 3.3 tem-se:

$$J = (\varepsilon \cdot dp^2 / 32 \cdot l \cdot \tau) \cdot (\Delta P / \mu) = (\Delta P / \mu) \cdot R_T \quad (3.5)$$

Em que:

R_T : resistência total da membrana (m^{-1})

Para o caso de soluções que apresentam diferentes tipos de macromoléculas e de massas moleculares variadas e partículas em suspensão, deve-se levar em consideração outras resistências ao fluxo de permeado. Assim sendo, a equação 3.5 torna-se:

$$J = (\Delta P - \Delta \pi) / \mu (R_M + R_p + R_g + R_c) \quad (3.6)$$

Em que:

J : fluxo de permeado ($m^3/.m^2.s$)

ΔP : pressão mecânica aplicada (Pa)

$\Delta \pi$: pressão osmótica (Pa)

μ : viscosidade da solução (Pa.s)

R_M : resistência da membrana (m^{-1})

R_p : resistência da zona de polarização (m^{-1})

R_g : resistência da camada de gel (m^{-1})

R_c : resistência devida à colmatação (m^{-1})

3.3.5 Colmatação

O fluxo do permeado, normalmente, no início da operação de filtração diminui rapidamente até um valor determinado, ocasionado pela formação da camada crítica nas proximidades da parede da membrana. Observa-se, ainda, mesmo com a circulação tangencial, uma continuidade na redução do fluxo de permeado. Sua intensidade depende das características da suspensão a filtrar, e também, das propriedades físicas (diâmetro dos poros, distribuição do tamanho dos poros, etc) e químicas (natureza) da membrana porosa utilizada.

Diferentes hipóteses foram estabelecidas para justificar o fenômeno da colmatação, cuja origem, de acordo com VISVANATHAN et al apud WISNIEWSKI (1996) é devida: a) a acumulação de partículas sobre a membrana formando uma camada de polarização por concentração ou uma camada de gel, cujas propriedades podem evoluir ao longo da operação; b) ao bloqueamento dos poros ou adsorção de partículas na superfície externa ou no interior dos poros da membrana, dificultando a passagem do permeado.

A primeira parte, também denominada colmatação reversível, permite encontrar rapidamente as capacidades iniciais da membrana através de uma parada da operação de filtração (seja pela anulação da pressão transmembrana ou pela substituição da solução por água limpa). A segunda parte, dita irreversível, pode ser eliminada a partir de modificações das propriedades termodinâmicas do sistema, pela introdução de energia mecânica ou química (tipicamente, limpeza contra-corrente ou

limpeza química) (TARDIEU, 1997). Uma ilustração dos mecanismos envolvidos na colmatção é mostrada na Figura 3.10.

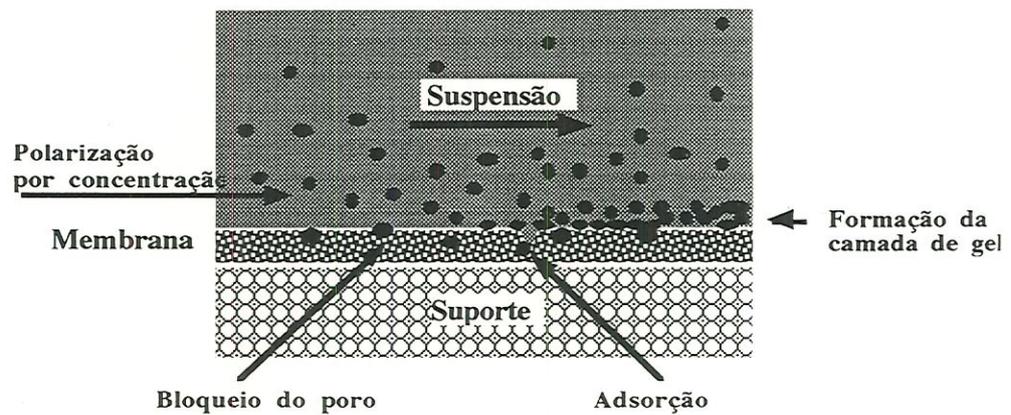


FIGURA 3.10 - Mecanismos envolvidos na colmatção de membranas
Fonte: WISNIEWSKI, 1996

3.3.5.1 Polarização por concentração

Nas proximidades da parede da membrana se forma uma camada, em que a concentração de solutos aumenta. Essa camada, de espessura suposta constante (δ), é denominada camada de polarização por concentração. Sua ordem de grandeza depende das condições hidrodinâmicas, ficando, normalmente entre 0,5 mm e alguns micrometros. No modelo de difusão-convecção, no estado estacionário, o fluxo líquido de soluto (J) através da membrana resulta da diferença entre o fluxo de convecção e o fluxo de retrodifusão, como ilustrado na Figura 3.11.

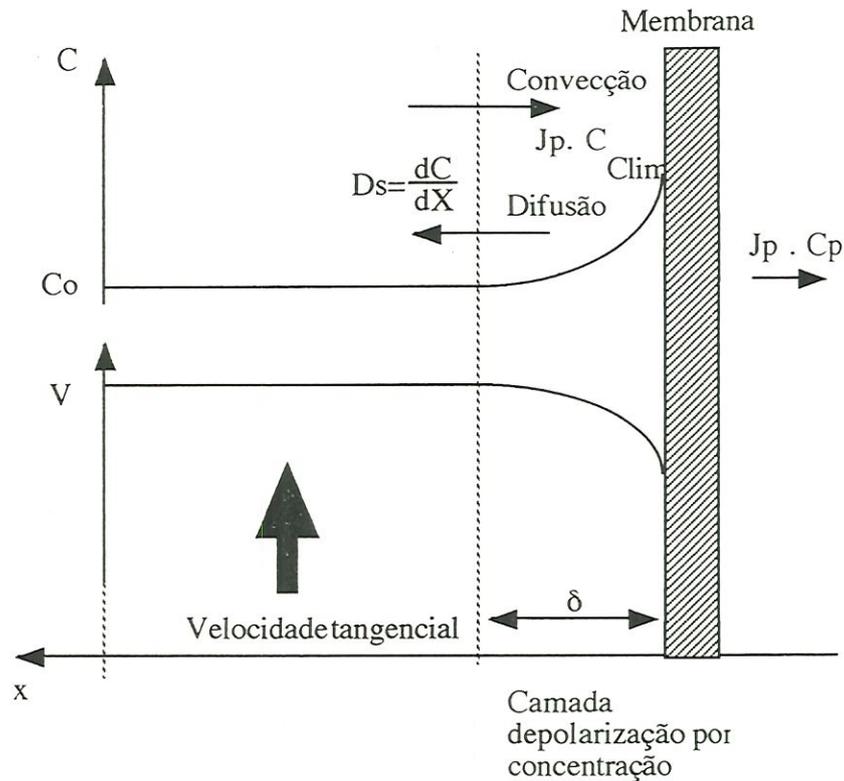


FIGURA 3.11 - Perfis de concentração e velocidade tangencial nas proximidades da parede de uma membrana

Fonte: Adaptado de DUCLERT (1989)

Dessa forma, tem-se que:

$$J = J_p \cdot C - D_s \cdot \frac{dC}{dX} \quad (3.7)$$

Em que:

J_p : fluxo do permeado ($m^3 / m^2 \cdot s$)

$D_s \cdot \frac{dC}{dX}$: fluxo de soluto devido a difusão, que obedece a lei de Fick

C : concentração do soluto na camada de difusão (mol/m^3)

D_s : coeficiente de difusão do soluto na solução (m^2/s)

X : espessura da camada de difusão ($0 < X < \delta$) (m)

Integrando-se a expressão 3.7 ao longo de toda espessura da camada de polarização, obtém-se o valor do fluxo do permeado:

$$J_p = \frac{D_s}{\delta} \cdot \ln \left[\frac{(C_{lim} - C_p)}{(C - C_p)} \right] \quad (3.8)$$

Em que:

$D_s/\delta = K_m$: coeficiente de transferência de massa (m/s)

C_{lim} : concentração do soluto próximo à superfície da membrana (mol/m³)

C_p : concentração do soluto no permeado (mol/m³)

Se a membrana impede a passagem do soluto, $C_p = 0$, então:

$$J_p = K_m \cdot \ln(C_{lim}/C) \quad (3.9)$$

O fator de polarização γ caracteriza o funcionamento da membrana para um determinado meio:

$$\gamma = C_{lim}/C_0 \quad (3.10)$$

Em que:

C_0 = concentração de solutos fora da camada de polarização (mol/m³)

Definindo-se a taxa de retenção absoluta (R_a):

$$R_a = 1 - C_p/C_{lim} \quad (3.11)$$

Para reduzir os efeitos causados pelo fenômeno de polarização, várias alternativas são propostas, tais como: o aumento da velocidade de circulação (aumento da turbulência), a diminuição da pressão transmembrana, a elevação da temperatura para diminuir a viscosidade, etc (LACOSTE, 1992; BADER & VEENSTRA, 1996; TARDIEU, 1997, PETRUS, 1997).

3.3.5.2 Camada de gel

O aumento da concentração de partículas nas proximidades da parede da membrana atinge um valor limite, não sofrendo mais variação. Aparece então, uma resistência suplementar R_g causada pela formação de uma camada de gel resultante da precipitação de macromoléculas sobre a membrana (Figura 3.12).

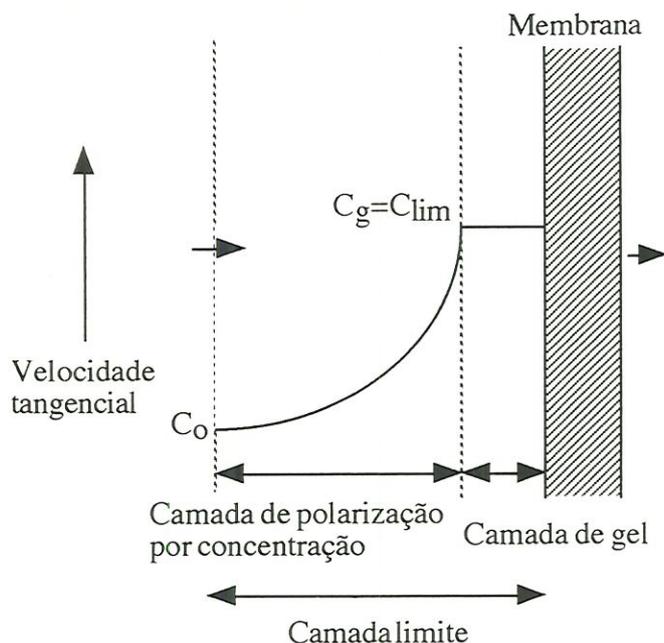


FIGURA 3.12 - Camada de gel e perfil de concentração para uma membrana

Fonte: Adaptado de MOULIN, 1987

Não é possível evitar a formação da camada de gel. A formação dessa camada depende das características da suspensão em circulação e, também, das condições em que é operado o sistema. O equilíbrio entre as duas direções de convecção (deposição pela permeação e retirada por cisalhamento) torna-se determinante, conduzindo a um estado de equilíbrio dinâmico, em que as partículas são agregadas e desagregadas em uma mesma taxa. Assim como na zona de polarização, o controle da camada de gel pode ser feito através do aumento da turbulência ou da diminuição da pressão, ou, ainda, pela utilização de membranas fabricadas com outros materiais, para se reduzir a adsorção de solutos (JÖNSSON & JÖNSSON, 1995).

3.3.5.3 Colmatação (bloqueamento dos poros)

A colmatação é o principal problema das unidades de ultrafiltração ou microfiltração. O termo colmatação indica particularmente, a obstrução progressiva dos poros da membrana como resultado da penetração de solutos presentes em soluções macromoleculares ou em suspensão coloidal.

A colmatção, seja a causada por sedimentação, seja pela obstrução dos poros é resultante de um grande número de fatores (Figura 3.13).

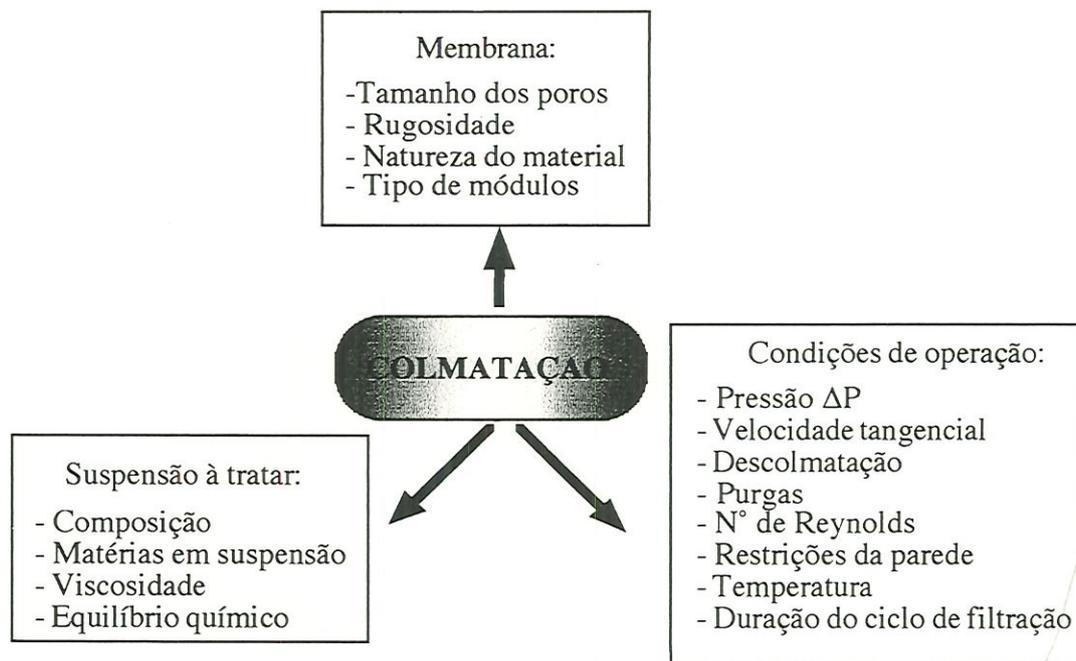


FIGURA 3.13 - Fatores de colmatção de uma membrana

Fonte: LACOSTE, 1992

Nos dois casos acima citados, o bloqueamento pode apresentar vários aspectos, tais como:

- mecânico: as partículas se depositam simplesmente e cobrem os interstícios da membrana;
- físico-químico: formação de uma camada com estrutura mais complexa (formação de gel por exemplo), pela adsorção em superfície;
- química: reação química com a membrana;
- biológica: intervenção de microrganismos (formação de biofilme com bloqueamento dos poros em superfície ou em profundidade).

A adsorção, mesmo sendo fenômeno essencialmente de superfície, exerce um papel importante no mecanismo da colmatção de membranas de ultrafiltração e microfiltração tangencial, tanto em superfície como em profundidade. A composição da suspensão, as propriedades das membranas e a natureza química das partículas são aspectos fundamentais ligados ao fenômeno de adsorção (VOLPINI, 1994).

As partículas com tamanho inferior aos poros da membrana podem penetrar através deles, e nesse caso podem ser adsorvidas, ficando retidas nas paredes internas desses poros, resultando em uma diminuição do fluxo de solvente e uma alteração nas características de retenção. A utilização de membranas com tamanho médio de poros inferior ao tamanho médio dos solutos é recomendável para reduzir os problemas de obstrução.

A colmatação por bloqueio dos poros ocorre na ultrafiltração e na microfiltração tangencial quando as curvas de repartição dos diâmetros de poros da membrana e dos diâmetros das partículas a reter são vizinhas ou se interpõem (Figura 3.14).

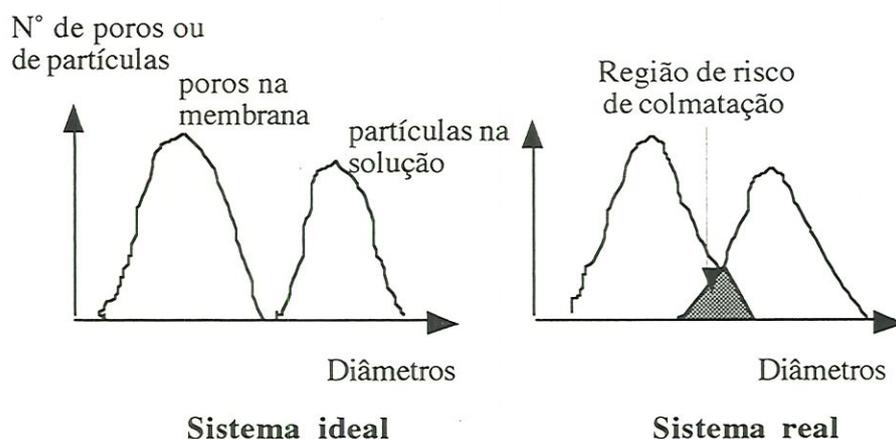


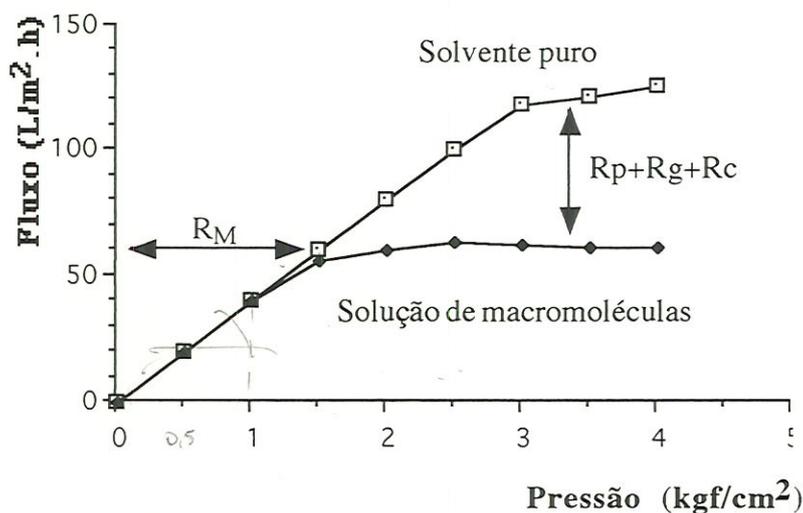
FIGURA 3.14 - Riscos de colmatação de uma membrana
Fonte: Adaptado de MOULIN, 1987

3.3.6 Condições de operação (PETRUS, 1997)

As condições de operação de uma membrana são supra importantes, tanto pelo aspecto de amenizar os efeitos dos fenômenos de polarização, formação da camada de gel e colmatação, quanto pelo aspecto econômico. O consumo de energia aumenta à medida que aumenta a pressão, a velocidade de circulação e a temperatura.

Quando não é considerado o efeito da compactação da membrana e no caso de um solvente puro, o fluxo do permeado é diretamente proporcional à pressão, sendo essa a força que promove a separação.

No caso de soluções complexas, principalmente, em que os fenômenos descritos anteriormente acontecem, o aumento da pressão nem sempre é revertido em maior fluxo proporcional, como pode ser visto na Figura 3.15.



R_M : resistência da membrana; R_p : resistência à polarização; R_g : resistência à camada de gel; R_c : resistência à colmatção

FIGURA 3.15 - Relação pressão - fluxo do permeado para solvente puro e solução de macromoléculas

Fonte: PETRUS, 1997

CARRÈRE & RENÉ (1996), apresentam resumidamente (Tabela 3.4) algumas linhas diretrizes quanto ao desenvolvimento e a otimização na operação dos processos de ultrafiltração ou microfiltração tangencial.

De acordo com PERSSON, GEKAS & TRÄGARDH (1995), para altas pressões a membrana e a camada de gel, normalmente, são compactadas e, também, ocorre uma alteração na seletividade do sistema, de tal modo que a colmatção pode ser intensificada.

PETRUS (1997), concluiu que além de um certo limite, que é específico para cada processo, o aumento da pressão pode não mais corresponder a um aumento de fluxo e, até mesmo reduzi-lo, com consequências adversas para a integridade da membrana. Normalmente, para os processos de microfiltração e ultrafiltração são utilizadas pressões entre 0,5 a 3,0 kgf/cm² e 2,0 a 10,0 kgf/cm², respectivamente.

O fluxo do permeado, também, aumenta com o aumento da velocidade de escoamento da solução junto à superfície da membrana, tendo em vista que reduz o perfil de concentração na zona de polarização e controla o crescimento da camada de gel.

TABELA 3.4 - Efeitos dos parâmetros de operação no desempenho de membranas

Parâmetros	Polarização por concentração	Camada de gel	Colmatação irreversível
Aumento da pressão transmembrana	Sem efeito sobre o fluxo limite (-) Aumento da retenção	(+) Aumento do fluxo (-) Diminuição da porosidade da camada (-) Dificuldade de cisalhamento	(-) Aumento da colmatação (+) Aumento do fluxo
Aumento da velocidade tangencial	(+) Aumento do fluxo (+) Diminuição da retenção	(+) Aumento do fluxo: diminuição da espessura da camada (-) Diminuição da porosidade da camada	Sem efeito s/fluxo
Aumento da concentração inicial	(-) Diminuição do fluxo (-) Aumento da retenção	(-) diminuição do fluxo ou Sem efeito s/fluxo	(-) Aumento da colmatação
Ambiente físico-químico		Importante	Fundamental
Procedimento de partida		(+) Aumento do fluxo	(-) Aumento da colmatação
Aumento do diâmetro das partículas		(+) Aumento do fluxo	

Fonte: CARRÈRE & RENÉ, 1996

Obs. São considerados positivos (+) ou negativos (-) os efeitos que causam um aumento (ou diminuição) do fluxo e/ou uma diminuição (ou aumento) da retenção

O aumento do fluxo de permeado, também, ocorre pelo aumento da temperatura, dentro dos limites suportáveis pela membrana e pelo produto. Isso acontece devido à redução da viscosidade da solução e pelo aumento da difusão através da camada de gel e da própria membrana. Utilizam-se temperaturas entre 30 e 60°C, no entanto, em função do tipo da membrana, altas temperaturas podem agravar sua compactação e até alterar as suas características físicas e suas propriedades seletivas.

3.4 Aplicações da tecnologia de membranas

3.4.1 Considerações gerais

A despeito do interesse e do grande avanço obtidos até hoje, a utilização da tecnologia de membranas, ainda, representa uma área com grande potencial de desenvolvimento.

Nesse quadro, a associação da tecnologia de membranas com as técnicas de tratamento de águas se apresenta como um caminho promissor, o qual, já deu origem a várias aplicações, como:

- osmose reversa para desalinização de água do mar;
- microfiltração, ultrafiltração ou nanofiltração para potabilização de águas de superfície ou subterrâneas;
- microfiltração, ultrafiltração, biorreator à membranas, diálise ou eletrodialise para o tratamento de esgotos domésticos ou industriais.

Essas aplicações recentes serão, ainda, objeto de aperfeiçoamento, adaptações e, provavelmente, completadas com outros processos (TARDIEU, 1997).

De acordo com FANE (1996), o crescente interesse na utilização dessa tecnologia nos campos de tratamento de água e de tratamento de esgotos é baseado nos seguintes aspectos:

- grande potencial para melhorar as eficiências dos tratamentos quando comparadas às tecnologias tradicionais;
- facilidade de instalação e ampliação da área filtrante;
- disponibilidade no mercado e com tendências na redução de seu custo (instalação e operação).

Restrições para implementação da tecnologia de membranas, incluem:

- incertezas quanto a sua produtividade (problemas de colmatação) e qualidade do produto (recuperação de materiais);
- viabilidade econômica;

3.4.2 Processos específicos para águas de abastecimento e águas residuárias

Neste caso, pode-se citar como exemplos a osmose reversa e a eletrodialise.

3.4.2.1 Osmose reversa

A osmose reversa é uma técnica separativa que consiste em extrair água de uma solução geralmente salina, a qual circula através de uma membrana sob pressão suficiente para inverter o fluxo osmótico (BRUN, 1989).

Em princípio a osmose reversa permite, alcançar dois objetivos, dependendo se o produto recuperável é constituído pelo permeado ou pelo retentado:

- a) reduzir a concentração total em solutos, em que as principais aplicações são: a produção de água potável a partir de águas salobras ou água do mar e melhorar a qualidade da água para usos industriais;
- b) aumentar a concentração de uma solução sendo a desidratação parcial de sucos de frutas na indústria alimentícia uma das principais aplicações.

O tratamento de efluentes industriais através da osmose reversa permite, simultaneamente, a remoção da poluição e a recuperação eventual de constituintes de valor comercial.

A aplicação da osmose reversa para tratamento de águas residuárias é recente. A maioria das aplicações são relativas a tratamentos, cujos efluentes respeitem as normas e que são reutilizados em irrigação. Um outro exemplo de aplicação, é o caso de uma usina hidroelétrica na Flórida que utiliza efluente de esgoto doméstico

tratado através de osmose reversa para limpeza e resfriamento (WETHERN e KATZARAS, 1995).

3.4.2.2 Eletrodiálise

A eletrodiálise é uma técnica separativa na qual espécies ionizadas minerais ou orgânicas dissolvidas como sais, ácidos ou bases são transportadas através das membranas iônicas sob ação de um campo elétrico (BRUN, 1989).

A eletrodiálise de uma solução permite atingir três objetivos:

- a) reduzir a concentração em eletrólitos; a dessalinização de águas salobras se constitui em uma das principais aplicações, se mostrando um processo competitivo se comparada com a destilação. Existem várias instalações em funcionamento. Algumas aplicações são encontradas na indústria alimentícia e farmacêutica;
- b) aumentar a concentração em moléculas solúveis. No Japão, a produção de sal a partir da água do mar se revelou econômica, levando em conta as restrições locais;
- c) transportar seletivamente íons que têm o mesmo sinal de carga.

3.4.3 Utilização de membranas acopladas a outros processos para tratamento de águas residuárias

Pode-se citar como exemplos, a associação da microfiltração ou ultrafiltração com outros processos de tratamento e, ainda, o biorreator à membrana.

3.4.3.1 Associação da microfiltração ou ultrafiltração

A utilização de membranas acopladas a outros processos de tratamento é objeto de estudos, seja em escala de laboratório, piloto, industrial e mesmo em instalações em grande escala. Na maioria dos casos, tratam-se de instalações relativamente compactas compreendendo de uma parte a microfiltração ou a ultrafiltração acoplada a um reator biológico.

DEGREMONT (1989), cita alguns exemplos de aplicações em tratamento de águas residuárias:

- reutilização de águas residuárias, em que a compacidade e a segurança são pesquisados: a microfiltração é associada a um tratamento de lodos ativados. A membrana assegura a clarificação do efluente do reator aeróbio que apresenta uma concentração de biomassa da ordem de 10 a 15 g/L. A produção de lodos em excesso é bastante reduzida;
- clarificação após digestor anaeróbio. No caso de sistemas de “contato” o adensamento do lodo é insuficiente. A utilização da microfiltração permite manter no digestor 30 g/L em SST à 60% em SSV e aumentar em proporção a carga aplicada.

Na europa, utilizou-se pela primeira vez estação de tratamento de esgotos empregando microfiltração para tratar os esgotos provenientes de dois vilarejos situados a 20 km ao norte de Cardigan, na costa do país de Gales. Os esgotos foram previamente submetidos a um tratamento físico-químico (decantação lamelar) e depois microfiltrados em membranas com diâmetro de poros de 0,2 μm . O efluente final apresentou boas características, límpido e livre de toda poluição microbiana. A estabilidade do fluxo mostrou a longo termo a eficiência do processo que era composto de uma descolmatação à ar comprimido (BILTOFT & NIAY, 1994).

BAILEY, HANSFORD & DOLD (1994) estudaram a utilização da microfiltração para substituir a decantação secundária em uma estação de lodos ativados. O sistema foi operado em seis condições diferentes. A idade do lodo variava entre 5 e 20 dias e a taxa de carregamento orgânico de DQO entre 7,5 e 45,0 g/L. A concentração da biomassa foi aumentada de 0,95 para 19,47 g/L. O efluente final apresentou 0,013 g/L de SST e a redução de DQO ultrapassou o valor de 97%.

A utilização da microfiltração tangencial em tratamento de águas residuárias é limitada pela colmatação da membrana devido, principalmente, à fração coloidal. Um pré-tratamento associando a eletro-coagulação e flotação por ar dissolvido permitem transformar parte dessa fração coloidal em flotável. O fluxo do permeado sobre uma membrana microporosa de 0,1 μm passou de 20 L/m².h para esgoto bruto à um valor próximo a 350 L/m².h quando utilizado esgoto pré-tratado (POUET & GRASMICK, 1993).

3.4.3.2 Biorreator à membrana

O biorreator à membrana (BRM) é uma tecnologia inovadora no tratamento de águas residuárias (LEVY, 1994).

O BRM realiza em contínuo duas funções dissociadas fisicamente:

- uma função de tratamento no biorreator;
- uma função de separação na membrana.

O biorreator tem a função de transformar a matéria orgânica e mineral em matéria biológica (biomassa), enquanto que a membrana deve separar as fases líquida e sólida e também recircular a biomassa para intensificar a reação. A filtração é efetuada impondo-se uma circulação tangencial da suspensão através da membrana.

Nos biorreatores à membrana, as características físicas da suspensão estão relacionadas diretamente com a hidrodinâmica do sistema. Ela pode condicionar o avanço da reação e também a filtrabilidade da suspensão (WISNIEWISKI, 1996).

3.4.4 A utilização de membranas e a desinfecção

As membranas podem ser utilizadas como alternativa para desinfecção, tanto de águas para abastecimento como de águas residuárias.

3.4.4.1 Águas para abastecimento

Numerosos experimentos para potabilização de águas empregando membranas têm sido utilizados nesses últimos anos. Normalmente são construídas instalações em escala reduzida (RUMEAU et al, 1991). Na maioria dos casos, águas provenientes de perfurações cáusticas com pouco poder de colmatação.

A indústria de equipamentos AQUASOURCE (DUMONT, 1993) propôs dois tipos de unidades móveis equipadas de membranas em fibras “creuses”: “Aquachoc” com capacidade para produzir 5 m³/h de água potável e, “Sirroc”, compreendendo quatro módulos para uma vazão de 20 m³/h.

IREPOLIA (Institut de Recherche sur l'Élimination des Pollutions d'Origine Industrielle et Agro-alimentaire) implantou uma unidade autônoma de potabilização de água por microfiltração tangencial utilizando membranas cerâmicas. Nesse sistema, com uma capacidade de 50 m³/dia foi utilizada água de categoria A1 (LEGERON, 1993).

Em Bernay, para superar as variações de características de uma água cáustica, colocou-se em operação uma instalação de microfiltração equipada com descolmatação à ar e, com capacidade para fornecer uma vazão de 50 m³/h. Colocada em operação esta estação, além de produzir uma vazão constante, apresentou sempre uma água tratada dentro dos padrões de potabilidade. Estes primeiros resultados em escala industrial, confirmam a viabilidade dessa alternativa, selecionada após numerosos estudos piloto (TAZI-PAIN et al, 1994).

Nos anos 90 surgem o desenvolvimento e as aplicações das técnicas à membranas no campo de tratamento de águas para abastecimento. As principais limitações continuam ligadas à colmatação da membrana e/ou às técnicas de limpeza. A colmatação da membrana se traduz por uma diminuição da vazão do permeado no decorrer do tempo. A colmatação pode estar ligada a diversos fatores, em que a adsorção da matéria orgânica sobre a superfície da membrana pode ser a principal causa. Para verificar esse problema ALI, SONGUELE BOMANGEAYEN & RUMEAU (1994) estudaram pré-tratamento eletrolítico, que pelo efeito direto da eletrólise age sobre certos íons, a matéria orgânica, os vírus e a matéria coloidal da água. Os estudos foram realizados utilizando membranas com diâmetros de poros diferentes (0,2; 0,5 e 0,8 μ m), e com três tipos de água (água de abastecimento, água de poço e esgoto tratado). A qualidade das diferentes águas tratadas foram similares, respeitando as normas dos padrões de potabilidade, independentemente de sua origem.

Vários experimentos foram realizados para demonstrar a aplicabilidade da microfiltração e também da ultrafiltração para potabilização de águas provenientes de mananciais superficiais pouco poluídos. Os primeiros resultados foram satisfatórios quanto à eficiência do tratamento. Não houve grandes diferenças de resultado entre a microfiltração e a ultrafiltração. Entretanto, quando se utilizou a microfiltração foi necessário pré-tratamento por coagulação para garantir uma melhor vazão do permeado (KUNIKANE et al, 1995).

3.4.4.2 Águas residuárias

OESTERHOLT & BULT (1993) realizaram estudo comparativo utilizando filtração em areia e microfiltração tangencial para melhorar a qualidade de um efluente de uma estação de tratamento de esgotos. A capacidade de remoção de ambos os métodos foi explorada para sólidos em suspensão, DQO, nitrogênio KJELDAHL, fósforo, cobre e zinco com e sem adição de cloreto férrico. Sem cloreto férrico somente os sólidos em suspensão foram removidos. Quando foi utilizado cloreto férrico verificou-se que 90% do fósforo foi eliminado na microfiltração, enquanto que na filtração em areia, 70%. Em geral, verificou-se melhor eficiência quando se utilizou a microfiltração.

LANGLAIS et al (1992) utilizaram a microfiltração como meio de desinfecção de um efluente após tratamento biológico. Os resultados confirmaram que a microfiltração à 0,2 μm é uma barreira eficaz na remoção dos coliformes fecais. Paralelamente a esses experimentos foram igualmente estudados as variações de turbidez, cor, DQO, DBO₅ e surfactantes aniônicos. A redução média da turbidez chegou a 99%, enquanto que as taxas de redução da DQO variaram de 31% a 72% em função do modo de filtração utilizado (frontal ou tangencial). As vazões médias foram de 75 L/m².h (microfiltração frontal) e 82 L/m².h (microfiltração tangencial).

Foram realizados experimentos por LANGLAIS et al (1993) para testar a eficiência da microfiltração tangencial aplicada a um efluente de um biofiltro. As características do efluente na saída do biofiltro apresentaram: DQO com valores entre 100 e 400 mg/L e SST entre 15 e 90mg/L. A microfiltração (0,2 μm) eliminou todos os microrganismos indicadores de contaminação fecal (streptococos fecais, coliformes fecais e totais). A redução da DQO chegou até 60% e a eliminação da turbidez, a 99%. Nas condições adotadas, o ciclo mínimo de filtração durou 72 horas para uma vazão mínima do permeado de 80 L/m².h.

KOLEGA et al (1991) pesquisaram a utilização da microfiltração para desinfecção e clarificação de águas residuárias após tratamento primário e, também efluente de um sistema de lodos ativados. O emprego de um sistema de limpeza, "gas backwashing", reduziu de maneira significativa os problemas de colmatção das membranas. O estudo mostrou que a microfiltração é eficaz para a eliminação de coliformes fecais, totais e streptococos. A eliminação de metais pesados, óleos e graxas foi significativa. Praticamente, foi removida toda matéria em suspensão.

A utilização de sistema de microfiltração ($0,2 \mu\text{m}$) se mostrou eficaz para eliminação de coliformes totais, coliformes fecais e streptococos a partir de um efluente secundário de uma estação de tratamento de esgotos por lodos ativados. A vazão média foi de $200 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ para uma pressão aplicada de 1 bar. O efluente final obtido apresentou uma qualidade mais elevada se comparado com aqueles obtidos em tratamentos terciários convencionais (KOLEGA et al, 1989).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Apresentação

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho foram desenvolvidas várias atividades experimentais, destacando-se: acompanhamento, por período de 600 dias, da operação de um biofiltro utilizando-se esgoto com tratamento primário, variando-se as condições de funcionamento e, também, realizando-se análises e exames laboratoriais de rotina; ensaios em membranas (microfiltração tangencial) com diferentes diâmetros de poros, em condições hidrodinâmicas variadas e utilizando-se efluentes com diferentes características.

No tratamento primário do esgoto utilizou-se flocculador de leito fluidizado associado a decantador lamelar inclinado. Em caso de impedimento na utilização deste, dispunha-se de um ponto para tomada de esgoto decantado diretamente da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) de Montpellier.

Em escala de laboratório, realizaram-se ensaios de filtrabilidade de suspensões, utilizando-se a célula de filtração SARTORIUS. Nesses ensaios, foram verificadas a influência do tratamento das membranas com polímero, bem como, a influência do tipo de suspensão utilizada e do pH na sua colmatação.

Essas atividades experimentais foram realizadas no “Laboratoire des Materiaux et Procédés Membranaires” (LMPM) da Universidade de Montpellier II - França.

4.2 Instalações experimentais

4.2.1 Floculador com leito de lodo fluidizado associado a decantador lamelar inclinado

A instalação experimental de decantação (Figura 4.1), constitui-se de uma coluna vertical de seção retangular sobreposta por um decantador lamelar inclinado (60° em relação à horizontal), alimentada na parte inferior da coluna. As características dessa coluna são dadas, a seguir:

- a) coluna de floculação
 - altura : 1,10m
 - largura : 0,14m
 - profundidade: 0,12m
 - seção : 0,0168m²
 - volume : 0,01848m³ (sem o cone de distribuição)
 - volume do cone de distribuição: 616 cm³

- b) decantador lamelar
 - comprimento : 0,70m
 - largura : 0,12m
 - profundidade : 0,12m
 - seção : 0,0144m²
 - volume : 0,1008m³
 - n° de lâminas : 4
 - ângulo de inclinação: 60°

Condições operacionais:

- velocidade aparente de passagem: 6,0m/h
- tempo de detenção hidráulico : 20min.

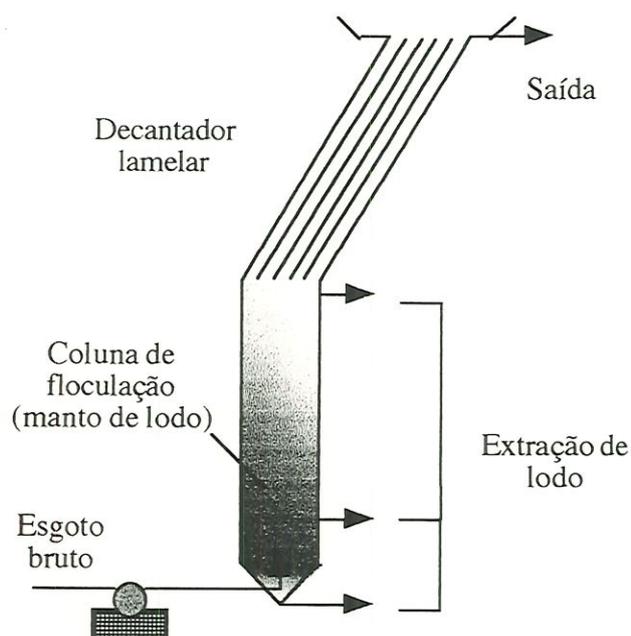
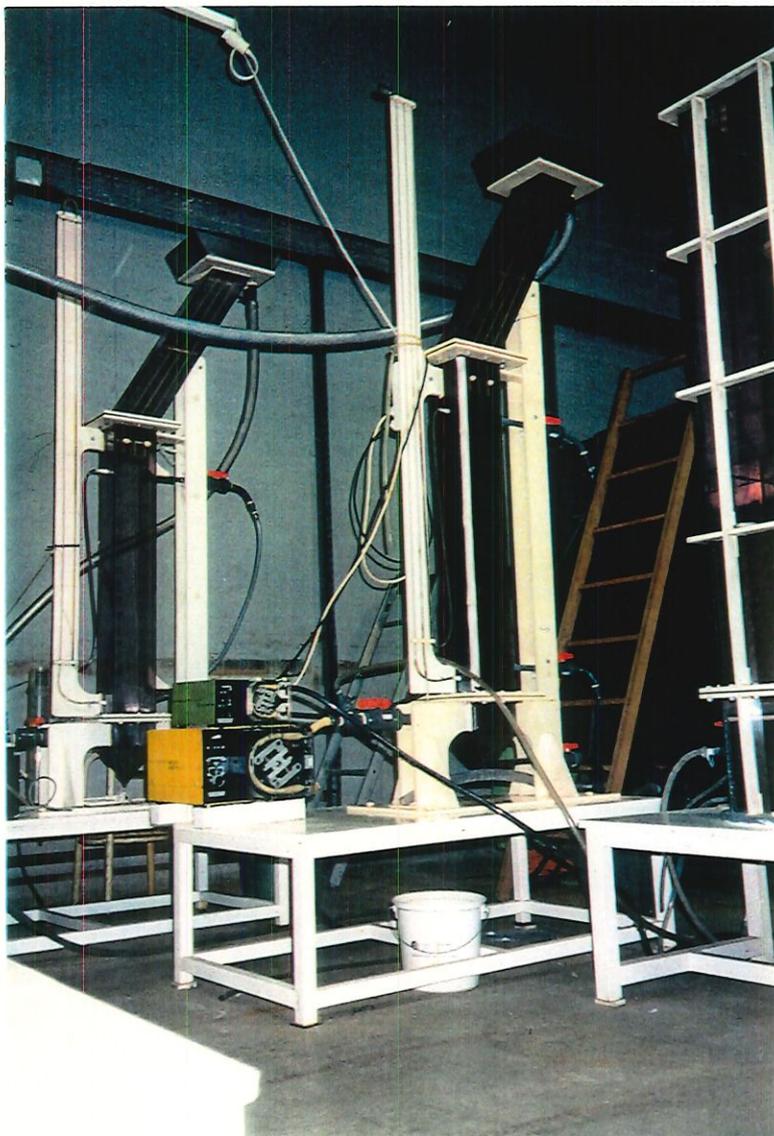


FIGURA 4.1 - Flocculador-piloto de manto de lodo associado à um decantador lamelar

Fonte: Adaptado de LACAZE, 1993

O esgoto atravessava a coluna de floculação, passando posteriormente pelo decantador lamelar. Um manto de lodo se formava na coluna, a partir da acumulação de partículas em suspensão. A altura do manto de lodo era regulada pela sua retirada através de um orifício de extração. A Fotografia 4.1 ilustra alguns aspectos dessa instalação.



FOTOGRAFIA 4.1 - Flocculador com leito de lodo fluidizado associado a decantador lamelar inclinado

4.2.2 Biofiltro

O piloto de biofiltração era composto de uma coluna preenchida com material granular (rocha vulcânica). As características do biofiltro são apresentadas, a seguir:

- altura total do biofiltro : 3,50m
- altura do recheio granular : 1,65m
- diâmetro interno da coluna : 0,145m
- volume total do leito (vazio) : 0,0272 m³
- volume considerando o recheio: 0,0128 m³

Na Figura 4.2 é mostrado um esquema do piloto de biofiltração.

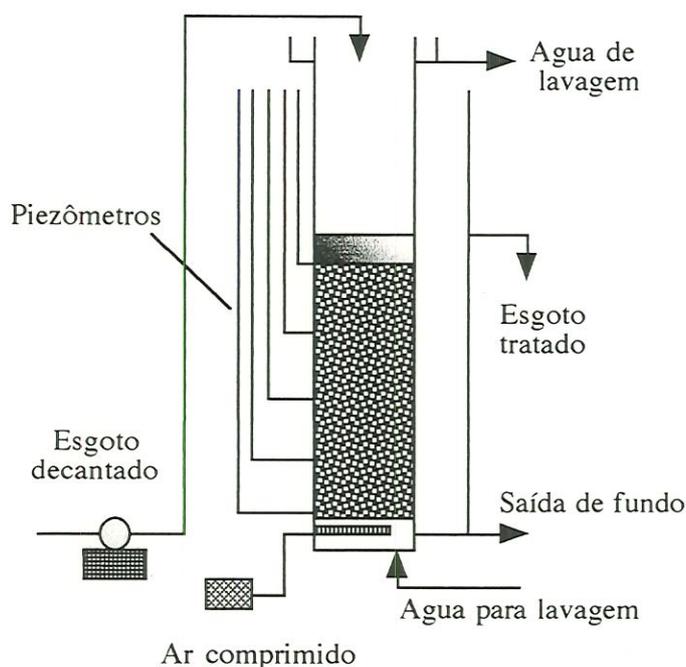


FIGURA 4.2 - Esquema do piloto de biofiltração

Alimentava-se o biofiltro na sua parte superior com esgoto decantado através de uma bomba peristáltica ajustada às condições desejadas. O esgoto atravessava a coluna preenchida, sendo que a saída do efluente tratado ocorria através de um sifão, visando, dessa forma, garantir a imersão do leito. Piezômetros colocados ao longo da coluna serviam para indicar as perdas de carga nos vários pontos de profundidade do biofiltro. A Fotografia 4.2 ilustra a instalação do biofiltro.

O leito filtrante era composto por grãos de rocha vulcânica de diâmetro efetivo variando de 3 a 5mm, servindo simultaneamente como suporte para a fixação de colônias de microrganismos e como filtro para a retenção de partículas em suspensão. A porosidade do material limpo determinada foi de 47% e sua densidade, 2250 kg/m^3 .



FOTOGRAFIA 4.2 - Instalação do biofiltro

4.2.2.1 Condições operacionais dos ensaios no biofiltro

Durante os experimentos modificou-se a carga hidráulica aplicada sobre o biofiltro piloto, através da variação da vazão do esgoto afluente (esgoto decantado). Com a injeção de ar na base do corpo do biofiltro através de um compressor, assegurava-se as condições aeróbicas necessárias para o sistema. As condições operacionais testadas durante os experimentos encontram-se resumidas na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - Condições operacionais do biofiltro

Vazão (Q) (l/h)	Velocidade aparente média (m/h)
16,50	1,00
8,25	0,50
4,13	0,25

O desempenho do processo era acompanhado através de coleta de amostras do esgoto decantado e do efluente tratado, pelo menos uma amostra diária e durante cada ciclo do biofiltro (até a sua colmatação), quando, então, realizava-se sua limpeza.

Para a lavagem do biofiltro promovia-se as seguintes ações: fechamento do registro de alimentação do esgoto decantado; fechamento da saída do efluente do biofiltro; injeção de água tratada à contra-corrente com vazão suficiente para expandir o leito, sem causar a perda de material suporte; injeção de grande quantidade de ar para facilitar a desagregação do meio granular e a desestruturação do biofilme em excesso. A limpeza do biofiltro terminava quando obtinha-se um efluente límpido (em aproximadamente 10 min).

4.2.3 Piloto A de membranas

A Figura 4.3 ilustra esquematicamente o piloto A de membranas utilizado neste trabalho.

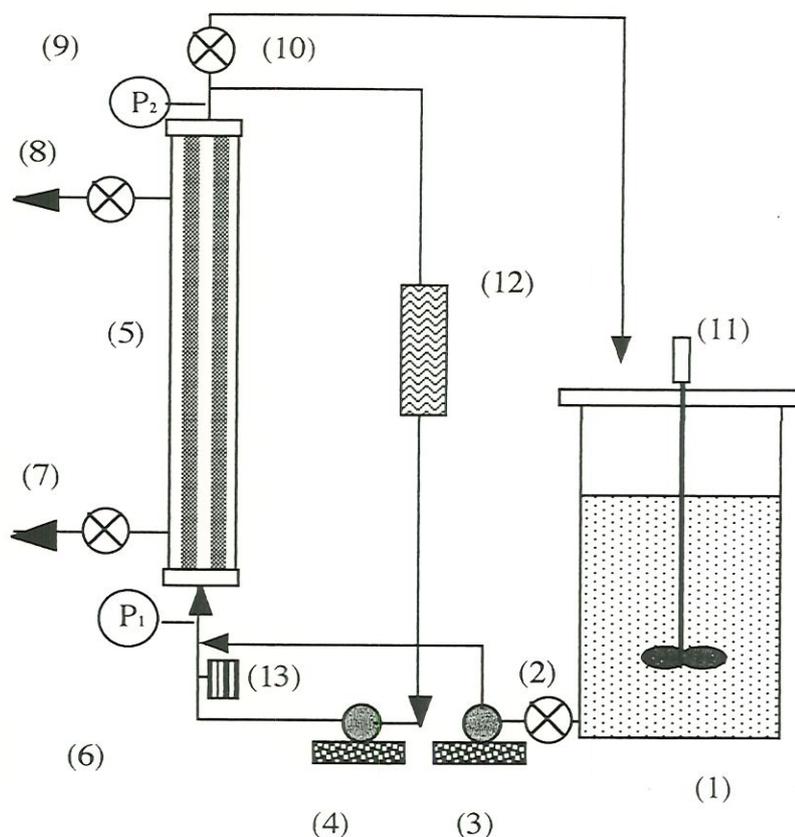
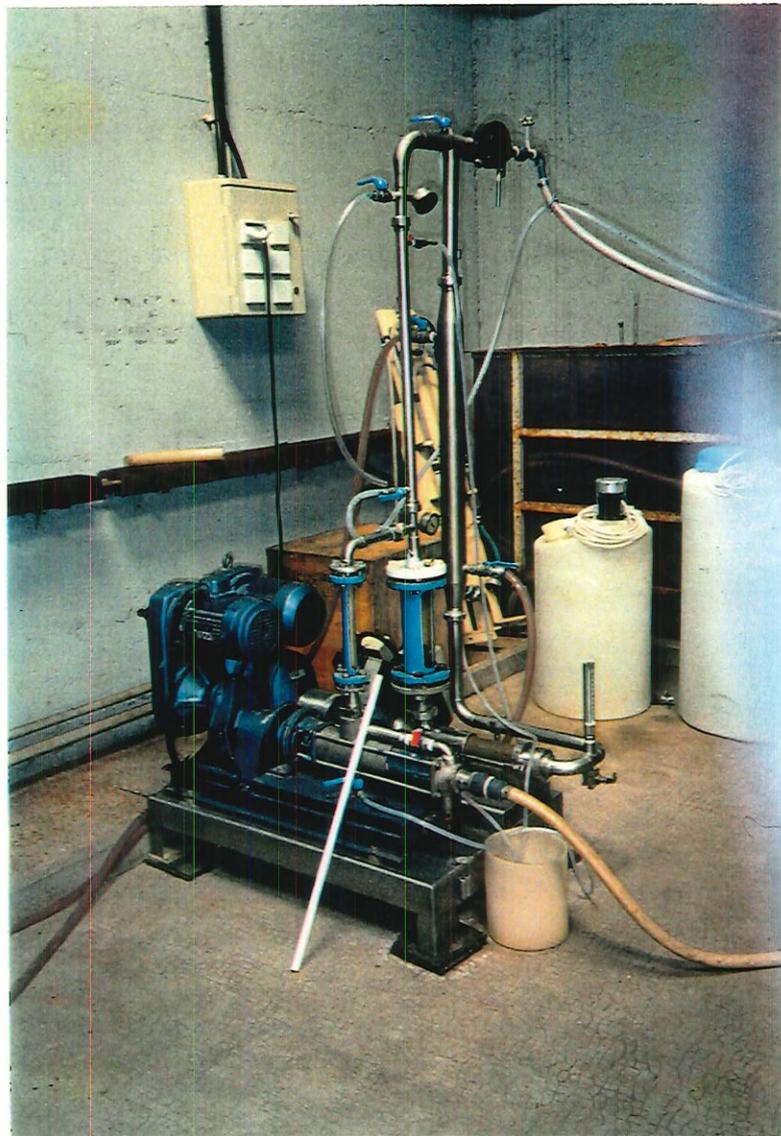


FIGURA 4.3 - Esquema do piloto A de membranas

- (1) - Tanque de alimentação (esgoto tratado por biofiltração)
- (2) - Registro
- (3) - Bomba centrífuga de alimentação
- (4) - Bomba centrífuga de recirculação
- (5) - Módulo de filtração à membrana (microfiltração)
- (6), (9) - Manômetros
- (7) - Registro baixo do permeado
- (8) - Registro alto do permeado
- (10) - Registro de purga do retido
- (11) - Misturador
- (12) - Trocador de calor
- (13) - Medidor de vazão

Durante os ensaios com o piloto A utilizava-se membranas cerâmicas para microfiltração e ultrafiltração tangencial, com diâmetros de poros de $0,20 \mu\text{m}$ e $0,05 \mu\text{m}$ fornecidas pela "Société des Céramiques Techniques" (SCT). O suporte dessas membranas é constituído de alumina α de estrutura macroporosa, sendo ao mesmo tempo altamente permeável e muito sólida. São membranas monotubulares com 75 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro interno. A superfície total do módulo era de $0,03534 \text{ m}^2$.

A Fotografia 4.3 mostra alguns aspectos do piloto A de membranas.



FOTOGRAFIA 4.3 - Piloto A de membranas

4.2.3.1 Condições operacionais do piloto A de membranas

Para o primeiro conjunto de ensaios utilizou-se um piloto em aço inox, cujo esquema está representado na Figura 4.3. Uma bomba centrífuga com baixa vazão



e forte pressão alimentava o piloto de filtração à membranas e uma segunda bomba centrífuga no anel de recirculação, com alta vazão e fraca pressão, permitia regular independentemente a pressão de operação e a velocidade de recirculação. O conhecimento da vazão de recirculação e das pressões nas extremidades do módulo de filtração (P1 e P2) (Figura 4.3) permitia determinar a velocidade tangencial de circulação e a pressão de operação no circuito. A diferença de pressão é dada por:

$$\Delta P = (P_1 - P_2) / 2 \quad (4.1)$$

Em que:

ΔP : diferença de pressão (Pa)

P_1 : pressão na entrada do módulo de filtração (Pa)

P_2 : pressão na saída do módulo de filtração (Pa)

A velocidade tangencial era determinada a partir do conhecimento da vazão de recirculação e da seção transversal da membrana.

Os ensaios de filtração eram realizados em circuito fechado. Para cada ciclo de filtração, utilizavam-se 100 litros de esgoto tratado (efluente do biofiltro) previamente colocados em um tanque de alimentação (Figura 4.3). Um ciclo de filtração tinha uma durabilidade de 3 a 5 horas. Antes de cada ciclo de filtração, mediu-se o fluxo do permeado para água potável (água de torneira) nas mesmas condições de velocidade e de pressão dos ensaios a serem efetuados com o efluente do biofiltro. A Tabela 4.2 mostra as condições operacionais dos ensaios com membranas do piloto A.

O desempenho do processo era acompanhado através da medição do fluxo do permeado ao longo do tempo do ensaio, da coleta de amostras e análises do permeado (pelo menos 3 amostras para cada ciclo de filtração).

TABELA 4.2 - Condições operacionais para os ensaios com membranas do piloto A

Piloto de membranas		Efluente do biofiltro para velocidade média aparente de passagem (m/h)		
		0,25	0,50	1,00
Piloto A $P = 10^5$ Pa $V_t = 4,0$ m/s	Membranas utilizadas	0,20 μ m	0,20 μ m	0,20 μ m
	(\varnothing poros)	0,05 μ m	0,05 μ m	0,05 μ m

4.2.4 Piloto B de membranas

Trata-se de um piloto em escala de laboratório para ensaios de filtração com membranas da marca MEMBRALOX, modelo T1-70 - SCT (Société des Céramiques Techniques). A Figura 4.4 mostra, esquematicamente, o piloto B de membranas.

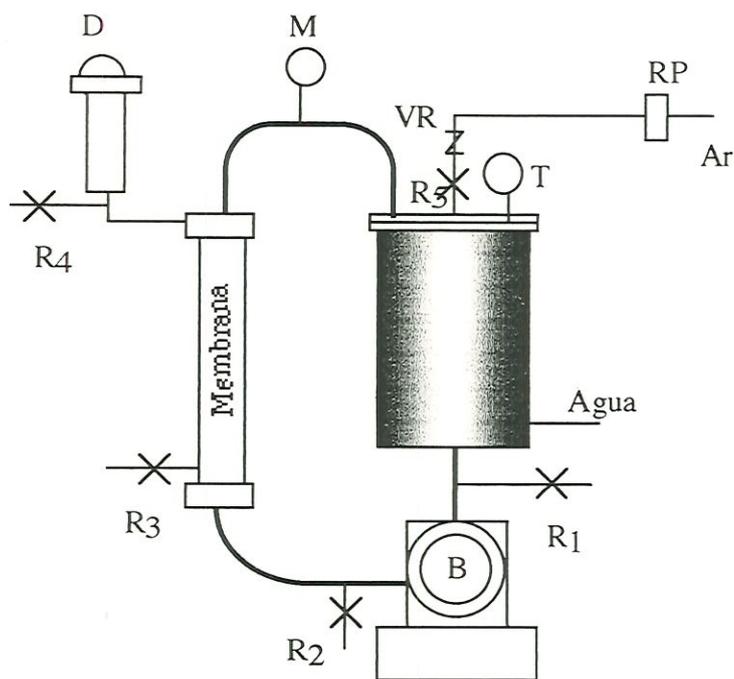


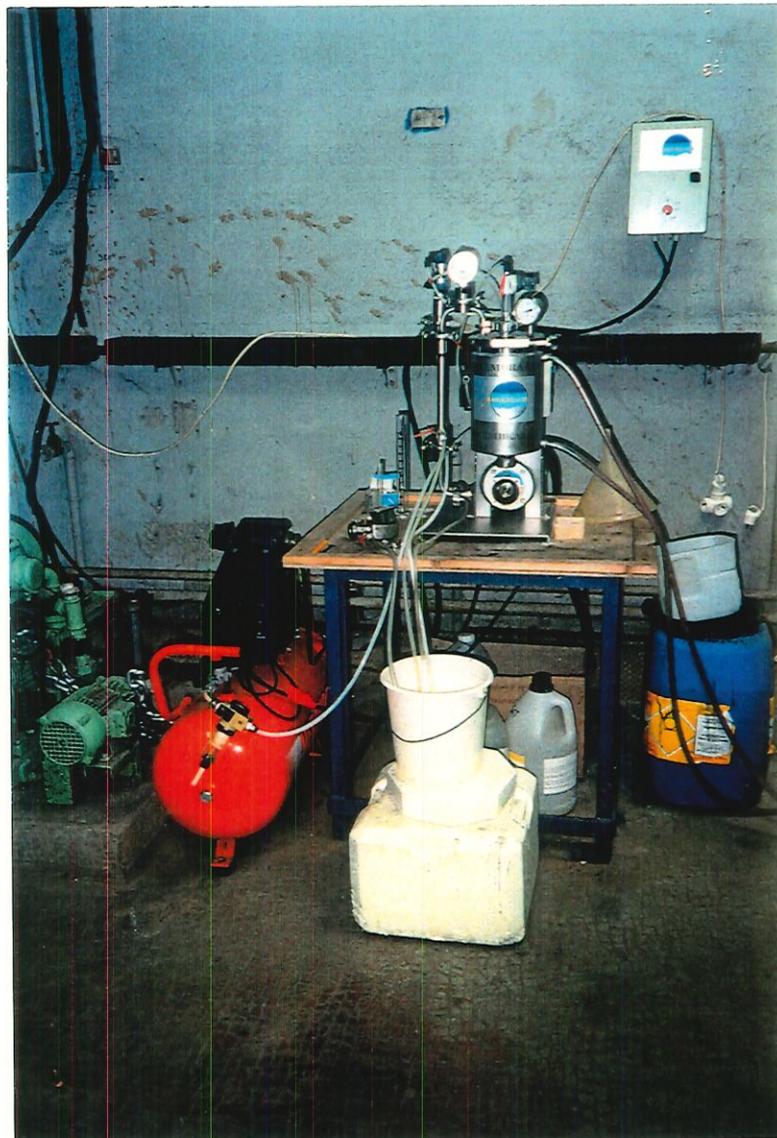
FIGURA 4.4 - Esquema do piloto B de membranas (MEMBRALOX)

- B - bomba de circulação
- RP - regulador de pressão
- T - termômetro
- M - Manômetro
- VR - válvula de retenção
- D - descolmatador
- R₁ a R₅ - registros

Este piloto destina-se à ensaios com membranas cerâmicas de microfiltração e ultrafiltração tangencial, permitindo avaliar a influência da membrana e das condições operacionais, assim como, o desempenho das mesmas em relação ao processo de separação.

O piloto é fixado sobre uma placa de inox (400mmx250mm), sendo constituído por:

- bomba de circulação que fornece uma vazão máxima de $1\text{m}^3/\text{h}$, cuja velocidade de circulação é controlada por um dispositivo que permite variar a frequência;
- reservatório ,em inox, parede dupla, com volume útil de 3 litros, pressurizável (no máximo 4×10^5 Pa);
- módulo de filtração (50 cm^2 de área filtrante);
- descolmatador;
- outros componentes: manômetro, termômetro, registros, entrada de ar com regulador de pressão, entrada de água para controle da temperatura no reservatório, etc. A Fotografia 4.4 , ilustra alguns aspectos da instalação deste piloto.



FOTOGRAFIA 4.4 - Piloto B de membranas (MEMBRALOX)

Para todos os ensaios realizados neste piloto utilizava-se, também, membranas cerâmicas para microfiltração e ultrafiltração tangencial, com diâmetros de poros de $0,2\mu\text{m}$ e $0,05\mu\text{m}$ fornecidas pela Soci  t   des C  ramiques Techniques (SCT). Essas membranas apresentam as mesmas caracter  sticas daquelas utilizadas no piloto A, monotubulares, apresentando 25 cm de comprimento e 1,0 cm de di  metro interno. A superf  cie total do m  dulo    de $0,0050\text{ m}^2$.

4.2.4.1 Condi  es operacionais do piloto B de membranas

Da mesma forma que o piloto A, os ensaios de filtra  o eram realizados em circuito fechado. Para cada ciclo de filtra  o enchia-se o tanque de alimenta  o de 3 litros com o esgoto tratado (efluente do biofiltro). Regulava-se o equipamento para obter-se as condi  es desejadas (velocidade de circula  o, press  o), iniciando-se em seguida o ensaio. Um ciclo de filtra  o podia durar de 2 a 3 horas. Antes de cada ciclo de filtra  o, media-se o fluxo do permeado para   gua pot  vel (  gua de torneira) nas mesmas condi  es de velocidade e de press  o aos dos ensaios a serem efetuados com o efluente do biofiltro. O desempenho do processo era acompanhado atrav  s da medi  o do fluxo do permeado ao longo do tempo do ensaio, da coleta de amostras e an  lises do permeado (pelo menos 3 amostras para cada ciclo de filtra  o).

A Tabela 4.3 mostra, resumidamente, as condi  es operacionais dos ensaios com membranas do piloto B.

TABELA 4.3 - Condi  es operacionais para os ensaios com membranas do pilotos B

Piloto de membranas		Efluente do biofiltro para velocidade média aparente de passagem (m/h)		
		0,25	0,50	1,00
Piloto B P = 10^5 Pa Vt = 2,0 m/s	Membranas utilizadas	$0,20\mu\text{m}$	$0,20\mu\text{m}$	$0,20\mu\text{m}$
	(�� poros)	$0,05\mu\text{m}$	$0,05\mu\text{m}$	$0,05\mu\text{m}$

Para reduzir os problemas de colmata  o na membrana (piloto B), regulava-se o descolmatador (autom  tico) para realizar uma limpeza a cada 2,5 minutos. O tempo de dura  o de cada impulso (contra-press  o) era de 1,0 segundo.

Para tentar minimizar os problemas de colmatção das membranas frente ao tipo de efluente utilizado (efluente do biofiltro), foram realizados vários ensaios no piloto B de membranas verificando-se: a modificação no valor das resistências da membrana em função da variação do tempo de recirculação no sistema e, também, em função do uso de coadjuvantes (Cloreto férrico, sulfato de alumínio, carvão ativado em pó). A determinação das dosagens dos coadjuvantes foram realizadas através de ensaios com o aparelho “Jar-test”.

4.2.5 Célula de filtração SARTORIUS

A célula de filtração SARTORIUS (Figura 4.5) é composta de um elemento cilíndrico com parede dupla. Na parte superior existe um dispositivo para entrada de ar sob pressão. A membrana porosa é disposta na parte inferior da célula.

Esse módulo de filtração permite:

- a) uma simulação de uma filtração tangencial, impondo-se um gradiente de velocidade nas proximidades da membrana pela ação de um agitador magnético;
- b) trabalhar nas condições de pressão desejadas graças a um compressor de ar.

As características dessa célula são:

- superfície de filtração : 11,34 cm²
- volume da célula : 200 cm³
- diâmetro das membranas: 4,7 cm
- diâmetro dos poros : 0,05 μm

As membranas utilizadas, modelo SARTORIUS, SM113 28, apresentam diâmetro médio de poros de 0,05 μm. Essas membranas eram em nitrato de celulose, portanto, orgânicas, assimétricas e macroporosas.

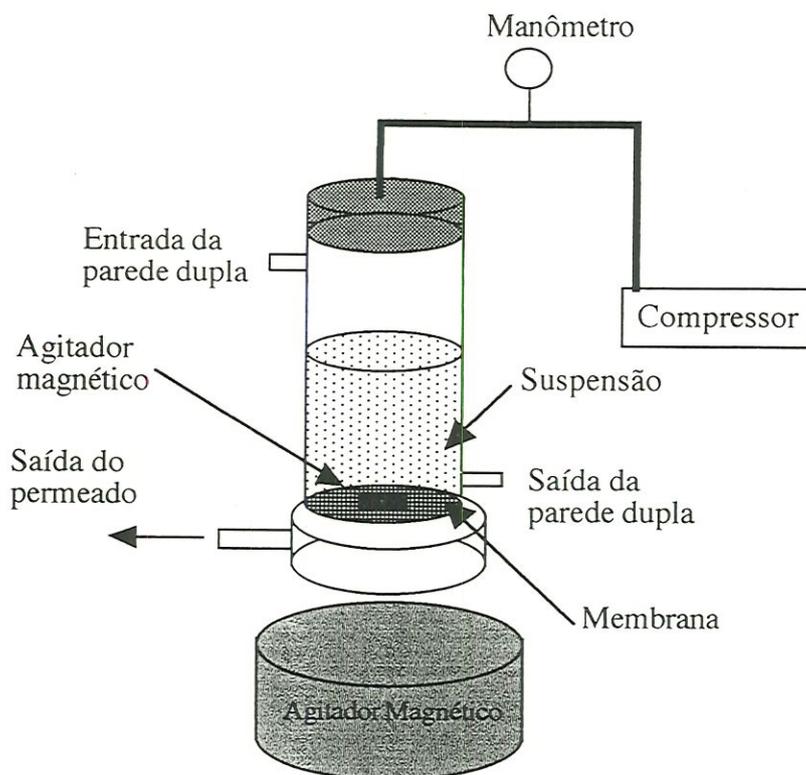


FIGURA 4.5 - Célula de filtração SARTORIUS

4.2.5.1 Tratamento das membranas com polímero

O polímero utilizado nos ensaios foi de mesma natureza que os polímeros empregados para limitar a adsorção de proteínas sanguíneas. A adsorção de proteínas de sangue sobre bolas de vidro diminui quando estas são recobertas de uma fina camada de polímero em óxido de polietileno. O polímero parece fornecer uma interface hidrófila que melhora a compatibilidade entre as superfícies em silício e as proteínas de sangue (mesmo as plaquetas).

A utilização de tais polímeros poderia modificar a colmatção das membranas, melhorando a eficácia da filtração.

As membranas foram tratadas por agitação durante 15 minutos com volume de polímero igual a 12 ml. Esse tratamento é denominado estático. Para uma série de experimentos foi utilizado um tratamento dinâmico por filtração de 50 ml de polímero.

A concentração da solução do polímero era de 6 g/L, sendo que por razões práticas, foi utilizada uma concentração de 0,12 g/L, ou seja, uma diluição de 50 vezes a partir da concentração inicial.

A superfície da membrana sendo de 11,34 cm² e, desejando-se uma adsorção em polímero de 1 µg/cm² na membrana, era necessário introduzir na célula de filtração um volume de polímero de 0,1 mL. Sendo esse volume muito pequeno para recobrir o agitador da célula de filtração houve necessidade de se aumentar o volume da solução do polímero, trabalhando-se, dessa forma, com um volume em excesso. O volume de 12 mL, permitia uma altura de 1 cm na célula, suficiente para cobrir o agitador e permitir uma distribuição homogênea do polímero sobre a membrana. O teor em polímero nessas condições foi de 127 µg/cm² (127 vezes em excesso).

4.2.5.2 Modo de operação para realização dos ensaios com a célula SARTORIUS

Para os ensaios de filtração com a célula SARTORIUS seguia-se os passos descritos abaixo:

- colocava-se a membrana ligeiramente úmida na célula, fechando a parte inferior da mesma, não esquecendo a junta de vedação;
- colocava-se o volume definido de suspensão à ser utilizado no ensaio;
- ligava-se o agitador magnético. A velocidade escolhida de 1000 rpm simulava uma velocidade linear (tangencial) aproximada de 2,5 m/s;
- regulava-se a pressão para 10⁵ Pascal;
- media-se o volume do filtrado em uma proveta, anotando-se o tempo de filtração.

Com o tratamento da membrana a base de polímeros, procurava-se verificar as modificações relacionadas aos problemas de colmatação e, também possíveis melhorias no seu desempenho.

4.2.5.3 Modelo de HERMIA aplicado a filtração

O modelo de HERMIA (SCOTT & HUGHES, 1996) aborda qualitativamente o crescimento da resistência ao escoamento. Esse modelo descreve o

mecanismo de retenção das partículas de uma suspensão totalmente retidas sobre a membrana, sem que ocorra interações físico-químicas com a mesma. A resistência total ao escoamento corresponde, portanto, a resistência inicial da membrana e a resistência ocasionada pela deposição sobre a membrana. Quando a filtração é realizada à pressão constante, tem-se que:

$$t / v = a \cdot v + b \quad (4.2)$$

em que:

t: tempo de filtração (s)

v: volume do filtrado (mL)

Os coeficientes a e b podem ser calculados:

$$a = (\mu \cdot \alpha \cdot W) / (2 \cdot \Omega^2 \cdot \Delta P) \quad (4.3)$$

$$b = (\mu \cdot R_M) / (\Omega \cdot \Delta P) \quad (4.5)$$

Com:

$$\alpha = R_C \cdot \Omega / M \quad (4.6)$$

W: massa seca do depósito na membrana por unidade de volume (kg/m³)

α : resistência específica do depósito (Kg/m)

M: massa seca do depósito = W.v (Kg)

Ω : área de filtração (m²)

Dessa forma, pode-se determinar o valor da resistência da membrana (R_M):

$$R_M = (\Omega \cdot \Delta P \cdot b) / \mu \quad (4.7)$$

e valor da resistência causado pelo depósito sobre a membrana (R_C):

$$R_C = (2\Omega \cdot \Delta P \cdot v \cdot a) / \mu \quad (4.8)$$

4.3 Método para limpeza química das membranas

A SCT recomenda ciclo clássico para limpeza das membranas cerâmicas (método estático), como segue:

- limpeza alcalina, mergulhando-se a membrana em uma solução (1,5% NaOH 30% +1,5% NaOCl 48%) à 70°C e deixando-a em imersão por um período de pelo menos 12 horas;
- limpeza com água limpa corrente por alguns minutos;
- limpeza ácida, mergulhando-se a membrana em uma solução 2% HNO₃ (70°C) e deixando-a em imersão por um período de pelo menos 12 horas;
- limpeza final com água limpa corrente por alguns minutos;

Se após a limpeza, a membrana apresentasse índice de recuperação inferior a 90%, repetiam-se os procedimentos relacionados.

4.4 Métodos de análises e equipamentos utilizados para determinação das características dos esgotos

A Figura 4.6 mostra de forma esquemática as análises realizadas nas diferentes etapas deste estudo.

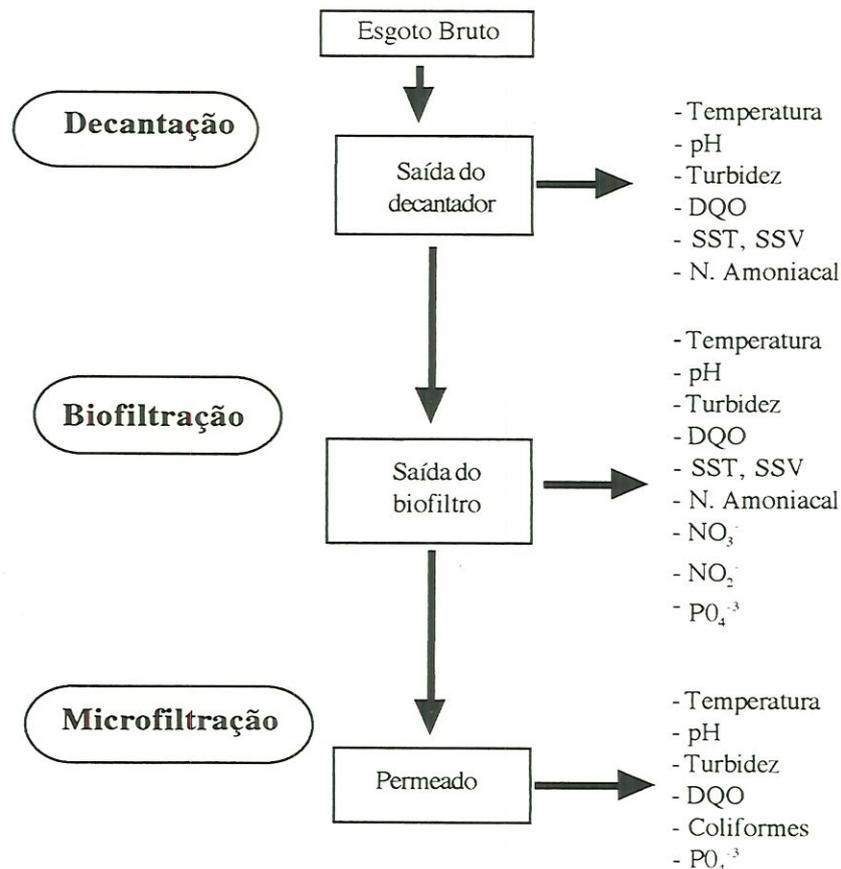


FIGURA 4.6 - Análises realizadas nas diferentes etapas de trabalho

As Fotografias 4.5 e 4.6 mostram aspectos gerais do laboratório de análises do LMPM (centro de pilotos).



FOTOGRAFIA 4.5 - Laboratório de análises



FOTOGRAFIA 4.6 - Laboratório de análises - vista geral

4.4.1 Determinação do pH

Para medir o pH utilizou-se o equipamento CG 832 SHOTT GERATE.

4.4.2 Turbidez

O equipamento utilizado para determinação da turbidez foi o espectrofotômetro DR/2000 HACH. Os resultados são expressos em FTU (Formazine Turbidity Units).

A determinação da turbidez é feita através da medida da dispersão e absorção da luz pelas partículas em suspensão presentes na amostra. A turbidez medida depende de variáveis tais como, o tamanho, a forma e as propriedades de refração das partículas. Não existe uma relação direta entre a turbidez e a concentração de matéria em suspensão. A calibração deste método é feita através de padrões de formazina.

4.4.3 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A medida da demanda química de oxigênio foi realizada segundo o método HACH, o qual utiliza amostras de pequeno volume (2ml) que são introduzidas em tubos contendo reativo (dicromato de potássio) e, em seguida, levadas à incubação durante 2 horas à uma temperatura de 150° C. O dicromato de potássio é um oxidante muito potente. Os compostos orgânicos oxidáveis reduzem o íon dicromato Cr^{6+} em íon cromo verde Cr^{3+} . O espectrofotômetro permite medir a quantidade de dicromato restante, ou seja, a quantidade de cromo trivalente produzido, dessa forma determinando a demanda de oxigênio.

Os tubos de reativos contém, também, sais de prata e de mercúrio. A prata possui um papel catalisador enquanto que o sal de mercúrio serve para evitar a interferência do íon cloro. A leitura é realizada por espectrofotômetro (DR/2000) à um comprimento de ondas $\lambda = 620 \text{ nm}$ para os tubos à gama de 0 a 1500 mg/L de DQO e comprimento de onda de 420 nm para aqueles entre 0 e 150 mg/L de DQO.

4.4.4 Matéria em Suspensão

A medida da matéria em suspensão era realizada segundo as recomendações da norma francesa AFNOR NFT 90-105. O método consiste na

filtragem livre ou à pressão de um certo volume de amostra em papel filtro (fibra de vidro) previamente pesado (filtros GF/C Whatman com diâmetro de poros de aproximadamente $1,2 \mu\text{m}$). Após a filtragem o papel filtro é levado para estufa (105°C) durante 2 horas, em seguida é resfriado no dessecador e pesado. Dessa forma, pode-se calcular a quantidade de matéria em suspensão pela diferença de pesos. Para determinar a quantidade de matéria em suspensão volátil coloca-se o papel filtro precedente em mufla, onde sofre a calcinação (550°C) por um período de 2 horas, sendo em seguida resfriado no dessecador e pesado.

4.4.5 Nitrogênio Amoniacal

O método utilizado era a acidometria após destilação em meio básico (Norma Francesa NF T90-015). Esse método é aplicado as águas cujo teor em N-amoniacal é superior a 4 mg/L .

Princípio da medida:



4.4.6 Nitrato

Para a determinação do nitrato foi utilizado o espectrofotômetro DR/2000. O resultado é expresso em mg/L N-NO_3^- . No método nitrato forte (0 a $30,0 \text{ mg/L}$) utilizava-se reativos em pó. O cádmio metálico reduz o nitrato, presente na amostra, à nitrito. O nitrito reage em meio ácido com o ácido sulfônico para formar um sal de diazonio. Esse sal reage com o ácido gentísico para formar um complexo de cor âmbar.

4.4.7 Nitrito

O nitrito era medido com a ajuda do espectrofotômetro DR/2000 - HACH. Os resultados são expressos em mg/L de NO_2^- . O método nitrito forte (0 a 150 mg/L NO_2^-) utiliza o sulfato ferroso em meio ácido para reduzir o nitrito a óxido nitroso. O íon ferroso se combina com o óxido nitroso para formar um complexo marron esverdeado sendo essa coloração proporcional à quantidade de nitrito presente.

4.4.8 Fosfato

Para a determinação do fosfato foi utilizado o espectrofotômetro DR/2000. O resultado é expresso em mg/L PO_4^{3-} . O método amino-ácido (0 a 30,0 mg/L) utilizava-se reativos em solução. Em solução fortemente ácida, o molibdato de amônia reage com o ácido molibdofosfórico. Esse complexo é, em seguida, reduzido pelo reativo amino-ácido para formar o azul de molibdênio.

4.4.8 Exames Bacteriológicos

Para determinar a concentração de coliformes totais e coliformes fecais utilizou-se o método Colilert. Esse método permite a detecção de coliformes totais e *E. Coli* a partir de uma concentração de um microrganismo viável (1UFC/100 mL).

4.4.9 Caracterização Granulométrica

WISNIEWSKI (1996) descreve dois métodos para a determinação da granulometria:

- pela determinação da repartição em tamanho das partículas em suspensão;
- pela quantificação da matéria orgânica dentro das diferentes classes granulométricas da suspensão.

No primeiro método, a repartição das partículas da suspensão, segundo seu tamanho, é efetuada com a utilização de um aparelho para determinação de granulometria, a laser (MICROSIZER-MALVERN). A medida é baseada na difração de um raio laser através das partículas em suspensão, sendo essa medida feita em volume. A lente focal utilizada (300 mm) permite medir partículas com diâmetro entre 1,2 e 600 μm .

Para quantificar a repartição da matéria orgânica, são determinadas a DQO e o COT da suspensão bruta, do sobrenadante da suspensão bruta após uma decantação de 2 horas e também de diferentes filtrados desta suspensão após filtragem em membranas de nitrato de celulose com poros de diferentes calibres (1,2 μm ; 0,2 μm ; 0,05 μm).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Apresentação

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tratamento de esgotos domésticos utilizando-se biofiltro, bem como os resultados dos ensaios realizados em membranas (microfiltração tangencial).

Em primeiro lugar, são apresentados os resultados que avaliam o desempenho do biofiltro (descrito no Capítulo 4, Item 4.2.2) através da remoção: da matéria orgânica (DQO), da turbidez, da concentração de matéria em suspensão e do nitrogênio amoniacal. Em seguida, uma avaliação e discussão desses resultados são apresentadas.

Após, são mostrados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados com o piloto A de microfiltração tangencial (descrito no Capítulo 4, Item 4.2.3). O desempenho desse piloto é avaliado, através da evolução: do fluxo do permeado, tanto para água de torneira quanto para os vários efluentes do biofiltro; da qualidade do permeado através de parâmetros como turbidez, DQO e sólidos em suspensão. Ainda, é efetuada uma avaliação quanto a colmatação das membranas através do cálculo das suas resistências.

Os resultados obtidos com o piloto B de microfiltração tangencial (descrito no Capítulo 4, Item 4.2.4) são apresentados e discutidos dentro dos mesmos padrões especificados para o piloto A. São, também, apresentados e discutidos para esse piloto, os resultados obtidos com os ensaios executados com os efluentes do biofiltro adicionando-se coadjuvantes (cloreto férrico, sulfato de alumínio, carvão ativado), submetidos a diferentes períodos de recirculação.

Finalmente, são mostrados e discutidos os ensaios de filtrabilidade de suspensões realizados com a célula de filtração SARTORIUS (descrita no Capítulo 4, Item

4.2.5) em que procurou-se verificar a influência do tratamento de membranas com polímero para reduzir os problemas de colmatação.

5.2 Biofiltro

Os resultados apresentados a seguir são decorrentes do acompanhamento da operação do biofiltro por período de 600 dias, conforme descrito no Capítulo 4, Item 4.2.2.

5.2.1 Influência da velocidade de passagem no biofiltro

A Tabela 5.1 apresenta os resultados médios para os parâmetros : turbidez, SST, SSV, nitrogênio amoniacal, DQOt e DQOs, obtidos para as velocidades de passagem no biofiltro de 0,25m/h; 0,50m/h e 1,00m/h.

TABELA 5.1 - Resultados médios dos parâmetros controlados no biofiltro

Parâmetros	Velocidade média aparente de passagem no biofiltro								
	0,25 m/h			0,50 m/h			1,00 m/h		
	D	B	E (%)	D	B	E (%)	D	B	E (%)
Turb (FTU)	139,35	27,15	80,64	144,66	51,21	66,17	149,59	49,35	66,77
SST (mg/L)	102,45	13,40	85,25	112,28	41,93	63,18	123,88	57,18	53,08
SSV (mg/L)	90,90	9,30	87,96	92,10	30,62	67,40	96,82	42,59	55,65
DQOt(mg/L)	325,10	64,05	80,35	349,00	106,86	70,83	337,59	92,65	72,32
DQOs(mg/L)	132,70	40,05	68,68	171,10	64,10	64,07	159,88	53,88	64,94
NA (mg/L)	34,83	15,52	57,87	38,32	28,83	28,34	31,47	24,12	26,19
NO ₃ ⁻ (mg/L)	-	9,34	-	-	4,51	-	-	5,61	-
NO ₂ ⁻ (mg/L)	-	0,84	-	-	0,90	-	-	1,39	-

D: afluente (esgoto decantado); B: efluente do biofiltro; E: eficiência

Através da Tabela 5.1, verifica-se que ocorreu uma sensível melhora no desempenho do biofiltro em relação a DQO, turbidez e nitrogênio amoniacal quando este foi operado com velocidade média de passagem mais baixa (0,25 /h).

A eficiência (E) na remoção da matéria orgânica total em termos de DQO foi de 72% para velocidade de 1,00 m/h, atingindo 80% na velocidade de 0,25 m/h. Não ocorreu uma grande melhoria na remoção da matéria orgânica solúvel (DQOs), variando a eficiência de 68% para 65%, para as velocidades de 0,25 m/h e 1,00 m/h, respectivamente. A DQO solúvel na saída do biofiltro (B) pode ter duas origens: compostos orgânicos solúveis presentes no afluente (D), mas não biodegradáveis e compostos solúveis rejeitados pela biomassa presente no biofiltro (metabólitos, células inativas, etc).

A remoção dos sólidos suspensos, com uma eficiência de 53% para a velocidade de 1,00 m/h atingiu, praticamente, 85% na velocidade de 0,25 m/h. De modo semelhante, a remoção do nitrogênio amoniacal foi mais elevada para a velocidade de passagem no biofiltro de 0,25 m/h, em torno de 58%, enquanto, para a velocidade de 1,00 m/h o valor médio alcançado foi de 26%.

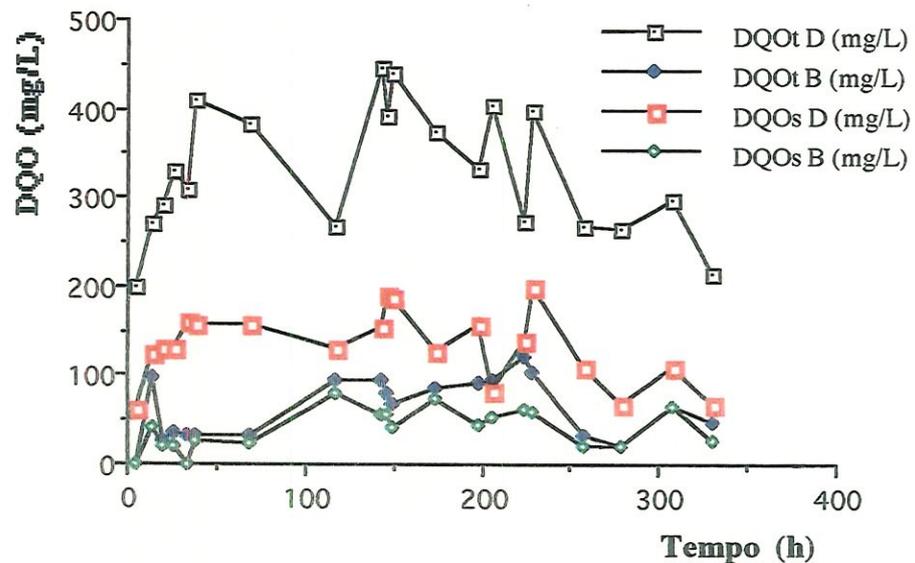
5.2.1.1 Remoção da concentração de matéria orgânica

Para se avaliar o desempenho do biofiltro foram analisados, preliminarmente, a remoção da concentração da matéria orgânica (em termos da DQO).

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram os valores de DQOt e DQOs na entrada (esgoto decantado) e na saída do biofiltro para as três velocidades médias de operação: 0,25m/h; 0,50m/h e 1,00m/h, respectivamente.

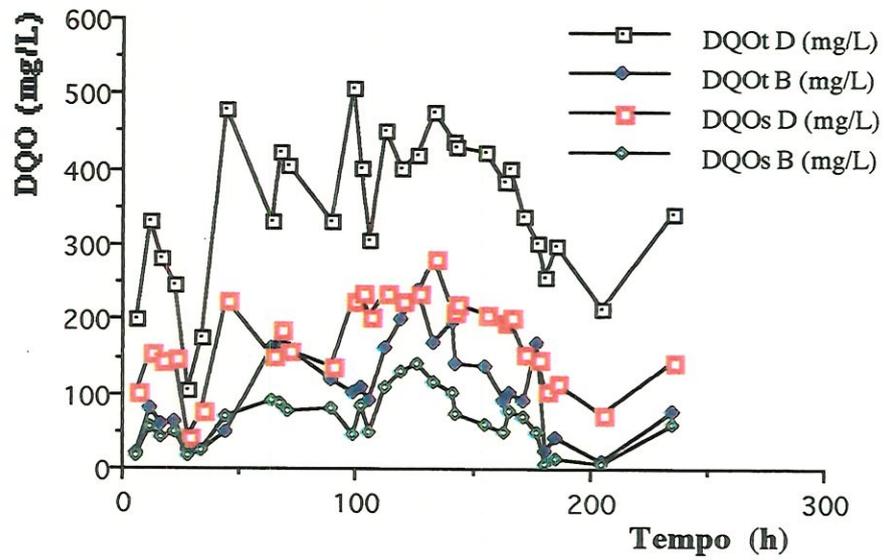
Verificou-se, neste trabalho, que para todas as velocidades utilizadas, o valor da DQOt no efluente foi, na sua maioria, inferior aqueles especificados pelas normas européias (125mg/L) para lançamentos de esgotos sanitários. Dessa forma, respeitando, também, a Resolução n° 20, de 18 de junho de 1986, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

De maneira geral, observa-se que existe uma tendência de diminuição dos valores da DQOt e da DQOs na saída do biofiltro, a medida que a velocidade de passagem diminui, ou seja que o tempo de retenção hidráulica aumenta. Na Tabela 2 (Anexo A) e na Figura 5.1, em que são apresentados os resultados experimentais obtidos no biofiltro para a velocidade de 0,25m/h, pode-se verificar que a DQOt do efluente raramente excede a 100mg/L e, sendo o seu valor médio de 64 mg/L.



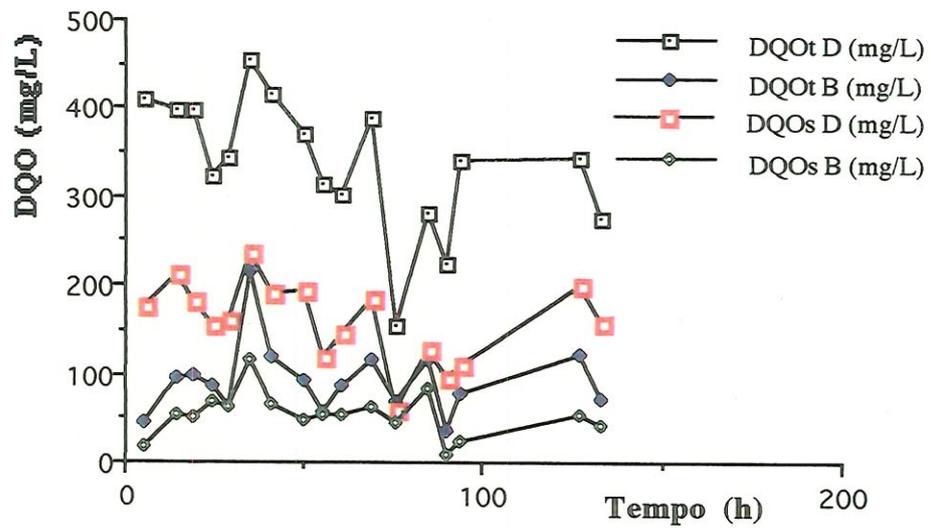
D: esgoto decantado; B: efluente do biofiltro

FIGURA 5.1 - Evolução da DQO para o ciclo de biofiltração quando com velocidade de 0,25 m/h



D: esgoto decantado; B: efluente do biofiltro

FIGURA 5.2 - Evolução da DQO para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,50m/h



D: esgoto decantado; B: efluente do biofiltro

FIGURA 5.3 - Evolução da DQO para o ciclo de biofiltração com velocidade de 1,00 m/h

5.2.1.2 Remoção da turbidez

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 mostram a evolução da turbidez na entrada e na saída do biofiltro, para as diferentes velocidades de passagem. Analisando-se essas figuras e as Tabelas 2, 6 e 10 (Anexo A), pode-se observar que independente da qualidade do afluente, a eficiência na remoção da turbidez é maior para a velocidade de passagem no biofiltro de 0,25m/h.

Para a velocidade do biofiltro de 0,25m/h atingiu-se, em média, 80% de remoção da turbidez, enquanto que para as velocidades de 0,50 e 1,00m/h obteve-se, em média uma remoção de 66%.

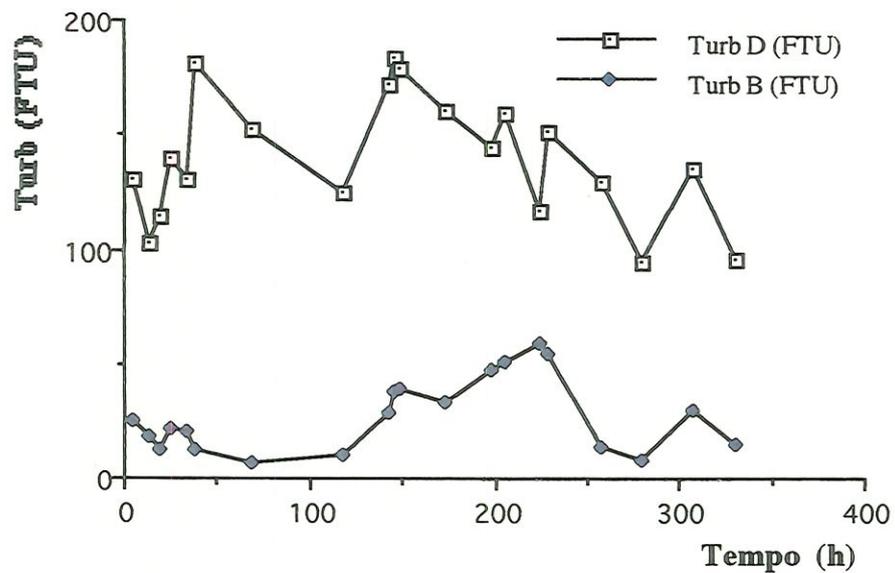
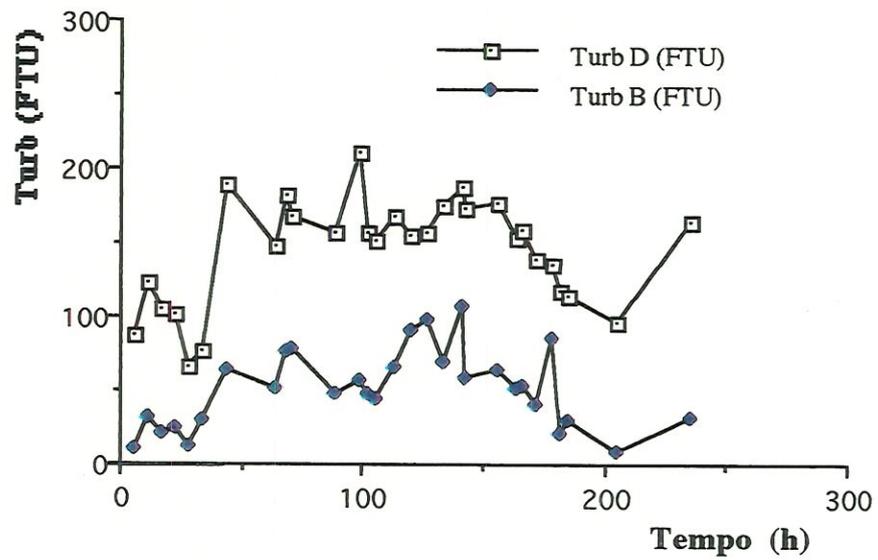
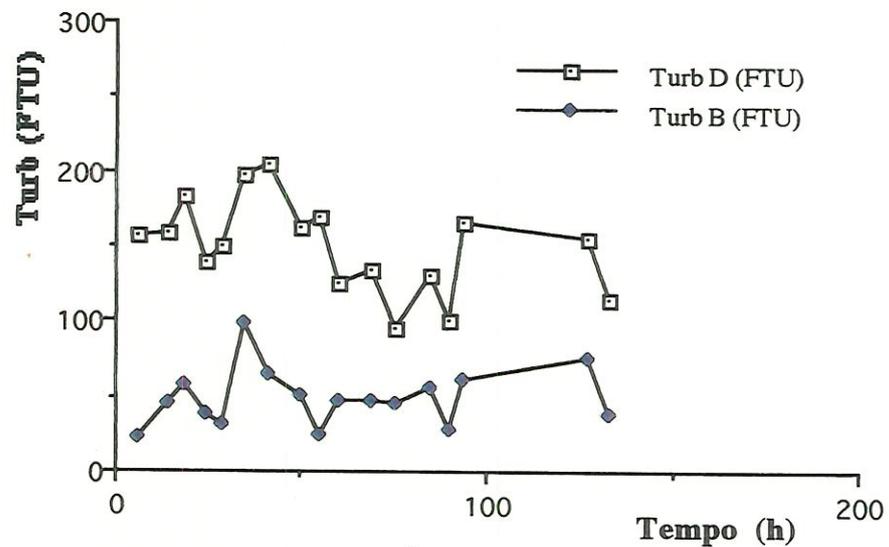


FIGURA 5.4 - Evolução da turbidez para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,25m/h



D: esgoto decantado; B: efluente do biofiltro

FIGURA 5.5 - Evolução da turbidez para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,50m/h



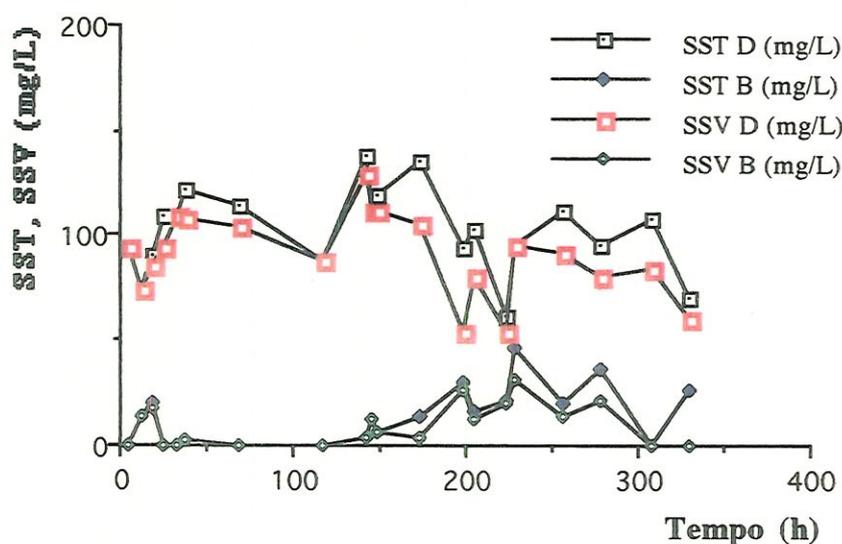
D: esgoto decantado; B: efluente do biofiltro

FIGURA 5.6 - Evolução da turbidez para o ciclo de biofiltração com velocidade 1,00m/h

5.2.1.3 Remoção da matéria em suspensão

Nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 pode-se observar a evolução da matéria em suspensão total (SST) e da matéria em suspensão volátil (SSV) no afluente e no efluente do biofiltro. A evolução da matéria em suspensão volátil apresenta configuração semelhante a da matéria em suspensão total.

Os resultados apresentados nas Tabelas 1, 5 e 9 (Anexo A) mostram que somente para a velocidade de 0,25m/h atinge-se, em média, um teor de SST inferior aos valores ditados pela norma europeia, ou seja 25mg/L. Os valores dos sólidos suspensos totais obtidos para as velocidades de 0,50m/h e 1,00m/h encontram-se próximos a 50mg/L.



D: esgoto decantado; B: efluente do biofiltro

FIGURA 5.7 - Evolução da matéria em suspensão para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,25m/h

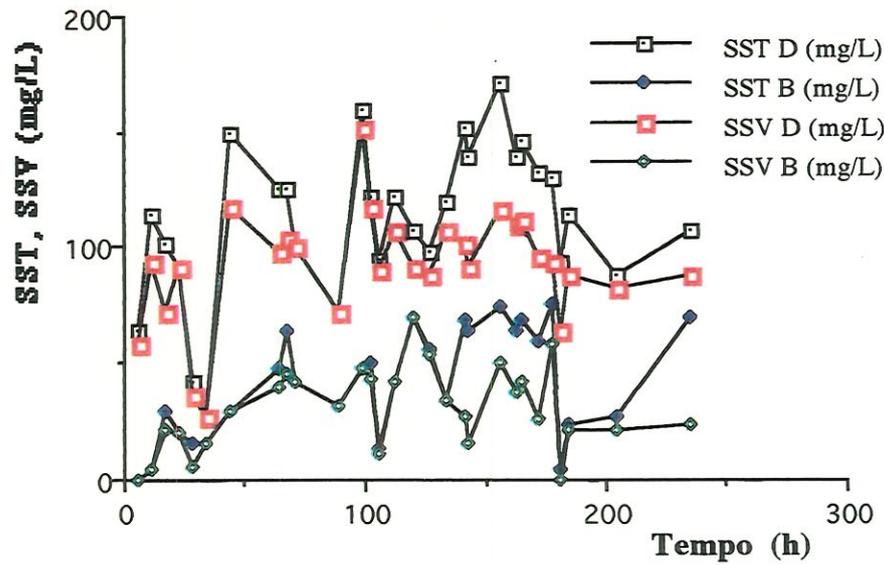


FIGURA 5.8 - Evolução da matéria em suspensão para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,50m/h

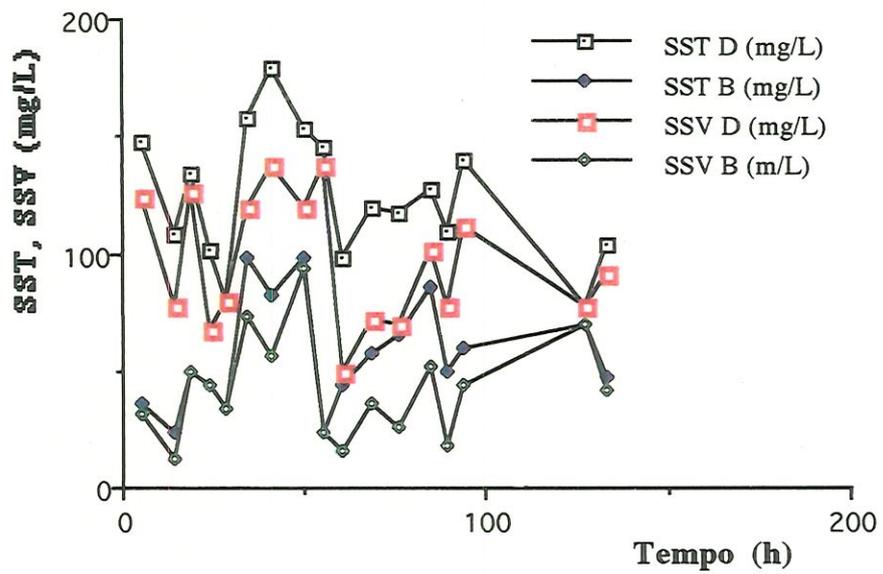
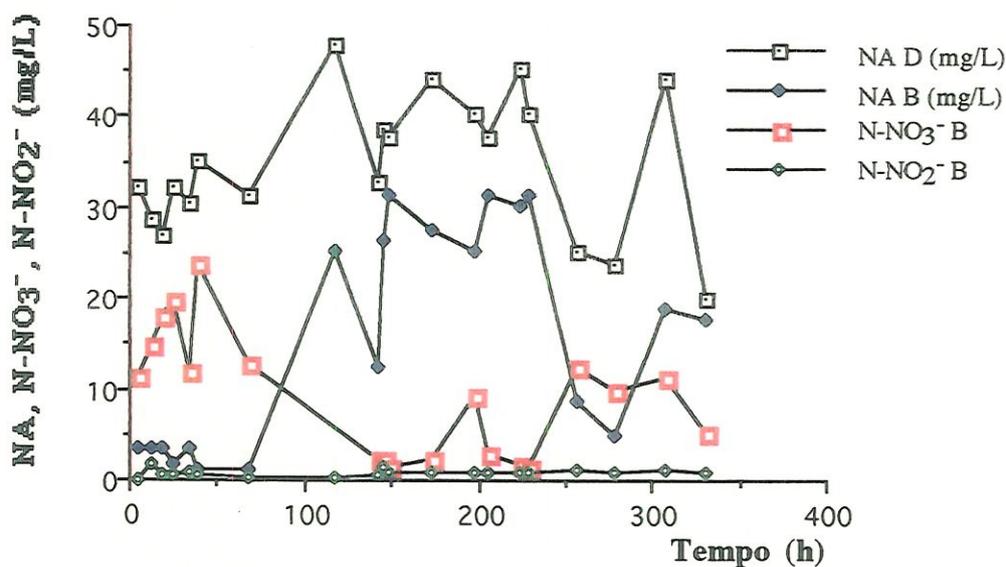


FIGURA 5.9 - Evolução da matéria em suspensão para o ciclo de biofiltração com velocidade de 1,00m/h

5.2.1.4 Remoção do nitrogênio amoniacal

A remoção do nitrogênio amoniacal está relacionada com o crescimento das culturas heterotróficas reduzindo a parte orgânica e, também, com as atividades de culturas autotróficas transformando o nitrogênio amoniacal em nitrato.

Durante os ensaios realizados, a concentração do nitrogênio amoniacal no afluente (esgoto decantado) permaneceu, em média, próxima a 35mg/L, conforme pode-se observar nas Tabelas 3, 7 e 11 (Anexo A). A redução média mínima ocorrida foi de 26%, ultrapassando a 50% para velocidade de passagem no biofiltro de 0,25m/h. Nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 pode-se observar a evolução do nitrogênio amoniacal no afluente e no efluente do biofiltro. Verifica-se, ainda, a evolução do nitrato e do nitrito no efluente do biofiltro (nas suas diferentes condições de operação).

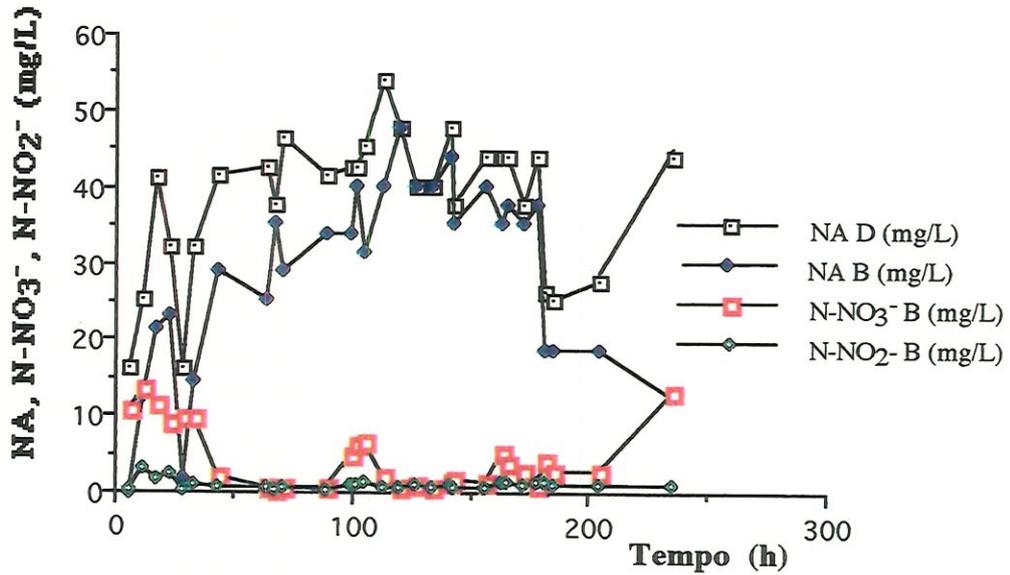


D: esgoto decantado; B: efluente do biofiltro

FIGURA 5.10 - Evolução do nitrogênio amoniacal (NA), nitrato e nitrito para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,25 m/h

Para a velocidade de 0,25 m/h, nas primeiras 100 horas de funcionamento do biofiltro ocorreu uma elevada redução de nitrogênio amoniacal, a partir de então essa

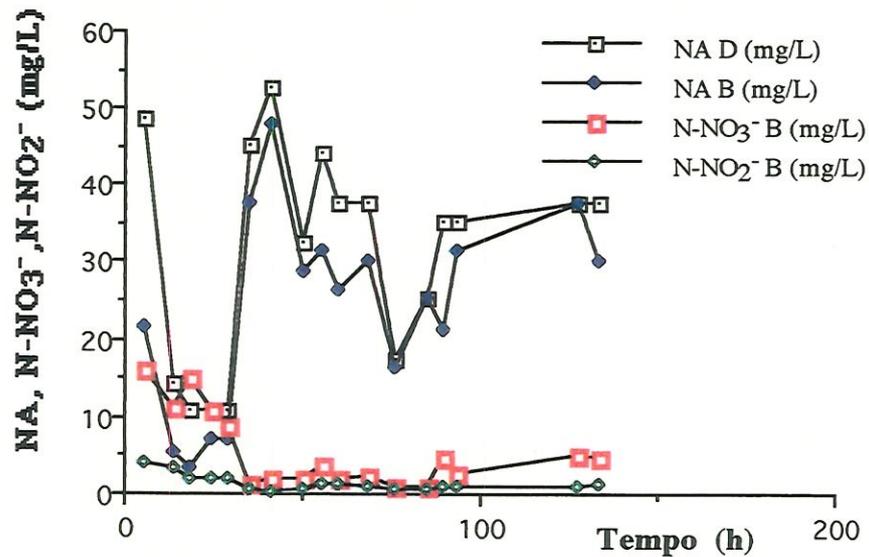
redução diminuiu bastante, provavelmente, por uma limitação de oxigênio dissolvido no sistema.



D: esgoto decantado; B: efluente do biofiltro

FIGURA 5.11 - Evolução do nitrogênio amoniacal (NA), nitrato e nitrito para o ciclo de biofiltração com velocidade de 0,50 m/h

Observa-se que mesmo com o aumento do tempo de retenção hidráulica, a redução de nitrogênio amoniacal não foi tão significativa. Os baixos valores de nitrificação atingidos, provavelmente, devem-se a deficiência em concentração de oxigênio dissolvido, cuja influência não foi objeto de estudo deste trabalho.



D: esgoto decantado; B: efluente do biofiltro

FIGURA 5.12 - Evolução do nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrito para o ciclo de biofiltração com a velocidade de 1,00 m/h

5.2.1.5 Evolução das cargas eliminadas para os diferentes parâmetros

As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 mostram a evolução das cargas eliminadas, medidas para os diferentes parâmetros e, em função, das diferentes cargas hidráulicas aplicadas.

A Figura 5.13 mostra a relação entre as cargas aplicadas e as cargas eliminadas de DQOt em kg/m³.dia. Pela regressão efetuada, verifica-se que a relação linear entre CA e CE (diretamente proporcional), principalmente para velocidades menores (cargas aplicadas inferiores a 5 kg DQOt/m³.dia).

As cargas aplicadas de DQOt variaram em função da velocidade de passagem no biofiltro, como segue: entre 0,6 e 1,6 kg DQOt/m³.dia para velocidade de passagem no biofiltro de 0,25 m/h; entre 1,0 e 3,5 kg DQOt/m³.dia para velocidade de passagem no biofiltro de 0,50 m/h e entre 2,5 e 6,5 kg DQOt/m³.dia para velocidade de passagem no biofiltro de 1,0 m/h.

Na grande maioria dos resultados, o teor da DQOt no efluente apresenta-se inferior a 125 mg/L para cargas aplicadas inferiores a 5kg DQOt/m³.dia.

Observou-se, também, que com o aumento das cargas aplicadas de DQOt houve diminuição no tempo de funcionamento dos ciclos do biofiltro (Tabela 5.2).

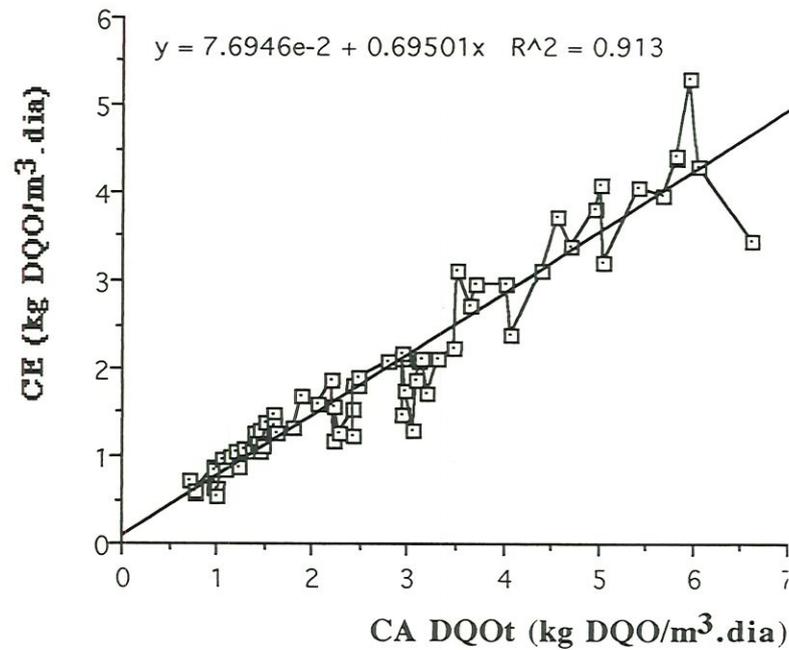


FIGURA 5.13 - Carga eliminada (CE) de DQOt em função da carga aplicada (CA) de DQOt

Na Figura 5.14 tem-se a evolução da carga eliminada de sólidos em suspensão em função da carga aplicada (em kg SST/m³.dia). Observa-se, como no caso anterior, que o comportamento dessa relação segue, também, uma tendência linear para cargas aplicadas inferiores a 2,5 kg SST/m³.dia.

O teor de sólidos suspensos totais no efluente do biofiltro, em geral, não excede a 25 mg/L para cargas aplicadas inferiores a 1,0 kg SST/m³.dia, o que corresponde a uma velocidade de passagem no biofiltro de 0,25 m/h e, em alguns casos para a velocidade de 0,50 m/h.

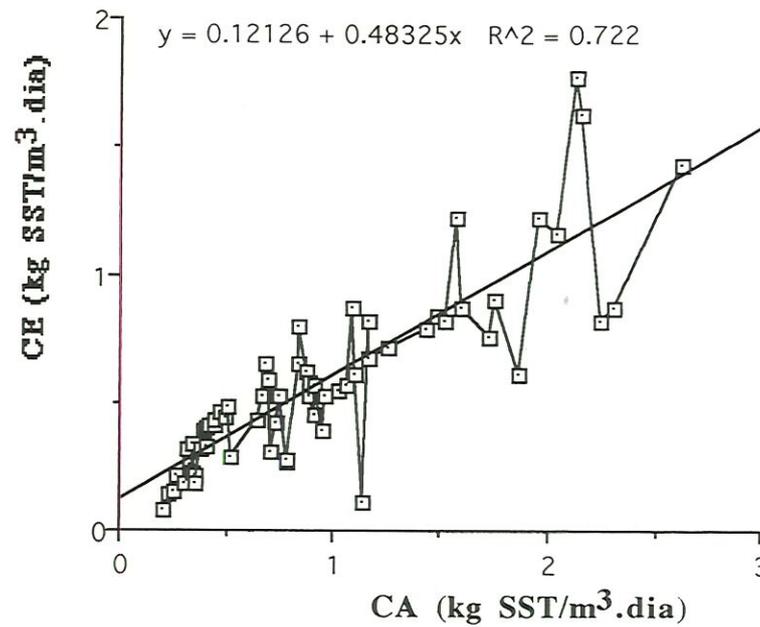


FIGURA 5.14 - Carga eliminada (CE) de SST em função da carga aplicada (CA) de SST

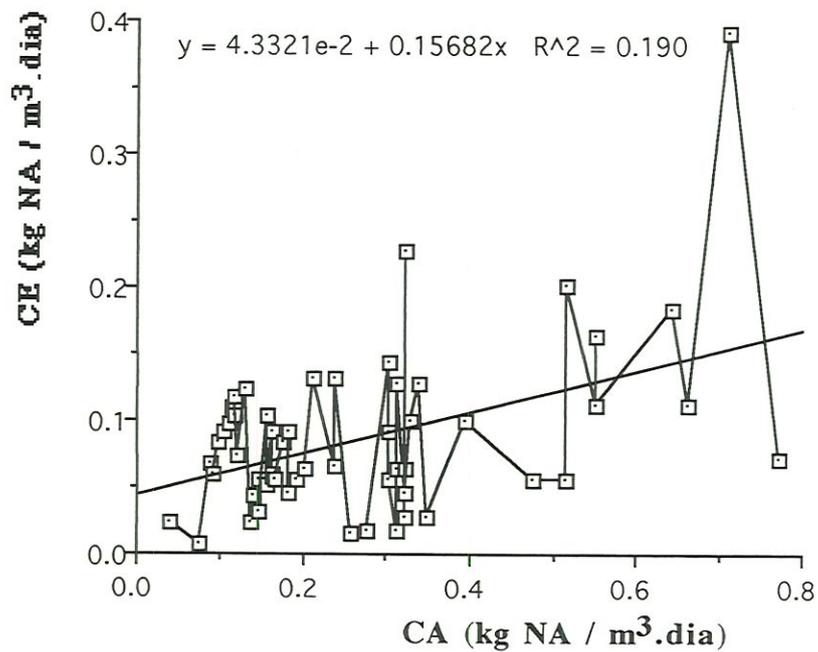


FIGURA 5.15 - Carga eliminada (CE) de Nitrogênio Amoniacal (NA) em função da carga aplicada (CA) de Nitrogênio Amoniacal

A Figura 5.15 mostra a evolução da carga eliminada de nitrogênio amoniacal em relação a carga aplicada ($\text{kg NA/m}^3\cdot\text{dia}$). Apesar de os valores se apresentarem dispersos, verifica-se que a nitrificação atingiu 50% para cargas aplicadas inferiores a $0,2 \text{ kg de NA/m}^3\cdot\text{dia}$, o que corresponde a uma velocidade de passagem no biofiltro de $0,25 \text{ m/h}$.

5.2.1.6 Influência da velocidade média de passagem sobre o tempo de funcionamento do biofiltro

Observa-se na Tabela 5.2 que o tempo de funcionamento do biofiltro decresce com o aumento da velocidade de passagem no biofiltro. Esse comportamento era esperado, uma vez que com o aumento da velocidade de passagem aumenta a carga de matéria em suspensão aplicada ao biofiltro.

TABELA 5.2 - Tempo médio de funcionamento do biofiltro

Parâmetro	Velocidade média aparente de passagem no biofiltro (m/h)		
	0,25	0,50	1,00
Tempo médio (horas)	56	30	24

5.2.2 Análise estatística do desempenho do biofiltro

Para analisar o desempenho do biofiltro foram construídas cartas de controle no "Quality Control - STATISTICA". Nessas cartas, o eixo horizontal representa as diferentes amostras, enquanto que o eixo vertical representa o valor da característica de interesse. A linha média representa o valor médio. As linhas adicionais representam os limites superior e inferior de controle (intervalo com grau de confiabilidade de 95%). No caso, o método para estabelecer essas últimas linhas, utiliza de forma direta, os princípios da estatística para distribuição de amostras (com características de distribuição normal).

Neste caso, as cartas de controle, que de um modo geral são utilizadas para verificar a eficiência de um determinado processo, foram construídas, e permitem verificar a estabilidade e/ou instabilidade do processo de tratamento no biofiltro, nas diversas condições de funcionamento.

As Figuras 5.16 e 5.17 mostram as cartas de controle das eficiências dos diversos parâmetros analisados no biofiltro e da eficiência global para a velocidade de passagem de 0,25 m/h. A eficiência global do sistema refere-se as remoções de DQOt, DQOs, turbidez, SST, SSV e nitrogênio amoniacal. Enquanto que as Figuras 5.18; 5.19; 5.20 e 5.21 mostram as cartas de controle para as velocidades médias de 0,50 m/h e 1,00 m/h, respectivamente.

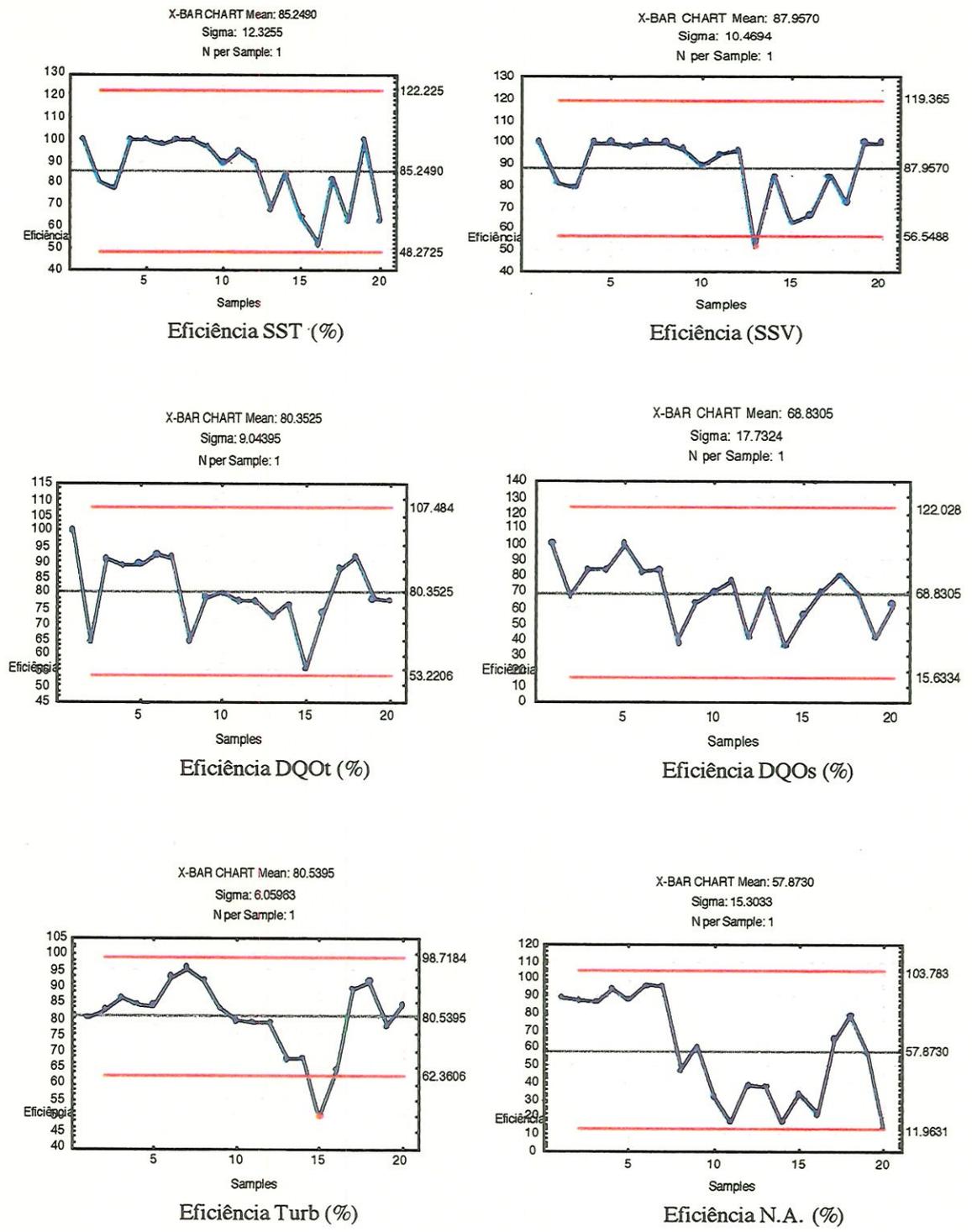


FIGURA 5.16 - Carta de controle para os diversos parâmetros analisados (0,25 m/h)

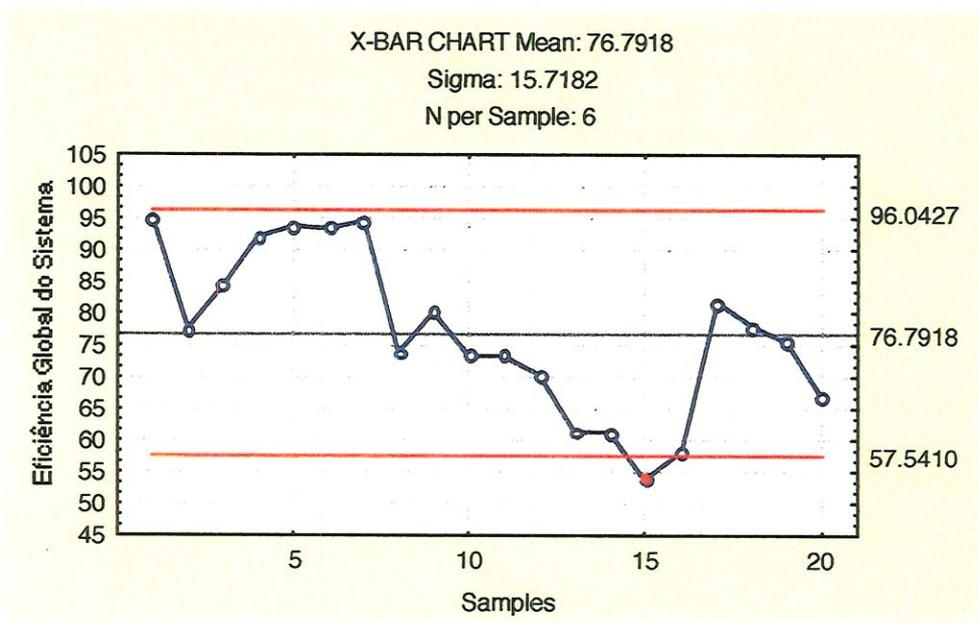


FIGURA 5.17 - Carta de controle do biofiltro para a velocidade de 0,25 m/h

Para a velocidade de passagem de 0,25 m/h, todos os parâmetros analisados apresentam-se quase na sua totalidade dentro das suas respectivas faixas de abrangência (Figura 5.16), e a Figura 5.17 mostra que a eficiência global do sistema, em média, foi 77%, estando em uma faixa de abrangência de 57 % a 96%, sendo que nesse caso, somente um dos pontos plotados ficou fora da faixa.

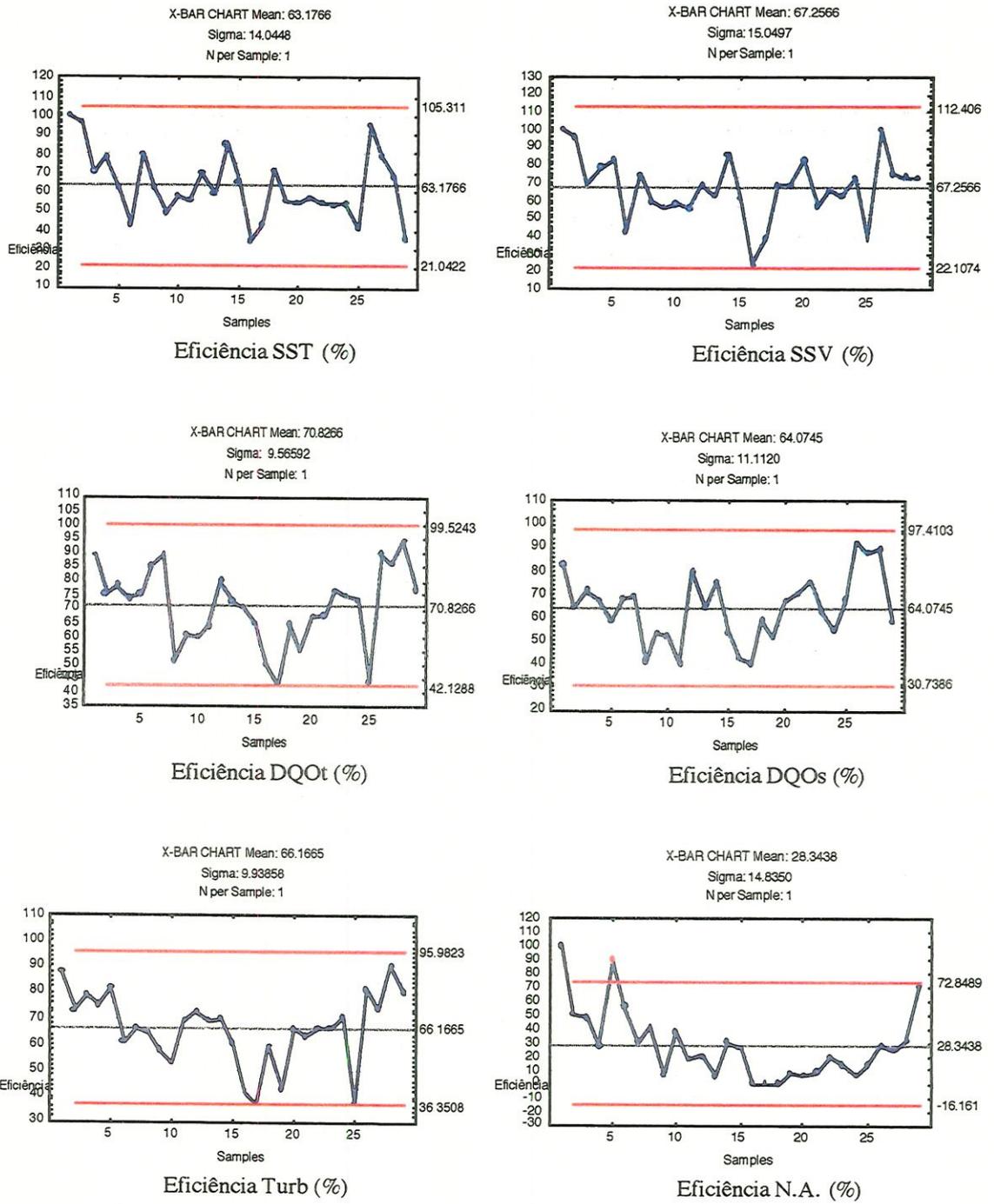


FIGURA 5.18 - Carta de controle para os diversos parâmetros analisados (0,50 m/h)

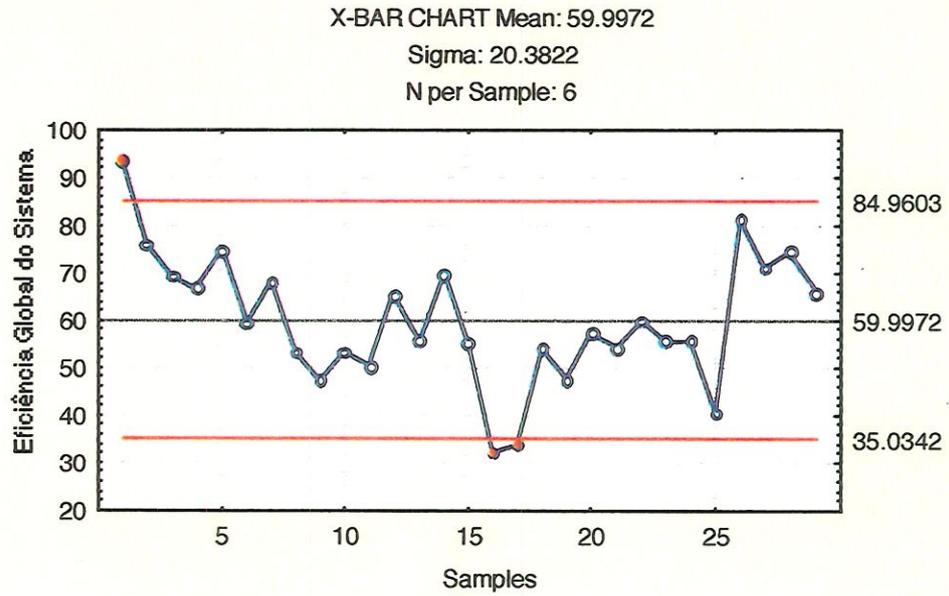


FIGURA 5.19 - Carta de controle do biofiltro para a velocidade de 0,50 m/h

Para a velocidade de passagem de 0,50 m/h, os parâmetros analisados estão dentro da faixa de abrangência (Figura 5.18), e a Figura 5.19 mostra que a eficiência global do sistema, em média, foi de 60%, estando em uma faixa de abrangência de 35% a 84% e, nesse caso, a grande maioria dos pontos plotados, também, permaneceram dentro da faixa.

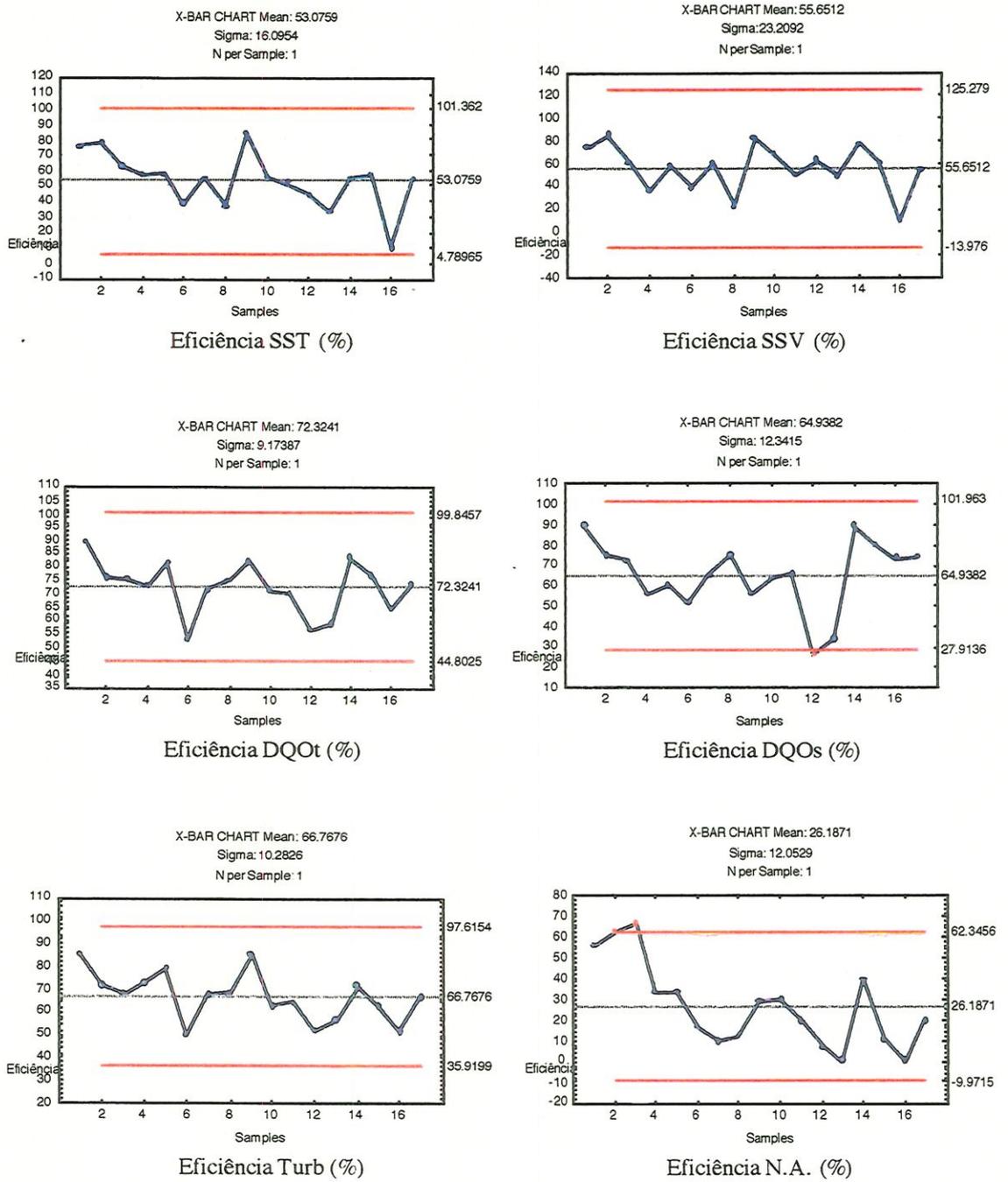


FIGURA 5.20 - Carta de controle para os diversos parâmetros analisados (1,00 m/h)

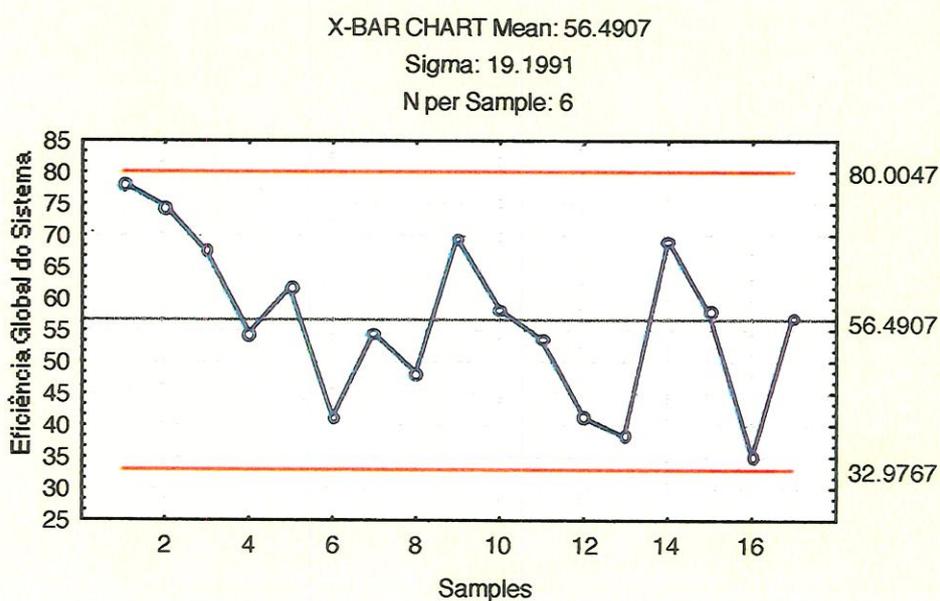


FIGURA 5.21 - Carta de controle do biofiltro para a velocidade de 1,00 m/h

Para a velocidade média de passagem de 1,00m/h todos os parâmetros analisados estão dentro da faixa de abrangência (Figura 5.20), e a Figura 5.21 mostra que a eficiência global do sistema, em média, foi de 56%, estando em uma faixa de abrangência de 33% a 80%, e nesse caso, todos os pontos plotados ficaram dentro da faixa de abrangência.

Pelo exposto anteriormente, pode-se verificar que o melhor desempenho do sistema ocorreu para a velocidade média de passagem de 0,25 m/h, na qual a eficiência média atingiu seu melhor valor e suas faixas limites com valores superiores em relação as outras velocidades de passagem no biofiltro.

5.3 Piloto A de microfiltração

Os resultados apresentados a seguir correspondem aos ensaios realizados com o piloto de microfiltração (A), conforme descrito no Capítulo 4, Item 4.2.3.

5.3.1 Evolução do fluxo do permeado

As Figuras 5.22 e 5.23 mostram, respectivamente, a evolução do fluxo do permeado de água de torneira (AT) obtida a partir da microfiltração nas membranas com diâmetros de poros de $0,20 \mu\text{m}$ e $0,05 \mu\text{m}$ e com os diferentes efluentes do biofiltro (B) e, a evolução do fluxo do permeado, somente, para os diferentes efluentes do biofiltro. Pode-se constatar, que mesmo para água de torneira, o fluxo do permeado decresce no tempo até valores relativamente baixos em relação aos valores iniciais, valores estes devido às resistências hidráulicas das membranas. A utilização do efluente do biofiltro conduziu a uma colmatação das membranas, provavelmente, relacionada à presença de partículas finas ou de matéria coloidal residual no efluente.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados gerais para os fluxos de permeado obtidos no piloto A de microfiltração utilizando as membranas com diâmetros de poros de $0,20 \mu\text{m}$ e $0,05 \mu\text{m}$ com água de torneira e com os efluentes do biofiltro nas velocidades médias de $0,25\text{m/h}$; $0,50\text{m/h}$ e $1,00\text{m/h}$. De acordo com esses resultados, observa-se uma tendência de diminuição do fluxo do permeado quando se passa da velocidade $0,25 \text{ m/h}$ no biofiltro para $1,00 \text{ m/h}$. O aumento da vazão do permeado para a membrana $0,05\mu\text{m}$ quando foi utilizado efluente do biofiltro ($1,0\text{m/h}$), pode ter ocorrido pelo acréscimo de temperatura durante o ensaio (Tabela B2 - ANEXO B). Observa-se, também, que de forma geral, ocorreu um melhor desempenho com a membrana com diâmetro de poros de $0,05 \mu\text{m}$, tanto para água de torneira quanto para os efluentes do biofiltro.

Na Tabela 5.4 tem-se as características do permeado para as diferentes condições dos ensaios realizados.

TABELA 5.3 - Fluxos dos permeados obtidos no piloto A de microfiltração para velocidade de recirculação de $4,0 \text{ m/s}$

Membrana ($0,05 \mu\text{m}$)				Membrana ($0,20 \mu\text{m}$)			
Média dos fluxos do permeado (Q_p) ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)				Média dos fluxos do permeado (Q_p) ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)			
AT	B($0,25\text{m/h}$)	B($0,50\text{m/h}$)	B($1,00\text{m/h}$)	AT	B($0,25\text{m/h}$)	B($0,50 \text{ h}$)	B($1,00\text{m/h}$)
533,00	244,50	129,00	156,20	366,70	190,14	144,30	81,50

TABELA 5.4 - Características dos efluentes do biofiltro (B) e dos permeados (P) obtidos no piloto A de microfiltração

Parâmetros	Membrana (0,05 μm)			Membrana (0,20 μm)		
	B(0,25m/h)	B(0,50m/h)	B(1,00m/h)	B(0,25m/h)	B(0,50m/h)	B(1,00m/h)
DQOt B (mg/L)	50,30	100,50	52,20	55,30	70,80	109,00
DQOs B (mg/L)	30,00	68,00	28,00	45,00	51,50	53,60
DQOt P (mg/L)	26,20	43,80	5,70	30,00	35,50	34,00
SST B (mg/L)	28,00	64,00	47,50	15,00	9,80	46,60
SSV B (mg/L)	17,50	59,50	23,00	15,00	8,50	32,40
Turb B (FTU)	17,00	53,00	35,30	14,50	28,70	65,20
Turb P (FTU)	4,70	8,50	4,20	3,30	5,00	6,40

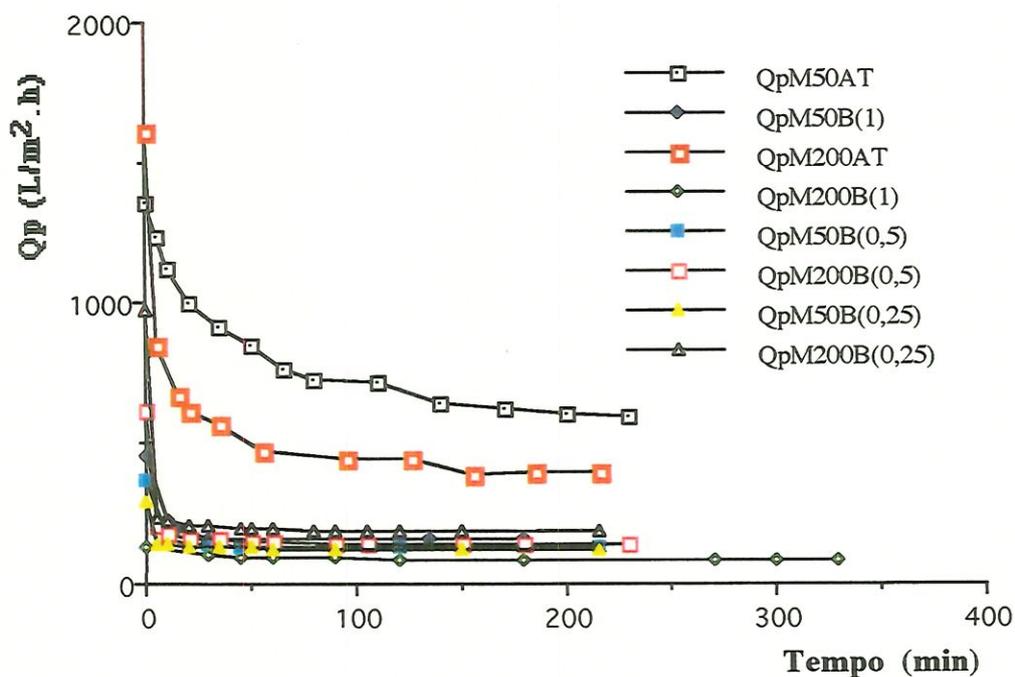


FIGURA 5.22 - Evolução do fluxo do permeado (Q_p) em $\text{L/m}^2\cdot\text{h}$ para as membranas $0,20\mu\text{m}$ (M200) e $0,05\mu\text{m}$ (M50) com água de torneira(AT) e com os diferentes efluentes do biofiltro (B)

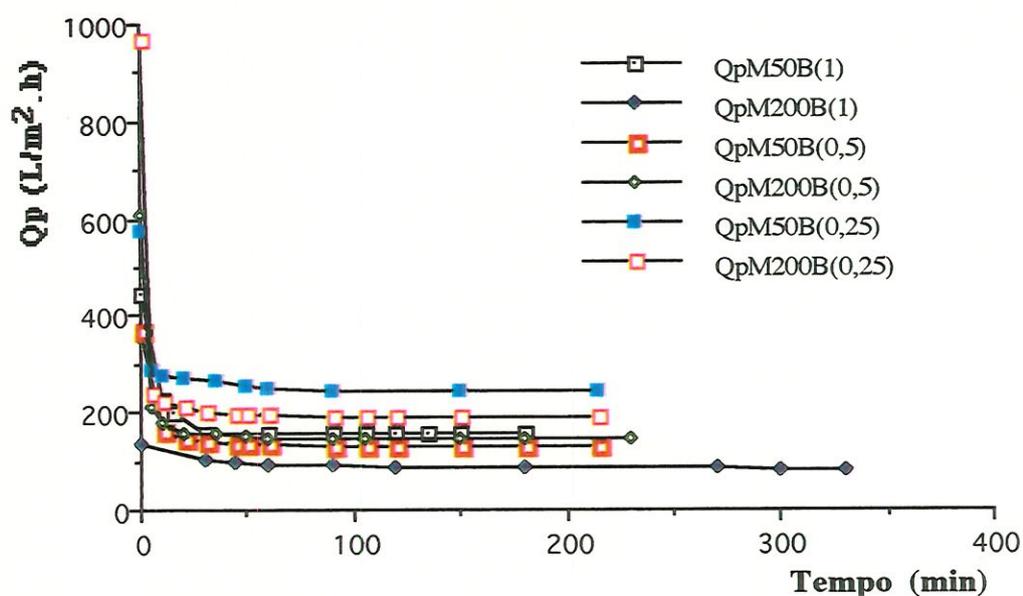


FIGURA 5.23 - Evolução do fluxo do permeado (Q_p) em $L/m^2.h$ para as membranas de $0,20\mu m$ (M200) e $0,05\mu m$ (M50) com os diferentes efluentes do biofiltro (B)

5.3.2 Evolução da qualidade do permeado

De maneira geral a microfiltração conduziu a uma sensível melhora na qualidade do efluente. Verificou-se que:

- a remoção da fração particulada foi total. A Figura 5.24 mostra as curvas da matéria em suspensão total (SST) dos efluentes do biofiltro (B) para as velocidades de $0,25m/h$; $0,50m/h$ e $1,00m/h$ e do permeado (P) para as membranas com diâmetro de poros de $0,20\mu m$ e $0,05\mu m$;
- a turbidez do permeado apresentou valores relativamente baixos, não excedendo a 10 FTU. A Figura 5.25 mostra a evolução da turbidez para os efluentes do biofiltro (B) e do permeado (P) nas várias condições operacionais dos ensaios;
- a redução da DQO total foi de pelo menos 50%, sendo, praticamente, total a remoção da DQO particulada. Observa-se na Tabela 5.4 que a DQOt do permeado é sempre inferior a DQOs dos efluentes do biofiltro. São justificáveis esse valores, uma vez que a determinação da DQOs foi realizada a partir do filtrado passado em filtros (GF/C

Whatman) com zona de corte de $1,2 \mu\text{m}$, enquanto que as membranas apresentavam zona de corte com valores inferiores ($0,20 \mu\text{m}$ e $0,05 \mu\text{m}$). A Figura 5.26 mostra as curvas da DQO para os efluentes do biofiltro (B) e do permeado (P) para as membranas com diâmetro de poros de $0,20 \mu\text{m}$ e de $0,05 \mu\text{m}$.

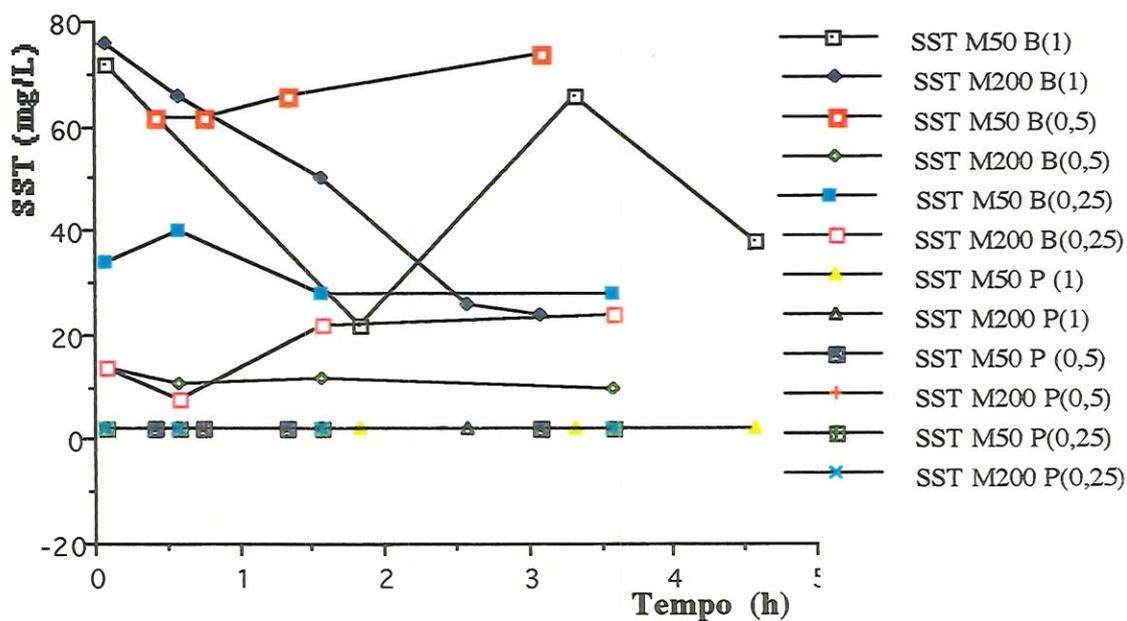


FIGURA 5.24 - Evolução da matéria em suspensão dos efluentes do biofiltro (B) e dos permeados (P) para as membranas $0,20 \mu\text{m}$ (M200) e $0,05 \mu\text{m}$ (M50)

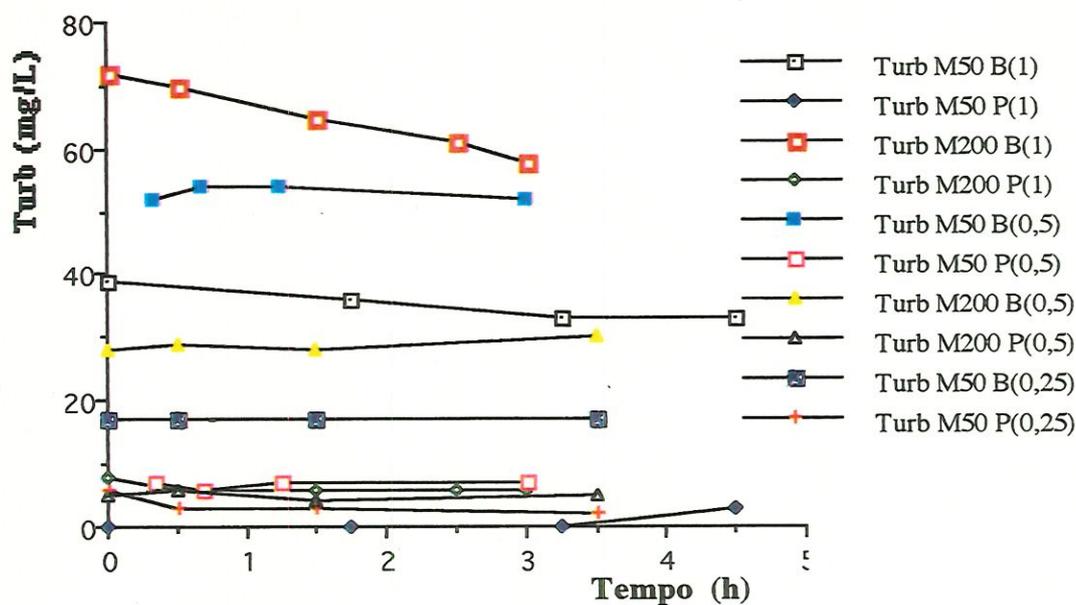


FIGURA 5.25 - Evolução da turbidez dos efluentes do biofiltro (B) e dos permeados (P) para as membranas $0,20\mu\text{m}$ (M200) e $0,05\mu\text{m}$ (M50)

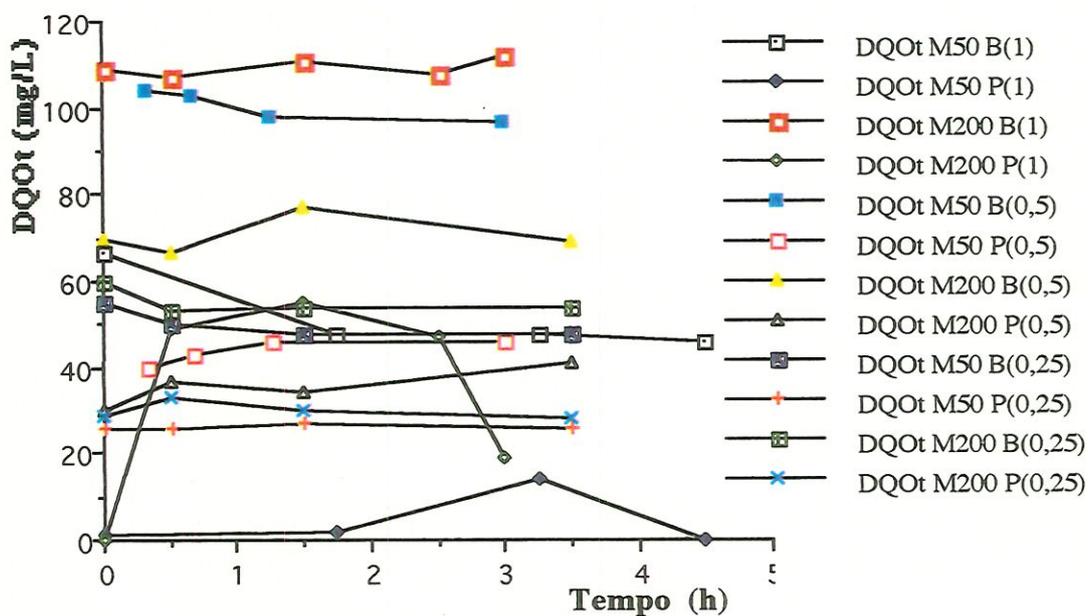


FIGURA 5.26 - Evolução da DQO para os efluentes do biofiltro (B) e dos permeados (P) para as membranas $0,20\mu\text{m}$ (M200) e $0,05\mu\text{m}$ (M50)

5.3.3 Avaliação das resistências das membranas nos ensaios realizados com o piloto A de microfiltração

A variação típica do fluxo do permeado (Figuras 5.22 e 5.23), caracterizada por um rápido decréscimo inicial, seguido de um longo e gradual declínio, principalmente, quando utilizou-se os efluentes do biofiltro, deve-se ao fenômeno de colmatação das membranas. As principais causas da colmatação, como já descrito no Item 3.3.5 do capítulo 3, incluem: adsorção, interações químicas, formação da camada de gel e bloqueio dos poros. As taxas de colmatação são, ainda, influenciadas pela natureza dos solutos, sua concentração, tipo de membrana, a distribuição de tamanho dos poros, a hidrodinâmica e as características da superfície da membrana.

5.3.3.1 Avaliação das resistências da membrana com tamanho de poros de 0,05 μm

Conhecidos:

- Fluxo médio do permeado para água de torneira: $J = 533 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ (Tabela 5.3)
- Fluxo do permeado para o efluente do biofiltro (0,25m/h): $J = 244,50 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do permeado para o efluente do biofiltro (0,50m/h): $J = 129,00 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do permeado para o efluente do biofiltro (1,00m/h): $J = 156,20 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Variação da pressão: $\Delta P = 10^5 \text{ Pa}$
- Viscosidade dinâmica: $\mu = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Adaptando-se a equação 3.6 (Capítulo 3), tem-se:

$$J = \Delta P / \mu(R_M + R_p + R_g + R_c) \quad (5.1)$$

Em que:

$$R_M + R_p + R_g + R_c = R_T \quad (5.2)$$

$$R_p + R_g + R_c = R_C \quad (5.3)$$

Considerando:

$R_C = 0$, quando se filtra água de torneira, obtém-se o valor de R_M :

$$R_M = 6,76 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$$

Dessa forma, tem-se que a resistência total da membrana $0,05 \mu\text{m}$ quando se utilizou efluente do biofiltro ($0,25\text{m/h}$) foi igual:

$$R_T = 1,47 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

Para a membrana de $0,05 \mu\text{m}$, quando se utilizou efluente do biofiltro ($0,50\text{m/h}$), tem-se a resistência total igual:

$$R_T = 2,79 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

A resistência total da membrana $0,05 \mu\text{m}$ quando se utilizou efluente do biofiltro ($1,00\text{m/h}$) foi igual:

$$R_T = 2,31 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

5.3.3.2 Avaliação das resistências da membrana com tamanho de poros de $0,20 \mu\text{m}$

Conhecidos:

- Fluxo do permeado para água de torneira: $J = 366,7 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do permeado para o efluente do biofiltro ($0,25\text{m/h}$): $J = 190,14 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do permeado para o efluente do biofiltro ($0,50\text{m/h}$): $J = 144,30 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do permeado para o efluente do biofiltro ($1,00\text{m/h}$): $J = 81,50 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Variação da pressão: $\Delta P = 10^5 \text{ Pa}$
- Viscosidade dinâmica: $\mu = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Aplicando-se a expressão 5.1, modificada:

$$J = \Delta P / \mu(R_M + R_C) \tag{5.4}$$

e, considerando-se $R_C = 0$, quando se filtra água de torneira, obtém-se o valor de R_M :

$$R_M = 9,80.10^{11} \text{ m}^{-1}$$

A resistência total da membrana $0,20 \mu\text{m}$ quando se utilizou efluente do biofiltro ($0,25\text{m/h}$) foi igual:

$$R_T = 1,89.10^{12} \text{ m}^{-1}$$

A resistência total da membrana $0,20 \mu\text{m}$ quando se utilizou efluente do biofiltro ($0,50\text{m/h}$) foi igual:

$$R_T = 2,49.10^{12} \text{ m}^{-1}$$

A resistência total da membrana $0,20 \mu\text{m}$ quando se utilizou efluente do biofiltro ($1,00\text{m/h}$) foi igual:

$$R_T = 4,42.10^{12} \text{ m}^{-1}$$

TABELA 5.5 - Resistências das membranas para o piloto A de microfiltração

Resistência (m^{-1})	Membrana ($0,05 \mu\text{m}$) Efluente do biofiltro			Membrana ($0,20 \mu\text{m}$) Efluente do biofiltro (m/h)		
	B(0,25 m/h)	B(0,50 m/h)	B(1,00 m/h)	B(0,25 m/h)	B(0,50 m/h)	B(1,00 m/h)
R_M	$6,76.10^{11}$			$9,80.10^{11}$		
R_T	$1,47.10^{12}$	$2,79.10^{12}$	$2,31.10^{12}$	$1,89.10^{12}$	$2,49.10^{12}$	$4,42.10^{12}$
R_C	$7,94.10^{11}$	$21,14.10^{11}$	$16,31.10^{11}$	$9,10.10^{11}$	$15,10.10^{11}$	$34,4.10^{11}$

Verifica-se que existe tendência no aumento da resistência total da membrana (R_T) com a passagem do efluente do biofiltro de $0,25$ para $1,00 \text{ m/h}$, principalmente, em relação à membrana $0,20 \mu\text{m}$.

Os resultados das resistências das membranas apresentados na Tabela 5.5 podem ser relacionados com os valores mostrados na Tabela 5.4. Observa-se que os valores obtidos para as resistências seguem as mesmas variações encontradas para os parâmetros analisados (DQOt B, DQOs B, DQOt P, SST B, SSV B, Turb B e Turb P).

5.4 Piloto B de microfiltração (MEMBRALOX)

Os ensaios com o piloto B de microfiltração tiveram seu procedimento conforme descrito no Item 4.2.4 do Capítulo 4.

5.4.1 Evolução do fluxo do permeado

As Tabelas 5.6 e 5.7 e as Figuras 5.27 e 5.28 mostram a evolução do fluxo do permeado (P) com água de torneira (AT) e com os efluentes do biofiltro (B) para as membranas com diâmetros de poros de 0,20 μm e de 0,05 μm . Observa-se que a membrana com diâmetro de poros de 0,20 μm apresentou fluxo de permeado mais elevado, quando se utilizou água de torneira.

Embora tenha ocorrido maior fluxo do permeado (P) na membrana com diâmetro de poros de 0,20 μm quando se utilizou os vários efluentes do biofiltro (B), essa diferença tendeu a desaparecer no limite inferior do ensaio, conforme pode-se verificar através da Tabela 5.7 e da Figura 5.28. Neste caso, os valores obtidos para o fluxo do permeado (Tabela 5.7) tendem a se aproximar de um mesmo valor, independentemente da origem do afluente, ou seja, da velocidade de passagem no biofiltro. Essas diferenças de resultados em relação ao piloto A de microfiltração (Tabela 5.3), encontram justificativas no fato que:

- trabalhou-se no piloto A, com uma velocidade de recirculação maior (4,00 m/s), enquanto que no piloto B, essa velocidade foi de 2,00 m/s;

- os procedimentos utilizados para lavagem das membranas (método estático) nem sempre resultam em boa recuperação das condições iniciais de permeação;

- o piloto A não dispunha de um sistema de descolmatação, portanto, não permitia uma recuperação parcial da capacidade de filtração das membranas no transcorrer dos ensaios.

TABELA 5.6 - Média dos resultados do fluxo de permeado (Q_p) para as membranas com tamanho de poros de $0,20 \mu\text{m}$ e $0,05 \mu\text{m}$ utilizando água de torneira (AT)

Tempo (min)	Q_p ($0,20 \mu\text{m}$) ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	Q_p ($0,05 \mu\text{m}$) ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
0	2823	1271
1	2397	1143
2	2183	1098
3	2070	1059
4	1990	1021
5	1937	1010

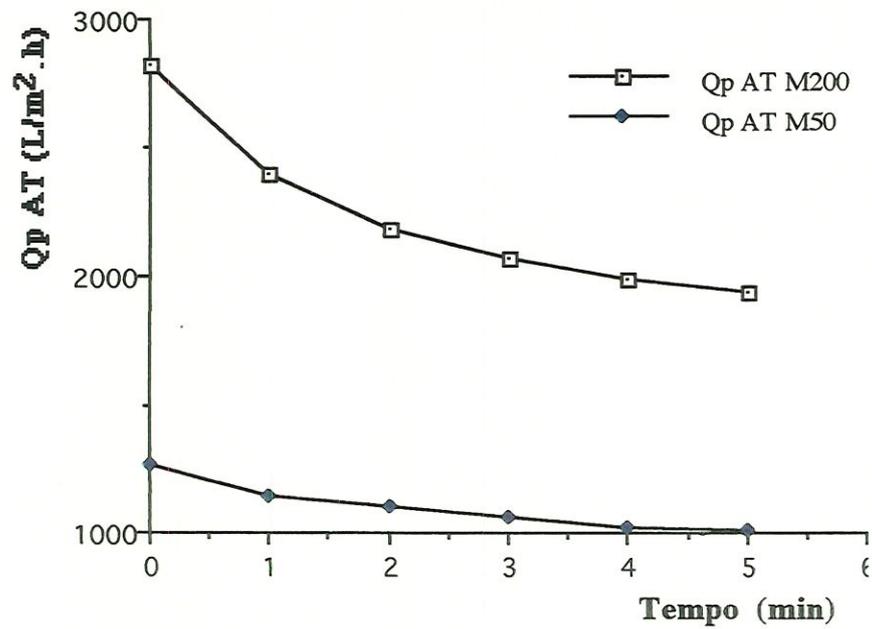


FIGURA 5.27 - Evolução do fluxo do permeado (Q_p) em $L/m^2 \cdot h$ com água de torneira (AT)

TABELA 5.7 - Média dos resultados do fluxo do permeado (Q_p) para as membranas com tamanho de poros $0,20 \mu m$ e $0,05 \mu m$ utilizando os vários efluentes do biofiltro

TEMPO (min)	Q_p ($0,20 \mu m$) ($L/m^2 \cdot h$)			Q_p ($0,05 \mu m$) ($L/m^2 \cdot h$)		
	B(0,25m/h)	B(0,50m/h)	1,00m/h)	B(0,25m/h)	B(0,50m/h)	B(1,00m/h)
0	526	537	500	435	435	368
5	227	234	221	218	218	204
30	162	149	163	158	158	160
60	152	143	155	146	146	150
90	149	140	151	138	138	146
120	149	140	151	138	138	146

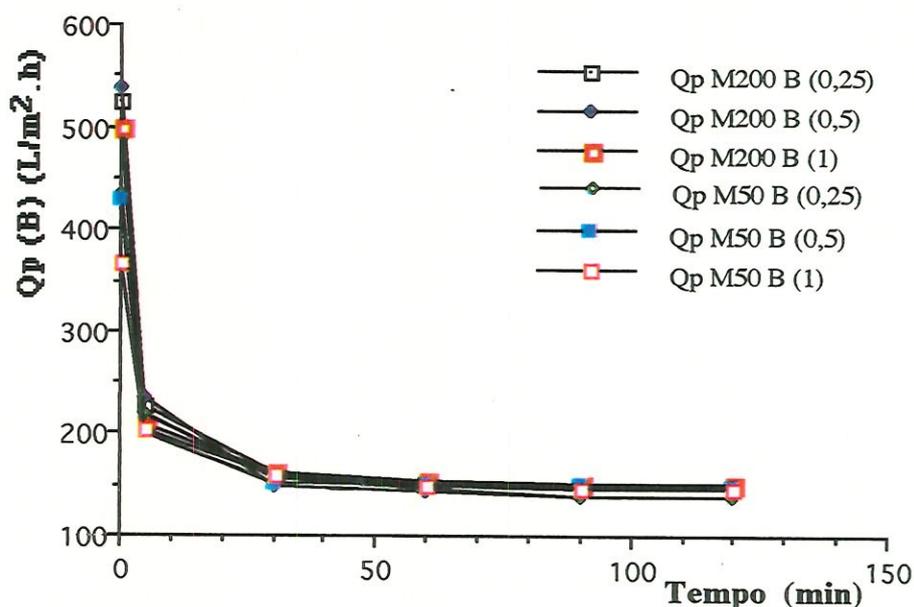


FIGURA 5.28 - Evolução do fluxo do permeado (Q_p) em $L/m^2 \cdot h$ com os efluentes do biofiltro (B)

5.4.2 Evolução da qualidade do permeado

Como ocorreu nos ensaios com o piloto A, também, neste caso (piloto B), observou-se uma melhora na qualidade do efluente final (permeado):

- a turbidez do permeado apresentou valores baixos, não excedendo a 10 FTU (Tabela 5.9 e Figura 5.29), independente do efluente do biofiltro (Tabela 5.8), bem como, do diâmetro dos poros da membrana utilizada. Observou-se uma leve tendência de valores da turbidez mais baixos para o permeado, quando se utilizou efluente do biofiltro com menores valores na velocidade de passagem;

- o permeado apresentou-se, praticamente, isento de sólidos suspensos;

- a redução da DQO_t ultrapassou a 60%, sendo, praticamente, total a remoção da DQO particulada. Nas Tabelas 5.10 e 5.11 e na Figura 5.30 pode-se verificar que a DQO_t do permeado é sempre inferior a DQO_t dos efluentes do biofiltro. Da mesma forma que no caso anterior (Piloto A), esses resultados, justificam-se porque a DQO_t foi determinada

após a filtragem em papel filtro-GF/C Whatman, com zona de corte de $1,2 \mu\text{m}$, enquanto que as membranas apresentavam zona de corte inferiores ($0,20 \mu\text{m}$ e $0,05 \mu\text{m}$). Podendo-se concluir que os valores da DQOs do permeado são similares ao da DQOt.

TABELA 5.8 - Médias dos resultados experimentais da turbidez e sólidos suspensos dos efluentes do biofiltro utilizados nos ensaios com o piloto B de microfiltração

Parâmetros	Membrana ($0,20 \mu\text{m}$)			Membrana ($0,05 \mu\text{m}$)		
	B(0,25m/h)	B(0,50m/h)	B(1,00m/h)	B(0,25m/h)	B(0,50m/h)	B(1,00m/h)
Turb B (mg/L)	30	40	54	39	36	38
SST B (mg/L)	30	53	77	20	48	52
SSV B (mg/L)	16	33	34	15	25	34

TABELA 5.9 - Médias dos resultados experimentais da turbidez do permeado

Tempo (min)	Turbidez do permeado (FTU) para Membrana ($0,20 \mu\text{m}$)			Turbidez do permeado (FTU) para Membrana ($0,05 \mu\text{m}$)		
	B(0,25m/h)	B(0,50m/h)	B(1,00m/h)	B(0,25m/h)	B(0,50m/h)	B(1,00m/h)
0	7	6	9	6	6	8
5	7	6	9	6	6	7
30	5	5	8	5	6	7
60	5	5	8	5	5	6
90	4	5	7	5	6	5
120	3	4	7	4	5	5

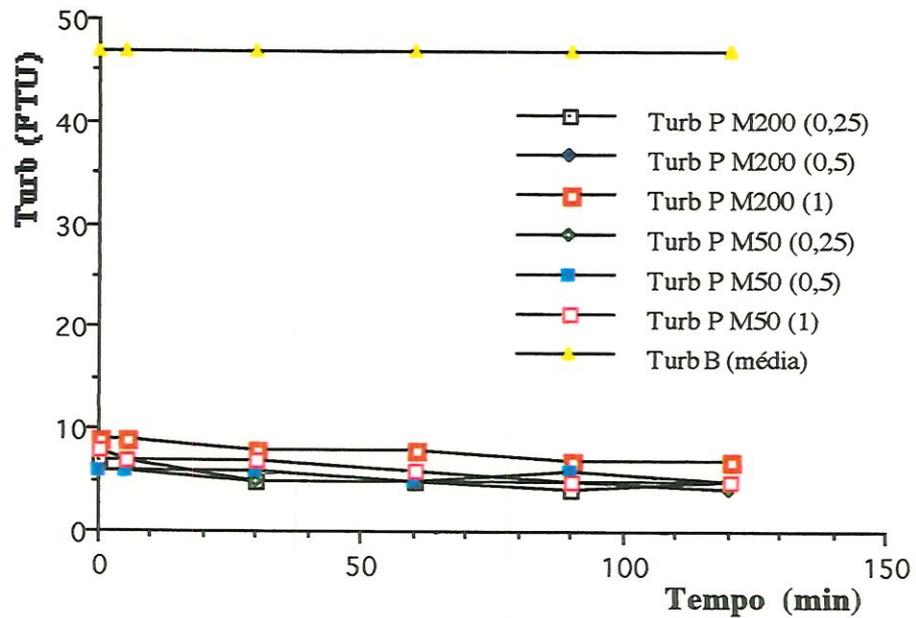


FIGURA 5.29 - Evolução da turbidez do efluente do biofiltro (B) e do permeado (P)

TABELA 5.10 - Média dos resultados experimentais para DQOt e DQOs dos vários efluentes do biofiltro

Parâmetros	Membrana (0,20 μm)			Membrana (0,05 μm)		
	0,25m/h	0,50m/h	1,00m/h	0,25m/h	0,50m/h	1,00m/h
DQOt B (mg/L)	64	82	104	80	64	77
DQOs B (mg/L)	37	50	57	47	38	39

TABELA 5.11 - Média dos resultados experimentais da DQOt do permeado (DQOtP)

Tempo (min)	DQOt P (mg/L) Membrana (0,20 μm)			DQOt P (mg/L) Membrana (0,05 μm)		
	0,25(m/h)	0,50(m/h)	1,00(m/h)	0,25(m/h)	0,50(m/h)	1,00(m/h)
	0	25	30	50	32	24
5	26	28	46	29	23	23
30	26	25	39	23	23	25
60	18	27	48	27	19	19
90	26	22	46	24	25	22
120	24	26	47	26	25	15

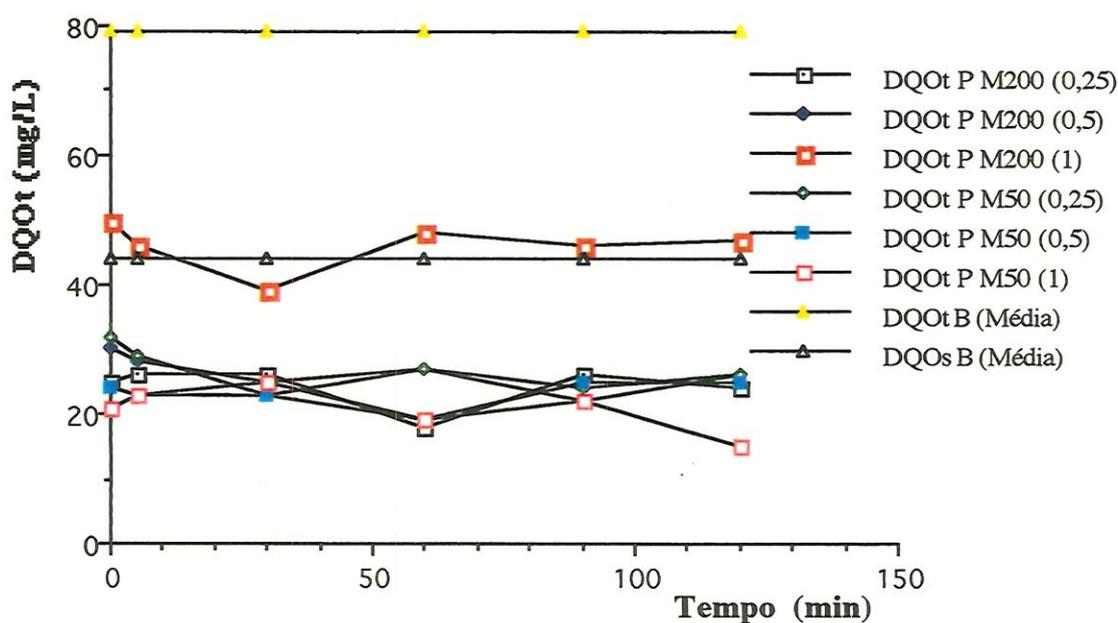


FIGURA 5.30 - Evolução da DQO dos efluentes do biofiltro (B) e do permeado (P)

5.4.3 Coliformes

Com o objetivo de avaliar a contaminação bacteriológica, foram realizadas exames para determinar os índices de coliformes totais e fecais:

- na entrada do biofiltro (esgoto decantado);
- na saída do biofiltro (B);
- após a microfiltração (membranas $0,20 \mu\text{m}$ e $0,05 \mu\text{m}$)

Para as análises do efluente do biofiltro coletou-se amostras, quando esse operava a uma velocidade de $0,50\text{m/h}$. Os resultados encontram-se na Tabela 5.12.



TABELA 5.12 - Resultados de exames bacteriológicos

	Coliformes totais (NMP/100mL)	Coliformes fecais (NMP/100mL)
Esgoto decantado (D)	$8,3 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^6$
Saída do biofiltro (B)	$6,9 \cdot 10^3$	$9,3 \cdot 10^4$
Permeado (0,20 μm)	< 2,2	< 2,2
Permeado (0,05 μm)	< 2,2	< 2,2

Pela análise da Tabela 5.12 observa-se que:

- o tratamento do esgoto com a biofiltração resultou em abatimento de 99,2% em termos de coliformes totais, enquanto que a redução de coliformes fecais foi de 96,3%;
- em nível de microfiltração, a remoção dos coliformes foi de praticamente 100%, para as membranas 0,20 μm e 0,05 μm , mostrando que essas membranas se constituem como uma barreira eficaz no controle bacteriológico.

5.4.4 Avaliação das resistências das membranas para os ensaios realizados no piloto B de microfiltração

Os ensaios realizados com o piloto B de microfiltração, utilizando os efluentes do biofiltro, com as membranas de diâmetros de poros de 0,20 μm e 0,05 μm caracterizaram que:

- ocorreu uma rápida diminuição do fluxo do permeado logo após os primeiros minutos de filtração, conforme pode ser verificado nas Figuras 5.27, 5.28 e das Tabelas 5.6 e 5.7;
- os fluxos obtidos para os efluentes do biofiltro foram inferiores aos obtidos com água de torneira (Tabela 5.7 e Figura 5.27).

Esses resultados apontam que os efluentes do biofiltro induziram a colmatção das membranas. A colmatção nas membranas pode ser avaliada pela determinação de suas resistências.

5.4.4.1 Avaliação das resistências da membrana com tamanho de poros de 0,05 μm

Conhecidos:

- Fluxo do permeado para água de torneira: $J = 1010,00 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do permeado para o efluente do biofiltro (0,25m/h): $J = 138 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do permeado para o efluente do biofiltro (0,50m/h): $J = 138 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do permeado para o efluente do biofiltro (1,00m/h): $J = 146 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Variação de pressão: $\Delta P = 10^5 \text{ Pa}$
- Viscosidade dinâmica: $\mu = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Utilizando-se as equações 5.1, 5.2 e 5.3 e, considerando:

$R_c = 0$, quando se filtra água de torneira, obtém-se o valor de R_M :

$$R_M = 3,57 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$$

Para a resistência total da membrana de diâmetro de poros de 0,05 μm , quando se utilizou efluente do biofiltro (0,25m/h), tem-se:

$$R_T = 2,61 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

A resistência total da membrana de diâmetro de poros de 0,05 μm quando se utilizou efluente do biofiltro (0,50m/h) foi igual:

$$R_T = 2,61 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

A resistência total da membrana $0,05 \mu\text{m}$ quando se utilizou efluente do biofiltro ($1,00\text{m/h}$) foi igual:

$$R_T = 2,46 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

5.4.4.2 Avaliação das resistências da membrana com tamanho de poros de $0,20 \mu\text{m}$

Conhecidos:

- Fluxo do permeado para água de torneira: $J = 1937 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do permeado para o efluente do biofiltro ($0,25\text{m/h}$): $J = 149 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ $4,14 \times 10^{-5}$
- Fluxo do permeado para o efluente do biofiltro ($0,50\text{m/h}$): $J = 140 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do permeado para o efluente do biofiltro ($1,00\text{m/h}$): $J = 151 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Variação de pressão: $\Delta P = 10^5 \text{ Pa}$
- Viscosidade dinâmica: $\mu = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Como no caso anterior com a membrana $0,05 \mu\text{m}$, aplicando-se a lei de DARCY, em que:

$J = \Delta P / \mu(R_M + R_C)$, e, considerando-se $R_C = 0$, quando se filtra água de torneira, obtém-se o valor de R_M :

$$R_M = 1,86 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$$

A resistência total da membrana com diâmetro de poros de $0,20 \mu\text{m}$ quando se utilizou efluente do biofiltro ($0,25\text{m/h}$) foi igual:

$$R_T = 2,42 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

A resistência total da membrana com diâmetro de poros de $0,20 \mu\text{m}$ quando se utilizou efluente do biofiltro ($0,50\text{m/h}$) foi igual:

$$R_T = 2,57 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

A resistência total da membrana com diâmetro de poros de $0,20 \mu\text{m}$ quando se utilizou efluente do biofiltro ($1,00\text{m/h}$) foi igual:

$$R_T = 2,39 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

Os resultados obtidos com o piloto B de microfiltração não permitiram relacionar os valores das resistências obtidos (Tabela 5.13) com a origem dos efluentes do biofiltro (Tabelas 5.8 e 5.10), principalmente, quando se utilizou a membrana com diâmetro de poros de $0,05 \mu\text{m}$.

TABELA 5.13 - Resistências das membranas nos ensaios com o piloto B de microfiltração

Resistência (m^{-1})	Membrana ($0,05 \mu\text{m}$) Efluente do biofiltro			Membrana ($0,20 \mu\text{m}$) Efluente do biofiltro		
	B($0,25\text{m/h}$)	B($0,50\text{m/h}$)	B($1,00\text{m/h}$)	B($0,25\text{m/h}$)	B($0,50\text{m/h}$)	B($1,00\text{m/h}$)
R_M	$3,57 \cdot 10^{11}$			$1,86 \cdot 10^{11}$		
R_T	$2,61 \cdot 10^{12}$	$2,61 \cdot 10^{12}$	$2,46 \cdot 10^{12}$	$2,42 \cdot 10^{12}$	$2,57 \cdot 10^{12}$	$2,39 \cdot 10^{12}$
R_C	$22,53 \cdot 10^{11}$	$22,53 \cdot 10^{11}$	$21,03 \cdot 10^{11}$	$22,34 \cdot 10^{11}$	$23,84 \cdot 10^{11}$	$22,04 \cdot 10^{11}$

5.4.5 Influência do tempo de recirculação e do uso de coadjuvantes no desempenho das membranas

Com o objetivo de melhorar o desempenho das membranas ($0,20 \mu\text{m}$ e $0,05 \mu\text{m}$) frente ao efluente estudado e, reduzir assim, os problemas de colmatção das membranas, foram realizados alguns ensaios no piloto B de microfiltração tangencial, em que foram verificados a influência do tempo de recirculação no sistema e da adição de produtos coadjuvantes como sulfato de alumínio, cloreto férrico e carvão ativado em pó.

Os resultados de cada ensaio, bem como as condições de operação são apresentados no Anexo C. Na Tabela 5.14 apresenta-se a sùmula desses resultados para as membranas com diâmetro de poros de $0,20 \mu\text{m}$ e $0,05 \mu\text{m}$. Observa-se na segunda coluna dessa tabela, tanto para a membrana $0,20 \mu\text{m}$, como para a membrana $0,05 \mu\text{m}$, que os

valores apresentados, para o fluxo do permeado (Q_p) com água de torneira (AT), diferem entre si, quando na realidade esses resultados deveriam aproximar-se, pois todos os ensaios foram realizados dentro das mesmas condições operacionais. Provavelmente essas diferenças são devidas à não recuperação da capacidade da membrana devido ao tipo de método utilizado para limpeza das mesmas (método estático), descrito, no Item 4.3 do Capítulo 4.

Verificou-se que o tempo de recirculação teve grande influência no aumento da capacidade de fluxo da membrana e, conseqüentemente, sobre as suas resistências. Para a membrana $0,20 \mu\text{m}$, o valor do fluxo do permeado passou de $528 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ para $2124 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ e o valor de fosfatos passou de $2,93 \text{ mg/L}$ para $0,01 \text{ mg/L}$ (Tabela 5.14) para tempos de recirculação de 2 horas e 24 horas, respectivamente.

No entanto, observou-se que a adição de coadjuvantes, como o sulfato de alumínio, o cloreto férrico e o carvão ativado no efluente do biofiltro aplicados diretamente no tanque de armazenamento do piloto de microfiltração antes de se iniciar os ensaios, resultou em uma sensível melhora no desempenho das membranas. Nesse caso, o tempo de recirculação não exerceu grande influência nos resultados obtidos para os fluxos do permeado (Tabela 5.14).

TABELA 5.14 - Símula dos resultados obtidos nas membranas variando o tempo de recirculação e pelo uso de coadjuvantes

Membrana	Condição do ensaio	Qp (AT) (L/m ² .h)	Resistência R _M (m ⁻¹)	Qp (B) (L/m ² .h)	Resistência R _r (m ⁻¹)	DQOt B (mg/L)	DQOt P (mg/L)	Turb B (FTU)	Turb P (FTU)	Fosf B (mg/L)	Fosf P (mg/L)
Membrana 0,20 μm	24 h recirculação	2736	1,32.10 ¹¹	2124	1,69.10 ¹¹	53	23	17	1	11,20	0,01
	16 h recirculação	2952	1,22.10 ¹¹	1548	2,33.10 ¹¹	28	15	15	1	11,07	0,01
	2 h recirculação	3060	1,18.10 ¹¹	528	6,80.10 ¹¹	86	26	32	5	11,57	2,93
	1 h recirculação 200mg/L (*)	3492	1,03.10 ¹¹	1310	2,75.10 ¹¹	53	8	17	1	10,48	0,58
	1h recirculação 100 mg/L (*)	2760	1,30.10 ¹¹	1044	3,45.10 ¹¹	22	20	15	2	8,81	0,26
	1 h recirculação 50mg/L (*)	3060	1,18.10 ¹¹	828	4,35.10 ¹¹	78	25	36	5	11,57	0,32
	15min recirculação 100/mg/L (***)	3132	1,15.10 ¹¹	1080	3,33.10 ¹¹	22	19	4	2	9,61	0,07
	15min recirculação 100mg/L (*)	3528	1,02.10 ¹¹	1044	3,45.10 ¹¹	20	4	4	0	10,94	0,23
	Sobrenadante jar test 150mg/L (*)	2124	1,69.10 ¹¹	1800	2,00.10 ¹¹	21	9	8	3	10,10	0,30
	Sobrenadante jar test 200mg/L (**)	2988	1,20.10 ¹¹	1620	2,22.10 ¹¹	28	11	9	3	10,10	0,01
Membrana 0,05 μm	24 h recirculação	1188	3,03.10 ¹¹	684	5,26.10 ¹¹	86	31	32	3	11,20	0,15
	16 h recirculação	1440	2,50.10 ¹¹	1134	3,17.10 ¹¹	22	13	19	0	9,61	0,06
	2 h recirculação	1026	3,51.10 ¹¹	228	1,58.10 ¹²	86	47	34	4	13,35	1,68
	16 h recirculação 200mg/L (*)	1512	2,38.10 ¹¹	720	5,00.10 ¹¹	22	18	15	1	8,60	0,03
	Sobrenadante jar test 150mg/L (*)	1080	3,33.10 ¹¹	630	6,71.10 ¹¹	28	13	9	2	-	-

(*) Cloreto férrico (**) Sulfato de alumínio (***) Cloreto férrico e 50mg/L de carvão ativado em pó

A partir de ensaios (teste de jarros) realizados com o efluente do biofiltro (0,25 m/h), em que utilizou-se como coadjuvantes, o cloreto férrico e o sulfato de alumínio, obteve-se resultados que indicaram uma dosagem ótima de 150 mg/L para o cloreto férrico e 200mg/L para sulfato de alumínio. Realizando-se ensaios de microfiltração com as membranas com diâmetro de poros de 0,20 μm e 0,05 μm utilizando o sobrenadante, após um período de 15 minutos de decantação, chegou-se a melhores resultados em termos de fluxo do permeado para a membrana de diâmetro de poros de 0,20 μm .

Quanto à qualidade do permeado, pode-se perceber que de forma geral, o uso de coadjuvantes (Tabela 5.14) conduziu a um desempenho superior da microfiltração. Isso pode ser verificado, quando compara-se esses resultados com aqueles obtidos na microfiltração do efluente do biofiltro sem a utilização de coadjuvantes (Tabelas 5.9 e 5.11).

Ainda, com o intuito de minimizar os problemas de colmatação das membranas, foram realizados ensaios preliminares utilizando-se polímero. Esses ensaios são, a seguir descritos.

5.5 Ensaios de filtrabilidade de suspensões utilizando a célula de filtração SARTORIUS

Os resultados, a seguir apresentados, foram obtidos a partir de ensaios com piloto de filtração em escala de laboratório (célula de filtração SARTORIUS), descritos no Capítulo 4, Item 4.2.5, em que foram verificados:

- a influência do uso de polímero na redução de colmatação nas membranas;
- a influência do valor do pH da solução preparada com o polímero na melhora do desempenho da membrana tratada;
- o efeito da técnica de tratamento com polímero utilizada na membrana.

Para efeito de comparação, foram realizados ensaios com três tipos de suspensões: as duas primeiras provenientes de um tanque de aeração de sistema de lodos ativados sendo uma com alta concentração e outra com baixa concentração (sobrenadante de lodos ativados após decantação); a terceira, também, com baixa concentração (efluente do biofiltro).

Ainda, foi aplicado o modelo de HERMIA para filtração frontal, descrito no Item 4.2.5.3 do Capítulo 4, verificando-se sua aplicabilidade na filtração tangencial, sendo os resultados obtidos para as resistências comparados com aqueles obtidos no modelo de DARCY.

5.5.1 Filtração de suspensão do tipo lodos ativados

Para a realização dos ensaios foi utilizada suspensão proveniente do tanque de aeração da estação de lodos ativados de Montpellier, que apresentava as seguintes características:

- DQOt entre 2000 e 2500 mg/L
- SST entre 1000 e 2000 mg/L

5.5.1.1 Ensaio de filtração utilizando lodos ativados em membrana tratada com polímero - Cálculo das resistências

Conhecidos:

- Fluxo do filtrado para água de torneira (AT) na membrana sem tratamento:
 $J = 1333 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do filtrado para água de torneira (AT) na membrana tratada com polímero:
 $J = 1385 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do filtrado com a suspensão de lodos ativados na membrana sem tratamento:
 $J = 72 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$

- Fluxo do filtrado com a suspensão de lodos ativados na membrana tratada com polímero:

$$J = 71,7 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$$

- Variação da pressão: $\Delta P = 10^5 \text{ Pa}$

- Viscosidade dinâmica: $\mu = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

A resistência total da membrana (R_T) é igual:

$$R_T = R_M + R_C$$

Aplicando-se a expressão 5.4:

$$J = \Delta P / \mu(R_M + R_C)$$

e, considerando-se $R_C = 0$, a resistência da membrana (R_M) foi determinada a partir da filtração de água de torneira:

$$R_M = 2,7 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1} \text{ para a membrana sem tratamento com polímero e,}$$

$$R_M = 2,6 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1} \text{ para membrana tratada com polímero.}$$

A resistência total foi determinada a partir da filtração da amostra (lodos ativados):

$$R_T = 5,0 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1} \text{ para a membrana sem tratamento com polímero e,}$$

$$R_T = 5,05 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1} \text{ para a membrana tratada com polímero.}$$

O tratamento das membranas com polímero, praticamente, não modificou as suas resistências. Nos cálculos acima, pode-se observar que no limite inferior da filtração, as resistências são praticamente iguais para as membranas não tratadas e para as membranas tratadas. A filtração de suspensões muito concentradas não permitiu concluir quanto a eficácia do uso deste tipo de polímero.

5.5.1.2 Ensaio de filtração utilizando sobrenadante de lodos ativados após decantação

A decantação, durante um período de duas horas em cone IMHOFF, da suspensão de lodos ativados permitiu obter a eliminação da fração decantável e, conseqüentemente, um sobrenadante de baixa concentração de matéria em suspensão, com as seguintes características:

- DQOt entre 115 e 260 mg/L
- SST entre 35 e 85 mg/L

Para as condições:

- Variação de pressão: $\Delta P = 10^5$ Pa
- Viscosidade dinâmica: $\mu = 10^{-3}$ Pa.s

Obteve-se:

- Fluxo do filtrado utilizando o sobrenadante (membrana sem tratamento):

$$J = 109 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$$

- Fluxo do filtrado utilizando o sobrenadante (membrana com tratamento):

$$J = 107,5 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$$

A partir da equação 5.4:

$$J = \Delta P / \mu (R_M + R_C), \text{ têm-se:}$$

$$R_T = 3,3 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1} \text{ para a membrana sem tratamento com polímero e,}$$

$$R_T = 3,35 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1} \text{ para a membrana tratada com polímero.}$$

Pode-se constatar que as resistências totais, nesse caso, são inferiores às encontradas quando da filtração com a suspensão de lodos ativados. No entanto, ainda apresentam valores elevados, mostrando, dessa forma, o quanto as frações supracoloidais e solúveis são responsáveis pela colmatação das membranas.

Observou-se também que o tratamento da membrana com polímero teve pouca influência na melhoria da sua resistência total. Entretanto, esperava-se que com a utilização do polímero ocorresse uma diminuição da adsorção das substâncias solúveis na membrana e, conseqüentemente, uma redução na colmatação.

5.5.2 Filtração utilizando o efluente do biofiltro

Para a realização dos ensaios foi utilizado efluente do piloto de biofiltração, com as seguintes características:

- DQOt entre 60 e 110 mg/L
- SST entre 14 e 60 mg/L

Os efluentes dos biofiltros se caracterizaram por serem pouco concentrados (DQOt , SST) se comparados com os efluentes utilizados nos ensaios descritos anteriormente.

A partir dos ensaios de filtração, obteve-se:

- Fluxo do filtrado utilizando o efluente do biofiltro (membrana sem tratamento):
 $J = 85,7 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$
- Fluxo do filtrado utilizando o efluente do biofiltro (membrana com tratamento):
 $J = 85,7 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$

Considerando-se a equação 5.4, em que:

$J = \Delta P / \mu(R_M + R_C)$, têm-se as resistências totais:

$R_T = 4,2 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$ para a membrana sem tratamento com polímero e,

$R_T = 4,2 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$ para a membrana tratada com polímero.

Pode-se constatar, mais uma vez, que o tratamento com polímero não teve influência sobre a colmatação da membrana. As resistências totais no limite inferior de filtração são idênticas com ou sem tratamento.

5.5.3 Influência do pH e o uso do polímero por filtração à vácuo

5.5.3.1 Influência do pH

Por razões de estabilidade do seu princípio ativo, a solução concentrada do polímero foi conservada em refrigerador e seu pH mantido entre 3 e 4. Ao se preparar a solução com água destilada, ocorre aumento do pH, sendo necessária correção com ácido sulfúrico. As suspensões utilizadas para os ensaios apresentaram um pH entre 7 e 8 (entre 7,4 e 7,6 para o efluente do biofiltro). Para verificar a influência do pH na resistência da membrana, parece interessante observar a filtração de suspensões com valores de pH próximos daquele do polímero e, também, com valores mais afastados.

Na Tabela 5.15 são apresentados os valores das resistências obtidas para as membranas, em que utilizou-se efluentes do biofiltro com diferentes valores de pH. Os ensaios de filtração foram realizados tanto para membranas submetidas ao tratamento com polímero assim como, para membranas sem tratamento com polímero.

TABELA 5.15 - Influência do pH sobre as resistências da membrana

Condição da membrana	Resistências das membranas (m^{-1})			
	Valores do pH da suspensão (efluente do biofiltro)			
	7,4	4,0	6,0	9,0
Membrana não tratada	$4,2 \cdot 10^{12}$	$3,4 \cdot 10^{12}$	$3,5 \cdot 10^{12}$	$4,1 \cdot 10^{12}$
Membrana tratada	$4,2 \cdot 10^{12}$	$3,1 \cdot 10^{12}$	$3,0 \cdot 10^{12}$	$4,7 \cdot 10^{12}$

Observou-se que para o valor mais alto do pH (9,0), os problemas de colmatção tenderam a aumentar (valores das resistências são mais altos). Esse valor de pH, parece ser o limite superior aceitável para esse tipo de membrana, pois as membranas orgânicas são muito sensíveis as variações de pH.

A filtração de suspensões com valores mais baixos de pH (pH=4,0 e pH=6,0), conduzem a uma ligeira diminuição nos valores das resistências das membranas, tanto para as membranas não tratadas, como aquelas submetidas ao tratamento com polímero. Porém, isso não foi constatado quando se filtrou a suspensão sem a correção do pH (pH=7,4).

5.5.3.2 Utilização de polímero por filtração à vácuo

Com a finalidade de verificar se as micro-bolhas de ar (resultantes da agitação da suspensão a uma pressão superior a pressão atmosférica) impediam a adsorção do polímero sobre a membrana, foi realizado um tratamento por filtração à vácuo. Para determinar a resistência da membrana, com ou sem polímero, estas foram umedecidas em um becker, com água de torneira ou com polímero e submetida à vácuo por um período de 15 minutos. Após, foram realizados os ensaios com água de torneira e com o efluente do biofiltro. Verificou-se que as resistências da membrana para água de torneira apresentaram os mesmos resultados, independente da membrana ter sido submetida ao tratamento com polímero ou não.

A partir dos ensaios de filtração, obteve-se:

- Fluxo do filtrado utilizando água de torneira (membrana sem tratamento):

$$J = 1440 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$$

- Fluxo do filtrado utilizando água de torneira (membrana com tratamento):

$$J = 1440 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$$

Considerando-se a equação 5.4, em que:

$J = \Delta P / \mu(R_M + R_C)$, e, considerando-se $R_C = 0$, a resistência da membrana (R_M) foi determinada a partir da filtração de água de torneira:

$$R_M = 2,5 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1} \text{ para a membrana sem tratamento com polímero e,}$$

$$R_M = 2,5 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1} \text{ para a membrana tratada com polímero.}$$

Os valores das resistências totais encontrados no patamar mínimo de filtração com os efluentes do biofiltro foram praticamente os mesmos com ou sem a utilização de polímero ($R_T = 4,1 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$) e, foram bastante próximos àqueles obtidos com o tratamento das membranas por agitação no Item 5.5.2 ($R_T = 4,2 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$).

5.5.4 Utilização do modelo de HERMIA aplicado à filtração do efluente do biofiltro

De acordo com as características da célula SARTORIUS tem-se:

- Área superficial da membrana: $A = 11,34 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
- Variação da pressão: $\Delta P = 10^5 \text{ Pa}$
- Viscosidade dinâmica: $\mu = 10^{-3} \text{ Pas}$

De acordo com este modelo as resistências da membrana (R_M) e a devido a colmatção (R_C) podem ser calculadas:

$$R_M = 1,134 \cdot 10^{11} \cdot b$$

$$R_C = 2,2368 \cdot 10^{11} \cdot v \cdot a,$$

Em que:

R_M e R_C : resistências em (m^{-1})

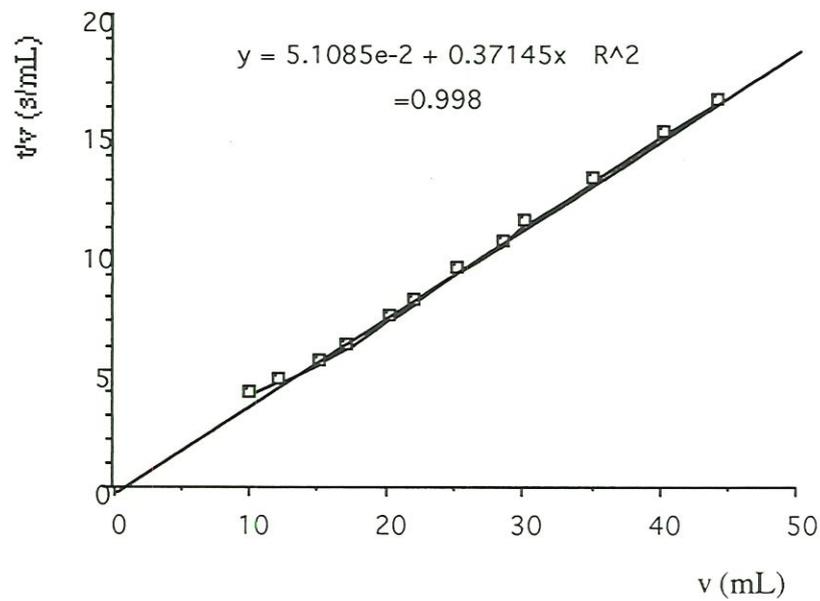
v : volume do filtrado em (mL)

a : coeficiente (s/mL^2)

b : coeficiente (s/mL)

TABELA 5.16 - Resultados da filtração com o efluente do biofiltro

Tempo (s)	41	56	82	104	147	176	235	300	340	462	600	720
v (mL)	10,0	12,0	15,0	17,0	20,0	22,0	25,0	28,5	10,0	35,0	40,0	44,0
t/v (s/mL)	4,10	4,67	5,47	6,12	7,35	8,00	10,52	9,40	11,30	13,20	15,00	16,36

**FIGURA 5.31** - Regressão linear sobre os resultados da filtração

Com os resultados da filtração do efluente do biofiltro na célula SARTORIUS apresentados na Tabela 5.16, e através da regressão linear realizada sobre esses pontos (Figura 5.31), obtém-se os valores de a e b :

$$a = 0,371$$

$$b = 0,051$$

Com os valores de “ a ” e “ b ” pode-se calcular as resistências da membrana através das equações 4.7 e 4.8 (Item 4.2.5, Capítulo 4):

$$R_M = 0,58 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-1}$$

$$R_C = 3,65 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1} \text{ (resistência no patamar inferior em que } v = 44 \text{ mL)}$$

O modelo de Darcy forneceu os seguintes resultados (Ítem 5.5.1 e 5.5.2):

$$R_M = 2,7 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1} \text{ (para água tratada) e,}$$

$$R_T = 4,2 \cdot 10^{12} \text{ (para o efluente do biofiltro).}$$

Portanto, o valor da resistência devido a colmatação (R_C), será:

$$R_C = R_T - R_M = 4,2 \cdot 10^{12} - 2,7 \cdot 10^{11}$$

$$R_C = 3,93 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

O modelo de HERMIA subestimou o valor da resistência da membrana (R_M). Embora esse modelo pareça descrever bem a evolução da resistência da membrana (bom coeficiente de regressão e resistência no patamar inferior de filtração muito próximo ao valor obtido pela lei de DARCY) ele não leva em consideração os fenômenos físicos da colmatação. Além disso, esse modelo não é específico para filtração tangencial. Para as resistências iniciais o modelo fornece resultados muito fracos e, portanto, bastante divergentes daqueles encontrados no modelo de DARCY. Os resultados, no entanto, podem ser considerados como uma primeira aproximação para a avaliação dos valores das resistências das membranas.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões deste trabalho, bem como sugestões para continuidade da pesquisa.

6.1 Conclusões

Várias atividades experimentais foram realizadas visando atingir os objetivos propostos neste trabalho. Entre as atividades, destacam-se o acompanhamento, por um período de seiscentos dias da operação do biofiltro, variando-se as condições de funcionamento e realizando-se análises e exames laboratoriais de rotina; ensaios utilizando membranas (microfiltração tangencial) com diferentes diâmetros de poros, em condições hidrodinâmicas variadas e usando-se efluentes do biofiltro com diferentes características. Tais atividades permitiram concluir que:

- A associação de processo biológico para tratamento de esgotos sanitários, mais especificamente, o processo de biofiltração com a microfiltração tangencial apresenta-se como uma alternativa eficaz. A qualidade do efluente final torna possível a reutilização desse tipo de efluente, seja no meio agrícola, seja no meio industrial. Sendo as necessidades de água cada vez maiores, a sua reutilização, parece ser uma alternativa para alguns usos específicos, tais como: irrigação (espaços verdes, campos de esporte, agricultura, jardins), limpeza (veículos, serviços públicos) e também, em alguns processos industriais. Essa reutilização poderá conduzir a uma mudança na gestão global dos recursos hídricos: os esgotos sanitários que se apresentam como um produto sem valor, podem passar, assim, a possuir um “status” de produto de valor pelos seus usuários.
- A grande vantagem da utilização de membranas é que elas podem se apresentar com tratamento em nível terciário. O efluente final obtido (permeado) apresenta qualidade constante (baixos valores da DQOt e SST), com menor contaminação bacteriológica, portanto, com características superiores, na maioria dos casos, àquelas obtidas por uma estação clássica de tratamento de esgotos e, dessa forma, podendo ser reutilizado.

Entretanto, a desinfecção do efluente será necessária, caso algum contato primário esteja previsto na reutilização desse efluente.

- O desempenho do biofiltro apresentou sensível melhora com a diminuição da velocidade de passagem de 1,0 m/h para 0,25m/h. Na velocidade de 1,0 m/h a DQOt de 338mg/L (esgoto decantado) passou para 93 mg/L (saída do biofiltro), com uma eficiência de remoção de 72%. Para a velocidade de 0,25 m/h, a DQOt passou de 325 mg/L para 64 mg/L, portanto, uma eficiência de remoção de 80%. Em relação aos sólidos suspensos totais houve remoção de 53% (de 124 mg/L para 57 mg/L) na velocidade de 1,0 m/h, enquanto que para velocidade 0,25 m/h a eficiência de remoção foi de 85% (de 102 mg/L para 13mg/L).
- Os períodos dos ciclos de filtração foram maiores para menores velocidades de passagem no biofiltro. Para a velocidade de 0,25 m/h o tempo médio de funcionamento do biofiltro foi de 56 horas, enquanto que para a velocidade de 1,0 m/h, o tempo de funcionamento do biofiltro foi reduzido para 24 horas.
- A eficiência global do sistema (biofiltro), considerando todos os parâmetros analisados (DQOt, DQOs, SST, SSV, turbidez e nitrogênio amoniacal), apresentou melhor resultado para a velocidade de passagem de 0,25 m/h, sendo de 77%, enquanto, que para as velocidades de 0,5 m/h e 1,0 m/h, foram de 60% e 56%, respectivamente.
- A microfiltração conduziu, de uma maneira geral, a uma sensível melhora na qualidade do efluente final. A remoção da fração particulada, através da microfiltração, ocorreu em quase toda sua totalidade (sólidos suspensos totais do permeado, praticamente zero). A turbidez do permeado apresentou valores relativamente baixos, não excedendo a 10 FTU. A eficiência na remoção da DQOt foi em média, em torno de 64%.
- Os valores das resistências totais, calculados para as membranas, foram relativamente altos quando se utilizou o efluente do biofiltro, caracterizando, dessa forma, o problema de colmatação, causado principalmente pelas matérias em suspensão, supracoloidais e pela fração coloidal fina. A penetração dos colóides através dos poros não deve ser excluída, entretanto, como causa da colmatação.

- A colmatção na membrana é na maioria das vezes irreversível. A regeneração química das membranas utilizando o método estático nem sempre permitiu restituir a permeabilidade inicial da membrana.
- A adição de produtos coadjuvantes, como o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, resultou em sensível melhoria no desempenho das membranas, sendo que os melhores resultados foram obtidos para dosagens de 200 mg/L para sulfato de alumínio e 150 mg/L para cloreto férrico. Nesse caso, a desestabilização química ocorre causando a transformação das frações solúvel, coloidal e supracoloidal, diminuindo, consequentemente, os problemas de colmatção.
- Os ensaios realizados, com o tratamento das membranas com polímero visando reduzir os problemas de colmatção, não apresentaram bons resultados, não permitindo, portanto, uma conclusão quanto a eficácia dessa alternativa.
- O modelo de HERMIA para filtração pode ser aplicado à filtração tangencial com restrições, principalmente, em relação à previsão do cálculo das resistências iniciais, em que o modelo fornece valores muito baixos. Os resultados, no entanto, podem ser considerados como uma primeira aproximação para se prever os valores das resistências das membranas.

6.2 Sugestões

A alternativa estudada não se constitui como completa para tratamento dos efluentes sanitários. Para a continuidade das pesquisas nesta área, apresenta-se alguns tópicos que devem ser melhor explorados e que, sem dúvida, contribuirão para a otimização do processo.

Quanto ao biofiltro, pesquisar:

- A influência da taxa de oxigenação no biofiltro visando, dessa forma, o aumento da nitrificação no sistema.

- A adoção de outro tipo de biofiltro, em que seja considerada a nitrificação, a desnitrificação e, também, a desfosfatação para se obter um efluente final com melhores características.

Quanto a microfiltração tangencial, pesquisar:

- A natureza dos compostos causadores da colmatção visando melhorar o fluxo do permeado. Para melhor entender o papel dos colóides finos e da matéria solúvel, a utilização de técnicas como a cromatografia e a microscopia eletrônica poderão permitir uma melhor identificação das partículas colmatantes.
- A influência da retrolavagem na descolmatção das membranas, bem como os métodos utilizados para limpeza química.
- Outros tipos de polímeros para tratamento das membranas, visando reduzir os problemas de colmatção.
- O uso de coadjuvantes para otimizar o desempenho das membranas.
- Sistemas em escala industrial (de maior dimensão) e, em contínuo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEYSINGHE, D. H., SHANABLEH, A. and RIGDEN, B.** (1996). Biofilters for water reuse in aquaculture. *Wat. Scs. Tech.*, v. 34, n. 11, p.253-260.
- AIM, R. B.; LIU, M. G. and VIGNESWARAN, S.** (1993). Recent development of membrane processes for water and waste treatment. *Wat. Scs. Tech.*, v. 27, n. 10, p. 141-149.
- ALI, A.; SONGUELE BOMANGAYEN, J. B. et RUMEAU, M.** (1994). Potabilisation des eaux de surface par couplage microfiltration - électrolyse. In: - INTERFILTRA - INTERMEMBRANE. Paris, 1994. *Recueil des Conférences*. p.186-191.
- ANDERSON, G. K.; SAW, C. B. and FERNANDES, M. I. A. P.** (1986) Applications of porous membranes for biomass retention in biological wastewater treatment processes. *Process biochemistry*, december.
- ARVIN, E. and HARREMÖES, P.** (1990). Concepts and models for biofilm reactor performance. *Wat. Scs. Tech.*, v. 22, n. 1-2, p.171-192.
- BADER, M. S. H. and VEENSTRA, J. N.** (1996). Analysis of concentration polarization phenomenon in ultrafiltration under turbulent flow conditions. *Journal of Membrane Science*, v.1, n. 114, p.139-148.
- BAILEY, A. D.; HANSFORD, G. S. and DOLD, P. L.** (1994). The enhancement of upflow anaerobic sludge bed reactor performance using crossflow microfiltration. *Wat. Res.*, v.28, n.2, p.291-295.
- BAILEY, A. D.; HANSFORD, G. S. and DOLD, P. L.** (1994). The use of crossflow microfiltration to enhance the performance of an activated sludge reactor. *Wat. Res.*, v.28, n.2, p.297-301.
- BERGAMASCO, R.** (1996). *O uso de partículas poliméricas para adesão microbiana em tratamento biológico de resíduos*. Campinas. 147p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.
- BENITEZ, J.; RODRIGUEZ, A. and MALAVER, R.** (1995). Stabilization and dewatering of wastewater using hollow fiber membranes. *Wat. Res.*, v.29, n.10, p.2281-2286.
- BILTOFT, B. G. et NIAI, R.** (1994). Protection des eaux littorales par microfiltration des effluents primaires d'une station d'eaux résiduaires. In: INTERFILTRA - INTERMEMBRANE. Paris, 1994. *Recueil des Conférences*. p.319-322.
- BOTTINO, A. et al.** (1991). Pore size and pore-size distribution in microfiltration membranes. *Separation Science and Technology*, v.26, p.1315-1327.
- BRUN, J. P.** (1989). *Procédés de séparation par membranes*. Paris, Masson. 269p.

- CAMPOS, J. R.** (1994). *Alternativas para tratamento de esgotos: pré-tratamento de águas de abastecimento*. Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari. 112p.
- CANLER, J. P. and PERRET J. M.** (1993). Biofiltres aérés: évaluation du procédé sur 12 unités industrielles - Les réacteurs à cultures fixées. In: ACTES DE LA 2^{ème} CONF. INTERNATIONALE (IAOW/GHTM/EWPCA/CFRP). Paris, 1995. p.27-37.
- CAPDEVILLE, B. and N'GUYEN, K. M.** (1990). Kinetics and modelling of aerobic and anaerobic film growth. *Wat. Scs. Tech.* v.22, n.1-2, p.149-170.
- CARRÈRE, H. et RENÉ, F.** (1996). Effets des paramètres opératoires sur les performances des procédés de micro et ultrafiltration tangentielle. *Entropie*. n.197, p.17-32.
- CHAIZE, S.** (1990) *Les bioréacteurs à membranes: utilisation en traitements d'eau résiduaire urbaine. Étude du colmatage bactérien*. Montpellier. 210p. Thèse (Doctorat) - Université de Montpellier II - France.
- COMA, J.** (1987). *Intensification du processus de floculation - décantation d'une suspension colloïdale instable. Application au cas d'une eau usée urbaine*. Montpellier. Thèse (Doctorat) - Université des Sciences et Techniques du Languedoc - France.
- COMA, J.; JABBOURI, A.; GRASMICK, A. et ELMALEH, S.** (1990) Floculation en lit fluidisé. *Wat. Res.*, v.24, n.3, p.361-366.
- COMA, J.; JABBOURI, A.; GRASMICK, A. et ELMALEH, S.** (1991) Intensive primary treatment of wastewater. *Wat. Scs. Tech.*, v.24, n.7, p.217-222.
- DEGRÉMONT.** (1989). *Mémento Technique de l'eau*. v.1 e v.2. Lavoisier.
- DUCLERT, F.** (1989). *Étude de divers phénomènes de colmatage limitant l'écoulement de l'eau à travers une membrane minérale microporeuse*. Montpellier. 170p. Thèse (Doctorat). Academie de Montpellier - USTL - France.
- DUMONT, C.** (1993). Club Membranes EDF, Avril.
- ECKENFELDER, W. W.** (1982). *Gestion des eaux usées urbaines et industrielles - Caractérisation - Techniques d'épuration - aspects économiques*. Technique et Documentation - Lavoisier.
- FANE, A. G.** (1996) Membranes for water production and wastewater reuse. *Desalination*, n.106, p.01-09.
- FUTAMURA, O.; KATOH, M. and TAKEUCHI, K.** (1994). Organic wastewater treatment by activated sludge process using integrated type membrane separation. *Desalination*, n.98, p.17-25.
- GHABRIS, A. H.; ABDEL-JAWAD, M. and ALY, G. S.** (1989). Municipal wastewater renovation by reverse osmosis - State of the Art. *Desalination*, n.75, p.213-240.

- GLIMENIUS, R.** (1985). Microfiltration - State of the art. *Desalination*, n.53, p.363-372.
- GONÇALVES, R. F.** (1993). *Élimination biologique du phosphore des eaux résiduaires urbaines par des biofilters immergés*. Toulouse. 187p. Thèse (Doctorat). L'Institut National de Sciences Appliquées de Toulouse - France.
- GONÇALVES, R. F. e ARAÚJO, M. G.** (1997) Entrada em regime permanente de um biofiltro aerado submerso tratando esgoto sanitário da região de Camburi - Vitória (ES). In: 19^o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Foz do Iguaçu, 1997. *Anais*. Foz do Iguaçu, ABES. p.439-449.
- GOSLING, P. and BROWN, D.** (1993) Membranes for sewage treatment: the reality. *Wat. Scs. Tech.*, v 27, n.5-6, p.439-447.
- GRASMICK, A.** (1978). *La filtration biologique sur colonne garnie: modèle d'élimination de la pollution dissoute*. Montpellier. Thèse (Doctorat). L'Université des Sciences et Techniques du Languedoc - France.
- GRASMICK, A.** (1982). *Contribution a la modélisation des réacteurs à cellules immobilisées sur support granulaire en couche fixe ou fluidisée*. Toulouse. Thèse pour obtenir le grade de docteur d'état. L'Institut National de Sciences Appliquées de Toulouse - France.
- GRASMICK, A.; ELMALEH, S. and IAHI, H.** (1984). Nitrification by attached cell reactors at co or counter-current: experimental data and modelling. *Wat. Res.*, v.18, p.885-892.
- GRASMICK, A.; ELMALEH, S. and COMA, J.** (1988). Intensive primary flocculation-sedimentation of urban wastewater. *Wat. Scs. Tech.*, v.21, p.631-637.
- GRASMICK, A.** (1992). Intensification du traitement primaire d'une eau usée urbaine. *Récents Progrès en Génie des Procédés.*, v.6, n.20, p.121-128.
- HARADA, H.; MOMONOI, K.; YAMAZAKI, S. and TAKIZAWA, S.** (1994). Application of anaerobic - UF membrane reactor for treatment of wastewater containing high strength particulate organics. *Wat. Scs. Tech.*, v.30, n.12, p.307-319.
- HOGETSU, A. et al.** (1992). *Wat. Scs. Tech.*, v.25, n.7, p.341-350.
- JÖNSSON, C. and JÖNSSON, A. S.** (1995). Influence of the membrane material on the adsorptive fouling of ultrafiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, v.108, p.79-87.
- KRAUTH, K. and STAAB, K. F.** (1993). Pressurized bioreactor with membrane filtration for wastewater treatment. *WAT. Res.*, v.27, n.3, p.405-411.
- KOLEGA, M et al.** (1991). Disinfection and clarification on treated sewage by advanced microfiltration. *Wat. Scs. Tech.*, v.23, p.1609-1618.

- KOLEGA, M. et al.** (1989). Desinfection of secondary sewage effluent by advanced membrane treatment technology. In: AUSTRALIAN WATER AND WASTEWATER ASSOCIATION - 13TH FEDERAL CONVENTION. Australia, 1989. *Proceed.* p.623-627.
- KUNIKANE, S. et al.** (1995). A comparative study on the application of membrane technology to the public water supply. *Journal of Membrane Science.*, n.102, p.149-154.
- LACAZE, O.** (1993). *Influence d'une destabilisation des eau usée par contact de boues sur la séparation liquide/solide.* Montpellier. D.E.A. Université de Montpellier II - França.
- LACOSTE, B.** (1992). *Étude d'un procédé de traitement des eaux usées sur membranes minérales par couplage microfiltration ou ultrafiltration tangentielle et systèmes biologiques en aérobiose..* Montpellier. 227p. Thèse (Doctorat). Université de Montpellier II - France.
- LANGLAIS, B. et al.** (1993). Microfiltration used a means of desinfection downstream: a bacterial treatment stage on fixed-bed bacteria. *Wat. Scs. Tech.*, v.27, n.7-8, p.19-27.
- LANGLAIS, B. et al.** (1992). Test on microfiltration as a tertiary treatment downstream of fixed bacteria filtration. *Wat. Scs. Tech.*, v.25, n.10, p.219-230.
- LANGLAIS, B.; DENIS, P. et FAIVRE, M.** (1992). La microfiltration, moyen de désinfection d'un effluent après traitement biologique. *L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances*, n.157, p.42-45.
- LAPOLLI, F. R. et al.** (1996). Tratamento de efluentes: uma abordagem utilizando biofiltração. In: V SEMINÁRIO DE HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DE BIOMASSA. Maringá, 1996.
- LAPOLLI, F. R. et al.** (1997). Municipal wastewater treatment: an application of membrane. In: THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM EUROMEMBRANE '97. Twente, 1997. *Book of abstracts.* p.142.
- LAZAROVA, V. and MANEN, J.** (1993). Advance in biofilm reactors ensuring effective biofilm activity control. In: ACTES DE LA 2^{ème} CONF. INTERNATIONALE (IAOW/GHTM/EWPCA/CFRP) - Les réacteurs à cultures fixées. Paris, 1993. p.411-420.
- LAZAROVA, V. and MANEN, J.** (1994). Advance in biofilm reactors ensuring effective biofilm activity control. *Water Science and Technology*, v.29, n.10-11, p.319-327.
- LEGERON, J. P.** (1993). Journée *Separatec*, Saint-Nazaire, Juin.
- LEGERON, J. P.** (1994). La biofiltration des eaux résiduaires. *L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances*, n.171, p.57-60.
- LERTPOCASOMBUT, K.** (1991). *Epuration carbonée par film biologique mince dans un réacteur à lit fluidisé triphasique..* Toulouse. Thèse (Doctorat). L'Institut National de Sciences Appliquées de Toulouse - France.

- LEVY, V. (1994) Le bioréacteur à membrane. In: INTERFILTRA-INTERMEMBRANE. Paris, 1994. *Recueil des Conférences*. p.323--326.
- LE TALLEC, X. and LESOUËF, A. Simple modelling of biological aerated filter. In: INTERNATIONAL SYPOSIUM ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY. Ostende, 1997. p.195-198.
- MADAENI, S. S.; FANE, A. G. and GROHMANN, G. S. (1995). Virus removal from water and wastewater using membranes. *Journal of Membrane Science*, n.102, p.65-75.
- METCALF and EDDY. (1991). *Wastewater Engineering - Treatment, Disposal, Reuse*. Third Edition. New York, McGraw-Hill.
- MOULIN, C. (1987). *L'ultrafiltration et son utilisation dans les traitement d'effluents industriels..* Montpellier. D.E.A (Rapport). Université des Sciences et Techniques du Languedoc - France.
- MULLER, E. B. et al. (1995). Aerobic domestic waste water treatment in a pilot plant with complete sludge retention by cross-flow filtration. *Wat. Res.*, v.29, n.4, p.1179-1189.
- OESTERHOLT, F. I. H. M. and BULT, B. A. (1993). Improving municipal waste water quality by effluent polishing: a pilot scale experiment at Winterswijk, the Netherlands. *Wat. Scs. Tech.*, v.27, n.5-6, p.277-286.
- OKADA, T. and OBA, O. (1994). Recycling of waste water from buildings by application of membrane technology. *Desalination*, n.98, p.335-341.
- PANUZZO, S. (1995). L'emploi des membranes séparatives dans le traitement des effluents huileux et solvants. *L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances*, n.181, p.42-46.
- PERSSON, K. M.; GEKAS, V.; TRÄGARDH, G. (1995). Study of membrane compaction and its influence on ultrafiltration water permeability. *Journal of Membrane Science*, v.100, p.155-162.
- PETRUS, J. C. C. (1997). *Preparação, modificação e caracterização de membranas assimétricas para clarificação de suco de frutas*. Campinas. 139p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- PILLAY, V. L.; TOWNSEND, B. and BUCKELEY, C. A. (1994). Improving the performance of anaerobic digester at wastewater treatment: the coupled crossflow microfiltration/digester process. *Wat. Scs. Tech.*, v.30, n.12, p.329-337.
- POUET, M. F. et GRASMICK, A. (1993). Combined electrocoagulation and flotation: a pretreatment for tangential flow microfiltration. In: EUROPEAN WATER FILTRATION CONGRESS. Ostende, 1993. *Proceedings*. v.3, p.27-37.
- POUET, M. F. et al. (1994). Tertiary treatment of urban wastewater by crossflow microfiltration. *Wat. Scs. Tech.*, v.30, n.4, p.133-139.

- POUET, M. F.** (1994). *Traitements physico-chimiques associés à une microfiltration d'eau usée urbaine*. Montpellier, 163p. Thèse (Doctorat). Université Montpellier II - France.
- PUJOL, R.; CANLER, J. P. and IWENA, A.** (1992). Biological aerated filters: an attractive and alternative biological process. *Wat. Scs. Tech.*, v.26, n.3-4, p.693-7021,.
- PUJOL, R.** (1990). L'épuration par biofiltration-Premiers constats. Étude interagences CEMAGREF, n.2, 51p.
- QUEMENEUR, F.; KERNOA, P. et JAOUEN, P.** (1994). Unité mobiles de purification d'eaux de surface (techniques conventionnelles-procédés à membranes). In: INTERFILTRA-INTERMEMBRANE. Paris, 1994. *Recueil des Conférences*. p.124-129.
- RAHMANI, H.** (1994). *Étude des processus de conversion des pollutions dans des réacteurs à biomasses fixées de type filtre immergé*. Toulouse. Thèse (Doctorat). L'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse - France.
- RAZY, A. F.** (1994). Ultrafiltration membrane separation for anaerobic wastewater treatment. *Wat. Scs. Tech.*, v.30, n.12, p.321-327.
- RESEAU NOVELECT - INNOVATION ENERGETIQUE ELECTRECITE.** (1993). *Les applications innovantes des techniques membranaires dans l'industrie*. 60p.
- ROGALLA, F. et al.** (1992). Minimising nuisances by covering compact sewage treatment plants. *Wat. Scs. Tech.*, v.25, n.4, p.363-374.
- ROQUES, H.** (1980). *Fondements théoriques du traitement biologique des eaux. Technique et Documentation*, Paris.
- RUMEAU, M. et al.** (1991). Les procédés à membranes dans le traitement d'eau. *Agen*, p. 13-29, juin.
- SCOTT, K. and HUGHES, R.** (1996). *Industrial membrane separation technology*. London, Blackie Academic & Professional, first edition.
- SCOTT, K.; ADHAMY, A.; ATTECK, W. and C. DAVIDSON.** (1994). Crossflow microfiltration of organic/water suspensions. *Wat. Res.*, v.28. n.1, p.137-145.
- SIMMS, K. M.; LIU, T. H. and ZAIDI, S. A.** (1995). Recent advances in the application of membrane technology to the treatment of produced water in Canada. *Water Treatment.*, n.10, p.135-144.
- SPINNEWYN, S.** (1997). *La filtration des suspensions biologiques*. Montpellier. Rapport de P.I.F.E. ISIM - Université de Montpellier II - França.
- TARDIEU, E.** (1997). Caractérisation du colmatage dans un bioréacteur à membrane recirculé appliqué au traitement d'eau résiduaire urbaine. Montpellier. 179p. Thèse (Doctorat). Université de Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc - France.

- TAVARES, C. R. G.** (1992). Tratamento aeróbio de efluentes em bio-reatores de leito fluidizado trifásico. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- TAZI-PAIN, A. et al.** (1994). Première installation de microfiltration MEMCOR pour la production d'eau potable. In: INTERFILTRA-INTERMEMBRANE. Paris, 1994. *Recueil des Conférences*. p.148-151.
- URASE, T.; YAMAMOTO, K. and OHGAKI, S.** (1993). Evaluation of virus removal in membrane separation processes using coliphage Q β . *Wat. Scs. Tech.*, v.28, n.7, p.9-15.
- VOLPINI, D. G.** (1994). *Optimisation de la préparation d'eau potable avec des membranes poreuses en présence de divers adjuvants*. Montpellier. 185p. Thèse (Doctorat). Université de Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc - France.
- WETHERN, M. and KATZARAS, W.** (1995) Reverse osmosis treatment of municipal sewage effluent for industrial reuse. *Desalination*, n.102, p.293-299.
- WISNIEWSKI, C.** (1996). *Étude du comportement de cultures mixtes en bioréacteur à membrane - cinétiques réactionnelles et filtrabilité*. Thèse (Doctorat). Montpellier. 174p. Université de Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc - France.
- YOKOMIZO, T.** (1994). Ultrafiltration membrane technology for regeneration of building wastewater for reuse. *Desalination*, n.98, p.319-326.

ANEXO A

ESTUDO: BIOFILTRAÇÃO

TABELA A.1 - Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,25m/h)

Amostra	Tempo (horas)	SST D (mg/L)	SST B (mg/L)	Eficiênc %	SSV D (mg/L)	SSV B (mg/L)	Eficiênc %
1	4,50	94	0	100,00	94	0	100,00
2	13,00	74	14	81,08	74	14	81,08
3	19,25	90	20	77,78	86	18	79,07
4	25,25	110	0	100,00	94	0	100,00
5	33,25	110	0	100,00	110	0	100,00
6	38,25	122	2	98,36	108	2	98,15
7	68,25	114	0	100,00	104	0	100,00
8	117,25	88	0	100,00	88	0	100,00
9	142,25	138	4	97,10	130	4	96,92
10	145,75	112	12	89,29	112	12	89,29
11	148,75	120	6	95,00	112	6	94,64
12	172,75	136	14	89,71	106	4	96,23
13	198,25	94	30	68,09	54	26	51,85
14	204,75	103	16	84,47	80	12	85,00
15	223,75	62	22	64,52	54	20	62,96
16	228,75	96	46	52,08	96	32	66,67
17	256,75	112	20	82,14	92	14	84,78
18	278,75	96	36	62,50	80	22	72,50
19	307,25	108	0	100,00	84	0	100,00
20	329,75	70	26	62,86	60	0	100,00
Média		102,45	13,40	85,25	90,90	9,30	87,96

TABELA A.2 - Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,25m/h)

Amostra	Tempo (horas)	Turb D (FTU)	Turb B (FTU)	Eficiênc %	DQOt D (mg/L)	DQOt B (mg/L)	Eficiênc %
1	4,50	131	26	80,15	198	0	100,00
2	13,00	103	18	82,52	270	97	64,07
3	19,25	114	13	88,60	292	27	90,75
4	25,25	140	22	84,29	329	36	89,06
5	33,25	131	21	83,97	309	33	89,32
6	38,25	182	13	92,86	412	32	92,23
7	68,25	153	7	95,42	383	33	91,38
8	117,25	125	10	92,00	267	95	64,42
9	142,25	172	29	83,14	445	95	78,65
10	145,75	184	38	79,35	394	79	79,95
11	148,75	161	34	78,88	374	85	77,27
12	172,75	161	34	78,88	374	85	77,27
13	198,25	145	47	67,59	333	93	72,07
14	204,75	160	51	68,13	405	96	76,30
15	223,75	117	59	49,57	275	122	55,64
16	228,75	152	54	64,47	398	105	73,62
17	256,75	130	14	89,23	267	33	87,64
18	278,75	95	8	91,58	266	22	91,73
19	307,25	135	30	77,78	297	65	78,11
20	329,75	96	15	84,38	214	48	77,57
Média		139,35	27,15	80,64	325,10	64,05	80,35

TABELA A.3 - Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,25m/h)

Amostra	Tempo (horas)	DQOs D (mg/L)	DQOs B (mg/L)	Eficiênc %	NA D (mg/L)	NA B (mg/L)	Eficiênc %
1	4,50	63	0	100,00	32,4	3,6	88,89
2	13,00	126	41	67,46	28,8	3,6	87,50
3	19,25	131	21	83,97	27,0	3,6	86,67
4	25,25	130	21	83,85	32,4	1,8	94,44
5	33,25	162	0	100,00	30,6	3,6	88,24
6	38,25	158	28	82,28	35,3	1,3	96,32
7	68,25	157	25	84,08	31,5	1,3	95,87
8	117,25	130	80	38,46	47,9	25,2	47,39
9	142,25	156	57	63,46	32,8	12,6	61,59
10	145,75	190	58	69,47	38,8	26,5	31,70
11	148,75	188	42	77,66	37,8	31,5	16,67
12	172,75	127	75	40,94	44,1	27,1	38,55
13	198,25	159	45	71,70	40,3	25,2	37,47
14	204,75	82	53	35,37	37,8	31,5	16,67
15	223,75	140	62	55,71	45,4	30,2	33,48
16	228,75	198	59	70,20	40,3	31,5	21,84
17	256,75	111	22	80,18	25,2	8,8	65,08
18	278,75	68	21	69,12	23,9	5,0	79,08
19	307,25	109	65	40,37	44,1	18,9	57,14
20	329,75	69	26	62,32	20,2	17,6	12,87
	Média	132,70	40,05	68,68	34,83	15,5	57,87

TABELA A.4 - Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,25m/h)

Amostra	Tempo (horas)	NO ₃ ⁻ B (mg/L)	NO ₂ ⁻ B (mg/L)	pH D	pH B
1	4,50	11,4	0,0	-	-
2	13,00	14,7	1,8	-	-
3	19,25	17,9	0,6	-	-
4	25,25	19,9	0,6	-	-
5	33,25	11,8	0,9	-	-
6	38,25	23,8	0,6	7,66	7,55
7	68,25	12,9	0,3	7,67	7,48
8	117,25	12,0	0,3	8,01	7,50
9	142,25	2,3	0,6	7,67	7,40
10	145,75	2,2	1,5	7,83	7,50
11	148,75	1,4	0,9	7,62	7,69
12	172,75	2,2	0,9	7,88	7,33
13	198,25	9,3	0,9	7,84	7,38
14	204,75	2,9	0,9	7,73	7,18
15	223,75	1,7	0,9	7,91	7,17
16	228,75	1,4	0,9	8,10	7,21
17	256,75	12,5	1,2	7,78	7,10
18	278,75	9,9	0,9	7,71	7,14
19	307,25	11,3	1,2	7,86	7,23
20	329,75	5,2	0,9	7,65	7,20
	Média	9,34	0,84	7,79	7,34

TABELA A.5 - Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,5m/h)

Amostra	Tempo (horas)	SST D (mg/L)	SST B (mg/L)	Eficiênc (%)	SSV D (mg/L)	SSV B (mg/L)	Eficiênc (%)
1	333,50	64	0	100,00	58	0	100,00
2	341,50	114	4	96,49	94	4	95,74
3	346,50	102	30	70,59	72	22	69,44
4	352,50	92	20	78,26	92	20	78,26
5	358,00	42	16	61,90	36	6	83,33
6	363,00	28	16	42,86	28	16	42,86
7	373,50	150	30	80,00	118	30	74,58
8	394,00	126	48	61,90	98	40	59,18
9	397,50	126	64	49,21	104	46	55,77
10	400,00	100	42	58,00	100	42	58,00
11	418,50	72	32	55,56	72	32	55,56
12	428,50	160	48	70,00	152	48	68,42
13	431,50	122	50	59,02	118	44	62,71
14	435,00	95	14	85,26	90	12	86,67
15	442,50	122	42	65,57	107	42	60,75
16	449,50	107	70	34,58	92	70	23,91
17	456,50	98	56	42,86	88	54	38,64
18	463,50	120	34	71,67	108	34	68,52
19	471,00	152	68	55,26	102	28	72,55
20	472,00	140	64	54,29	92	16	82,61
21	485,50	172	74	56,98	116	50	56,90
22	493,00	140	64	54,29	110	38	65,45
23	495,00	146	68	53,42	112	42	62,50
24	501,50	132	60	54,55	96	26	72,92
25	507,50	130	76	41,54	94	58	38,30
26	511,00	94	4	95,74	64	0	100,00
27	514,50	114	24	78,95	88	22	75,00
28	534,50	88	28	68,18	82	22	73,17
29	564,50	108	70	35,19	88	24	72,73
Média		112,28	41,93	63,18	92,10	30,62	67,40

TABELA A.6 - Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,5 m/h)

Amostra	Tempo (horas)	Turb D (FTU)	Turb B (FTU)	Eficiênc (%)	DQOt D (mg/L)	DQOt B (mg/L)	Eficiênc (%)
1	333,50	88	11	87,50	200	22	89,00
2	341,50	123	33	73,17	332	82	75,30
3	346,50	105	22	79,05	282	61	78,37
4	352,50	101	25	75,25	246	64	73,98
5	358,00	66	12	81,82	105	26	75,24
6	363,00	77	30	61,04	176	26	85,23
7	373,50	190	64	66,32	480	50	89,58
8	394,00	148	52	64,86	332	161	51,51
9	397,50	182	77	57,69	423	166	60,76
10	400,00	167	79	52,69	405	162	60,00
11	418,50	157	49	68,79	332	120	63,86
12	428,50	210	57	72,86	508	102	79,92
13	431,50	157	49	68,79	402	110	72,64
14	435,00	151	45	70,20	306	90	70,59
15	442,50	167	66	60,48	452	161	64,38
16	449,50	156	91	41,67	402	200	50,25
17	456,50	158	99	37,34	420	240	42,86
18	463,50	175	70	60,00	477	171	64,15
19	471,00	187	107	42,78	436	197	54,82
20	472,00	173	59	65,90	431	141	67,29
21	485,50	176	64	63,64	425	136	68,00
22	493,00	153	51	66,67	384	90	76,56
23	495,00	159	53	66,67	404	103	74,50
24	501,50	140	41	70,71	340	90	73,53
25	507,50	135	85	37,04	304	170	44,08
26	511,00	118	22	81,36	258	26	89,92
27	514,50	115	30	73,91	301	42	86,05
28	534,50	96	9	90,63	217	12	94,47
29	564,50	165	33	80,00	341	78	77,13
Média		144,66	51,21	66,17	349,00	106,86	70,83

TABELA A.7 - Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,5m/h)

Amostra	Tempo (horas)	DQOs D (mg/L)	DQOs B (mg/L)	Eficiênc (%)	NA D (mg/L)	NA B (mg/L)	Eficiênc (%)
1	333,50	104	18	82,69	16,2	0,0	100,00
2	341,50	154	55	64,29	25,2	12,6	50,00
3	346,50	143	41	71,33	41,4	21,6	47,83
4	352,50	150	49	67,33	32,4	23,4	27,78
5	358,00	43	18	58,14	16,2	1,8	88,89
6	363,00	79	25	68,35	32,4	14,4	55,56
7	373,50	225	70	68,89	41,6	29,0	30,29
8	394,00	151	90	40,40	42,8	25,2	41,12
9	397,50	187	88	52,94	37,8	35,3	6,61
10	400,00	159	76	52,20	46,6	29,0	37,77
11	418,50	137	82	40,15	41,6	34,0	18,27
12	428,50	226	46	79,65	42,8	34,0	20,56
13	431,50	235	84	64,26	42,8	40,3	5,84
14	435,00	206	50	75,73	45,4	31,5	30,62
15	442,50	236	110	53,39	54,2	40,3	25,65
16	449,50	225	130	42,22	47,9	47,9	0,00
17	456,50	237	142	40,08	40,3	40,3	0,00
18	463,50	282	116	58,87	40,3	40,3	0,00
19	471,00	210	102	51,43	47,9	44,1	7,93
20	472,00	222	73	67,12	37,8	35,3	6,61
21	485,50	207	61	70,53	44,1	40,3	8,57
22	493,00	196	48	75,51	44,1	35,2	20,00
23	495,00	204	77	62,25	44,1	37,8	14,29
24	501,50	154	70	54,55	37,8	35,3	6,61
25	507,50	149	48	67,79	44,1	37,8	14,29
26	511,00	105	8	92,38	26,5	18,9	28,68
27	514,50	117	14	88,03	25,2	18,9	25,00
28	534,50	75	8	89,33	27,7	18,9	31,77
29	564,50	144	60	58,33	44,1	12,6	71,43
Média		171,10	64,10	64,07	38,32	28,83	28,34

TABELA A.8 - Resultados experimentais obtidos no biofiltro (0,5m/h)

Amostra	Tempo (horas)	NO ₃ ⁻ B (mg/L)	NO ₂ ⁻ B (mg/L)	pH D	pH B
1	333,50	10,8	0,3	-	-
2	341,50	13,5	3,0	-	-
3	346,50	11,5	1,8	-	-
4	352,50	9,0	2,4	-	-
5	358,00	9,6	0,3	-	-
6	363,00	9,6	0,9	-	-
7	373,50	2,2	0,6	7,70	7,51
8	394,00	0,6	0,6	7,80	7,35
9	397,50	0,5	0,3	7,72	7,40
10	400,00	0,6	0,6	7,80	7,35
11	418,50	0,6	0,3	7,80	7,30
12	428,50	4,8	0,9	7,64	7,27
13	431,50	6,1	0,9	7,57	7,27
14	435,00	6,6	1,5	7,71	7,21
15	442,50	2,0	0,6	7,64	7,31
16	449,50	0,8	0,6	7,68	7,37
17	456,50	0,9	0,9	7,72	7,35
18	463,50	0,8	0,6	7,72	7,29
19	471,00	1,5	0,9	7,83	7,46
20	472,00	1,8	0,6	7,68	7,37
21	485,50	1,5	0,6	7,88	7,31
22	493,00	5,1	1,5	7,85	7,53
23	495,00	3,7	1,5	7,73	7,33
24	501,50	2,9	1,2	7,74	7,40
25	507,50	1,1	1,5	7,86	7,56
26	511,00	4,0	1,5	7,85	7,33
27	514,50	2,7	0,9	7,71	7,29
28	534,50	2,9	0,9	7,83	7,18
29	564,50	13,2	1,2	7,81	7,35
Média		4,51	0,90	7,75	7,35

TABELA A.9 - Resultados experimentais obtidos no biofiltro (1,0m/h)

Amostra	Tempo (horas)	SST D (mg/L)	SST B (mg/L)	Eficiênc (%)	SSV D (mg/L)	SSV B (mg/L)	Eficiênc (%)
1	570,00	148	36	75,68	124	32	74,19
2	578,50	108	24	77,78	78	12	84,62
3	583,00	134	50	62,69	126	50	60,32
4	588,50	102	44	56,86	68	44	35,29
5	593,00	80	34	57,50	80	34	57,50
6	599,00	158	98	37,97	120	74	38,33
7	605,50	180	82	54,44	138	56	59,42
8	614,50	154	98	36,36	120	94	21,67
9	619,50	146	24	83,56	138	24	82,61
10	624,50	98	44	55,10	50	16	68,00
11	633,00	120	58	51,67	72	36	50,00
12	640,00	118	66	44,07	70	26	62,86
13	649,00	128	86	32,81	102	52	49,02
14	654,00	110	50	54,55	78	18	76,92
15	658,00	140	60	57,14	112	44	60,71
16	691,50	78	70	10,26	78	70	10,26
17	697,50	104	48	53,85	92	42	54,35
Média		123,88	57,18	53,08	96,82	42,59	55,65

TABELA A.10 - Resultados experimentais obtidos no biofiltro (1,0m/h)

Amostra	Tempo (horas)	Turb D (FTU)	Turb B (FTU)	Eficiênc (%)	DQOtD (mg/L)	DQOtB (mg/L)	Eficiênc (%)
1	570,00	157	23	85,35	409	45	89,00
2	578,50	158	45	71,52	399	96	75,94
3	583,00	183	58	68,31	399	98	75,44
4	588,50	139	38	72,66	322	88	72,67
5	593,00	150	31	79,33	344	64	81,40
6	599,00	198	99	50,00	454	216	52,42
7	605,50	204	66	67,65	415	119	71,33
8	614,50	163	51	68,71	371	92	75,20
9	619,50	170	25	85,29	313	56	82,11
10	624,50	125	47	62,40	301	87	71,10
11	633,00	135	48	64,44	389	117	69,92
12	640,00	95	46	51,58	156	68	56,41
13	649,00	130	57	56,15	280	116	58,57
14	654,00	101	29	71,29	225	37	83,56
15	658,00	165	62	62,42	341	79	76,83
16	691,50	156	76	51,28	345	124	64,06
17	697,50	114	38	66,67	276	73	73,55
Média		149,59	49,35	66,77	337,59	92,65	72,32

TABELA A.11 - Resultados experimentais obtidos no biofiltro (1,0m/h)

Amostra	Tempo (horas)	DQOt D (mg/L)	DQOs B (mg/L)	Eficiênc (%)	NA D (mg/L)	NA B (mg/L)	Eficiênc (%)
1	570,00	177	19	89,27	48,6	21,6	55,56
2	578,50	212	53	75,00	14,4	5,4	62,50
3	583,00	183	51	72,13	10,8	3,6	66,67
4	588,50	155	69	55,48	10,8	7,2	33,33
5	593,00	161	64	60,25	10,8	7,2	33,33
6	599,00	238	117	50,84	45,4	37,8	16,74
7	605,50	192	66	65,63	52,9	47,9	9,45
8	614,50	195	49	74,87	32,6	28,7	11,96
9	619,50	119	53	55,46	44,1	31,5	28,57
10	624,50	147	54	63,27	37,8	26,5	29,89
11	633,00	186	63	66,13	37,8	30,2	20,11
12	640,00	61	45	26,23	17,6	16,4	6,82
13	649,00	128	85	33,59	25,2	25,2	0,00
14	654,00	95	10	89,47	35,3	21,4	39,38
15	658,00	111	23	79,28	35,3	31,5	10,76
16	691,50	200	54	73,00	37,8	37,8	0,00
17	697,50	158	41	74,05	37,8	30,2	20,11
Média		159,88	53,88	64,94	31,47	24,12	26,19

TABELA A.12 - Resultados experimentais obtidos no biofiltro (1,0m/h)

Amostra	Tempo (horas)	NO ₃ ⁻ B (mg/L)	NO ₂ ⁻ B (mg/L)	pH D	pH B
1	570,00	16,2	4,2		
2	578,50	11,4	3,3		
3	583,00	15,1	2,1		
4	588,50	10,8	2,0		
5	593,00	9,0	2,1		
6	599,00	1,3	0,6	7,58	7,42
7	605,50	2,1	0,3	7,64	7,45
8	614,50	2,0	0,6	7,61	7,23
9	619,50	3,7	1,2	7,70	7,19
10	624,50	2,1	1,2	7,82	7,50
11	633,00	2,3	0,9	7,80	7,54
12	640,00	0,9	0,6	7,71	7,46
13	649,00	1,0	0,6	7,86	7,74
14	654,00	4,7	0,9	7,80	7,23
15	658,00	2,6	0,9	7,80	7,37
16	691,50	5,3	0,9	7,92	7,32
17	697,50	4,9	1,2	7,87	7,35
Média		5,61	1,39	7,76	7,40

ANEXO B**ESTUDO: BIOFILTRAÇÃO / MICROFILTRAÇÃO
TANGENCIAL
Piloto A de Microfiltração**

TABELA B.1 - Resultados experimentais obtidos com a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação: 4,0 m/s; Data: 14/02/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	Qs (L/h)	P1 (Bar)	P2 (Bar)	T (°C)
0	1358,1	244,8	1,5 - 2,0	0,0 - 0,5	12
5	1232,5	252,0	"	"	12
10	1120,5	252,0	"	"	12
20	998,2	259,2	"	"	12
35	916,7	252,0	"	"	12
50	848,6	252,0	"	"	13
65	767,3	259,2	"	"	14
80	726,6	252,0	"	"	14
110	713,0	244,8	"	"	15
140	645,1	244,8	"	"	15
170	624,7	259,2	"	"	15
200	604,4	259,2	"	"	16
230	590,8	252,0	"	"	16

TABELA B.2: Resultados experimentais com a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V = 1,0$ m/h); Velocidade de recirculação=4,0 m/s; Data: 28/02/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	Qs (L/h)	P1 (Bar)	P2 (Bar)	T (°C)
0	448,2	280,8	1,5 - 2,0	0,0 - 0,5	14
10	227,5	280,8	"	"	14
15	200,3	266,4	"	"	15
30	159,6	273,6	"	"	16
60	159,6	273,6	"	"	18
90	157,9	288,6	"	"	20
105	156,2	288,0	"	"	21
120	156,2	288,0	"	"	22
135	156,2	288,0	"	"	22
150	156,2	288,0	"	"	22
180	156,2	273,6	"	"	23

TABELA B.3 - Resultados experimentais com a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B); ($V = 1,0$ m/h); Velocidade de recirculação: 4,0 m/s; Data: 28/02/96

Tempo (horas)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)	DQOt P (mg/L)	SST B (mg/L)	SSV B (mg/L)	TURB B (FTU)	TURB P (FTU)
0,00	67	26	1	70	26	39	1
1,75	48	28	2	20	20	36	2
3,25	48	34	14	64	22	33	14
4,50	46	24	0	36	24	33	0

TABELA B.4 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação: 4,0 m/s; Data: 13/02/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	QS L/h)	P1 (Bar)	P2 (Bar)	T (°C)
0	1616,2	252,0	1,5 -2,0	0,0 - 0,5	13
5	848,8	252,0	"	"	13
15	665,5	252,0	"	"	13
20	611,2	252,0	"	"	14
35	570,4	248,4	"	"	14
55	475,3	244,8	"	"	16
95	441,4	252,0	"	"	17
125	441,4	237,6	"	"	18
155	387,1	234,0	"	"	18
185	400,6	252,0	"	"	19
215	393,9	252,0	"	"	20

TABELA B.5 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=1,0\text{m/h}$); Velocidade de recirculação: 4,0m/s; Data: 22/02/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	Qs (L/h)	P1 (Bar)	P2 (Bar)	T (°C)
0	135,8	252,0	1,5 -2,0	0,0 - 0,5	10
30	101,9	244,8	"	"	13
45	96,8	273,6	"	"	13
60	95,1	252,0	"	"	14
90	91,7	266,4	"	"	10
120	84,9	252,0	"	"	11
180	84,9	252,0	"	"	13
270	84,9	244,8	"	"	15
300	81,5	288,0	"	"	15
330	81,5	273,6	"	"	15
360	81,5	273,6	"	"	16

TABELA B.6 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=1,0\text{m/h}$); Velocidade de recirculação: 4,0m/s; Data: 22/02/96

Tempo (horas)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)	DQOt P (mg/L)	SST B (mg/L)	SSV B (mg/L)	TURB B (FTU)	TURB P (FTU)
0,0	109	9	0	74	74	72	8
0,5	107	38	49	64	34	70	6
1,5	111	75	55	48	24	65	6
2,5	108	74	47	24	10	61	6
3,0	112	72	19	22	20	58	6

TABELA B.7 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação: 4,0m/s; Data: 03/04/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	Qs (L/h)	P1 (Bar)	P2 (Bar)	T (°C)
0	1028,8	218,2	1,5 -2,0	0,0 - 0,5	14
5	977,8	207,4	"	"	14
10	831,8	176,4	"	"	14
15	-	-	-	-	-
20	780,9	165,6	"	"	14
30	760,5	161,3	"	"	15
40	733,4	155,5	"	"	15
50	682,5	144,7	"	"	16
60	645,1	136,8	"	"	16
75	617,9	131,0	"	"	17
90	584,0	123,8	"	"	17
105	567,0	120,2	"	"	18
120	543,2	115,2	"	"	18
150	509,3	108,0	"	"	19
180	492,3	104,4	"	"	20
210	482,1	102,2	"	"	20
240	475,3	100,8	"	"	21

TABELA B.8 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) (0,5 m/h); Velocidade de recirculação: 4,0m/s; Data: 10/04/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	Qs (L/h)	P1 (Bar)	P2 (Bar)	T (°C)
0	370,1	288,0	1,5 -2,0	0,0 - 0,5	17
5	-	-	"	"	17
10	163,0	252,0	"	"	18
20	146,0	288,0	"	"	18
30	142,6	295,2	"	"	18
40	135,8	324,0	"	"	19
50	135,8	288,0	"	"	19
60	135,8	280,0	"	"	20
75	132,4	266,4	"	"	20
90	130,7	273,6	"	"	20
105	129,0	273,6	"	"	21
120	129,0	273,6	"	"	21
150	129,0	266,4	"	"	22
180	129,0	266,4	"	"	24
210	129,0	273,6	"	"	25

TABELA B.9 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro(B) ($V=0,5\text{m/h}$); Velocidade de recirculação: 4,0m/s; Data: 10/04/96

Tempo (h)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)	DQOt P (mg/L)	SST B (mg/L)	SSV B (mg/L)	TURB B (FTU)	TURB P (FTU)
0,33	104	50	40	60	60	52	7
0,67	103	75	43	60	58	54	6
1,25	98	73	46	64	60	54	7
3,00	97	74	46	72	60	52	7

TABELA B.10 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação: 4,0 m/s; Data: 02/04/96

Tempo (min)	Qp ($\text{L/m}^2\cdot\text{h}$)	Qs (L/h)	P1 (Bar)	P2 (Bar)	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	251,3	288,0	1,5 -2,0	0,0 - 0,5	15
5	224,1	288,0	"	"	15
10	217,3	252,0			15
20	191,8	266,4	"	"	16
30	181,6	266,4	"	"	16
40	174,8	259,2	"	"	16
50	-	-			-
60	168,1	252,0	"	"	17
75	156,2	273,6	"	"	18
95	134,5	280,8	"	"	18
105	152,8	273,6	"	"	18
120	149,4	273,6	"	"	19
150	147,7	273,6	"	"	20
180	144,3	273,6	"	"	21
240	140,9	273,6	"	"	22
300,00	139,2	266,4	"	"	24

TABELA B.11 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,5\text{m/h}$); Velocidade de recirculação: 4,0m/s; Data: 17/04/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	QS (L/h)	P1 (Bar)	P2 (Bar)	T (°C)
0	611,2	342,0	1,5 -2,0	0,0 - 0,5	17
5	210,5	342,0	"	"	17
10	180,0	342,0	"	"	17
20	159,6	324,0	"	"	19
30	156,2	331,2	"	"	19
40	152,8	331,2	"	"	20
50	152,8	324,0	"	"	20
60	149,4	324,0	"	"	20
75	146,0	324,0	"	"	21
90	146,0	316,8	"	"	21
105	146,0	295,2	"	"	22
120	-	-	-	-	-
150	144,3	295,2	"	"	23
180	144,3	295,2	"	"	23
210	144,3	295,2	"	"	24
240	144,3	295,2	"	"	25

TABELA B.12 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro ($V=0,5\text{m/h}$); Velocidade de recirculação: 4,0m/s; Data: 17/04/96

Tempo (horas)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)	DCOt P (mg/L)	SST B (mg/L)	SSV B (mg/L)	TURB B (FTU)	TURB P (FTU)
0,0	70	53	30	12	10	28	5
0,5	67	48	37	9	8	29	6
1,5	77	54	34	10	10	28	4
2,5	69	51	41	8	6	30	5

TABELA B.13 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25\text{m/h}$); Velocidade de recirculação: 4,0m/s; Data: 14/05/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	Qs (L/h)	P1 (Bar)	P2 (Bar)	T (°C)
0	577,2	259,2	1,5 -2,0	0,0 - 0,5	21
5	288,6	280,8	"	"	21
10	278,4	280,8	"	"	21
20	271,6	273,6	"	"	22
30	264,8	280,8	"	"	23
40	258,0	280,8	"	"	24
50	-	-	-	-	-
60	251,2	280,8	"	"	25
75	251,2	280,8	"	"	26
90	244,5	280,8	"	"	27
105	244,5	280,8	"	"	27
120,00	244,5	280,8	"	"	27
150,00	244,5	273,6	"	"	28
180,00	244,5	273,6	"	"	28
210,00	244,5	273,6	"	"	29

TABELA B.14 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25\text{ m/h}$); Velocidade de recirculação: 4,0m/s; Data: 14/05/96

Tempo (horas)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)	DQOt P (mg/L)	SST B (mg/L)	SSV B (mg/L)	SST P (mg/L)	TURB B (FTU)	TURB P (FTU)
0,0	55	28	26	32	20	0	59	6
0,5	50	32	26	28	20	0	59	3
1,5	48	30	27	26	16	0	59	3
3,5	48	30	26	26	14	0	59	2

TABELA B.15 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana $0,20 \mu\text{m}$ com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação: $4,0\text{m/s}$; Data: 22/05/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	QS (L/h)	P1 (Bar)	P2 (Bar)	T (°C)
0	967,7	324,0	1,5 -2,0	0,0 - 0,5	19,
5	763,9	324,0	"	"	19
10	672,3	288,0	"	"	19
20	509,3	324,0	"	"	19
30	448,9	300,6	"	"	19
40	434,6	309,6	"	"	19
50	407,4	316,8			20
60	387,1	309,6	"	"	20
75	373,5	309,6	"	"	22
90	353,1	309,6	"	"	23
105	346,3	309,6	"	"	23
120	339,5	309,6	"	"	23
150	339,5	302,4	"	"	23

TABELA B.16 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana $0,20 \mu\text{m}$ com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25\text{m/h}$); Velocidade de recirculação: $4,0\text{m/s}$; Data: 22/05/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	QS (L/h)	P1 (Bar)	P2 (Bar)	T (°C)
0	967,7	288,00	1,5 - 2,0	0,0 - 0,5	23
5	237,7	"	"	"	24
10	224,1	"	"	"	24
20	210,5	"	"	"	24
30	203,7	"	"	"	25
40	196,9	"	"	"	25
50	196,9	"	"	"	26
60	193,5	"	"	"	26
75	190,1	"	"	"	26
90	190,1	"	"	"	27
105	190,1	"	"	"	27
120	190,1	"	"	"	28
150	190,1	"	"	"	28
180	190,1	"	"	"	29
210	190,1	"	"	"	30

TABELA B.17 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação: 4,0m/s; Data: 23/05/96

Tempo (h)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)	DQOt P (mg/L)	SST B (mg/L)	SSV B (mg/L)	SST P (mg/L)	TURB B (FTU)	TURB P (FTU)
0,08	60	50	29	12	12	0	13	2
0,50	53	45	33	6	6	0	15	3
1,50	54	41	30	20	20	0	14	4
3,50	54	44	28	22	22	0	16	4

ANEXO C

**ESTUDO: BIOFILTRAÇÃO / MICROFILTRAÇÃO
TANGENCIAL**

Piloto B de Microfiltração (MEMBRALOX)

TABELA C.1 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação = 2,0 m/s; Pressão: 1 bar; Data: 20/11/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	2736
1	2648
2	2496
3	2300
4	2256
5	2016

TABELA C.2 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) (V= 0,25 m/h); Velocidade de recirculação=2,0 m/s); Pressão: 1 bar

Data: 20/11/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	552	6	42	51	96	53
5	204	6	41	51	96	53
30	180	6	41	51	96	53
60	150	6	40	51	96	53
90	144	5	35	51	96	53

TABELA C.3 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 20/11/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1584
2	1536
3	1320
4	1128
5	1104

TABELA C.4 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação= $2,0\text{m/s}$; Pressão= 1 bar

Data: 20/11/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	444	5	43	51	96	53
5	264	5	38	51	96	53
30	192	4	10	51	96	53
60	168	5	36	51	96	53
90	156	5	35	51	96	53

TABELA C.5 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação= $2,0\text{m/s}$; Pressão: 1 bar

Data: 20/11/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)
0	2520
1	2340
2	2232
3	2124
4	1980
5	1944

TABELA C.6 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão= 1 bar

Data: 20/11/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	480	6	35	51	96	53
5	228	6	35	51	96	53
30	144	4	39	51	96	53
60	132	4	24	51	96	53
90	120	3	41	51	96	53

TABELA C.7 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana $0,05 \mu\text{m}$ com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 22/11/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)
0	960
1	888
2	864
3	840
4	816
5	792

TABELA C.8 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana $0,05 \mu\text{m}$ com o efluente do biofiltro ($V = 0,25 \text{ m/h}$); Velocidade de recirculação=2,0 m/s); Pressão = 1 bar

Data: 22/11/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DCOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	300	7	44	59	122	62
5	132	7	40	59	122	62
30	120	5	45	59	122	62
60	108	6	38	59	122	62
90	96	5	31	59	122	62
120	96	4	35	59	122	62

TABELA C.9 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana $0,20 \mu\text{m}$ com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,5 \text{ m/h}$); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1 bar

Data: 29/11/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)	Tur P (FTU)	DCOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	432	7	60	64	136	61
5	144	6	54	64	136	61
30	108	5	51	64	136	61
60	108	4	52	64	136	61
90	108	4	49	64	136	61



TABELA C.10 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira; Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 05/12/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1368
1	1080
2	1056
3	1056
4	1056
5	1056

TABELA C.11- Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) (V=0,5 m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1 bar

Data: 05/12/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DCOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	348	8	33	51	96	48
5	180	8	32	51	96	48
30	156	7	34	51	96	48
60	156	6	25	51	96	48
90	150	7	36	51	96	48

TABELA C.12 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 06/12/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	2448
1	1620
2	1404
3	1152
4	972
5	936

TABELA C.13 - Resultados obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,5$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1 bar

Data: 06/12/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DDOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	444	7	30	41	90	70
5	312	7	30	41	90	70
30	168	6	31	41	90	70
60	144	6	27	41	90	70
90	132	6	22	41	90	70

TABELA C.14 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1 bar

Data: 06/12/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
0	1080
1	1008
2	900
3	900
4	900
5	900

TABELA C.15 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,5$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar

Data: 06/12/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	504	6	24	41	90	70
5	192	6	25	41	90	70
30	132	6	26	41	90	70
60	132	6	20	41	90	70
90	132	6	29	41	90	70

TABELA C.16 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=1,0$ m/h); Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão = 1 bar

Data: 11/12/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	312	9	60	47	87	54
5	180	9	58	47	87	54
30	144	9	70	47	87	54
60	144	8	68	47	87	54
90	144	7	65	47	87	54

TABELA C.17 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão = 1 bar

Data: 12/12/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
0	3960
1	3348
2	2988
3	2916
4	2880
5	2880

TABELA C.18 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=1,0$ m/h); Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão = 1 bar

Data: 12/12/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	720	7	63	47	87	54
5	204	7	54	47	87	54
30	192	6	34	47	87	54
60	168	5	62	47	87	54
90	156	6	60	47	87	54

TABELA C.19 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 13/12/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	3132
1	2556
2	2196
3	2088
4	1944
5	1908

TABELA C.20 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) (V=1,0 m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1 bar

Data: 13/12/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	588	8	33	48	117	63
5	264	7	35	48	117	63
30	180	7	35	48	117	63
60	156	6	33	48	117	63
90	156	6	37	48	117	63

TABELA C.21 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) (V=1,0m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1 bar

Data: 13/12/96

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	348	6	21	48	117	63
5	216	6	32	48	117	63
30	168	6	38	48	117	63
60	156	5	33	48	117	63
90	156	5	33	48	117	63

TABELA C.22 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1bar

Data: 17/12/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
0	3276
1	2736
2	2556
3	2484
4	2448
5	2376

TABELA C.23 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25\text{m}/\text{h}$); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar

Data: 17/12/96

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURBB (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	444	12	24	18	44	34
5	216	10	26	18	44	34
30	156	8	32	18	44	34
60	156	8	28	18	44	34
90	156	8	25	18	44	34

TABELA C.24 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 21/01/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
0	3348
1	2772
2	2484
3	2412
4	2376
5	2376

TABELA C.25 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1bar

Data: 21/01/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	576	6	9	14	38	21
5	216	6	12	14	38	21
30	156	4	0	14	38	21
60	156	5	0	14	38	21
90	156	3	11	14	38	21
120	156	3	20	14	38	21

TABELA C.26 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 22/01/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1728
1	1390
2	1296
3	1248
4	1200
5	1176
6	1152

TABELA C.27 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar

Data: 22/01/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	540	4	20	14	38	21
5	240	4	22	14	38	21
30	150	4	24	14	38	21
60	144	5	12	14	38	21
90	138	4	28	14	38	21
120	138	3	22	14	38	21

TABELA C.28 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 23/01/97

Tempo (min)	Q_p (L/m ² .h)
0	2268
1	2160
2	2124
3	2112
4	2088
5	2064
6	2052

TABELA C.29 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,5$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 23/01/97

Tempo (min)	Q_p (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	828	5	10	22	26	8
5	288	4	12	22	26	8
30	162	4	12	22	26	8
60	162	4	22	22	26	8
90	162	4	10	22	26	8
120	162	4	10	22	26	8

TABELA C.30 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 24/01/97

Tempo (min)	Q_p (L/m ² .h)
0	1080
1	936
2	936
3	900
4	900
5	864
6	864

TABELA C.31 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,5$ m/h); Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão = 1 bar

Data: 24/01/97

Tempo (min)	Qp ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	540	5	23	22	26	8
5	240	5	20	22	26	8
30	168	5	20	22	26	8
60	168	5	18	22	26	8
90	167	5	19	22	26	8
120	167	4	22	22	26	8

TABELA C.32 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão = 1 bar

Data: 29/01/97

Tempo (min)	Qp ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
0	2952
1	2880
2	2880
3	2880
4	2800
5	2808
6	2784

TABELA C.33 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm biofiltro (B) ($V=1,0$ m/h); Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão = 1 bar

Data: 29/01/97

Tempo (min)	Qp ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	612	5	21	29	37	10
5	228	4	20	29	37	10
30	162	3	18	29	37	10
60	162	2	16	29	37	10
90	162	3	16	29	37	10
120	162	4	18	29	37	10

TABELA C.34 - Resultados obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira; Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 30/01/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
0	1236
1	1188
2	1152
3	1152
4	1152
5	1152
6	1152

TABELA C.35 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) (\bar{V} =1,0 m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar

Data: 30/01/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	456	7	21	29	37	10
5	204	7	20	29	37	10
30	156	8	18	29	37	10
60	150	6	16	29	37	10
90	144	6	16	29	37	10
120	144	6	18	29	37	10

TABELA C.36 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira; Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 07/02/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
0	1368
1	1260
2	1188
3	1170
4	1152
5	1152
6	1152

TABELA C.37 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25\text{m/h}$); Velocidade de recirculação= $2,0\text{m/s}$; Pressão= 1 bar

Data: 07/02/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2\cdot\text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	456	9	21	30	64	52
5	234	7	16	30	64	52
30	168	5	14	30	64	52
60	162	4	21	30	64	52
90	162	5	0	30	64	52
120	162	5	10	30	64	52

TABELA C.38 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação= $2,0\text{m/s}$; Pressão = 1bar

Data: 08/02/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2\cdot\text{h}$)
0	2880
1	2700
2	2520
3	2448
4	2340
5	2304
6	2268

TABELA C.39 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25\text{m/h}$); Velocidade de recirculação= $2,0\text{m/s}$; Pressão= 1 bar

Data: 08/02/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2\cdot\text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	576	6	17	15	48	26
5	270	5	17	15	48	26
30	174	4	17	15	48	26
60	168	4	0	15	48	26
90	168	3	17	15	48	26
120	168	4	0	15	48	26

TABELA C.40 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 11/02/97

Tempo (min)	Q_p (L/m ² .h)
0	2880
1	2304
2	1980
3	1800
4	1764
5	1692
6	1656

TABELA C.41 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) (V=0,5 m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1 bar

Data: 11/02/97

Tempo (min)	Q_p (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	444	5	19	33	78	60
5	192	5	14	33	78	60
30	156	4	6	33	78	60
60	156	4	7	33	78	60
90	156	4	8	33	78	60
120	156	3	24	33	78	60

TABELA C.42 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 13/02/97

Tempo (min)	Q_p (L/m ² .h)
0	1152
1	1116
2	1080
3	1080
4	1080
5	990
6	990

TABELA C.43 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,5$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1 bar

Data: 13/02/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	324	6	16	28	44	26
5	192	5	14	28	44	26
30	156	5	12	28	44	26
60	156	4	14	28	44	26
90	156	4	16	28	44	26
120	150	4	12	28	44	26

TABELA C.44 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1bar

Data: 18/02/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)
0	1206
1	1116
2	1080
3	1044
4	1044
5	1044
6	1044

TABELA C.45 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com esgoto decantado (D); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 18/02/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB D (FTU)	DQOtD (mg/L)	DQOsD (mg/L)
0	426	9	79	117	259	122
5	180	9	77	117	259	122
30	132	8	77	117	259	122
60	132	7	74	117	259	122
90	132	7	67	117	259	122
120	132	5	57	117	259	122

TABELA C.46 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1bar

Data: 27/02/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
0	3096
1	1980
2	1440
3	1152
4	972
5	828
6	792

TABELA C.47 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=1,0$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1bar

Data: 27/02/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	312	11	75	79	177	105
5	168	11	60	79	177	105
30	120	10	32	79	177	105
60	120	11	69	79	177	105
90	120	10	67	79	177	105
120	120	11	68	79	177	105

TABELA C.48 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1bar

Data: 03/03/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
0	2808
1	2700
2	2376
3	2052
4	1872
5	1800
6	1728

TABELA C.49 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=1,0$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão = 1 bar

Data: 03/03/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	456	14	46	76	124	54
5	216	14	46	76	124	54
30	180	15	42	76	124	54
60	180	14	42	76	124	54
90	168	12	32	76	124	54
120	162	10	36	76	124	54

TABELA C.50 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 04/03/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)
0	1152
1	1008
2	1008
3	972
4	972
5	936
6	936

TABELA C.51 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=1,0$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar

Data: 04/03/97

Tempo (min)	Q_p ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	300	11	21	38	73	41
5	192	8	18	38	73	41
30	156	6	20	38	73	41
60	144	6	7	38	73	41
90	138	5	16	38	73	41
120	138	5	23	38	73	41

TABELA C.52 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 03/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	2880
1	2376
2	1944
3	1620
4	1512
5	1440
6	1368

TABELA C.53 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) (\bar{V} =0,25 m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar

Data: 03/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	380					
5	186					
30	168	6	20	30	53	30
60	168					
90	168					
120	168					

TABELA C.54 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 04/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1584
1	1512
2	1440
3	1368
4	1332
5	1314
6	1296

TABELA C.55 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão= 1 bar

Data: 04/04/97						
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	420					
5	240					
30	186	7	29	30	53	30
60	168					
90	168					
120	168					

TABELA C.56 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão = 1 bar

Data: 07/04/97	
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	3132
1	2592
2	2556
3	2448
4	2124
5	2016
6	1944
10	1800

TABELA C.57 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o permeado (P) obtido no ensaio de 03/04/97 sobre a membrana 0,20 μm ; Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão = 1 bar

Data: 07/04/97	
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1476
1	1332
2	1152
3	1080
4	1026
5	972
6	954
8	918
10	900
15	882

TABELA C.58 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 07/04/97	
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1620
1	1440
2	1404
3	1296
4	1224
5	1206
6	1188
8	1152

TABELA C.59 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o permeado (P) obtido no ensaio de 04/04/97 sobre a membrana 0,05 μm ; Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 07/04/97	
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1044
1	936
2	882
3	792
4	756
5	720
6	684
8	630
10	612
15	594

TABELA C.60 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 10/04/97	
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	3348
1	3240
2	3168
3	3060
4	2808
5	2736
6	2736

TABELA C.61 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar (após recircular 24 horas no piloto)

Data: 10/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	2520					
5	2160	1	23	17	53	34
10	2124					

Fosfato (B) = 11,20 mg/L em PO₄
 Fosfato (P) = 0,01 mg/L em PO₄

TABELA C.62 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 11/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1620
1	1512
2	1404
3	1296
4	1260
5	1224
6	1188

TABELA C.63 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar; (após recircular 14 horas no piloto)

Data: 04/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	1224					
5	1008					
10	936	3	31	32	86	50
30	684					

Fosfato (B) = 11,20 mg/L em PO₄
 Fosfato (P) = 0,15 mg/L em PO₄

TABELA C.64 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 09/04/97	
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	3960
1	3960
2	3960
3	3780
4	3744
5	3528
6	3492

TABELA C.65 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) (\bar{V} =0,25 m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar
(Dosagem de cloreto férrico = 200 mg/L)

Data: 09/04/97						
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	1608					
5	1344					
30	1310	1	8	17	53	34

Fosfato (B) = 10,48 mg/L em PO₄
Fosfato (P) = 0,58 mg/L em PO₄

TABELA C.66 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 10/04/97	
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	3348
1	3276
2	3222
3	3132
4	3132
5	3045
6	3060

TABELA C.67 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar; (após recircular 2 horas no piloto)

Data: 10/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	1872					
5	624					
10	816	5	26	32	86	50
30	768					

Fosfato (B) = 11,57 mg/L em PO₄
 Fosfato (P) = 2,93 mg/L em PO₄

TABELA C.68 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 11/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	3456
1	3528
2	3384
3	3132
4	3132
5	3060
6	3060

TABELA C.69 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar; (Dosagem de cloreto férrico = 50 mg/L e uma hora recirculando)

Data: 10/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	2160					
5	1440	5	25	36	78	53
10	1116					
30	828					

Fosfato (B) = 11,57 mg/L em PO₄
 Fosfato (P) = 0,32 mg/L em PO₄

TABELA C.70 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 11/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1296
1	1224
2	1188
3	1116
4	1044
5	1026
6	1026

TABELA C.71 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar; (após recircular 3 horas no piloto)

Data: 11/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	936					
5	468	4	47	34	86	63
10	312					
30	228					

Fosfato (B) = 11,20 mg/L em PO₄
 Fosfato (P) = 1,68 mg/L em PO₄

TABELA C.72 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 15/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	3240
1	3060
2	3060
3	2952
4	2916
5	2844
6	2736

TABELA C.73 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar; (Dosagem de cloreto férrico = 50 mg/L e com 1 hora de recirculação)

Data: 15/04/97

Tempo (min)	Qp ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	2052					
5	1152					
10	840	3	15	10	30	27
30	588					

Fosfato (B) = 11,07 mg/L em PO_4
 Fosfato (P) = 0,89 mg/L em PO_4

TABELA C.74 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 15/04/97

Tempo (min)	Qp ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)
0	3600
1	3588
2	3456
3	3348
4	3276
5	3096
6	2952

TABELA C.75 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar; (após recircular 16 horas no piloto)

Data: 15/04/97

Tempo (min)	Qp ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	2844					
5	2232					
10	2124	1	15	10	30	27
15	1548*					

Fosfato (B) = 11,07 mg/L em PO_4
 Fosfato (P) = 0,01 mg/L em PO_4 ; (* final do ensaio)

TABELA C.76 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 16/04/97	
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	3528
1	3456
2	3384
3	3312
4	3240
5	3168
6	3132

TABELA C.77 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar; (Dosagem de cloreto férrico = 100 mg/L e recirculando de 15 min.)

Data: 16/04/97						
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	2520					
5	1332	2	19	15	28	26
10	1080					
30						

Fosfato (B) = 9,61 mg/L em PO₄
 Fosfato (P) = 0,07 mg/L em PO₄

TABELA C.78 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 16/04/97	
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1800
1	1800
2	1800
3	1728
4	1620
5	1584
6	1512

TABELA C.79 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($\bar{V}=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar; (após recircular 16 horas no piloto)

Data: 16/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	1440					
5	1332					
10	1278	0	13	15	28	26
30	1134*					

Fosfato (B) = 9,61 mg/L em PO₄
 Fosfato (P) = 0,06 mg/L em PO₄ (* final do ensaio)

TABELA C.80 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 17/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	4032
1	3960
2	3816
3	3744
4	3744
5	3600
6	3528

TABELA C.81 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($\bar{V}=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar
 (Dosagem de cloreto férrico = 100 mg/L e de carvão ativado = 50 mg/L, recirculando 15 minutos no piloto)

Data: 17/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	3204					
5	1872					
10	1440	0	4	4	20	11
30						

Fosfato (B) = 9,99 mg/L em PO₄
 Fosfato (P) = 0,23 mg/L em PO₄

TABELA C.82 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 17/04/97	
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1460
1	1404
2	1404
3	1332
4	1296
5	1260
6	1260

TABELA C.83 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar
(Dosagem de hidróxido de cálcio = 200 mg/L e após recircular 14 horas no piloto)

Data: 17/04/97						
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	1260					
5	1080					
10	1044	1	8	4	20	11
30	792*					

Fosfato (B) = 9,99 mg/L em PO₄

Fosfato (P) = 0,29 mg/L em PO₄

* final do ensaio

TABELA C.84 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 22/04/97	
Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	3384
1	3348
2	3096
3	2952
4	2808
5	2736
6	2700

TABELA C.85 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar
(dosagem de cloreto férrico = 100 mg/L e após recircular 1 hora no piloto)

Data: 22/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	2196					
5	1620	2	23	15	22	21
10	1422					
30	1044*					

Fosfato (B) = 8,81 mg/L em PO₄
Fosfato (P) = 0,26 mg/L em PO₄; (* final do ensaio)

TABELA C.86 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 22/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1836
1	1800
2	1728
3	1692
4	1638
5	1584
6	1512

TABELA C.87 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar
(Dosagem de cloreto férrico = 20 mg/L e após recircular 14 horas no piloto)

Data: 04/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	1440					
5	1152	1,0	18	15	22	21
10	1008					
30	756					

Fosfato (B) = 8,60 mg/L em PO₄; Fosfato (P) = 0,03 mg/L em PO₄

TABELA C.88 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 29/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	3492
1	3456
2	3384
3	3312
4	3276
5	3204
6	3168

TABELA C.89 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) (\bar{V} =0,5 m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar
(Dosagem de cloreto férrico e após recircular 15 minutos no piloto)

Data: 29/04/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	2088					
5	1080					
10	864	3	-	25	50	33
30	720					

Fosfato (P) = 0,54 mg/L em PO₄

TABELA C.90 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2, 0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 08/05/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	2952
1	2844
2	2664
3	2520
4	2304
5	2160
6	2124

TABELA C.91 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão= 1 bar; (Sobrenadante do jar teste com dosagem de cloreto férrico = 150 mg/L e após decantação de 15 minutos)

Data: 08/05/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	1944					
5	1800					
10	1764	3	9	8	21	15
30	1760					

Fosfato (P) = $0,30$ mg/L em PO_4

TABELA C.92 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão = 1 bar

Data: 08/05/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	3816
1	3528
2	3240
3	3168
4	3150
5	3096
6	3060

TABELA C.93 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($V=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação= $2,0$ m/s; Pressão= 1 bar (sobrenadante do jar teste (dosagem de 200 mg/L de sulfato de alumínio) e após decantação de 15 minutos)

Data: 08/05/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	2520					
5	1944					
10	1728	3	11	7	57	30
30	1620					

Fosfato (B) = $10,10$ mg/L em PO_4
 Fosfato (P) = $0,01$ mg/L em PO_4

TABELA C.94 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 09/05/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	1260
1	1176
2	1224
3	1128
4	1188
5	1152
6	1116

TABELA C.95 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,05 μm com o efluente do biofiltro (B) (\bar{V} =0,25 m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar; (sobrenadante do jar teste (dosagem de 150 mg/L de cloreto férrico) e após uma decantação de 15 minutos)

Data: 09/05/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOtB (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	972					
5	756					
10	684	2	13	9	28	28
30	630					

TABELA C.96 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 21/05/97

Tempo (min)	Qp (L/m ² .h)
0	4104
1	3780
2	3600
3	3384
4	3132
5	3024
6	2952

TABELA C.97 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o efluente do biofiltro (B) ($\bar{V}=0,25$ m/h); Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar

Data: 21/05/97						
Tempo (min)	Q_p (L/m ² .h)	TURB P (FTU)	DQOt P (mg/L)	TURB B (FTU)	DQOt B (mg/L)	DQOs B (mg/L)
0	792					
5	312	6	18	7	27	21
10	276					
30	240					

Fosfato (P) = 9,25 mg/L em PO₄

TABELA C.98 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com água de torneira (AT); Velocidade de recirculação=2,0 m/s; Pressão = 1 bar

Data: 22/05/97	
Tempo (min)	Q_p (L/m ² .h)
0	4560
1	4104
2	4032
3	3456
4	3348
5	3240
6	3204

TABELA C.99 - Resultados experimentais obtidos sobre a membrana 0,20 μm com o permeado de 21/05/97; Velocidade de recirculação=2,0m/s; Pressão=1 bar

Data: 22/05/97	
Tempo (min)	Q_p (L/m ² .h)
0	1152
1	1116
2	1080
3	1080
4	1044
5	1044
6	1080
8	1080
10	1044
15	1116
20	1116

ANEXO D

ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

MALVERN MasterSizer SB.00 Master Mode 10 Mai 1996 3:06 pm

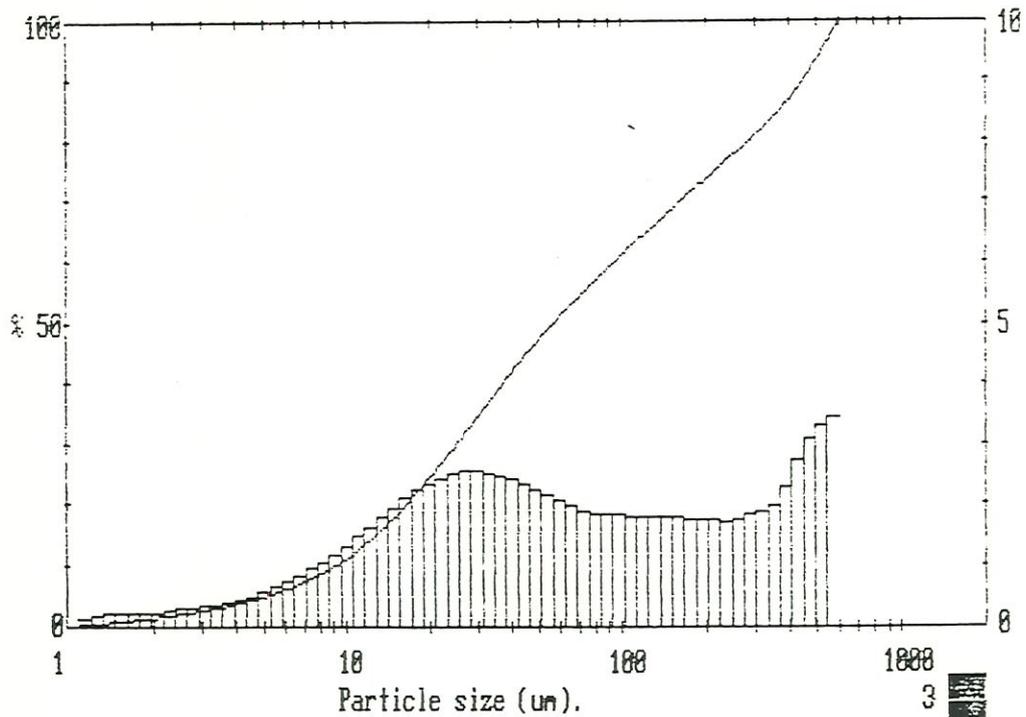
Upper	in	Lower	Under	Upper	in	Lower	Under	Upper	in	Lower	Under	Span
				124	3.7	101	61.4	11.6	2.8	3.45	10.6	7.89
				101	3.7	83.3	57.7	9.48	2.3	7.78	6.53	D(4.75)
				83.3	3.8	68.3	53.6	7.78	1.8	6.39	6.53	141.05µm
				68.3	4.1	58.1	49.6	6.39	1.4	5.24	5.1	
600	6	492	93	55.1	4.4	48.0	45.3	5.24	1.1	4.30	4.1	D(3.23)
492	6	404	88	45.0	4.8	37.8	40.6	4.30	0.9	3.53	3.2	19.24µm
404	4.1	323	79	37.8	5.0	31.0	35.2	3.53	0.7	2.93	2.9	
323	3.0	272	75	31.0	5.1	25.9	34.4	2.90	0.6	2.38	1.9	D(1.9)
272	3.0	224	75	25.9	4.9	20.9	25.5	2.38	0.5	1.95	1.4	444.90µm
224	3.0	183	75	20.9	4.6	17.1	20.9	1.95	0.4	1.60	1.0	
183	3.0	151	65.0	17.1	4.0	14.1	16.9	1.60	0.4	1.32	0.5	D(1.0)
151	3.6	124	65.0	14.1	3.6	11.6	13.4	1.32	0.5	0.50	0.0	9.06µm

Source =	:Sample	Beam length =	2.4 mm	Model indep	
Feed length =	300 mm	Residual =	0.933 %		
Presentation =	std	Obscuration =	0.3253	Volume Conc. =	0.1004%
		Value distribution		Sp.S.A	0.3118 g ² /cc.

7116 std lg588
Eau brute 1

00017755 00017801

MALVERN MasterSizer SB.00 Master Mode 10 Mai 1996 3:06 pm



7116 std lg588
Eau brute 1

00017755 00017801

FIGURA D.1 - Caracterização granulométrica: Esgoto Bruto

MALVERN MasterSizer SB.0C Master Mode 10 Mai 1996 3:59 pm

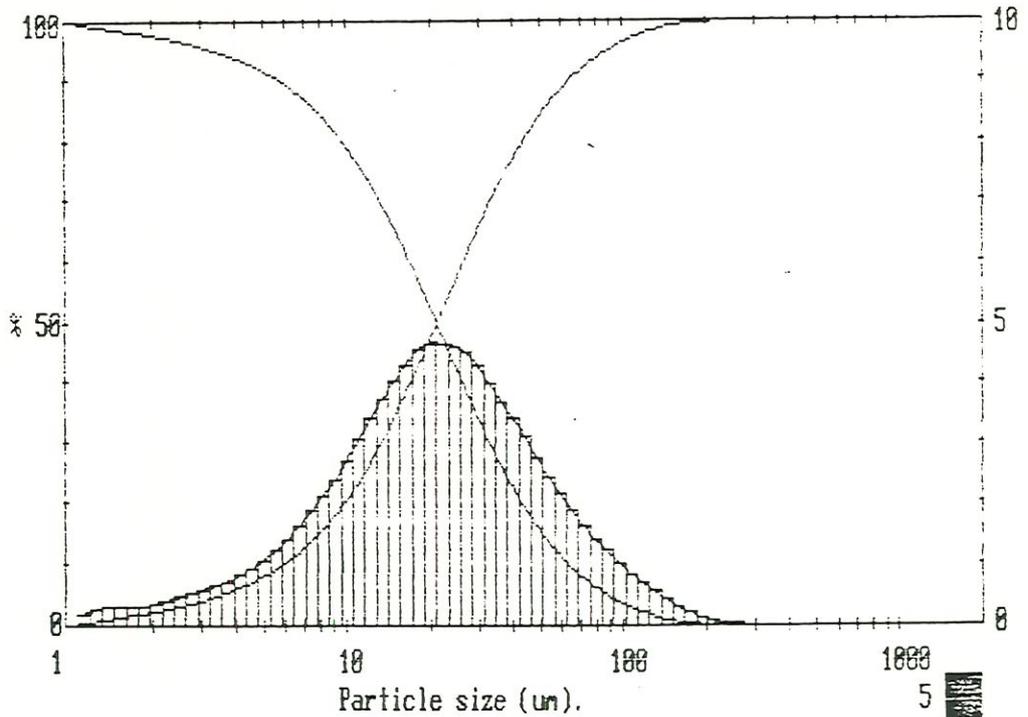
Upper	in	Lower	Under	Upper	in	Lower	Under	Upper	in	Lower	Under	Span
				124	1.6	101	95.6	11.6	5.7	9.46	19.3	2.75
				101	3.1	80	92.4	9.46	4.9	7.78	14.7	D14.31
				80	6.2	66	91.0	7.78	3.5	6.39	11.2	25.75µm
				66	12.4	56	87.2	6.39	2.7	5.24	8.6	D13.21
501	0.0	402	100	56	24.8	46	82.0	5.24	2.0	4.00	6.6	D12.21
402	0.0	404	100	46	49.6	37	75.5	4.00	1.5	3.53	5.0	11.54µm
404	0.0	333	100	37	77.0	31	67.8	3.53	1.2	3.16	4.0	D11.01
333	0.0	272	100	31	154.0	25	59.2	3.16	1.0	2.82	3.0	D10.01
272	0.1	224	95.9	25	308.0	20	49.7	2.82	0.8	1.95	2.0	63.77µm
224	0.2	183	93.7	20	616.0	17	40.4	1.95	0.6	1.60	1.4	D10.01
183	0.5	151	93.2	17	1232.0	14	32.1	1.60	0.6	1.32	0.8	D10.01
151	1.0	124	86.2	14	2464.0	11	25.0	1.32	0.6	0.50	0.0	5.67µm

Source =	:Sample	Beam length =	2.4 mm	Model indep	
Focal length =	300 mm	Residual =	0.873 %	Volume Conc. =	0.0597%
Presentation =	std	Obscuration =	0.3246	Sp.S.A	0.5200 µ²/cc.
		Volume distribution			

7116 std lgw588
Eau decantee 2

000017755 000017805

MALVERN MasterSizer SB.0C Master Mode 18 Mai 1996 3:59 pm



7116 std lgw588
Eau decantee 2

000017755 000017805

FIGURA D.2 - Caracterização granulométrica: Esgoto Decantado

MALVERN MasterSizer SB.00 Master Mode 10 Mai 1996 4:07 pm

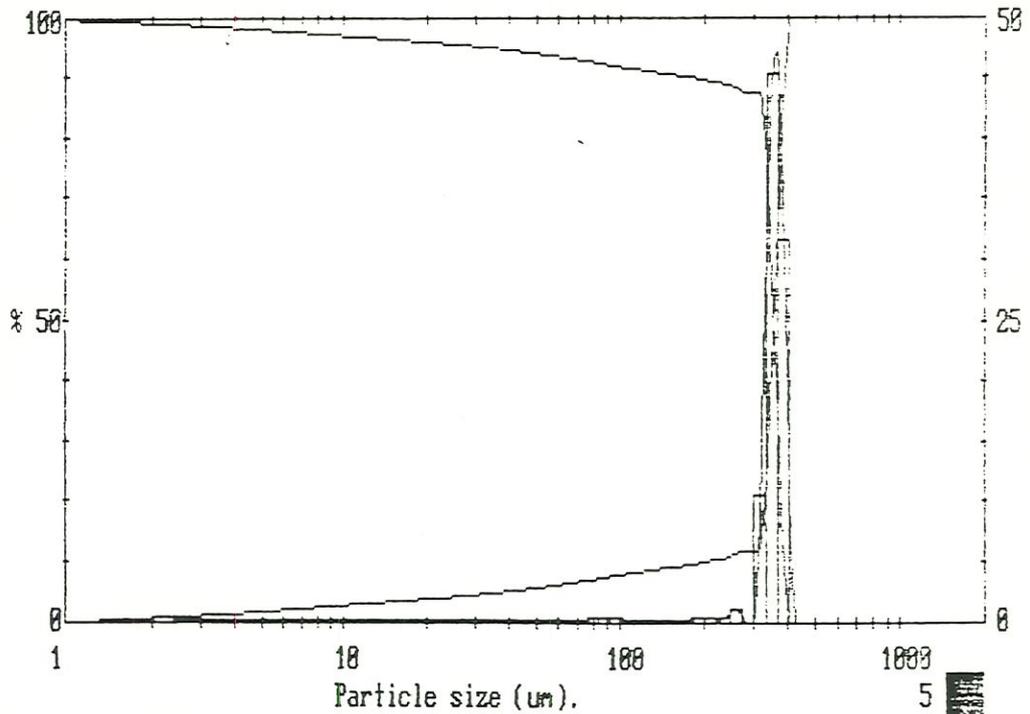
Upper	in	Lower	Under	Upper	in	Lower	Under	Upper	in	Lower	Under	Span
				124	0.6	101	8.1	11.6	0.3	9.46	2.7	0.54
				101	0.7	83.3	7.4	9.48	0.3	7.76	2.4	D14.31
				83.3	0.7	68.3	6.7	7.76	0.3	6.39	2.1	329.24µm
				68.3	0.6	55.1	6.1	6.39	0.3	5.04	1.8	D13.31
600	0.0	493	100	55.1	0.6	45.0	5.5	5.04	0.3	4.23	1.6	D13.31
493	0.0	404	100	45.0	0.6	37.6	5.0	4.23	0.3	3.50	1.4	67.40µm
404	77.5	333	22.5	37.6	0.4	31.0	4.6	3.50	0.3	2.93	1.3	D11.11
333	10.4	272	12.1	31.0	0.4	25.5	4.3	2.93	0.2	2.39	1.0	D11.11
272	1.6	227	10.6	25.5	0.3	20.9	3.9	2.39	0.2	1.93	0.9	D11.11
227	0.9	183	9.6	20.9	0.3	17.1	3.6	1.93	0.2	1.60	0.8	D11.11
183	0.6	151	8.7	17.1	0.3	14.1	3.3	1.60	0.2	1.32	0.7	D11.11
151	0.6	124	8.1	14.1	0.3	11.6	3.0	1.32	0.2	1.05	0.6	D11.11

Source =	:Sample	Beam length =	2.4 mm	Model indep
Focal length =	300 mm	Residual =	41.480 %	D11.11
Presentation =	std	Obscuration =	0.0357	329.24µm
		Volume distribution	Volume Conc. =	0.0335%
			Sp.S.A =	0.0833 m ² /cc.

7116 std lg-588
Eau filtrée 2

000017755 000017806

MALVERN MasterSizer SB.00 Master Mode 18 Mai 1996 4:87 pm



7116 std lg-588
Eau filtrée 2

000017755 000017806

FIGURA D.4 - Caracterização granulométrica: Efluente do Biofiltro (0,5 m/h)

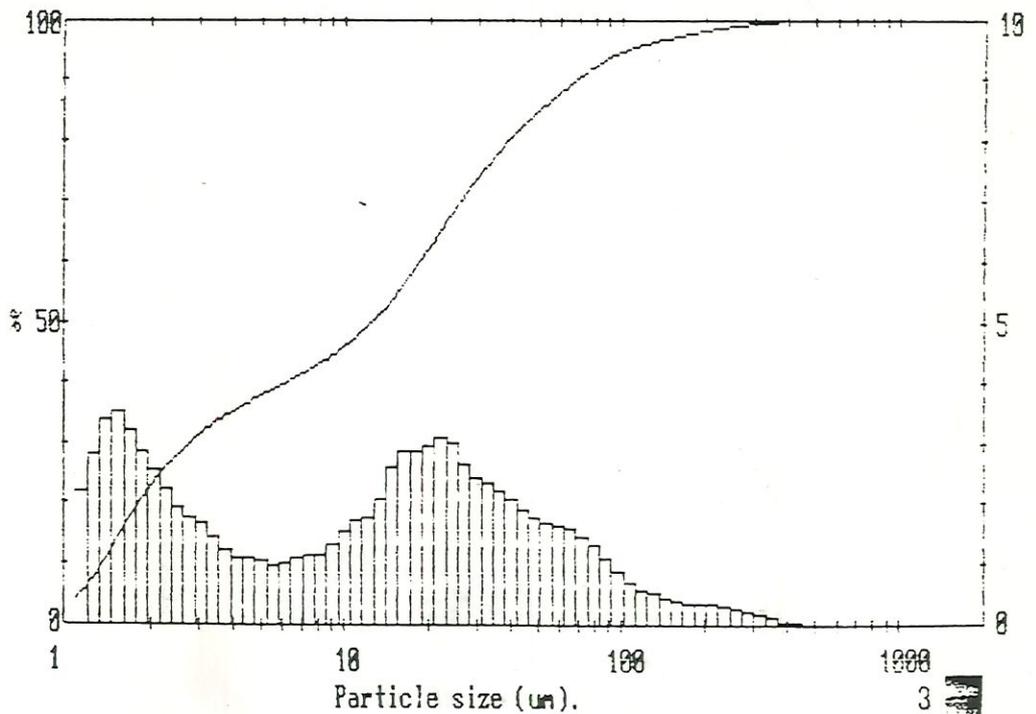
MALVERN MasterSizer SB.0C Master Mode 24 Mai 1996 3:03 pm

Upper		in Lower		Under		Upper		in Lower		Under		Span
				124	1.3	101	35.0	11.6	2.3	9.48	45.2	5.25
				101	2.0	83.3	33.0	9.48	2.5	7.78	42.0	D14,31
				83.3	3.3	69.3	30.0	7.78	3.5	6.39	40.0	27.86µm
				69.3	5.1	59.1	28.0	6.39	5.0	5.24	38.0	D12,21
500	0.0	492	100	59.1	7.4	46.0	25.0	5.24	7.0	4.30	36.0	3.53µm
492	0.0	404	100	46.0	11.6	37.8	23.0	4.30	10.0	3.53	34.0	
404	0.2	332	99.9	37.8	14.6	31.0	21.0	3.53	13.0	3.00	32.0	
332	0.4	272	99.9	31.0	19.1	25.5	19.0	3.00	17.0	2.72	30.0	D1v,0.91
272	0.6	224	99.7	25.5	25.5	20.9	17.0	2.72	23.0	1.95	28.0	67.51µm
224	0.7	183	99.0	20.9	34.1	17.1	14.0	1.95	31.0	1.60	26.0	D1v,0.11
183	0.8	151	97.2	17.1	43.8	14.1	11.6	1.60	40.0	1.32	24.0	1.35µm
151	1.0	124	95.3	14.1	55.5	11.6	9.48	1.32	50.0	0.50	0.0	
Source = :Sample				Beam length = 2.4 mm				Model indep				D1v,0.51 12.39µm
Social length = 300 mm				Residual = 2.610 %				Volume Conc. = 0.0197%				
Presentation = std				Obscuration = 0.3375				Volume distribution Sp.S.A 1.8382 µ²/cc.				

7116 std lgw588
FLAVIO E.F.

000017850

MALVERN MasterSizer SB.0C Master Mode 24 Mai 1996 3:33 pm



7116 std lgw588
FLAVIO E.F.

000017850

FIGURA D.5 - Caracterização granulométrica: Efluente do Biofiltro (0,25 m/h)