

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**FILTRAÇÃO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO COM
ESPONJAS DE POLIURETANO**

DALVA ISOLANI

Florianópolis
Setembro/2000

FILTRAÇÃO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO COM ESPONJAS DE POLIURETANO.

DALVA ISOLANI

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Tecnologias de Saneamento Ambiental.

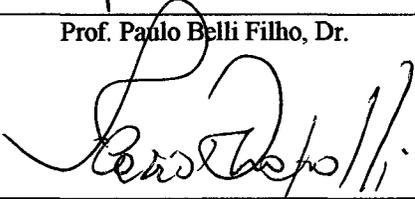
Aprovado por:



Prof. Antônio Edésio Jungles, Dr.



Prof. Paulo Belli Filho, Dr.



Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.



Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.
(Coordenador)



Prof. Mauricio Luiz Sens, Dr.
(Orientador)

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL
SETEMBRO/2000

"Os momentos mais esplêndidos da vida não são os chamados dias de êxito mas sim, aqueles dias em que, saindo do desânimo e do desespero, sentimos erguer-se dentro de nós um desafio: a vida e a promessa de futuras realizações."

Ao Luiz (in memoriam) e à Ruth, meus pais, que me deram a vida, a formação e o constante incentivo para estudar.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas e instituições contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa. A algumas delas expresso formalmente minha gratidão.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação – Mestrado em Engenharia Ambiental, pelo enriquecimento dos meus conhecimentos.

À Coordenadoria de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, pela oportunidade de realizar este curso.

À Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), por conceder suas instalações para o desenvolvimento desta pesquisa. Ao Eng. João José Bento de Souza, Gerente-Geral de Itajaí, pela oportunidade da realização deste trabalho, bem como seu apoio durante o Curso. Aos operadores da Estação de Tratamento de Água de Balneário de Camboriú, Bento João Eduardo e Pedro Leopoldo Gomes, pela colaboração durante a realização dos ensaios no filtro piloto.

À Empresa Trorion por fornecer o material filtrante necessário para a realização deste estudo.

Ao Laboratório Integrado do Meio Ambiente (LIMA), pelas instalações na realização de ensaios realizados, montagem do filtro-piloto e pelo grande auxílio por parte de seu funcionário Carlos.

ESPECIAIS:

Ao Professor Maurício Luiz Sens, orientador e amigo, pelo apoio durante o período desta pesquisa.

Ao Ramon Lucas Dalsasso, colega, pela orientação e sugestões para o término desta pesquisa.

Ao Hendrikus Klaas van Enck, amigo, pelo companheirismo, incentivo, apoio e compreensão, nos momentos em que minha presença era requerida.

À Leda Freitas Ribeiro, amiga, pelo apoio e colaboração na revisão deste trabalho.

À família, pelo apoio e compreensão durante toda minha trajetória.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	3
2 - OBJETIVOS	3
2.1 – OBJETIVO PRINCIPAL	3
2.2 – OBJETIVO ESPECÍFICO	3
CAPÍTULO III	4
3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1 – HISTÓRICO	4
3.2 QUALIDADE E TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO	6
3.2.1 Alcalinidade, Acidez e pH	6
3.2.2 Dureza	7
3.2.3 Cloreto e Sulfatos	7
3.2.4 Ferro e Manganês	8
3.2.5 Sólidos Totais e Condutividade	9
3.2.6 Temperatura	9
3.2.7 Aspectos Microbiológicos	9
3.2.8 Turbidez	10
3.2.9 Cor Aparente e Cor Verdadeira	10
3.3 PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS COLOIDAIIS E SUBSTÂNCIAS HÚMICAS	12
3.3.1 Estabilidade das Partículas Coloidais	13
3.3.1.1 Estabilidade Eletrostática	13
3.3.1.2 Estabilização Estérica	15
3.4 COAGULAÇÃO – FLOCULAÇÃO	16
3.4.1 Considerações Gerais	16
3.4.2 Mecanismos de Coagulação	17
3.4.2.1 Sulfato de Alumínio	20

3.5 FILTRAÇÃO	24
3.5.1 Classificação	24
3.5.2 Filtração em Meio Granular de Areia e Filtração em um Meio Poroso não Granular com Esponjas	30
3.5.2.1 Filtração em um Meio Granular de Areia	30
3.5.2.1.1 Filtração Direta	30
3.5.2.2 Filtração Rápida Convencional	33
3.5.2.3 Filtração em um Meio Poroso não Granular com Esponjas	33
3.5.3 Lavagem de um Meio Granular e de um Meio Poroso não Granular (Esponja)	34
3.5.3.1 Meio Granular	34
3.5.3.2 Meio Poroso não Granular	35
3.5.4 Critérios Recentes de Projetos	35
3.5.5 Mecanismos de Filtração	39
3.5.5.1 Mecanismos de Transporte	39
3.5.5.1.1 Teoria Fenomenológica	41
3.5.5.1.2 Teoria das Trajetórias	48
3.5.5.2 Velocidade na Filtração	52
3.5.5.3 Perda de Carga no Leito Filtrante	54
3.5.5.3.1 Perda de Carga num Leito Granular.....	55
3.5.5.3.2 Perda de Carga num Meio Poroso não Granular	58
 CAPÍTULO IV	 59
4 - MATERIAIS E MÉTODOS	59
 4.1 PILOTO DO FILTRO COM LEITO DE ESPONJAS DE POLIURETANO	 59
4.1.1 Detalhes do Filtro Piloto	62
4.2 QUALIDADE DA ÁGUA DECANTADA (AFLUENTE DO FILTRO)	64
4.2.1 Turbidez e Matéria em Suspensão	64
4.3 ESTRUTURA POROSA – MEIO FILTRANTE	65
4.3.1 Estrutura Molecular da Esponja de Poliuretano	
4.3.2 Características da Esponja (Tamanho das Partículas Retidas)	65

4.4 METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE	66
4.5 OPERAÇÃO DO PILOTO	73
4.5.1 Alimentação do Piloto	75
4.5.2 A Lavagem	75
4.6 DAS ANÁLISES	76
4.6.1 Turbidez	77
4.6.2 Cor	77
CAPÍTULO V	79
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
5.1 FILTRAÇÃO COM ESPONJAS LIMPAS	79
5.1.1 Determinação das Perdas de Carga no Filtro Limpo	79
5.1.2 Ensaio de Filtração	81
5.1.2.1 Filtração para as diversas Compressões nas Esponjas Cinza, Rosa e Preta	83
5.1.2.1.1 Compressão de 80%	83
5.1.2.1.2 Compressão de 70%	84
5.1.2.1.3 Compressão de 50%	85
5.1.3 Avaliação da Esponja Cinza	86
5.1.4 Avaliação da Esponja Rosa	87
5.1.5 Avaliação da Esponja Preta	89
5.2 AVALIAÇÃO ENTRE AS ESPONJAS CINZA, ROSA E PRETA	90
CAPÍTULO VI	93
6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	93
6.1 CONCLUSÕES	93
6.2 RECOMENDAÇÕES	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

ANEXOS	99
Anexo 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NO FILTRO PILOTO COM A ESPONJA CINZA PARA VERIFICAR A EFICIÊNCIA DA FILTRAÇÃO	100
Anexo 2 – RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DAS TABELAS INDIVIDUAIS PARA A ESCOLHA DOS PARÂMETROS TURBIDEZ REMANESCENTE (NTU) EM FUNÇÃO DA CARREIRA DE FILTRAÇÃO (H)	140
Anexo 3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS EM FUNÇÃO DOS CRITÉRIOS UTILIZADOS PARA AVALIAR A EFICIÊNCIA DA FILTRAÇÃO: COR APARENTE MENOR OU IGUAL A 5 uC TURBIDEZ IGUAL OU MENOR QUE 1 NTU	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração esquemática da dupla camada elétrica	15
Figura 2 – Diagrama de coagulação utilizando sulfato de alumínio	23
Figura 3 – Classificação dos diversos tipos de filtração	26
Figura 4 - Região de separação dos processos de filtração	28
Figura 5 – Espectro de filtração	29
Figura 6 – Mecanismos de transporte na filtração com ação de profundidade	40
Figura 7 – Elemento de volume do meio filtrante	41
Figura 8 – Variação da concentração de partículas ao longo da espessura de um meio filtrante uniforme no início da filtração	45
Figura 9 – Variação do coeficiente λ com depósito específico α	46
Figura 10 – Desenho esquemático da instalação do piloto	61
Figura 11 – Fotografia do piloto na ETA	62
Figura 12 – Fotografia do piloto instalado em bancada	62
Figura 13 – Esquema do projeto do piloto	63
Figura 13 – Fotografia do decantador da ETA	64
de Balneário Camboriú evidenciando a ascensão de flocos	66
Figura 15 – Representação da equação de poliuretano	68
Figura 16 – Fotografia das esponjas utilizadas como meio filtrante	69
Figura 17 – Esquema de comparação entre diversos processos de filtração e a esponja utilizada	70
Figura 18 – Fotografia da esponja preta vista em escala real e no microscópio eletrônico com aumento 100x	71
Figura 19 – Fotografia da esponja cinza vista em escala real e no microscópio eletrônico com aumento 100x	72
Figura 20 – Fotografia da esponja rosa vista em escala real e no microscópio eletrônico com aumento 100x	75
Figura 21 – Esquema de correlação dos tamanhos das esponjas em função das compressões e porosidades	76
Figura 22 - Fotografia da lavagem do filtro com esponja preta	80
Figura 23 – Perda de carga no filtro limpo em função da taxa de filtração e da compressão para a esponja cinza	80
Figura 24 – Perda de carga no filtro limpo em função da taxa de filtração e da compressão para a esponja rosa	81
Figura 25 - Perda de carga no filtro limpo em função da taxa de filtração e da compressão para a esponja preta	
Figura 26 - Turbidez remanescente em função da carreira de filtração para uma compressão de 80% e taxa superficial de filtração (192 m ³ /m ³ . dia)	83
Figura 27 – Turbidez remanescente em função da carreira de filtração para uma compressão de 80% e taxa superficial de filtração (218 m ³ /m ³ . dia)	84

Figura 28 – Turbidez remanescente em função da carreira de filtração para uma compressão de 80% e taxa superficial de filtração ($212 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$)	85
Figura 29 – Cor aparente remanescente (uC), turbidez remanescente (NTU), duração da carreira de filtração (h) e taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$) em função da compressão para esponja cinza	86
Figura 30 – Cor aparente remanescente (uC), turbidez remanescente (NTU), duração da carreira de filtração (h) e taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$) em função da compressão para esponja rosa	87
Figura 31 – Cor aparente remanescente (uC), turbidez remanescente (NTU), duração da carreira de filtração (h) e taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$) em função da compressão para esponja preta	89
Figura 32 – Cor aparente remanescente (uC), turbidez remanescente (NTU), compressão (%) em função das esponjas cinza, rosa e preta	91
Figura 33 – Compressão (%), perda de carga (cm), taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$) e duração da carreira (h) em função das esponjas cinza, rosa e preta	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – ESPECIFICAÇÃO DAS ESPONJAS DESTINADAS AO MERCADO DE FILTRAÇÃO INDUSTRIAL DENOMINADA FILTRAL	68
Tabela 2 – MASSA ESPECÍFICA, MASSA APARENTE E POROSIDADE DOS MATERIAIS FILTRANTES	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – CLASSIFICAÇÃO DAS MEMBRANAS E SUAS APLICAÇÕES	27
Quadro 2 – PRINCIPAIS MÉTODOS DE LAVAGEM	34

LISTA DE SÍMBOLOS

STD	Sólidos totais dissolvidos
A°	Ângstrons
THM	Trihalometanos
pH	Potencial hidrogênionico
ETE	Estação de tratamento de esgoto
μ	Viscosidade absoluta
ETA	Estação de tratamento de água
C_{of}	Concentração de partículas no afluente
C_{ef}	Concentração de partículas no efluente
Δf	Área
ΔL_f	Altura
ΔC	Variação da concentração da suspensão
MA	Depósito específico absoluto
V_{∞}	Velocidade de aproximação
L	Espessura do meio filtrante
∂	Depósito específico efetivo
βf	Inverso do fator de compactação
ε	Porosidade
λ	Coefficiente de filtração
C	Concentração
K_{ac}	Coefficiente de acumulação
K_{ar}	Coefficiente devido ao arrasto
αu	Capacidade teórica do filtro
J	Gradiente de perda de carga no meio filtrante
Kh_0	Condutividade hidráulica do meio filtrante limpo
Kh	Condutividade hidráulica do meio filtrante em um tempo qualquer
Pe	Número de Peclet
Dif	Coefficiente de difusão ao movimento Browniano
Kb	Constante de Boltzaman
T	Temperatura
dp	Diâmetro da partícula
Dc	Diâmetro do coletor
V_{∞}	Velocidade de aproximação
ρ_e	Massa específica da partícula
ρ_a	Massa específica da água
g	Aceleração da gravidade

η_r	Eficiência global de coleta
α_p	Coefficiente de aderência entre partícula da suspensão e partículas previamente coletadas
η_p	Taxa de partículas coletadas no coletor simples com partículas aderidas
N_c	Número de partículas aderidas ao coletor
Q	Vazão afluente ao filtro
A	Área superficial do leito filtrante
P	Porosidade média do meio filtrante
V_v	Volume de vazios
V_g	Volume dos grãos do meio filtrante
NB	Norma Brasileira
V	Velocidade aparente da água no meio poroso
K	Coefficiente de proporcionalidade
J	Declividade da linha de carga
hf	Perda de carga no leito filtrante
K	Coefficiente de permeabilidade
P_0	Porosidade do leito de areia
V	Volume real de areia
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
NTU	Unidade de turbidez
uC	Unidade de cor
ME	Massa específica verdadeira
P_1	Massa do frasco, mais água destilada, mais amostra em gramas
P_2	Massa do frasco, mais água destilada em gramas
m_1	Massa da amostra em gramas
MA	Massa específica aparente
m	Massa da esponja em gramas
V	Volume da esponja em cm^3
LIMA	Laboratório Integrado de Meio Ambiente

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o estudo de um meio filtrante para possibilitar a construção de unidades de filtração mais compactas e leves, verificando o desempenho, a eficiência e a eficácia de um novo material filtrante de esponjas de poliuretano. Para realizar a pesquisa foi construído um filtro-piloto em acrílico com 30 cm de altura e 12 cm de diâmetro, composto por duas placas perfuradas de alumínio, entre as quais ficaram inseridos o meio filtrante e um eixo central com rosca o qual permite a compressão e descompressão das esponjas. Três variedades de esponjas de poliuretano foram utilizadas, rosa, cinza e preta com 95,25%, 45,43% e 97,65% de porosidade, respectivamente, com compressões de 50, 70 e 80%. O filtro-piloto foi instalado ao lado do decantador da Estação de Tratamento de Água da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), no Balneário Camboriú. A água que alimentou o filtro-piloto foi a água decantada da ETA e a água de lavagem, a água tratada distribuída pela CASAN. O piloto trabalhou com uma carreira média de filtração de oito horas e taxas de filtração na ordem de 251 m³/m².dia. Foram analisadas as condições hidráulicas e a eficiência do filtro-piloto através de ensaios de cor aparente, turbidez, perda de carga e a taxa de filtração. Com base no trabalho concluiu-se que a esponja cinza apresentou maior eficiência para a filtração de 70% de compressão, com valores satisfatórios para uma porosidade bem elevada. Constatou-se também que o filtro manteve uma turbidez constante com alterações na água decantada, o que prova que além de sua utilização na filtração, possui propriedades que permitem utilizá-lo em polimento final no tratamento de águas para fins potáveis.

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the applications of a new filter medium for lightweight compact water drainage installations. Special attention was paid to the performance, efficiency and efficacy of the new polyurethane sponge filter medium. To carry out this research, a pilot filter was built of acrylic, 30 cm in height and 12 cm in diameter. The filter was inserted between two perforated aluminum plates with a screw in the central axis to enable compression and decompression. Three varieties of polyurethane sponges were used, pink, gray and black, with porosity of 95.25%, 43.43% and 97.65% and compressions of 50, 70 and 80% respectively. The pilot was installed next to the settler at the Water Treatment Plant of the *Companhia Catarinense de Águas e Saneamento* (Santa Catarina Water and Sanitation Company) (CASAN) in the town of Balneário Camboriú (SC). The water which was used to feed the pilot came from the main settler of the drinking water plant and for washing, the filtered drinking water was used. The pilot worked with an average filtration load of eight hours and filtration levels in the order of $251 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$. The hydraulic conditions and efficiency of the pilot filter were analyzed through the color, turbidity, filterbed resistance and rate of filtration. Based on this work, it was concluded that the gray colored sponge was the most efficient, with a compression of 70%, and satisfactory results for very high porosity. It was also noted that the filter maintained constant turbidity with considerable alterations in the settled water which proves that besides its use for filtration, the system can also be recommended for the final polishing in the treatment of drinking water.

CAPÍTULO I

1 - INTRODUÇÃO

A filtração é uma operação que consiste na remoção de partículas suspensas, coloidais e de microrganismos presentes na água que escoam através de um meio poroso.

A filtração, na maioria dos casos, precede as operações de coagulação, floculação, decantação, sendo uma técnica de tratamento corretamente aplicada nos sistemas de tratamento de água.

A operação é realizada comumente com leitos de areia e/ou carvão antracitoso. Esses materiais, cuja eficiência não é mais contestada, são de emprego difícil nos casos de unidades de potabilizações móveis. Estudos realizados com novas formas de materiais, tais como telas, feltros e esponjas, mostraram ser promissores em tratamento de água e de ar. Em 1990 Le Cloirec e Baudu estudaram a aplicação de uma esponja de poliuretano impregnada de carvão ativado para o tratamento do ar. Em 1991 Sens, Azou e Martim utilizaram a mesma esponja em filtração de água para fins de potabilização. Dando continuidade aos estudos, em 1992, Sens, Martin e a Bectra International S.A. desenvolveram um projeto para uma estação transportável de tratamento de água para fins militares, ocasião em que utilizaram esponja de poliuretano impregnada de carvão ativado na etapa da filtração.

A procura de uma nova técnica para o emprego em estações de tratamento de água compacta e/ou transportáveis, induziu ao estudo da filtração com esponjas de poliuretano. Esse uso possibilitará uma

construção leve, compacta e com facilidades de limpeza do meio filtrante. Também implicará redução do consumo de água para sua lavagem.

Os trabalhos anteriores com esponja de poliuretano impregnada de carvão ativado, desenvolvidos na França por (SENS; AZOU; MARTIN, 1991), apresentaram resultados insatisfatórios. A impregnação do carvão ativado apresentou pequenos rendimentos de eliminação dos micropoluentes através da adsorção, levando à utilização somente de esponjas virgens a fim de obter uma maior eficiência no processo de filtração. Assim, este trabalho é uma continuidade desses estudos com a recomendação de se utilizar esponjas virgens em virtude do alto custo do carvão ativado.

Para a realização desta pesquisa foi projetado e construído um filtro-piloto instalado junto à ETA (Estação de Tratamento de Água) no Município de Balneário Camboriú. A água de alimentação do piloto foi a água previamente coagulada/floculada e decantada, coletada em um dos três decantadores do referido sistema.

CAPÍTULO II

2 - OBJETIVOS

2.1 – OBJETIVO PRINCIPAL

Estudo de alternativas de tratamento de águas de abastecimento através de novos meios filtrantes, quais sejam, as esponjas de poliuretano.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Verificar a eficiência de filtração através das esponjas de poliuretano com densidades e compressões diferentes;
- b) Avaliar o efeito das condições hidráulicas na eficiência da filtração;
- c) Verificar a viabilidade de implantar o sistema de filtração em situações de calamidades públicas e situações de emergência;
- d) Avaliar o sistema como unidades compactas e leves.

CAPÍTULO III

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 - HISTÓRICO

Sendo a água um elemento essencial à vida na terra, pode-se considerar que sua utilização para consumo humano constitui o seu uso mais nobre. A existência de fontes de água com características de potabilidade aceitável, tanto no passado como atualmente, tem sido determinante para o desenvolvimento das sociedades humanas, e sua falta, no futuro, poderá ser um fator limitante do crescimento econômico e social das sociedades modernas.

Preocupações de produção de água própria para consumo humano podem ser encontradas em referências antigas. VIEIRA (1997) relata que um texto médico apócrifo, datado de 2000 a.C., indica como obter água potável fazendo-se fervê-la ao fogo, aquecendo-a ao sol, introduzindo-lhe um ferro em brasa ou filtrando-a através de um leito de areia.

O sistema de distribuição de água na Roma antiga já era bastante desenvolvido e seu estudo revela uma sensibilidade enorme de proteção da saúde pública. Estimativas realizadas para o período do império consideram que tratavam 13 m³/s de água para uma população superior a um milhão de habitantes, no segundo século d.C.

Depois da invasão bárbara e o declínio natural provocado pela queda do Império Romano (Idade Média), houve uma grande perda dos sistemas construídos, reaparecendo depois de um milênio, no Renascimento.

Com a Revolução Industrial e o afluxo maciço das populações rurais aos centros urbanos industrializados, criou-se a necessidade de construção de sistemas complexos de abastecimento de água e de drenagem de esgotos, uma vez que a falta de saneamento básico vinha ocasionando problemas sérios de saúde pública. Determinou-se, à época, uma atenção especial à qualidade das águas de abastecimento por parte dos serviços públicos.

Nos meados do século XIX, com o surto de cólera em Londres, surge um dos primeiros estudos epidemiológicos relacionados com a água de abastecimento.

No início do século XX foram desenvolvidos métodos de desinfecção da água com o objetivo de eliminar microrganismos e, em particular, os agentes patogênicos. Assim, de 1904 a 1909, na Inglaterra e nos Estados Unidos, foi introduzida a prática sistemática de desinfecção por cloração nos sistemas de abastecimento público.

Na década de setenta, os conceitos de projetos de tratamento de água para abastecimento público eram determinados predominantemente por políticas de produção de água isenta de turbidez e de microrganismos patogênicos, e quimicamente estável. O tratamento convencional consistia numa seqüência de operações e processos que geralmente incluía pré-cloração, coagulação, sedimentação, filtração rápida em filtros de areia e cloração residual.

Com a crescente industrialização, urbanização e utilização intensiva de produtos químicos na agricultura, tem-se observado, por parte da população, uma rejeição aos poluentes que, em quantidade e diversidade progressivas, vêm contaminando as águas naturais, colocando, conseqüentemente, maiores dificuldades no seu tratamento. Se a essas dificuldades se acrescentar a produção de subprodutos da cloração, potencialmente cancerígenos, estende-se facilmente os enormes esforços verificados na década de setenta, na investigação e desenvolvimento de esquemas de tratamento de desinfecção alternativos com o objetivo de eliminar aqueles subprodutos. Foram realizados métodos de oxidação baseados na ozonização e na aplicação de dióxido de cloro.

No final dos anos oitenta, as estações de tratamento de água foram confrontadas, por um lado, com novos problemas relacionados com a presença de xenobióticos (pesticidas e solventes) e outros compostos orgânicos, e, por outro lado, com padrões de qualidade mais exigentes, impostos pelos governos e organizações internacionais.

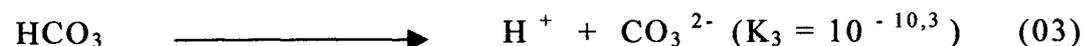
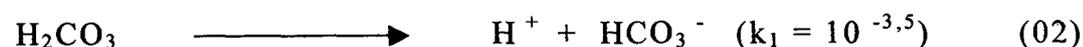
Novas operações e processos de tratamento de água, por exemplo, filtração com carvão ativado, desinfecção por ultravioleta e utilização de membranas (ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa) são objetos de investigação e aplicação nos dias atuais.

Dentro das condicionantes sócioeconômicas de cada comunidade, a melhor estratégia de tratamento será certamente determinada a partir da combinação de métodos convencionais com processos avançados, tendo como objetivo minimizar efeitos secundários e garantir a observância de padrões de qualidade que, seguramente, apresentarão graus de exigência cada vez maiores.

3.2 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO

3.2.1 - Alcalinidade, Acidez e pH

A alcalinidade pode ser entendida como a capacidade da água em neutralizar ácidos, e a acidez como a de neutralizar bases. A alcalinidade e a acidez de soluções aquosas baseiam-se, geralmente, no sistema do ácido carbônico, que é um ácido diprótico fraco e que possui três pontos de equivalência, sendo que suas principais reações com $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, são:



A alcalinidade é importante porque influi consideravelmente na coagulação química, sendo que os principais coagulantes primários utilizados em nosso país são o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, que são doadores de prótons em solução. Logo, se a alcalinidade da água for baixa, a coagulação eficiente poderá ocorrer com a adição de um alcalinizante para ajuste do pH mas, se a alcalinidade e o pH forem relativamente altos, provavelmente o sulfato de alumínio não será indicado.

A acidez depende do pH, pois é devida ao CO_2 , que estará presente somente para valores de pH inferiores a 8,3 e superiores a 4,4; pois, abaixo desse valor a acidez decorre da existência de ácidos fortes, que não costumam estar presentes nas águas.

Uma água pode apresentar uma ou várias faixas de valores de pH, para as quais ocorre uma coagulação-floculação eficiente, ocasionando a remoção de cor e turbidez.

3.2.2 - Dureza

O conceito de dureza é definido como sendo a soma de cátions polivalentes presentes na água e expressa em termos de uma quantidade equivalente de CaCO_3 , evidenciando-se os cátions de cálcio, magnésio, estrôncio, íons de ferro e de manganês. A dureza pode ser classificada em função dos cátions (cálcio e magnésio), ou dos ânions (carbonatos e não-carbonatos).

3.2.3 - Cloretos e Sulfatos

Sais dissolvidos, como cloretos, sulfatos e outros em menor quantidade caracterizam os sólidos totais dissolvidos. Eles podem interferir na coagulação. A presença de cloretos também pode indicar alguma forma de poluição, sendo que no Brasil, nas regiões próximas ao litoral, as águas

apresentam por vezes excessiva quantidade de cloretos, sem que essa contaminação seja provocada pelo ser humano. Teores elevados de sulfatos causam efeitos laxativos mais acentuados que os outros sais.

3.2.4 – Ferro e Manganês

São encontradas com grande facilidade em várias regiões do Brasil águas com teores de ferro e manganês. Segundo AZEVEDO (1976), teores elevados de ferro são detectados com maior frequência nos seguintes casos:

- a) águas subterrâneas, agressivas (pH baixo), ricas em CO_2 e sem oxigênio dissolvido, sob a forma de bicarbonato ferroso dissolvido;
- b) águas superficiais, com matéria orgânica, e frequentemente em estado coloidal;
- c) águas poluídas por determinados resíduos industriais ou por atividades de mineração.

Teores excessivos de ferro e manganês podem apresentar vários inconvenientes, tais como manchas em tecidos, em utensílios e aparelhos sanitários; sabor desagradável; interferência nos processos industriais (fabricação de cerveja, papéis, tinturarias); causar depósitos e incrustações; possibilitar o desenvolvimento de bactérias ferruginosas nocivas, tais como a Chrenotrix.

Geralmente o manganês está associado ao ferro, sendo que sob o ponto de vista sanitário e em concentrações comumente encontradas não apresentam efeitos adversos à saúde. Podem, no entanto, atribuir gosto levemente metálico à água. A remoção desse metal é mais complexa que a do ferro, pois a formação do precipitado (MnO_2) ocorre para valores de pH relativamente altos (geralmente, superior a oito), o que poderá dificultar a coagulação (DI BERNARDO, 1990).

3.2.5 - Sólidos Totais e Condutividade

De acordo com DI BERNARDO (1990), valores elevados de sólidos totais dissolvidos (STD) aumentam a solubilidade dos precipitados Al(OH)_{3p} e Fe(OH)_{3p} , influenciam na cinética da coagulação e afetam a formação e precipitação do carbonato de cálcio. A força iônica da solução está relacionada com o teor de STD em virtude da presença de sódio, magnésio, cloreto, sulfato, carbonato e bicarbonato. Águas com valores de força iônica muito diferentes apresentam características de coagulação diferentes, mesmo que os demais parâmetros de qualidade sejam semelhantes.

3.2.6 - Temperatura

A temperatura influencia diretamente na remoção da turbidez quando se utilizam coagulantes com íons metálicos. A eficiência de remoção diminui com temperaturas baixas.

3.2.7 - Aspectos Microbiológicos

Vários são os problemas de saúde pública que estão relacionados à presença de microrganismos nas fontes de abastecimento. Segundo BRANCO (1978), microrganismos como vírus e bactérias constituem um perigo sanitário, pois através deles podem ser transmitidas a poliomielite, a hepatite infecciosa e outras doenças. A presença de algas pode causar sérios problemas nas estações de tratamento de água, pois determinadas espécies causam gosto e odor na água, outras podem obstruir facilmente as unidades de filtração. A carga negativa e o tamanho dos organismos, normalmente, quando presentes na água afetam a coagulação. Bactérias e algas possuem dimensões variáveis, de 10^2 até 10^6 Å° (Ângstrons), e

possuem carga superficial negativa. Água filtrada com turbidez inferior a 1,0 UT (unidade de turbidez) apresenta maiores probabilidades de não conter boa parte dos microrganismos patogênicos, e permite uma desinfecção final mais efetiva (DI BERNARDO, 1990).

3.2.8 - Turbidez

A turbidez na água bruta é ocasionada principalmente pela presença de materiais em suspensão, como partículas maiores, facilmente removíveis ou em suspensão coloidal, de difícil remoção, proveniente da erosão do solo e, em alguns casos, oriunda de crescimento bacteriano e pela presença de algas. Nas águas brutas, geralmente os organismos patogênicos costumam estar ligados às partículas responsáveis pela turbidez. Desta forma, quando se realiza a remoção da turbidez está-se removendo os organismos. Quando a eficiência na remoção da turbidez for baixa, pode propiciar a passagem de microrganismos pela etapa da desinfecção sem a eliminação dos mesmos.

3.2.9 - Cor Aparente e Cor Verdadeira

A presença de matéria orgânica em águas pode ser proveniente de várias fontes. Os compostos orgânicos naturais nas águas são oriundos da degradação de plantas e animais e são denominados de substâncias húmicas. No passado, a medida da cor era feita apenas por motivo estético, porém, com a descoberta dessas substâncias que são precursoras de formação de trihalometanos (THM), se a desinfecção for feita com cloro livre, a quantificação da cor passa a ser muito importante.

Atualmente, pelo método da comparação visual, geralmente utilizado por meio de aparelhos que dispõem de discos padronizados, obtém-se a cor aparente, devido à interferência de partículas coloidais e suspensas, além de microrganismos. Quando a medida da cor é feita com o sobrenadante da

amostra de água, após centrifugação a 3500 rpm durante trinta minutos, obtém-se a cor verdadeira.

As substâncias húmicas são constituídas de uma mistura de compostos de natureza química diversa, com ácidos amorfos predominantemente aromáticos e hidrofílicos, com cadeias de massa molecular entre 10^4 e 10^5 g. As dimensões das moléculas de substâncias húmicas variam com o pH e o grau de polimerização, entre 3,5 e 10 nm, sendo que a cor medida depende do pH da amostra.

As substâncias húmicas são compostas geralmente de:

- a) ácidos húmicos: solúveis em meio alcalino (insolúveis em ácido);
- b) ácidos fúlvicos: solúveis em meios alcalinos e ácido;
- c) ácidos himatomelânicos: solúveis em meio alcalino e em álcool (insolúveis em ácido);
- d) húmina: resíduo resultante da separação dos ácidos, insolúvel nos meios ácidos e alcalinos.

A análise das substâncias húmicas por espectroscopia revelou que tais compostos podem apresentar grupos funcionais (carboxílicos, fenólicos, alcoólicos, quenônios, metoxílicos, carbonílicos, etc.) e grupos aromáticos.

A cor na água pode também ser proveniente de outros compostos, como águas contendo ferro e/ou manganês ou de águas eutróficas. Nesses casos, a cor é acentuada pela presença de clorofila e matéria xântica colorida, ou ainda pelo uso de corantes utilizados pelas indústrias têxteis, compostos metálicos ou de pigmentos naturais que não são removidos através das ETEs. Águas coloridas são normalmente alvo de reclamações, notadamente por parte dos consumidores. Além disso, podem propiciar a formação de compostos organoclorados quando sua cor for verdadeira, com a presença de ácidos húmicos ou fúlvicos e passarem por uma pré-cloração em seu tratamento.

3.3 - PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS COLOIDAIIS E SUBSTÂNCIAS HÚMICAS

Segundo DI BERNARDO (1990), substâncias húmicas possuem grande facilidade de se combinar com os metais, sendo que a natureza da associação não é ainda bem compreendida. A formação de complexos entre os grupos funcionais das substâncias húmicas e os hidróxidos metálicos é originada pela adsorção dessas substâncias à superfície dos hidróxidos metálicos, ocorrendo a estabilização em suspensão. Essa formação parece ocasionar as formas de ligações que interferem na coagulação e sedimentação.

As partículas coloidais são classificadas pelos seus tamanhos e variam de 1,0 nm a 1,0 µm, sendo que alguns autores utilizam a faixa até 10 µm. No meio aquático encontram-se as dispersões coloidais na forma de emulsões (dispersão líquido-líquido) e suspensões (dispersão sólido-líquido). Os sistemas coloidais podem ser classificados em estáveis e instáveis com a condição de permanência ou não dessa estabilidade. Os colóides estáveis (reversíveis) incluem moléculas de detergente (micelas), proteínas, amidos e alguns polímeros de cadeia grande. Os colóides instáveis (irreversíveis), argilas, óxidos metálicos e microrganismos.

A estabilidade depende da resultante final das forças de atração e repulsão que agem entre as partículas coloidais. As forças de atração (forças de Van der Waals) são causadas pela interação de partículas dipolares permanentes ou induzidas, enquanto as forças de repulsão são fornecidas pelo Potencial Zeta. Propriedades dos colóides que influem na coagulação são, respectivamente: a hidrofobia, a hidrofilia e a mobilidade eletroforética. A hidrofobia caracteriza os colóides hidrófobos por atrair para sua superfície um número muito grande de moléculas de água que constituem uma barreira, impedindo sua união. A hidrofilia impede os colóides de atrair moléculas de água para sua superfície. Nos sistemas hidrófilos, as partículas reagem quimicamente com a água e com os coagulantes metálicos, enquanto nos sistemas hidrófobos não há intervenção da água na reação. Portanto, a coagulação apresenta mais

características físicas do que químicas. A mobilidade eletroforética, resultante do fenômeno da eletroforese, é o movimento de migração pelo qual as partículas de argila coloidal passaram para um dos pólos elétricos criados no interior de uma dispersão coloidal, onde foram colocados dois eletrodos, com passagem de corrente elétrica.

3.3.1 - Estabilidade das Partículas Coloidais

A estabilidade das partículas apresenta-se de duas formas: estabilidade eletrostática e estérica, sendo que para a condição de estabilidade são considerados os aspectos estrutura da interface sólido-líquido e as forças entre duas interfaces, quando próximas de si.

3.3.1.1 - Estabilidade Eletrostática

Na água, a maior parte das partículas e moléculas de substâncias húmicas possuem superfície carregada eletricamente, decorrente de três processos:

- a) grupos presentes na superfície sólida que podem, ao reagir com a água, receber ou doar prótons;
- b) grupos superficiais podem reagir na água com outros solutos além dos prótons, considerando-se a sílica como um óxido representativo;
- c) imperfeições na estrutura da partícula responsável pela parcela substancial da carga das argilas minerais.

Em virtude dos processos citados, por meio dos quais os colóides se apresentam com carga de superfície negativa, ocorre um balanço com íons de carga contrária presentes na água, por isso, o sistema coloidal não apresenta carga elétrica líquida.

A figura 1, abaixo, representa uma partícula coloidal negativa com uma nuvem de íons ao seu redor. Sendo a superfície da partícula negativa, há um acúmulo de íons positivos na região da interface formando juntamente com a carga negativa da partícula, a **Dupla Camada Elétrica ou Camada Compacta**. Íons negativos aproximam-se da camada compacta atraindo íons positivos, formando a **Camada Difusa**, que engloba a primeira. Logo, tem-se uma concentração elevada de íons positivos próximos à superfície do colóide, também chamada de **Camada Stern**, a partir da qual se forma a camada difusa, em que a concentração de íons é menor. O potencial elétrico criado pela presença do colóide na água diminui com a distância, a partir da superfície desse colóide que é máximo e é denominado **Potencial de Nernst**. Segundo Stern, citado por DI BERNARDO (1993), existe uma distância mínima entre a superfície do colóide e os íons de carga contrária (positivos), em razão da qual o potencial elétrico decresce linearmente; em seguida, a diminuição resulta exponencial, passando pela fronteira entre a camada compacta e a difusa, local onde o potencial elétrico é denominado de **Potencial Zeta**, estando associado à aplicação da diferença de potencial em uma amostra de água contendo colóides negativos de tal forma que uma certa porção do meio, em torno da partícula, caminha junto com esta em direção ao eletrodo positivo, caracterizando o **Plano de Cisalhamento**.

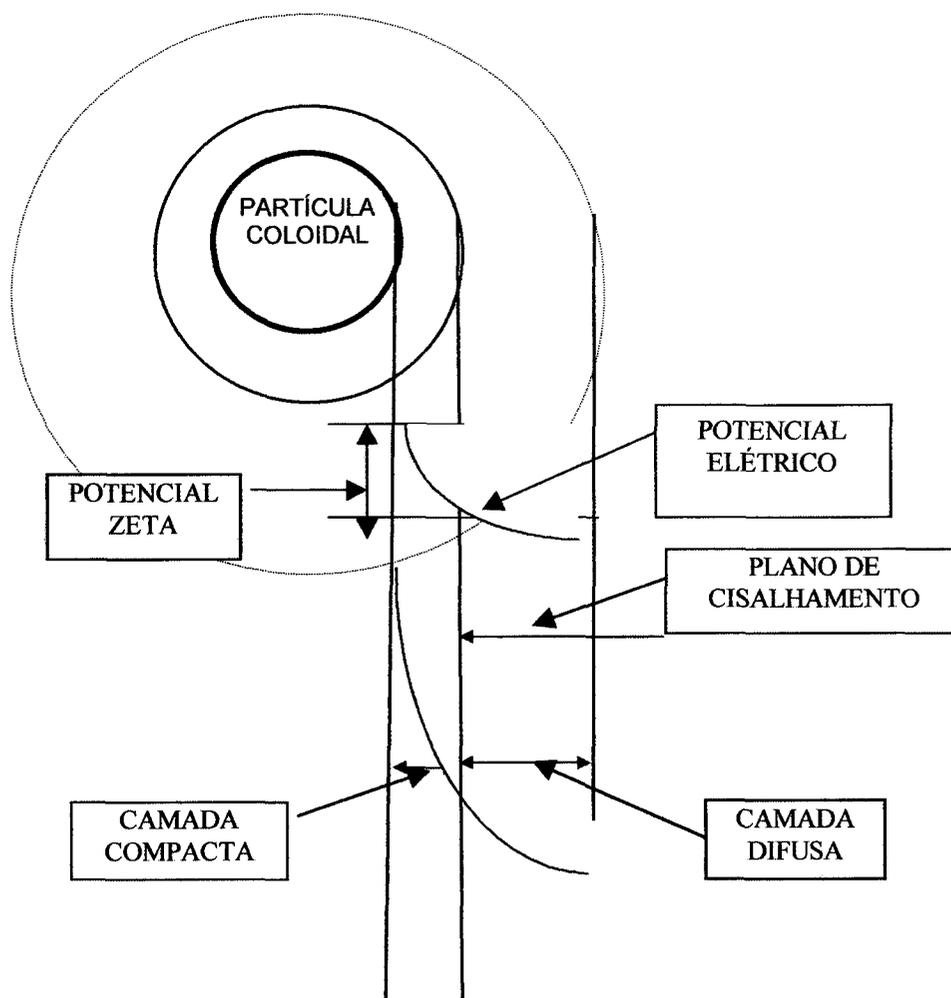


Figura 1: Configuração esquemática da dupla camada elétrica

Fonte: DI BERNARDO, 1993.

3.3.1.2 - Estabilização Estérica

Pode resultar da adsorção de polímeros na superfície das partículas coloidais. Os polímeros adsorvidos podem estabilizar ou desestabilizar dependendo da quantidade do polímero e de partículas, da afinidade entre o polímero e a água e do tipo e concentração de eletrólitos presentes.

Quando existe interação entre as superfícies de duas partículas recobertas por polímeros, que se encontrem próximas, a repulsão entre elas pode ocorrer de duas formas: uma delas, com a colisão entre as partículas,

reduzindo o volume disponível para as moléculas adsorvidas e restringindo o movimento dos polímeros, causando, assim, a repulsão entre as partículas. Na outra forma, a mais freqüente, as camadas adsorvidas se entrelaçam, aumentando a concentração dos segmentos dos polímeros.

Se os segmentos estendidos dos polímeros forem fortemente hidrofílicos, ocorre, preferencialmente, a reação entre eles e a água, tendendo à repulsão. Nas águas naturais as substâncias húmicas, que são polímeros aniônicos, podem ser adsorvidas na interface sólido-líquido e contribuir para a estabilidade, por efeitos estéricos.

3.4 – COAGULAÇÃO – FLOCULAÇÃO

3.4.1 - Considerações Gerais

As várias etapas de tratamento a que é submetida a água são estabelecidas tendo em consideração a sua história, isto é, as suas características, a entrada da Estação de Tratamento de Água, e são constituídas por operações físicas e por processos químicos e biológicos. Grande parte das Estações de Tratamento de Água utilizam a coagulação-floculação, como uma das etapas do processo da clarificação das águas, seguida pela decantação, filtração e desinfecção.

Este trabalho se detém ao sistema de filtração rápida ascendente, com esponjas de poliuretano, o qual foi precedido dos processos de coagulação-floculação e decantação.

A coagulação-floculação, é o processo pelo qual ocorre a transformação de pequenas partículas em agregados maiores, passíveis de sedimentação. A coagulação resulta de dois fenômenos: o primeiro, químico, o qual consiste da reação do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva, o segundo, físico, consiste em transportar as espécies hidrolisadas para viabilizar seu contato com as impurezas. O processo é muito rápido e depende das características da água bruta, tais como: alcalinidade, pH, temperatura, cor, turbidez, sólidos totais

dissolvidos, força iônica, qualidade microbiológica, tamanho e distribuição das partículas em suspensão, e da intensidade da agitação.

Segundo GONÇALVES (1996), considera-se a coagulação como o resultado de quatro mecanismos distintos:

- a) Compressão da camada difusa do colóide;
- b) Adsorção e neutralização de carga;
- c) Varredura;
- d) Adsorção e formação de pontes.

A floculação consiste na agregação das partículas já desestabilizadas, através do choque umas com as outras, formando coágulos. É portanto um fenômeno essencialmente físico.

3.4.2 - Mecanismos de Coagulação

Conforme SPAANS (1996), atualmente considera-se a coagulação como resultado da ação de quatro mecanismos distintos:

a) Compressão da Camada Difusa

Quando um sistema coloidal receber um eletrólito indiferente, irá causar um aumento na densidade das cargas na camada difusa e diminuirá a esfera de influência das partículas, ocorrendo a coagulação por Compressão da Camada Difusa. Concentrações altas de íons positivos e negativos na água acarretam um acréscimo do número de íons na camada difusa que, para manter-se eletricamente neutra, tem seu volume reduzido, de modo que as forças de Van der Waals sejam dominantes, eliminando a estabilização eletrostática.

Destacamos dois aspectos sobre esse mecanismo de coagulação:

- a quantidade de eletrólitos para que ocorra a coagulação independe da concentração de colóides na água;

- para qualquer quantidade adicionada de eletrólitos, é impossível causar a reestabilização das partículas coloidais.

b) Adsorção e Neutralização de Carga

A desestabilização de uma dispersão coloidal resume-se nas interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente. O mecanismo de adsorção-neutralização é muito importante quando o tratamento é realizado através de uma das Tecnologias da filtração direta, porque não há necessidade da produção de flocos para posterior sedimentação, mas de partículas desestabilizadas que serão retidas no meio filtrante.

c) Varredura

Esse mecanismo é utilizado na maioria das estações de tratamento onde se tem a floculação e a sedimentação antecedendo a filtração, pois os flocos resultantes são de maior tamanho e apresentam velocidades de sedimentação altas, quando comparadas aos flocos oriundos da coagulação realizada no mecanismo de adsorção-neutralização. A varredura pode ocorrer dependendo da quantidade adicionada de sais de alumínio e ferro, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água e da formação de precipitados tais como $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou de $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

d) Adsorção e Formação de Pontes

Os compostos orgânicos sintéticos e naturais, caracterizados por grandes cadeias moleculares, possuem a propriedade de apresentar sítios ionizáveis ao longo de suas cadeias e de atuarem como coagulantes. Podem se classificar em:

- Catiônico: apresenta sítios ionizáveis positivos;
- Aniônico: apresenta sítios ionizáveis negativos;
- Não-Iônico: não apresenta sítios ionizáveis;
- Anfótero: apresenta sítios ionizáveis negativos e positivos.

Segundo VIANNA (1992), a água bruta possui suspensões e soluções coloidais responsáveis pela cor e turbidez, sendo necessária a remoção desses colóides para a sua desestabilização. Isso é realizado por meio de processos químicos, adicionando-se à água a ser tratada compostos designados como coagulantes, floculantes ou auxiliares, conforme a atividade que desempenhem.

A coagulação começa no mesmo instante em que são adicionados os coagulantes à água, e dura apenas frações de segundos. Basicamente, provém de uma série de reações físicas e químicas entre os coagulantes, à superfície das partículas, de algumas substâncias químicas presentes na água, especialmente as que lhe conferem a denominada alcalinidade, e a própria água.

A floculação é considerada como o fenômeno pelo qual as partículas já desestabilizadas chocam-se umas com as outras para formar os coágulos maiores. Dois modelos: o físico e o químico, resumidos por (CEPIS et al., 1973) e por CAMPOS E POVINELLI (1974), procuram explicar o que ocorre durante a coagulação e a floculação. Cada um deles explica parte dos fenômenos que ocorrem de fato, deixando, outros sem justificativa satisfatória. Qualquer que seja o modelo que se considere, a prática mostra ser adequado proceder à aplicação do coagulante de modo mais uniforme possível em toda massa líquida, durante o menor tempo e com maior agitação, sendo que após, essa aplicação deve ser lenta, diminuindo de intensidade com o passar do tempo. A coagulação adequada permite economizar produtos químicos e tempo de agitação para a floculação da água em tratamento.

DI BERNARDO et al. (1986) estudaram a utilização de meios granulares para obter a microfloculação e, simultaneamente, a decantação da água em tratamento para obter a um só tempo a redução das dimensões da unidade de tratamento e a redução do consumo de floculantes, tendo em vista que os colóides desestabilizados não precisam crescer muito.

CAMPOS E POVINELLI (1974) destacaram como principais coagulantes e floculantes o sulfato de alumínio, o sulfato ferroso, o cloreto férrico e o aluminato de sódio. A coagulação e a floculação podem realizar-

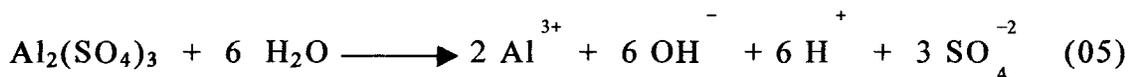
se com maior eficiência quando forem utilizados, em conjunto com os coagulantes/floculantes, compostos denominados auxiliares. Os polieletrólitos, produtos químicos compostos de cadeias moleculares longas, quando lançados na água, apresentam um grande número de cargas, sendo que estas são responsáveis pela atração e fixação dos colóides que se deseja remover no tratamento.

Para o estudo de filtração em esponjas de poliuretano foi utilizada a água decantada, em cujo processo de floculação utilizou-se o coagulante-floculante sulfato de alumínio.

3.4.2.1 - Sulfato de Alumínio

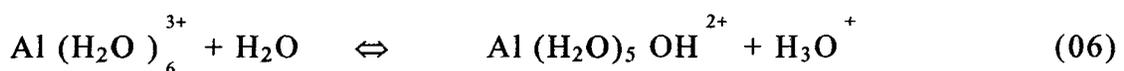
Vários são os produtos químicos capazes de se comportar como coagulantes/floculantes, porém o mais amplamente utilizado pelas estações de tratamento de água, em nosso país, é o sulfato de alumínio.

Segundo AMIRTHARAJAH e MILLS (1985), quando o sulfato de alumínio é adicionado à água, ocorre a seguinte reação:

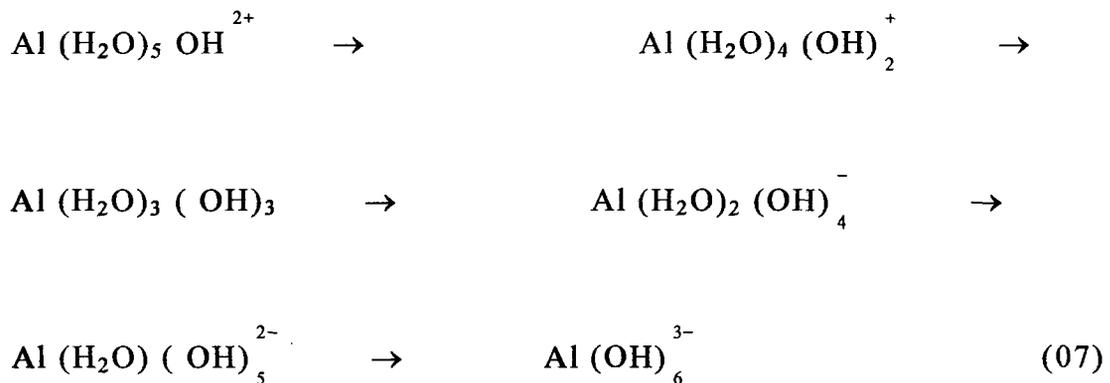


O íon Al^{3+} é hidratado, coordenando seis moléculas de água e formando o íon $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$. Esse íon pode reagir e formar diversas espécies de hidrólises, algumas das quais, formas mais simples, são complexos monoméricos e diméricos, em que ligações coordenadas ocorrem com o íon hidróxila OH^- , que passam a substituir as moléculas de H_2O .

A primeira reação da hidrólise é representada pela equação de equilíbrio:



Diversas outras espécies hidrolisadas podem ocorrer, à medida que as moléculas de água vão sendo substituídas pelo OH^- , que serão positivamente, neutra ou negativamente carregadas.



A partir das espécies anteriores, é possível construir vários polímeros com diversos dos produtos de hidrólise. As partículas responsáveis pela cor e turbidez nas águas naturais, normalmente são colóides eletricamente desequilibrados, de carga negativa, que permanecem separadas uma das outras porque possuem a mesma carga, e se repelem. Para que essas partículas possam se unir, é necessário desestabilizá-las, ou seja, neutralizá-las. Para tanto, basta fazer com que os produtos de hidrólise sejam adsorvidos sobre a enorme superfície dos colóides, de maneira que a carga total das partículas seja nula ou próxima de zero.

Duas dificuldades são encontradas para a consecução desse objetivo: a primeira, no que diz respeito à formação de uma espécie de dupla capa de cargas positivas ao redor do colóide e, a segunda, em relação ao curto tempo de vida dos produtos de hidrólise, inferior a um segundo para a maioria deles.

Dos produtos de hidrólise mencionados, um é neutro e, nas condições usuais, apresenta-se insolúvel: é o Hidróxido de Alumínio, que se apresenta sob forma de um pequeno floco gelatinoso, precipitável. Nas condições de pH que prevalecem usualmente nas unidades de mistura rápida e floculação, decorridos alguns segundos, todos os produtos de hidrólise tendem a

transformar-se nesse composto. O tempo oscila entre um e sete segundos. Caso os colóides não sejam desestabilizados pelas formas hidrolisadas do alumínio, o hidróxido de alumínio poderá desestabilizá-lo, por meio de outro mecanismo, baseado na saturação e arraste dos colóides.

O processo que desestabiliza os colóides através da saturação da água em tratamento com gel hidróxido de alumínio, e arraste dos colóides aprisionados no gel, é denominado desestabilização por varredura. O curto período de existência das formas hidrolisadas do íon- alumínio na água tende a formar o hidróxido de alumínio, sólido e precipitável. As espécies hidrolisadas que permanecerão em solução estarão presentes em equilíbrio com a fase sólida $\text{Al}(\text{OH})_3 (s)$, em concentrações muito baixas, nas faixas usuais de pH que prevalecem nos flocculadores das ETAs, e os tipos predominantes dessas espécies dependerão do pH da água em tratamento.

Em seu trabalho, AMIRTHARAJAH e MILLS apresentam o diagrama da figura 2, abaixo em que aparecem representadas as linhas correspondentes às concentrações de saturação dos produtos de hidrólise, considerados mais importantes. Quatro áreas importantes destacam-se no diagrama:

- a) a região onde se consegue desestabilizar por adsorção os colóides presentes na água a tratar. As dosagens de sulfato de alumínio a se empregar são baixas, inferiores a 2,0 mg/l. O pH da água, após a adição do sulfato, varia entre o mínimo de 5,0 e o máximo de 7,0. Verifica-se que os colóides absorvem os produtos de hidrólise mais convenientes e na quantidade exata para sua desestabilização. No limite superior de dosagem do sulfato, portanto, a carga negativa com que o colóide se apresenta terá sido anulada;
- b) a região de re-estabilização do colóide. Cargas adsorvidas em excesso pelo colóide, anteriormente negativo, podem reverter sua carga, re-estabilizando-o como partícula positiva;

- c) a região onde os colóides são desestabilizados por varredura, isto é, onde o gel hidróxido de alumínio adsorve os colóides presentes na água bruta. É a região na qual o trabalho é realizado com maior facilidade, pois a faixa do pH é mais ampla (5,9 a 9,2), logo, as dosagens de sulfato são superiores a 15 mg/l;
- d) a região em que ocorre a combinação dos mecanismos descritos nos itens a e c.

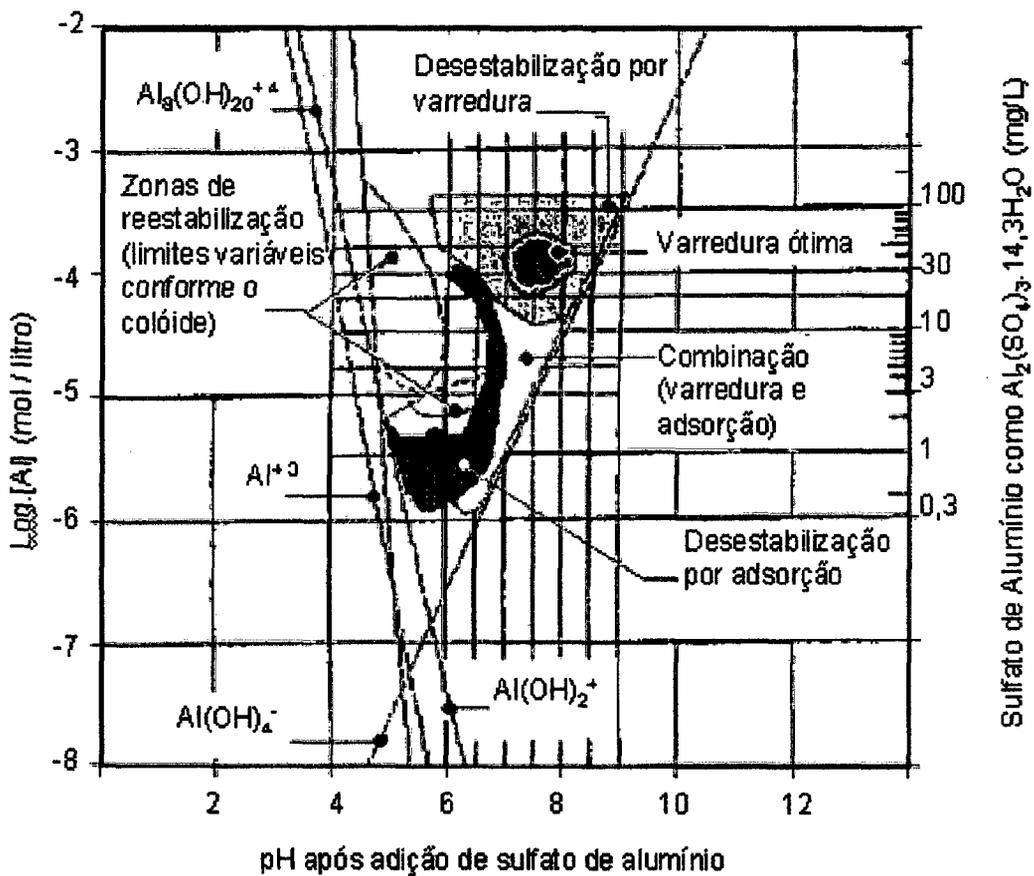


Figura 2: Diagrama de coagulação utilizando sulfato de alumínio

Fonte: Extraído GERALD A.E. and A. AMIRTHARAJAH, 1985

3.5 - FILTRAÇÃO

A filtração é um processo imprescindível para a produção contínua e segura de água potável, e pode ser rápida ou lenta, dependendo da taxa de filtração. Usualmente, os filtros rápidos funcionam com taxas de filtração entre 150 e 600m³/m².dia, enquanto os filtros lentos operam com taxas geralmente inferiores a 6m³/m².dia, embora na literatura existam indicações de taxas superiores. Para o uso eficiente da filtração rápida, é necessário um pré-tratamento da água bruta com coagulação química, podendo ou não existir a floculação e a decantação ou flotação, dependendo da qualidade da água a ser tratada.

A filtração é a separação de partículas em suspensão de um fluido pela passagem através de um meio poroso fixo. Segundo DI BERNARDO (1993), a descrição quantitativa da filtração envolve formulações matemáticas dos mecanismos responsáveis pela retenção das partículas no meio filtrante. Esses modelos geralmente necessitam de uma combinação com os resultados de pesquisas para formulação do projeto e a operação dos filtros em estações de tratamento de água.

AZEVEDO NETTO (1976) descreve o processo de filtração como sendo uma consequência de uma série de fenômenos simultâneos, classificando-os em ações físicas: sedimentação, adsorção e absorção; ações químicas: oxidação e ionização; ações biológicas: desenvolvimento de certas variedades de bactérias aeróbias na camada superficial do leito; e ações bioquímicas, como a tensão superficial dos leitos. Com a combinação dessas ações, as partículas ficam retidas em espaços intergranulares.

3.5.1 - Classificação

Existem diversos tipos de filtros para atuarem de diferentes formas no tratamento de água e LIBÂNIO (1991) as classificou de forma mais abrangente. Do ponto de vista da análise hidráulica do comportamento

básico dos filtros, a filtração pode ser efetuada segundo uma das seguintes concepções básicas (ou, em alguns casos, associando-se algumas delas):

a) Filtração de Fluxo Descendente

- de baixa taxa de filtração (filtros lentos);
- de alta taxa de filtração (filtros rápidos):
 - de camada simples;
 - de camadas múltiplas: duplos (areia e antracito).

b) Filtração de Fluxo Ascendente

- de baixa taxa de filtração (filtros lentos ascendentes);
- de alta taxa de filtração:
 - (filtros rápidos ascendentes: clarificadores de contato);
 - (filtros rápidos ascendentes contínuos sem retrolavagem).

Segundo LIBÂNIO (1991), a determinação do comportamento do filtro durante a filtração exigiu uma pesquisa experimental feita com meios filtrantes constituídos de vários materiais diferentes e um estudo teórico adequado, capaz de permitir a formulação de um modelo matemático que exprimisse o inter-relacionamento das variáveis que interferem no processo. Estabelecida a teoria moderna para filtração, foi possível a criação de filtros modernos, mais eficientes e econômicos, que são empregados na solução do problema da expansão da capacidade de produção das estações de tratamento de água.

DI BERNARDO (1993) classifica os filtros quanto ao modo de funcionamento em:

- a) filtros rápidos por gravidade (fluxo ascendente ou descendente);
- b) filtros lentos (funcionamento por gravidade e fluxo ascendente e descendente);
- c) filtros rápidos sob pressão (fluxo ascendente e descendente);

d) dupla filtração por gravidade ou sob pressão (filtros rápidos, normalmente com fluxo ascendente seguido pelo fluxo descendente).

Tendo em vista os novos processos de filtração como o de esponjas, estabeleceu-se a seguinte classificação:

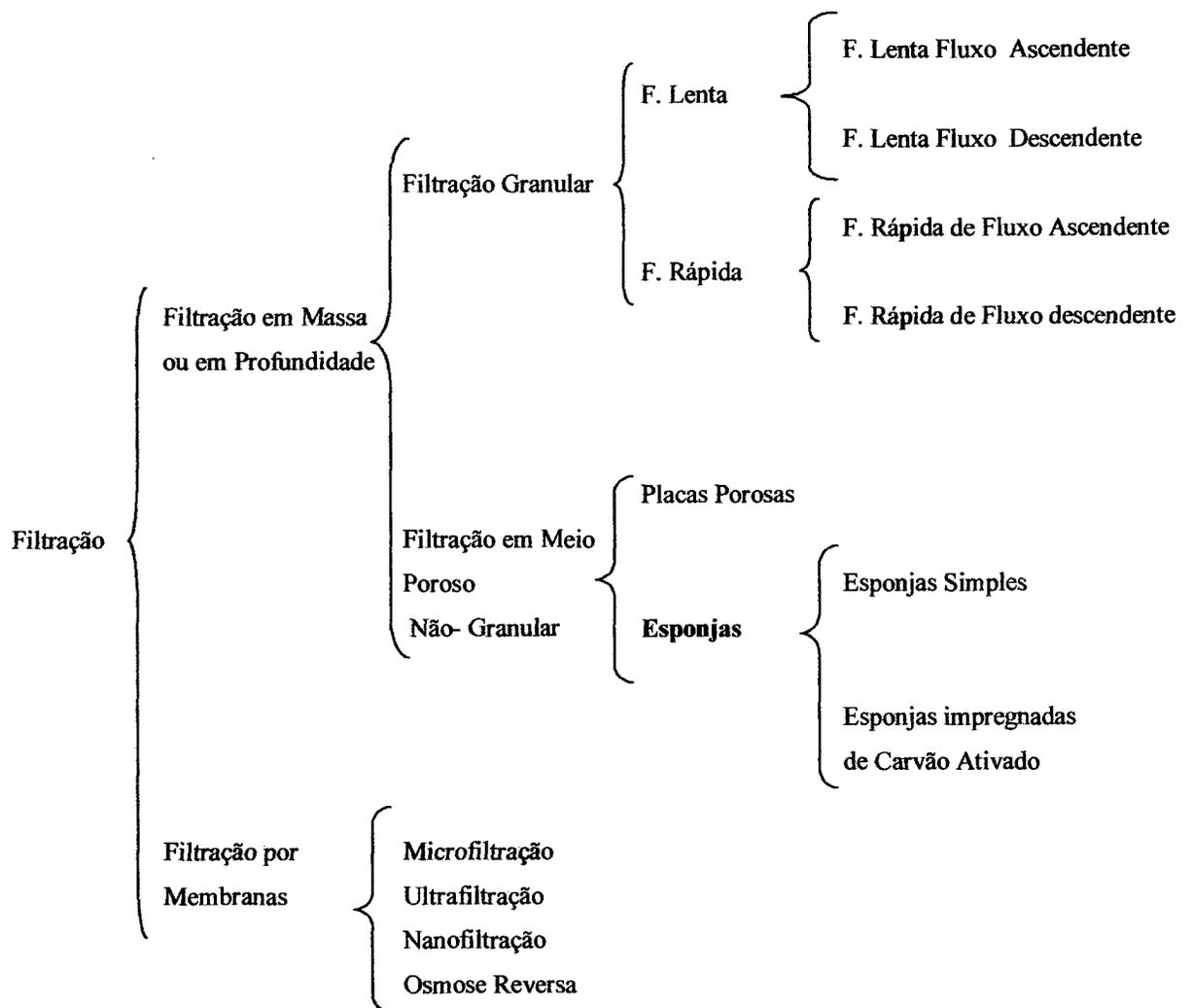


Figura 3: Classificação dos diversos tipos de filtração.

Fonte: SENS e ISOLANI (2000).

As membranas são geralmente divididas em quatro categorias: Microfiltração, Ultrafiltração, Nanofiltração e Osmose Reversa. Essa classificação é determinada pelo tamanho do poro existente na referida membrana. Esse tamanho é diretamente proporcional à permeação e inversamente proporcional à pressão de operação de um sistema com membranas. Membranas de poros grandes proporcionam alta permeação à baixa pressão de operação, por outro lado, membranas com poros pequenos têm baixa permeação a uma pressão elevada. O quadro 1, abaixo, exemplifica o uso das várias membranas.

Quadro 1 – CLASSIFICAÇÃO DAS MEMBRANAS E SUAS APLICAÇÕES

TIPO DE MEMBRANA	TAMANHO DO PORO	FUNÇÃO
Microfiltração	0,1 a 2,0 micron	Remover sólidos em suspensão
Ultrafiltração	0,01 a 0,1 micron	Remover substâncias coloidais, bactérias, pirogênio
Nanofiltração	0,001 a 0,01 micron	Remover vírus, íons inorgânicos e substâncias de peso molecular acima de 400
Osmose Reversa	0,0001 a 0,001 micron	Remover compostos orgânicos, sais dissolvidos, vírus, bactérias e pirogênio

Fonte: MICRODYN DO BRASIL (1992).

Por membrana entende-se, em geral, uma estrutura superficial que separa duas fases uma da outra, mas que permite, simultaneamente, uma troca seletiva de materiais. Como forças motrizes para essa troca de materiais, podem atuar diferenças de pressão, temperatura, concentração, bem como diferenças de potenciais elétricos. Os processos mais conhecidos são: osmose reversa para a separação de sais; ultrafiltração para a concentração de materiais macromoleculares; processos de destilação através de membranas; diálise; eletrodialise.

Neste estudo, a esponja de poliuretano foi classificada na região do processo de filtração convencional, conforme a figura 4, abaixo, em que ocorre a remoção de partículas na faixa de 1 μm .

Na figura 5, as esponjas de poliuretano estão localizadas na faixa de 10^4 Angstrom.

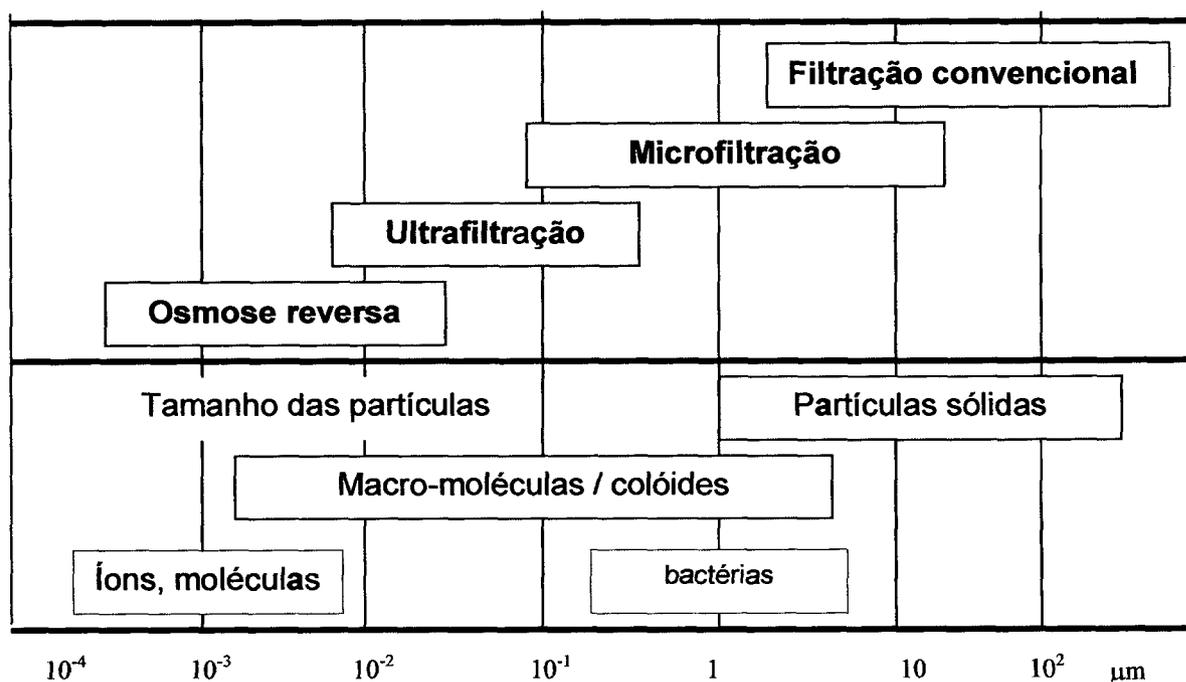


Figura 4: Região de separação dos processos de filtração

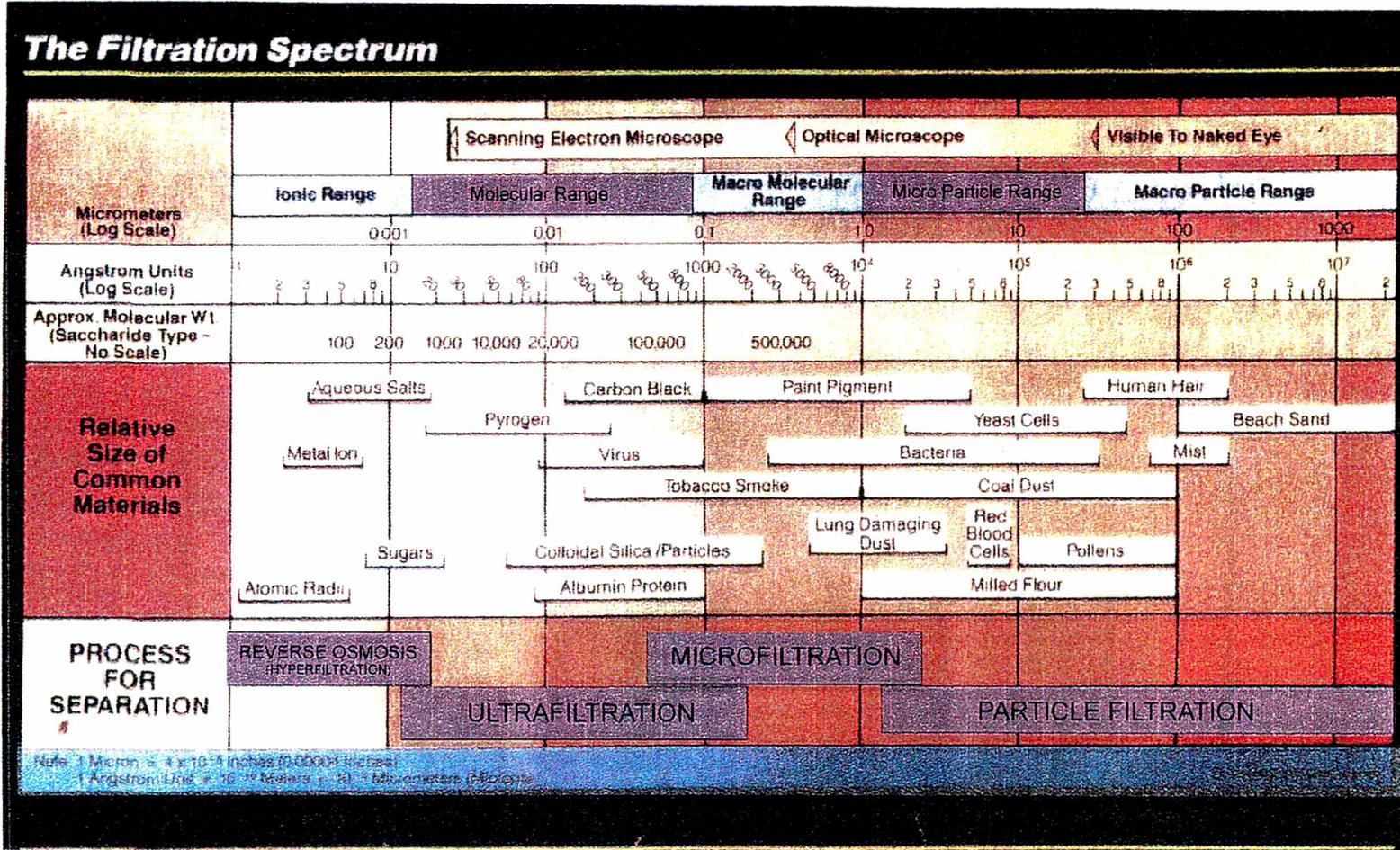


Figura 5 – ESPECTRO DE FILTRAÇÃO¹

Quando em operação, após determinado tempo, os filtros devem ser lavados para remover as impurezas retidas nos espaços intergranulares. Com exceção da filtração lenta, a lavagem é realizada com a injeção de água promovendo a expansão e a fluidização parcial do leito filtrante. A filtração ótima ocorre quando os flocos coagulados não sedimentáveis são retidos nos poros do leito e produzem a filtração ao longo deste. Um leito filtrante ideal possui as seguintes características: o meio possui diâmetro suficientemente grande para formar poros de dimensões capazes de reter grandes quantidades de flocos, possui diâmetro suficientemente pequeno para evitar a passagem de sólidos em suspensão; possui profundidade adequada para permitir carreiras de filtração longas e boas condições de lavagem (HAMMER, 1979). O filtro que mais se aproxima do filtro ideal, é o granular de fluxo ascendente, pois o fluxo de água durante a filtragem ocorre num sentido que favorece a diminuição da granulometria do leito filtrante. Dessa forma, todo meio granular, incluindo a camada suporte, participa da filtração, não havendo necessidade de trabalhar com material filtrante de densidades diferentes.

A filtração em esponjas assemelha-se com o sistema granular, porém, é um meio poroso não granular que será verificado no decorrer desta pesquisa.

3.5.2 - Filtração em Meio Granular de Areia e Filtração em um Meio Poroso não Granular com Esponjas

3.5.2.1 - Filtração em Meio Granular de Areia

3.5.2.1.1 - Filtração Direta

A filtração direta é classificada em filtração direta ascendente e filtração direta descendente.

A filtração direta ascendente é uma tecnologia que tem sido empregada em sistemas de tratamento de água para abastecimento, desde os

tempos mais remotos. Segundo DI BERNARDO (1986), atribui-se a PORZIO, em 1685, a primeira menção ao uso de filtro com escoamento ascendente para tratamento de água. Há indícios de que no século XVIII foram construídas as primeiras instalações na França e na Inglaterra e de uma patente datada de 1791, obtida por James Peacock, para Filtração por Ascensão. Nos Estados Unidos, tem-se notícia dos primeiros testes realizados em Richmond. Embora os resultados tenham sido considerados insatisfatórios em virtude da turbidez elevada da água bruta, algumas instalações foram construídas.

A partir da metade do século XX, a filtração ascendente passou a ser difundida na União Soviética e na Holanda, em relação às inovações propostas, surgindo na União Soviética o filtro AKK e na Holanda o filtro Immedium. Essa nova tecnologia, chamada de Clarificação de Contato, dispensa o uso dos decantadores. Por esse processo, a água bruta, após receber o coagulante, é encaminhada diretamente aos filtros, obtendo-se um efluente com qualidade satisfatória. No Brasil, a primeira experiência foi em Colatina ,(ES) e Ponta Grossa(PR), tendo participação a Fundação SESP.

A filtração direta descendente é a tecnologia de tratamento a qual consiste das seguintes etapas:

- a) mistura rápida;
- b) floculação;
- c) filtração.

Dependendo das características do meio filtrante e da qualidade da água bruta, a floculação não pode ser utilizada, e, como consequência da existência ou não dessa etapa, a tecnologia é classificada em Filtração Direta Descendente com Pré-Floculação e Filtração Direta Descendente sem Pré-Floculação.

Segundo DI BERNARDO (1993), atualmente as estações de tratamento completo têm sido projetadas com certa flexibilidade operacional, de modo a possibilitar que em épocas de estiagem venham a

tratar a água bruta pela filtração direta, eliminando-se parcial ou totalmente a unidade de floculação e desviando-se parcial ou totalmente a unidade de floculação. Desta maneira, desvia-se a água dos decantadores, conduzindo-a diretamente aos filtros.

Comparando-se ao tratamento completo, a filtração direta descendente apresenta as seguintes vantagens:

- investimento inicial com obras civis e equipamentos reduzidos em cerca de 30 – 50%;
- custo menor de operação e manutenção (eliminação dos equipamentos de remoção de lodo dos decantadores, e, também, algumas vezes, dos equipamentos de floculação);
- redução substancial do consumo de coagulante;
- menor volume produzido de lodo na estação;
- diminuição do consumo de energia elétrica;
- facilidade no tratamento de água bruta com baixa turbidez.

Dentre as desvantagens, destacam-se:

- dificuldades no tratamento de água bruta com turbidez ou com cor verdadeira alta;
- necessidade de monitoramento contínuo ou controle rigoroso dos principais parâmetros de qualidade, tanto da água bruta como da água filtrada;
- tempo relativamente curto para verificar qualquer mudança na qualidade de água bruta;
- tempo de detenção total da água no sistema, para oxidação de substâncias orgânicas presentes no afluente, relativamente pequeno;
- possibilidade de paralisação temporária da estação em consequência de erros de dosagem do coagulante;
- período inicial de melhora da qualidade do efluente mais longo.

No Brasil, há algumas instalações de filtração direta descendente destinadas ao tratamento de água para consumo humano, que operam satisfatoriamente produzindo água tratada que atende ao padrão de potabilidade, porém em épocas de chuvas ocorre uma diminuição da duração da carreira de filtração, chegando a 50% de redução. Instalações com essa tecnologia são encontradas nas estações de Rio Deserto, em Brasília(DF), Carapina, em Vitória (ES) e Jiqui, em Natal (RN).

Modernamente, tem sido introduzida a filtração direta ascendente contínua. Essa nova tecnologia de tratamento de água consiste num sistema compacto, cujo leito é constituído de areia com uma única granulometria, sendo que, dependendo das características da água bruta, há a necessidade de realizar a adição de um coagulante, o qual é introduzido na entrada da tubulação de água bruta. A água é clarificada enquanto flui para a parte superior do leito de filtragem. Em sua operação, o leito filtrante move-se para baixo contra o fluxo de água, sendo que a areia suja é separada, lavada e repostada na parte superior do leito. A lavagem da areia suja dá-se com a mistura ar-água, sendo o ar injetado na parte inferior do módulo, ascendendo em um duto específico (air-life). O sistema é contínuo e existe uma perda em torno de 5% de descarte que é a água suja. Atualmente, o referido sistema encontra-se em operação em países da Europa, Estados Unidos e Ásia. No Brasil, dois desses módulos estão operando: um no Rio Grande do Sul e outro em Santa Catarina.

3.5.2.2 - Filtração Rápida Convencional

3.5.2.3 - Filtração em um Meio Poroso não Granular com Esponjas

O sistema de filtração com esponjas é uma inovação que está sendo introduzida através desta pesquisa, cujo desenvolvimento está descrito no Capítulo IV. Consiste na utilização de um meio poroso não granular que é a esponja de poliuretano. O princípio baseia-se no processo de filtração direta granular que pode ser ascendente e descendente, servindo de

referência para o trabalho. A filtração consiste na passagem do fluxo de água pelo leito filtrante comprimido e o processo de lavagem ocorre descomprimindo-se o leito, sucedendo a expansão do material filtrante e facilitando a remoção das partículas.

3.5.3 - Lavagem de um Meio Granular e de um Meio Poroso não Granular (Esponja)

3.5.3.1 - Meio Granular

O sistema de lavagem em meio granular pode ser efetuado de diversas maneiras, estando apresentado no quadro 2, abaixo:

Quadro 2 - PRINCIPAIS MÉTODOS DE LAVAGEM

MÉTODO DE LAVAGEM	MEIO FILTRANTE
a) Lavagem somente com água, no sentido ascensional.	Areia convencional e em pequenas estações.
b) Lavagem auxiliar superficial com tubulação fixa ou com torniquetes hidráulicos e lavagem simultânea (ou não) com água no sentido ascensional.	Areia convencional e em estações com operação qualificada.
c) Lavagem auxiliar sub-superficial com tubulação fixa ou com torniquetes hidráulicos e lavagem simultânea (ou não) com água no sentido ascensional.	Antracito e areia e em estações com operação qualificada.
d) Insuflação de ar, seguida de lavagem com água no sentido ascensional.	Antracito e areia ou areia praticamente uniforme e em estações com operação qualificada.
e) Insuflação de ar e introdução simultânea de água no sentido ascensional.	

Fonte: Di Bernardo (1993).

Independentemente do método de lavagem utilizado, é recomendável que se localize um ponto de água com pressão superior a 20 m em local

próximo aos filtros. A lavagem inadequada dos filtros apresenta diversos problemas, tais como:

- a) aparecimento de bolas de lodo no interior do meio filtrante;
- b) menor volume de água produzida na carreira de filtração;
- c) água filtrada de pior qualidade;
- d) aumento de perda de carga no meio filtrante.

3.5.3.2 - Meio Poroso não Granular

No sistema de lavagem do meio filtrante de esponja, existe uma grande semelhança com o filtro de areia. Neste, a areia é expandida no momento da retrolavagem pela força de arraste provocada pela velocidade da água. No filtro pesquisado, ou seja, objeto deste trabalho, a esponja inicialmente é comprimida para executar a filtração, e, no momento da lavagem, descomprime-se, aumentando seu volume e conseqüentemente os poros. A água é introduzida com grande velocidade para ocorrer o arraste das partículas retidas no meio filtrante. Após executada a lavagem, comprime-se novamente a esponja para o procedimento da filtração.

3.5.4 - Critérios Recentes de Projetos

A partir de 1974, novos critérios de projetos de sistema de filtração direta ascendente passaram a ser seguidos normalmente pelos projetistas em nosso país. Em 1977 começaram a ser realizadas pesquisas sobre filtração direta ascendente na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (ESSC-USP), destacando-se estudos sobre os seguintes aspectos: altura da água sobre o topo da camada de areia; granulometria e espessura da camada de areia; qualidade da água bruta; taxa de filtração; execução de descargas de fundo durante a filtração;

granulometria e espessura da camada de pedregulho e remoção de microorganismos (DI BERNARDO, 1986).

Segundo AZEVEDO NETTO (1977) E RICHTER (1991), a filtração direta ascendente pode ser aplicada a águas brutas pouco poluídas e contaminadas, com turbidez baixa (inferior a 50 NTU), com teor de sólidos suspensos menor que 150 mg/l e sem variações rápidas de qualidade.

As principais características dos filtros são:

a) Camada de Areia

- espessura da camada: 2,0 - 2,5 m
- tamanho dos grãos: 0,7 - 2,0 mm
- tamanho efetivo: 0,7 - 0,8 mm
- coeficiente de desuniformidade: menor que 2

b) Camada Suporte

- espessura total: 0,4 - 0,6 m
- número de subcamadas: 5
- tamanho dos eixos: 4 - 31 mm

c) Altura da Água sobre o Topo da Camada de Areia:

entre 1,8 - 2,3 m

d) Taxa de Filtração

- constante, entre 120 e 150 m³/m².dia

e) Perda de Carga Final na Camada de Areia

- máxima de 2,0 m

Como em todos os sistemas de filtração de água, a filtração direta ascendente apresenta vantagens e desvantagens. Todavia, as vantagens parecem ser maiores, pois o processo permite:

- realizar boa coagulação e floculação;

- evitar a necessidade de tratamento prévio;
- reduzir o consumo de coagulante;
- realizar a filtração no sentido favorável de redução do tamanho dos grãos;
- utilizar toda camada de areia para a retenção de impurezas;
- apresentar carreiras de filtração mais longas que os filtros de areia de fluxo descendente;
- facilitar o processo de fluidização da areia.

Quanto às desvantagens, convém mencionar:

- inconveniência na mistura da água de lavagem com a filtrada;
- limitações relativas à qualidade da água bruta.

Segundo DI Bernardo (1996) citado por DALSSASSO (1999), foram observados os seguintes avanços na tecnologia de filtração direta nos últimos anos:

- redução da altura de água sobre o topo da areia;
- comprovação da necessidade de realização da coagulação no mecanismo de adsorção-neutralização de cargas;
- importância da camada-suporte na retenção de impurezas e adequação de sua composição;
- realização de Descargas de Fundo Intermediárias (DFI), com introdução de água na interface pedregulho-areia, possibilitando o tratamento de água bruta com maior turbidez e cor verdadeira ou aumento da taxa de filtração;
- especificação apropriada das características da camada de areia;
- influência da qualidade da água para lavagem na eficiência da filtração no início da carreira.

DI BERNARDO (1993) evidencia que em estudos realizados variando a espessura da camada de areia entre 1,6 e 2,0 m e tendo por característica

granulométrica o tamanho efetivo de 0,65 - 0,80 e 1,0 mm, a areia mais fina apresentou um acúmulo de impurezas na interface pedregulho-areia, com carreiras de filtração encerradas pela perda de carga final igual a 2,4 m (areia + pedregulho) e taxas de filtração entre 120 e 240 m³/m².dia. Quando utilizado o filtro com areia grossa, ocorreu o transpasse para taxas de filtração superiores a 180 m³/m².dia, enquanto a perda de carga total nos meios granulares atingiu 2,0 m. Assim, existe uma relação muito grande entre taxa de filtração, as características das camadas de areia, a camada-suporte e a carga hidráulica disponível. A situação ideal para uma certa taxa de filtração seria aquela cuja carga hidráulica disponível fosse consumida no momento em que iniciasse o transpasse.

Pelo fato de uma grande quantidade de impurezas ser retida na camada-suporte durante a filtração, e ser de difícil remoção durante a lavagem, é promovida a drenagem do filtro através de descarga de fundo, antes do início da lavagem, originando daí, as descargas de fundo intermediárias. Essa operação consiste em desviar temporariamente a alimentação do filtro através de um *by-pass*. Em seguida, abre-se a descarga de fundo do filtro, ao mesmo tempo em que é injetada água filtrada entre a camada suporte e as camadas de areia por meio de uma tubulação. A vazão em que a água é injetada é equivalente a vazão proporcionada pela abertura da descarga de fundo, correspondendo a uma taxa superior a 600 m³/m².dia, para garantir uma boa limpeza. A injeção de água na interface serve para impedir a formação de bolhas de ar no meio granular, decorrentes do escoamento da água com velocidades diferentes entre a areia e o pedregulho.

Di Bernardo et al. (1996), citados por DALSSASSO (1999), realizaram estudos em instalação-piloto, testando taxas de filtração com variação de 160 a 480 m³/m².dia, com execução de até quatro descargas de fundo intermediárias. O filtro possuía camada de areia de 1,6 m, com grãos de diâmetro de 0,59 a 2,0 mm; tamanho efetivo de 0,85 mm; coeficiente de desuniformidade 1,65; porosidade média da areia limpa: 0,43; camada suporte com cerca de 85 cm; granulometria: 2,4 a 31,7 mm; água bruta apresentando cor aparente entre 40 e 100 uC e turbidez entre 20 e 30 uT.

Os resultados desses estudos mostraram que a maior parte das impurezas foi retida na camada suporte e início da camada de areia (cerca de 40 cm), com a perda de carga nessa região atingindo cerca de 50 % da carga total do meio granular. A duração das carreiras pode ser prolongada com descargas de fundo intermediárias, sem prejuízo da qualidade da água produzida.

3.5.5 - Mecanismos da Filtração

As forças que mantêm as partículas removidas da suspensão aderidas às superfícies dos grãos ou as malhas da esponja do meio filtrante são ativas para distâncias relativamente pequenas (alguns Angstroms).

A filtração é considerada como sendo o resultado de dois mecanismos distintos, porém complementares: transporte e aderência. O transporte das partículas é um fenômeno físico e hidráulico e a aderência é um fenômeno de ação superficial, sendo influenciada por parâmetros físicos e químicos.

3.5.5.1 - Mecanismos de Transporte

O transporte das partículas é influenciado pelas características físicas e químicas do afluente, do pré-tratamento químico, da taxa de filtração, do meio filtrante e do método de operação. Para explicar a aproximação das partículas nos grãos do meio filtrante, também denominados de coletores, tem-se o impacto inercial, a interceptação, a sedimentação, a difusão e também a ação hidrodinâmica. A figura 6, abaixo, mostra, de forma esquemática, as diversas maneiras pelas quais a partícula suspensa deixa a linha corrente e atinge a superfície dos grãos.

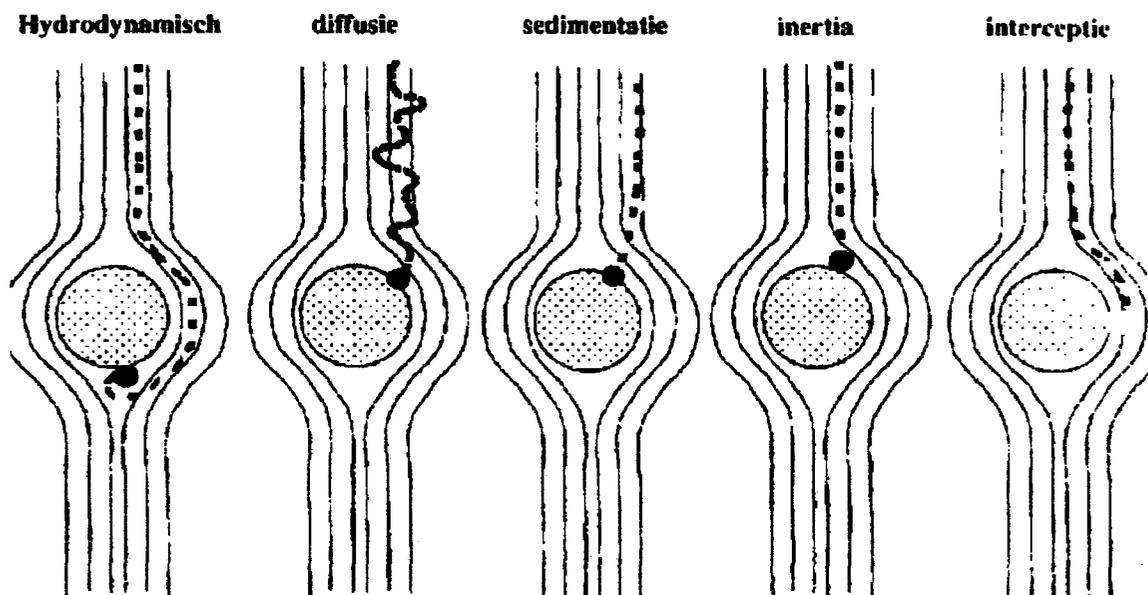


Figura 6: Mecanismos de transporte na filtração com ação de profundidade.

Fonte: SPAANS (1996).

Segundo DI BERNARDO (1993), a remoção de partículas durante a filtração resulta da ação conjunta dos mecanismos de transporte e aderência. Após um certo tempo de funcionamento, com vazão constante do afluente ao filtro, as partículas retidas nos vazios intergranulares causam a diminuição das dimensões destes, com conseqüente aumento da velocidade intersticial e da Força de Cisalhamento, responsáveis pelo arrastamento de partículas para subcamadas inferiores do meio filtrante. O efeito total dos mecanismos de transporte e de aderência e do arrastamento de partículas previamente retidas tem sido quantificado por meio das teorias fenomenológica e das trajetórias.

3.5.5.1.1 - Teoria Fenomenológica

Seja um elemento de volume de um meio filtrante uniforme, com área Δf em planta e altura ΔL_f , como é mostrado na figura 7, abaixo. A variação da concentração da suspensão é dada por:

$$-\Delta C = (C_{ef} - C_{af}) \quad (6)$$

em que: C_{af} : concentração de partículas no afluente (vol/vol)

C_{ef} : concentração de partículas no efluente (vol/vol)

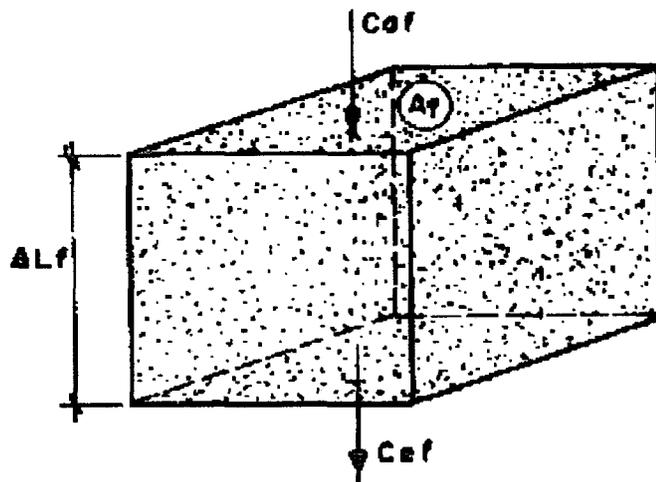


Figura 7: Elemento de Volume do Meio Filtrante.

Fonte: Di Bernardo (1993).

Considerando-se o escoamento com vazão constante Q_f e admitindo-se que o depósito específico seja aumentado de $\Delta \sigma_a$, após um intervalo de tempo Δt , tem-se:

volume de partículas removidas da suspensão: - $\Delta C \cdot \Delta t \cdot Q_f$

volume de partículas acumuladas: $\Delta \sigma_a \cdot \Delta L_f \cdot A_f$

Como a quantidade de partículas removidas da suspensão é igual à de partículas retidas no meio filtrante, resulta :

$$\Delta C \cdot \Delta t \cdot Q_f = \Delta \sigma_a \cdot \Delta L_f \cdot A_f \quad (7)$$

Rearranjando a equação (7), obtém-se, na forma diferencial, a seguinte equação:

$$\frac{\partial C}{\partial L} \cdot V_\infty + \frac{\partial \sigma_a}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

em que

σ_a : depósito específico absoluto (vol. de sólidos/vol. do meio filtrante)

V_∞ : velocidade de aproximação (LT^{-1})

L : espessura do meio filtrante (L)

Proposta por IWASAKI há mais de cinquenta anos e resultante de seus estudos sobre filtração lenta, a equação 8 reflete a relação entre a variação da concentração das partículas com a profundidade e a variação do depósito específico absoluto com o tempo para a velocidade de aproximação considerada. Muitas vezes, considera-se o depósito específico efetivo, que leva em conta o líquido contido entre as partículas retidas, dado por:

$$\sigma = \beta_f \cdot \sigma_a \quad (9)$$

Na equação 9, σ é o depósito específico efetivo e, βf , o inverso do fator de compactação ($\beta f > 1$). Nessas condições, a porosidade local resulta:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sigma \quad (10)$$

A combinação das equações 9 e 10 fornece:

$$-\frac{\partial C}{\partial L} = \frac{1}{\beta f \cdot V_{\infty}} \cdot \frac{\sigma \varepsilon}{\sigma} \quad (11)$$

A equação 11 representa a variação da concentração de partículas em decorrência da espessura do meio filtrante, indicando que essa taxa diminui à medida que o depósito específico aumenta com o tempo de operação. Combinando as equações 10 e 11, resulta:

$$\frac{\partial C}{\partial L} = \frac{1}{\beta f \cdot V_{\infty}} \cdot \frac{\sigma \varepsilon}{\sigma} \quad (12)$$

De acordo com a equação 12, a taxa de variação da concentração da suspensão em razão da espessura do meio filtrante decresce à medida que a porosidade diminui com o tempo da operação. A equação 11 é empregada para prever a variação de σ com o t somente quando for conhecida a variação de C com L . Há muitos modelos matemáticos propostos para descrever a variação de C com L , os quais apresentam a seguinte forma geral:

$$-\frac{\partial C}{\partial L} = F \quad (C, \sigma, \text{ parâmetros do modelo}) \quad (13)$$

A primeira tentativa para determinar a função "F" foi feita em 1937, por IWASAKI. Com base em pesquisas realizadas com filtro lento, cuja ação física de coar é dominante para taxas de filtração inferior a $12 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dia, o autor propõe a seguinte equação:

$$-\frac{\partial C}{\partial L} = -\lambda C \quad (14)$$

em que: λ é o coeficiente de filtração (L^{-1})

O coeficiente do filtro λ , representa a eficiência de uma subcamada qualquer na retenção de partículas. Rearranjando a equação 14, obtém-se na forma de diferenças finitas a seguinte equação :

$$\lambda = -\frac{1}{\Delta Lf} \cdot \frac{\Delta C}{C} \quad (15)$$

ou

$$\lambda = \frac{1}{\Delta Lf} \cdot [Caf / Cef - 1] \quad (16)$$

Na equação 16, o Cef e Caf são respectivamente as concentrações de partículas no efluente e afluente da subcamada de espessura ΔLf , para uma certa velocidade de aproximação. É evidente que, quanto menor a concentração Cef , maior será a relação Caf / Cef e, conseqüentemente, maior o coeficiente de filtração λ .

No início da filtração, isto é, $t = 0$, a equação 15 pode ser integrada, resultando:

$$C = C_0 \cdot e^{-\lambda_0 \Delta Lf} \quad (17)$$

Se o meio filtrante for uniforme, ΔL_f será igual à espessura total, permanecendo constante o valor de λ_0 em todo o meio filtrante para $t = 0$, de modo que a concentração C varia com a espessura segundo uma curva exponencial, apresentada na figura 8.

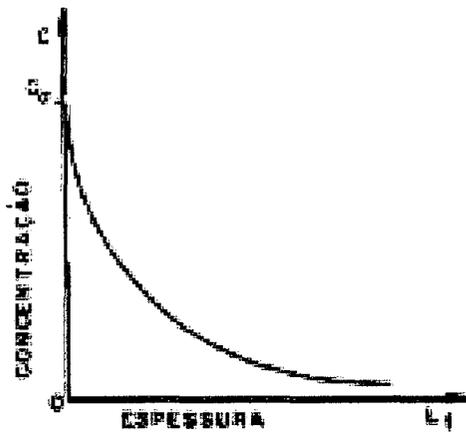


Figura 8 - Variação da concentração de partículas ao longo da espessura de um meio filtrante uniforme, no início da filtração.

Fonte: DI BERNARDO (1993).

Vários pesquisadores propuseram modelos matemáticos para expressar λ em função de α , destacando-se Iwasaki e Ives.

$$\rho a : \quad (18) \quad (\text{Iwasaki})$$

e

$$\lambda = \lambda_0 + a_1 \sigma - \frac{a_2 \sigma^2}{\varepsilon_0 - \sigma} \quad (19) \quad (\text{Ives})$$

No modelo proposto por IWASAKI(1927), é evidente a predominância da ação física de coar, já que o coeficiente do filtro, λ , aumenta continuamente com o tempo, o que ocorre geralmente em filtros lentos e rápidos com escoamento descendente e meio filtrante constituído de areia fina, porém, dificilmente ocorre nos filtros com ação de profundidade. Nesses filtros, o coeficiente do filtro λ , que apresenta um valor inicial, λ_0 , aumenta até determinado tempo e em seguida diminui. Há evidências experimentais indicando que, realmente, o comportamento de uma subcamada qualquer do meio filtrante resulta semelhante ao apresentado na figura 9 e que a filtração ocorre progressivamente do início para o final do meio filtrante.

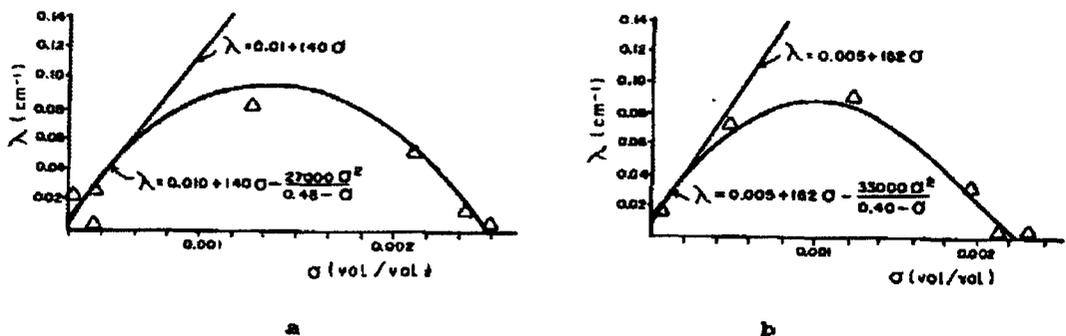


Figura 9: Variação do coeficiente λ com depósito específico σ .

Fonte: Di Bernardo (1993).

O maior problema da aplicabilidade do modelo matemático, proposto por Ives (1975), citado por DI BERNARDI (1993), está relacionado à concentração C , expressa em volume de partículas por volume de suspensão. Em geral, mede-se, ao longo do meio filtrante, por meio da coleta de amostras, a turbidez ou o número de partículas, sendo muito difícil avaliar a massa específica dos sólidos retidos, mesmo após a medição do teor de sólidos suspensos nas amostras. Por isso, Adin e Rebhun (1974), citados por DI BERNARDO (1993), propuseram um modelo matemático (equação 19), baseado na acumulação e arrasto em uma

$$\eta_r = \sigma_a \eta_0 + \sigma_p \eta_p N_c \left[\frac{dp}{Dc} \right]^2 \quad (30)$$

em que:

η_r : eficiência global de coleta

σ_p : coeficiente de aderência entre partícula da suspensão e partículas previamente coletadas

η_p : Taxa de partículas coletadas no coletor simples com partículas aderidas

N_c : número de partículas aderidas ao coletor

O'Melia et al. (1967), citados por DI BERNARDO (1993), desenvolveram um trabalho experimental e observaram que:

- a) a eficiência de remoção de partículas no meio filtrante limpo depende do tamanho das partículas presentes no afluente, existindo um tamanho da ordem de 1 μm , para o qual é mínima a eficiência de remoção;
- b) o efeito do tamanho das partículas é principalmente observado no início da filtração, até que os grãos estejam recobertos por algumas delas;
- c) para uma dada quantidade de partículas retidas no meio filtrante, a perda de carga varia inversamente ao tamanho da partícula, isto é, quanto menor o tamanho das partículas, maior a perda de carga desenvolvida em um meio filtrante constituído de areia;
- d) a eficiência de remoção em um leito filtrante limpo independe da concentração de partículas no efluente;
- e) a floculação pode ser realizada para obter um tamanho de partículas (maior que 1 μm) que reduz a taxa de desenvolvimento de perda de carga no meio filtrante;

- f) a eficiência da aderência entre partículas e grãos do meio filtrante e entre partículas da suspensão e partículas previamente retidas depende da coagulação química;
- g) a equação 32 foi confirmada experimentalmente, após o estágio inicial da filtração, quando os grãos se encontravam recobertos por partículas.

Algumas conclusões do trabalho de O'Melia et al. (1967), citados por DI BERNARDO (1993), são muito importantes, tais como:

- a) dependendo das características da água bruta, a pré-floculação torna-se a principal etapa a ser realizada em uma estação de filtração direta descendente;
- b) o uso de um coagulante (sal de alumínio ou de ferro ou um polímero catiônico) no final da lavagem pode reduzir consideravelmente os picos de turbidez que ocorrem no início da filtração e, inclusive, reduzir o período inicial da filtração em que se produz água filtrada com qualidade insatisfatória.

As equações 28, 29 e 30 baseiam-se na hipótese de que não há repulsão entre as partículas e os coletores. Apesar de ainda serem necessários estudos, há evidências práticas do aumento de eficiência de coleta, η_0 , com o aumento de D_c e diminuição de V_∞ . É possível que, no futuro, a filtração possa ser realmente explicada com base na teoria das trajetórias.

3.5.5.2 Velocidade na Filtração

Segundo DI BERNARDO (1993), há duas velocidades de interesse na filtração:

a) Velocidade de Aproximação (ou taxa de filtração), que é igual à vazão afluyente ao filtro, dividida pela área de sua seção transversal ao fluxo. Geralmente, em filtros de fluxo ascendente ou descendente, esse valor é dado pela vazão afluyente dividida pela área, em planta, do filtro, ou seja:

$$V_a = \frac{Q}{A} \quad (31)$$

em que:

Q : vazão afluyente ao filtro

A : área superficial do leito filtrante

b) A Velocidade Média Intersticial, que é igual à velocidade de aproximação dividida pela porosidade média do leito filtrante, ou seja:

$$V_i = \frac{V_a}{P} \quad (32)$$

em que:

P : porosidade média do meio filtrante, dada por:

$$P = \frac{V_v}{V_v + V_g} \quad (33)$$

Sendo:

V_v : volume de vazios

V_g : volume dos grãos do meio filtrante

A norma técnica NB-592 (Associação Brasileira de Normas técnicas), estabelece o seguinte em relação às taxas de filtração:

- Filtros Lentos: (5.11.9)

A taxa de filtração a ser adotada deve ser determinada por experiências em filtros-piloto, em período superior e necessário para a ocorrência de todas as variações da qualidade da água. Não sendo possível realizar essas experiências, a taxa de filtração não deve ser superior a $6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

- Filtros Rápidos (5.12.5)

A taxa de filtração a ser adotada é determinada por meio de filtro-piloto operado com água a ser filtrada, com camada filtrante igual à dos filtros a serem construídos. Não sendo possível proceder a experiências em filtro-piloto, as taxas máximas são as seguintes:

- a) para filtro de camada simples, $180 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$;
- b) para filtro de camada dupla, $360 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

A taxa máxima em filtros de fluxo ascendente é fixada pela citada norma, em $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

As experiências-piloto de DI BERNARDO (1993), no entanto, vêm mostrando que essa taxa pode chegar a $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

3.5.5.3 - Perda de Carga no Leito Filtrante

A perda de carga no leito filtrante obedece às leis de escoamento em meios porosos. Esse escoamento, quando ocorre com as velocidades intersticiais correspondentes às velocidades de aproximação estabelecidas pela NB-592, se fazem no regime laminar, aplicando-lhes a lei de Darcy:

$$v = K \cdot J \quad (34)$$

em que:

v : velocidade aparente da água no meio poroso = Va ;

K : coeficiente de proporcionalidade (denominado coeficiente de permeabilidade, ou simplesmente permeabilidade);

J : declividade da linha de carga (perda de carga unitária).

A expressão anterior pode ser rescrita da forma:

$$v = K \frac{hf}{L} \quad (35)$$

em que:

hf : perda de carga no leito filtrante

L : espessura da camada filtrante

K : coeficiente de permeabilidade

3.5.5.3.1 - Perda de Carga num Leito Granular

O valor do coeficiente K é mínimo e varia com o tempo quando o filtro está limpo (recém-lavado). À medida que o tempo passa, e que o filtro vai retendo maiores quantidades de materiais em suspensão, seu valor vai aumentando, atingindo o K máximo no instante em que é lavado.

O valor desse coeficiente é aplicável para águas limpas que percolam através do leito limpo e pode ser calculado pela equação:

$$K = \frac{g \cdot \rho \cdot P_0^3}{K_K \cdot \mu \cdot (1 - P_0)^2} \cdot \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (36)$$

em que:

P_0 : porosidade do leito de areia

V : volume real da areia

A : área superficial da areia correspondente a esse volume

K_k : coeficiente de Kozeny (aproximadamente igual a 5,0 para a maior parte das condições de filtração das águas).

Transportando a equação (36) para a equação(35), obtém-se a equação de Kozeny:

$$\frac{h_f}{L} = \frac{K_k}{g} \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot v_a \cdot \frac{(1 - P_0)^2}{P_0^3} \cdot \left(\frac{A}{V} \right)^2 \quad (37)$$

Deve-se levar em conta que as partículas constituintes do leito filtrante não são esferas. Entretanto, define-se o coeficiente de esfericidade como sendo a relação entre áreas de duas partículas de mesmo volume: a partícula esférica e a partícula real.

$$\frac{A_{esfera}}{A_{particula}} = C_e \quad \therefore \quad A_{particula} = \frac{A_{esfera}}{C_e}$$

Nessas condições, a equação de Kozeny pode ser reescrita como:

$$\frac{h_f}{L} = \frac{K_k}{g} \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot v_a \cdot \frac{(1 - P_0)^2}{P_0^3} \cdot \left(\frac{A_{esfera}}{V_{particula} \cdot C_e} \right)^2$$

ou tendo em vista a definição de coeficiente de esfericidade,

$$V_{particula} = V_{esfera} :$$

$$\frac{h_f}{L} = \frac{K_k}{g} \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot v_a \cdot \frac{(1 - P_0)^2}{P_0^3} \cdot \left(\frac{A_{esfera}}{V_{esfera} \cdot C_e} \right)^2$$

Porém,

$$A_{esfera} = 4 \pi R^2 \text{ e } V_{esfera} = \frac{4}{3} \pi R^3$$

portanto:

$$\frac{A_{esfera}}{V_{esfera}} = \frac{3}{R} = \frac{6}{D}$$

logo,

$$\frac{h_f}{L} = \frac{K_k}{g} \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{V_a}{C_e^2} \cdot \frac{(1 - P_0)^2}{P_0^3} \cdot \left(\frac{6}{D} \right)^2$$

fazendo $K_k = 5$, encontra-se a expressão:

$$\frac{h_f}{L} = \frac{180\mu}{g \cdot \rho} \cdot \frac{(1 - P_0)^2}{P_0^3} \cdot \frac{V_a}{C_e^2} \cdot \left(\frac{1}{D} \right)^2$$

ou ainda:

$$\frac{h_f}{L} = \frac{180v}{g} \cdot \frac{(1 - P_0)^2}{P_0^3} \cdot \frac{V_a}{C_e^2} \cdot \left(\frac{1}{D} \right)^2 \quad (38)$$

em que C_e : em meio granular

3.5.5.3.2 - Perda de Carga num Meio Poroso não Granular

Independentemente da teoria utilizada para analisar a remoção das partículas num meio filtrante, ocorre um aumento da perda de carga com o decorrer da filtração em virtude da retenção dessas partículas.

A perda de carga no meio filtrante limpo é proporcional à velocidade de passagem v , segundo a Lei de Darcy:

$$(\Delta h/L) = K_1 \cdot v \quad (39)$$

Se forem ajustadas as perdas de cargas em razão da entrada e saída do filtro e suportes de compressão, tem-se:

$$(\Delta h/L) = K_2 \cdot v_0^2$$

$$(\Delta h/L) = K_0 \cdot v_0 + K_2 \cdot v_0^2 \quad (40)$$

A porosidade do meio pode ser determinada pela fórmula de SAKTHIVADIVAL (1972):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt[3]{\frac{\Delta h}{\Delta h_0}}} \quad \text{ou} \quad \Delta h = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^3 \cdot \Delta h_0 \quad (41)$$

CAPÍTULO IV

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação experimental que culminou neste trabalho foi desenvolvida em um piloto de filtração, com a finalidade de avaliar o leito filtrante de esponjas de poliuretano no que se refere à remoção do material em suspensão (turbidez e cor), à duração da carreira de filtração e à capacidade de armazenamento do leito.

Os testes para verificação da tratabilidade, no meio poroso em questão, foram executados através da construção de um piloto, que será descrito a seguir.

4.1 PILOTO DO FILTRO COM LEITO FILTRANTE DE ESPONJAS DE POLIURETANO

O filtro-piloto foi montado na Estação de Tratamento de Água da CASAN, no Município de Balneário Camboriú, ao lado e na parte inferior de um dos três decantadores lamelares, tendo sido aproveitada a carga hidráulica de um deles, dispensando a instalação de bombas para esse fim, conforme representa a figura 10, abaixo.

O filtro-piloto de esponja de poliuretano é alimentado pela água decantada no sentido ascendente, passando por um medidor de vazão, do tipo hidrômetro da marca LAO.

Dois piezômetros foram instalados na entrada e saída do filtro-piloto, para medição da perda de carga. A água utilizada para a lavagem do filtro durante a sua operação foi a água tratada para abastecimento público.

Dois registros do tipo borboleta foram instalados para execução de manobras de filtragem e lavagem do filtro-piloto.

A água decantada foi submetida ao processo de filtração ascendente, com três tipos de esponjas de densidades e compressões variadas, com taxas de $111 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ a $264 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, com uma duração média de oito horas diárias.

As medições da perda de carga e da vazão eram registradas de 60 a 60 minutos, quando eram também coletadas amostras de água decantada e filtrada dos filtros descendentes da ETA e do filtro-piloto de esponja de poliuretano, para avaliação da cor e da turbidez, no laboratório de controle de qualidade da CASAN.

Durante o experimento, a água utilizada como referencial de comparação para a cor e a turbidez foi a água filtrada pela ETA.

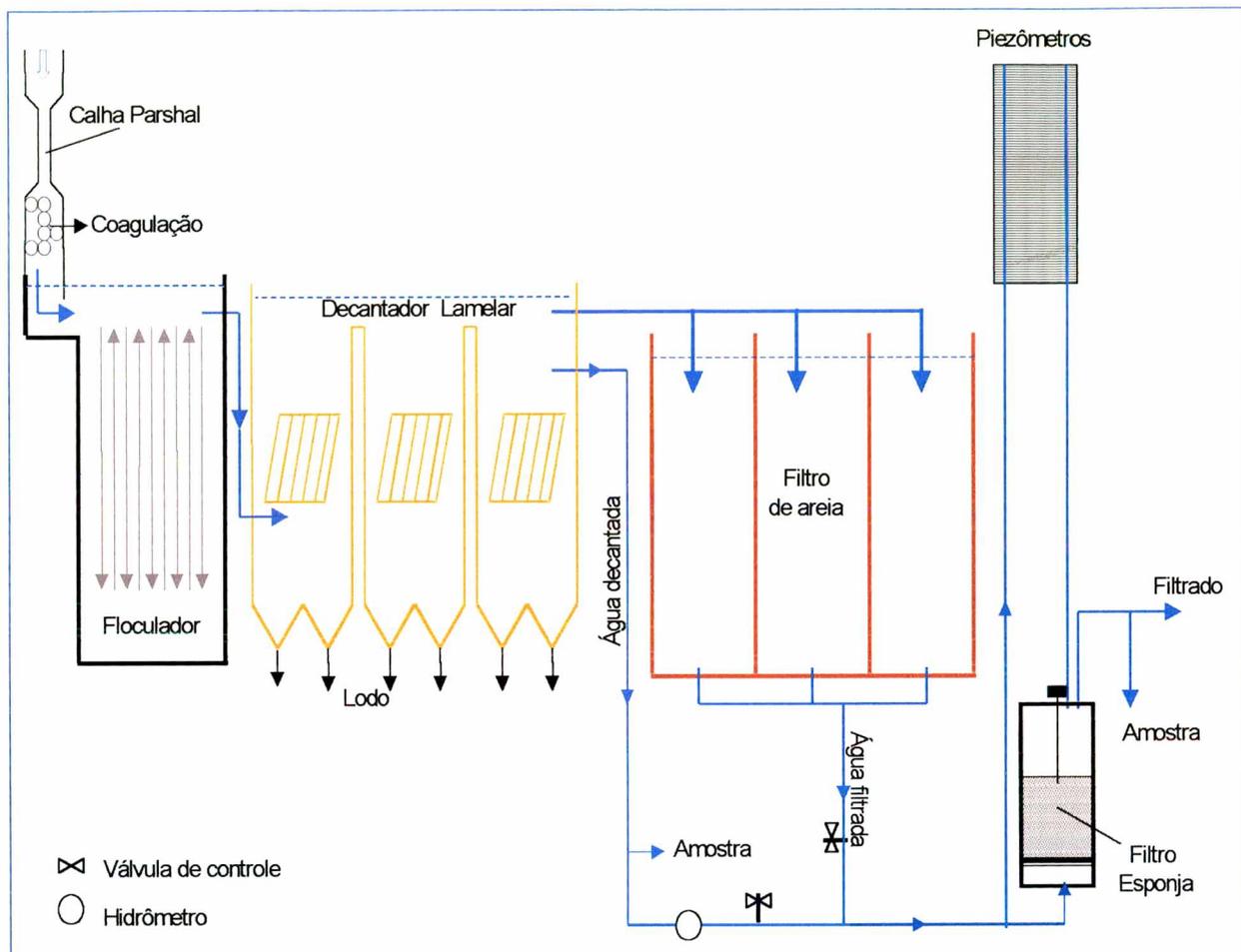


Figura 10: – Desenho esquemático da instalação do piloto.

Inicialmente foram realizados testes hidráulicos (perda de carga, vazão, taxa de filtração) do piloto, no Laboratório Integrado do Meio Ambiente (LIMA) da UFSC. Para determinar a perda de carga foram realizados testes com água tratada em laboratório, visualizada na figura 12, abaixo. Depois dessa etapa, esse piloto (representado na figura 11, abaixo) foi instalado na parte inferior e ao lado de um decantador lamelar da ETA de Balneário Camboriú para o prosseguimento da pesquisa.

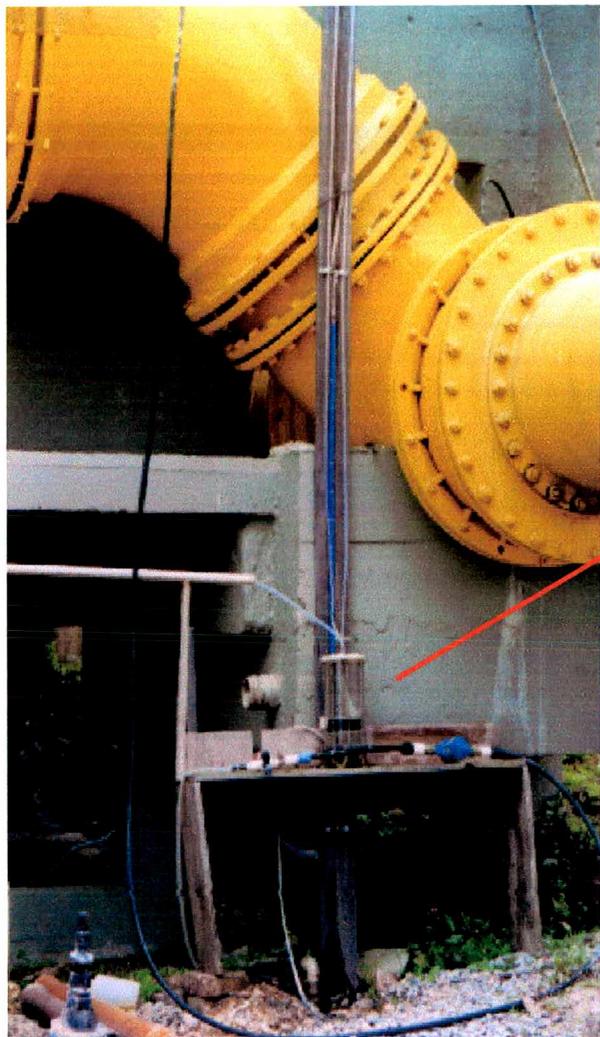


Figura 11: – Fotografia do piloto na ETA

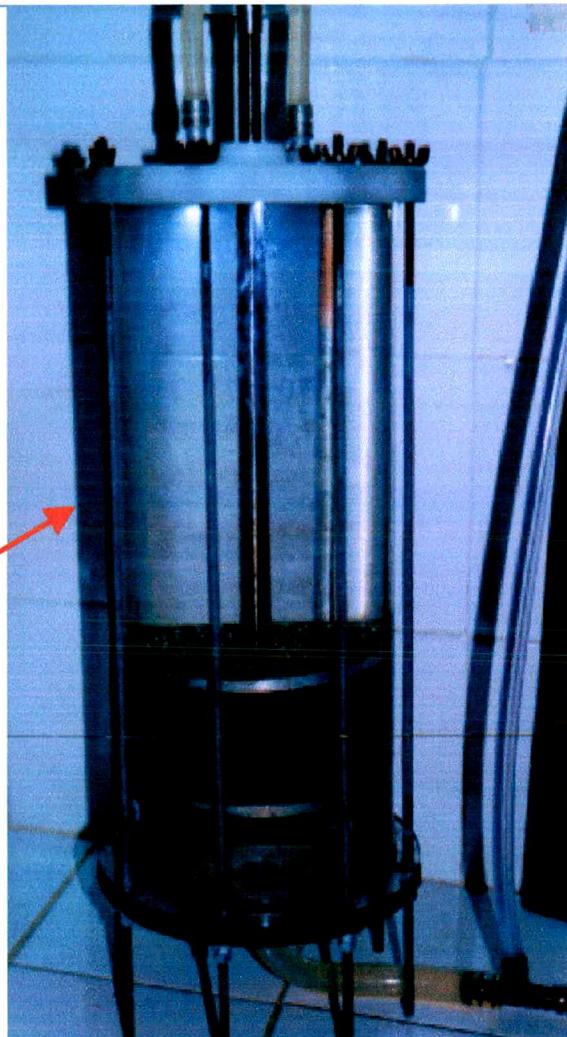


Figura 12:- Fotografia do piloto instalado em bancada

4.1.1 - Detalhes do Filtro Piloto

O filtro foi desenvolvido e construído numa coluna de acrílico com 118 mm de diâmetro e 300 mm de altura, composto por duas placas perfuradas nas quais está inserido o meio filtrante (esponjas de poliuretano) e um eixo central com rosca, o qual permite a compressão e a descompressão desta. O leito filtrante é comprimido entre as tampas superior e inferior. A tampa inferior é fixa em um fundo falso e a tampa

superior pode ser movida para baixo e para cima através do eixo central para estabelecer a compressão ou descompressão desejada, com as densidades e compressões pré-estabelecidas.

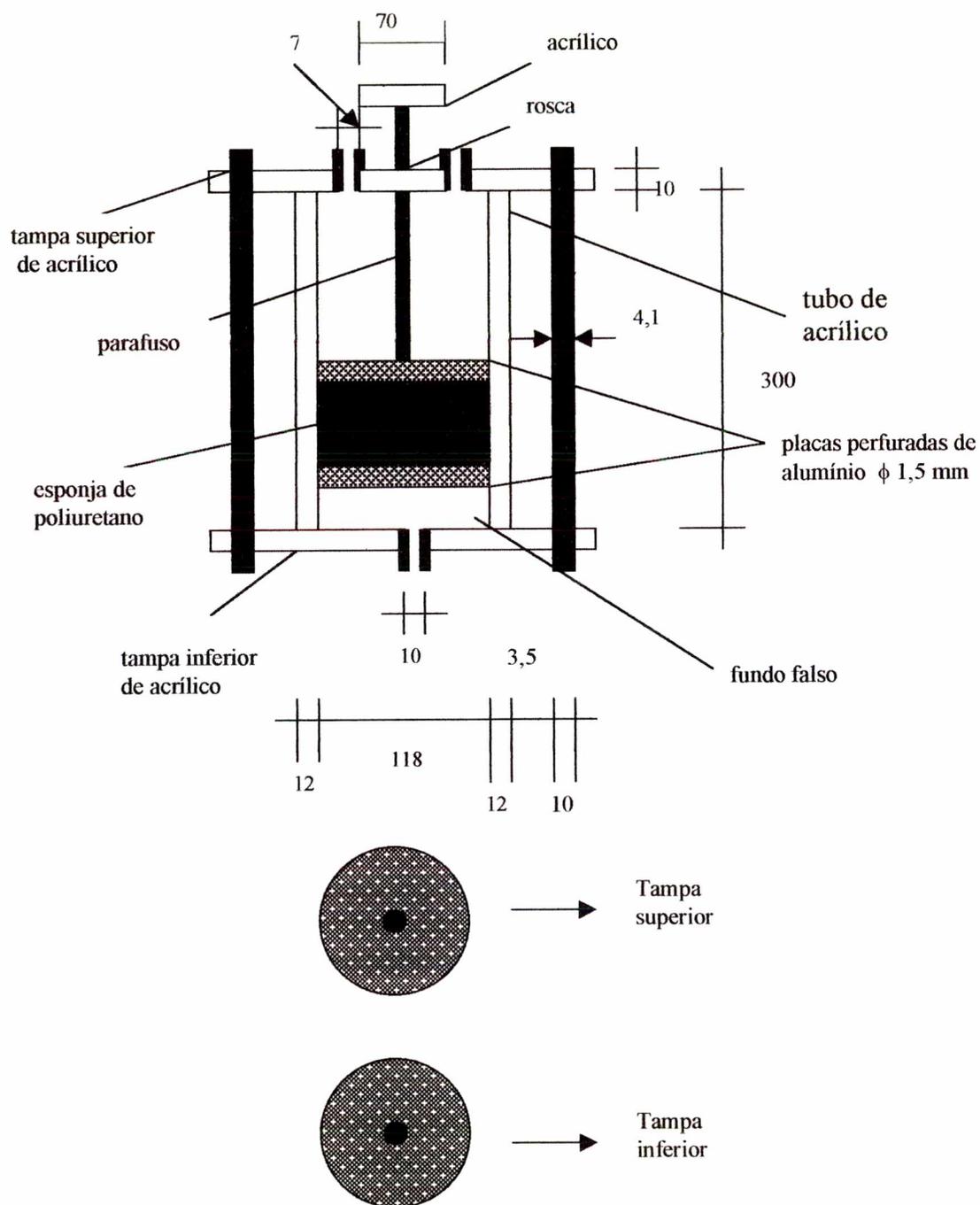


Figura 13: Esquema do projeto piloto.

4.2 - QUALIDADE DA ÁGUA DECANTADA (AFLUENTE DO FILTRO)

Conforme exposto anteriormente, a água de alimentação do filtro foi uma água decantada proveniente de um dos decantadores da ETA de Balneário Camboriú, apresentando geralmente turbidez entre 1 e 3 NTU, e cor entre 10 e 20 uC. Possui uma característica interessante: a ascensão de flocos nos decantadores em dias de temperaturas mais elevadas, isto é, acima de 28°C, evidenciada na figura 14, abaixo.

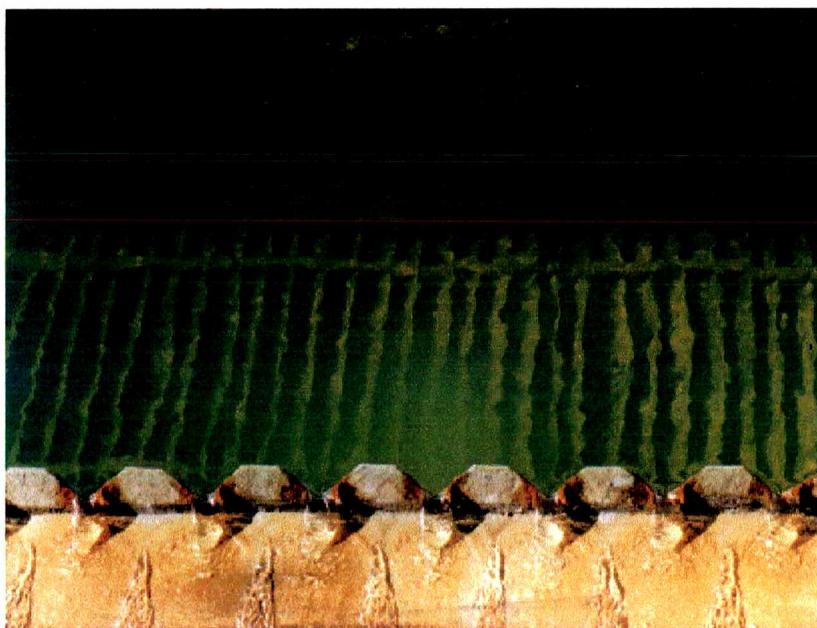


Figura 14: - Fotografia do decantador da ETA de Balneário Camboriú evidenciando a ascensão de flocos.

4.2.1 - Turbidez e Matéria em Suspensão

Em águas de baixa turbidez, é difícil avaliar a eficiência de um filtro somente pela remoção desta. Os valores aceitáveis do parâmetro de avaliação da turbidez, pelas Normas de Potabilidade, podem conter quantidades aceitáveis de material em suspensão. Segundo Bernhardt, citado por RICHTER, s/d.:

"O principal problema no tratamento (...) não se origina na extração de turbidez (...), mas sim na remoção de algas e seus detritos, como também no processo de floculação em que resultam de substâncias algogênicas. Em comparação a estes problemas, a eliminação de turbidez tem um papel relativamente pequeno."

Na filtração direta, praticamente todo o material coagulado deveria ser removido do leito filtrante, a não ser que o mesmo apresente sérias deficiências, que normalmente não são detectadas nas curvas de turbidez/perda de carga *versus* tempo de filtração. Sinais dessas deficiências incluem excesso de material depositado na rede de distribuição e nos reservatórios, proveniente do transpasse de material coagulado através do leito filtrante. O transpasse pode ocorrer quando o leito filtrante não possui profundidade suficiente ou o tamanho dos grãos é grande, ou, ainda, essas duas causas ocorrem simultaneamente para filtros de areia.

No filtro de esponja, o transpasse tem influência em razão da taxa de compressão da esponja filtrante e a sua porosidade.

Por esse motivo, o mérito maior deveu-se à avaliação do filtro pela determinação indireta do depósito específico, através da perda de carga durante a carreira de filtração.

4.3 - ESTRUTURA POROSA - MEIO FILTRANTE

4.3.1 - Estrutura Molecular da Esponja de Poliuretano

Vários são os elementos que compõem a estrutura molecular da esponja de poliuretano. Procede-se, aqui, a uma descrição sucinta desses elemento e suas reações no processo de industrialização.

Polímeros são substâncias formadas de macromoléculas que apresentam unidades estruturais que se repetem sucessivamente. O material

é formado por mais de um monômero, denominado de copolímero de condensação.

O poliuretano constitui-se de copolímeros formados na polimerização de vários poliésteres e poliéteres com o isocianato de parafenileno. Esses copolímeros possuem estrutura tridimensional muito complexa, com enorme versatilidade. No caso estudado, podemos classificá-los como poliuretanos esponjosos ou espumados.

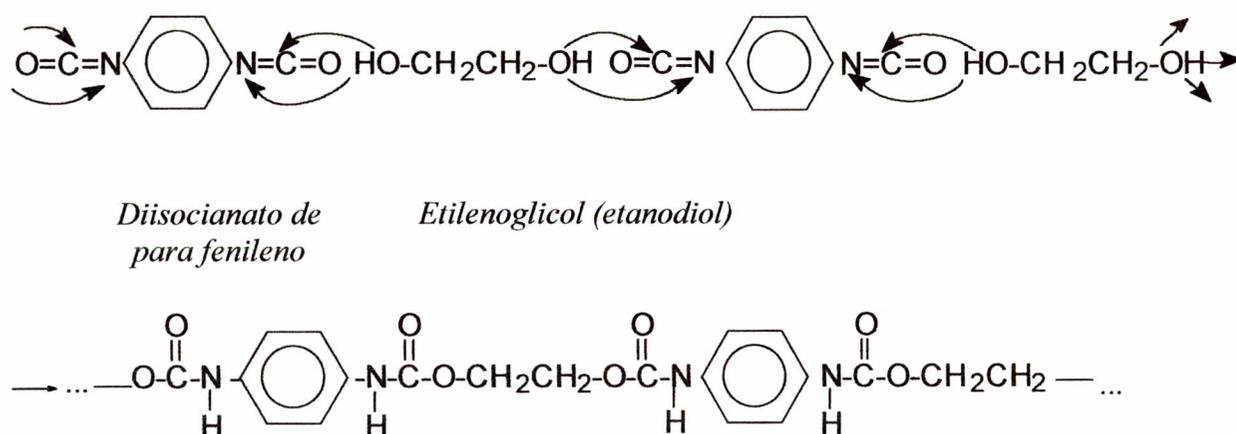


Figura 15: - Representação da equação de poliuretano

O poliuretano é fabricado em condições tais que, além da reação de polimerização, ocorre também outra reação que libera gás no meio reacional. Isso faz o poliuretano crescer e ficar cheio de bolhas em seu interior, produzindo o conhecido aspecto de espumas, cujo material resultante é comumente usado em colchões e travesseiros. Apesar de não haver eliminação de moléculas na polimerização que forma o poliuretano, esta é classificada como polímero de condensação.

4.3.2 - Características da Esponja (Tamanho das Partículas Retidas)

As esponjas utilizadas na pesquisa apresentam em sua superfície poros grandes, de diâmetros entre 30 e 200 μm e poros pequenos na

estrutura interna que constitui a maioria de sua massa, e tamanhos variáveis de 1 a 20 μm diâmetro. A porosidade média da esponja comercial é de 0,80 $= \epsilon_m = V/V_e$, com V = volume de água dentro do volume total (esponja + água) e V_e = volume da esponja comprimida.

Foram utilizados três tipos de esponjas de poliuretano classificadas em:

- a) Esponja cinza - Filtral 1640 (comercialmente designada por densidade 20);
- b) Esponja preta - Filtral 04010 (comercialmente designada por densidade 27);
- c) Esponja rosa - Filtral 3075 (comercialmente designada por densidade 32).

A figura 16, abaixo, representa o conjunto das esponjas utilizadas no experimento.

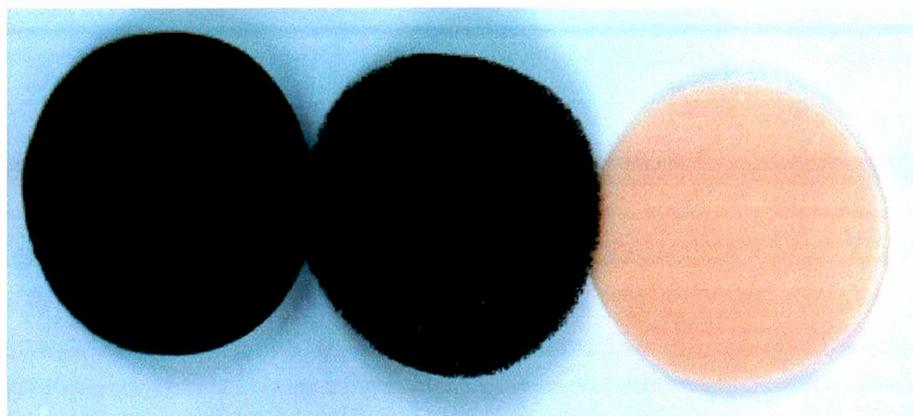


Figura 16: – Fotografia das esponjas utilizadas como meio filtrante.

As principais características das esponjas segundo as normas técnicas da Empresa TRORION estão descritas na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - ESPECIFICAÇÃO DAS ESPONJAS DESTINADAS AO MERCADO DE FILTRAÇÃO INDUSTRIAL DENOMINADA DE FILTRAL

FILTRAL - ESPECIFICAÇÃO					
CARACTERÍSTICA	UNIDADES	NORMAS	04010	1640	3075
Nº de células	Células p/ cm linear	-	4 a 6	14 a 17	25 a 30
Resiliência	%	NBR-8619	Mín. 30	Mín. 28	Mín. 25
Densidade	Kg/M	NBR-8537	26 a28	Mín. 20	Mín. 32
ILD a 25%	N	NBR-9176	55+ - 10	50+- 10	40+-10
ILD a 40%	N	NBR-9176	75+-10	80+-10	55+-10
ILD a 65%	N	NBR-9176	140+-20	120+-20	110+-20
Alongamento	%	NBR-8515	Mín. 300	Mín. 450	Mín. 450
Resistência a tensão	Kpa	NBR-8515	Mín. 100	Mín. 120	Mín.120
Resistência a Rasgo	N/m	NBR-8516	Mín. 800	Mín.700	Mín.650
Passagem de ar	CFM (pés cubicos/min	NBR-8517	11	3,5	3,5

Fonte: TRORION, 1998.

A figura 17, abaixo demonstra que a esponja comprimida remove uma concentração maior de partículas em relação à esponja não comprimida.

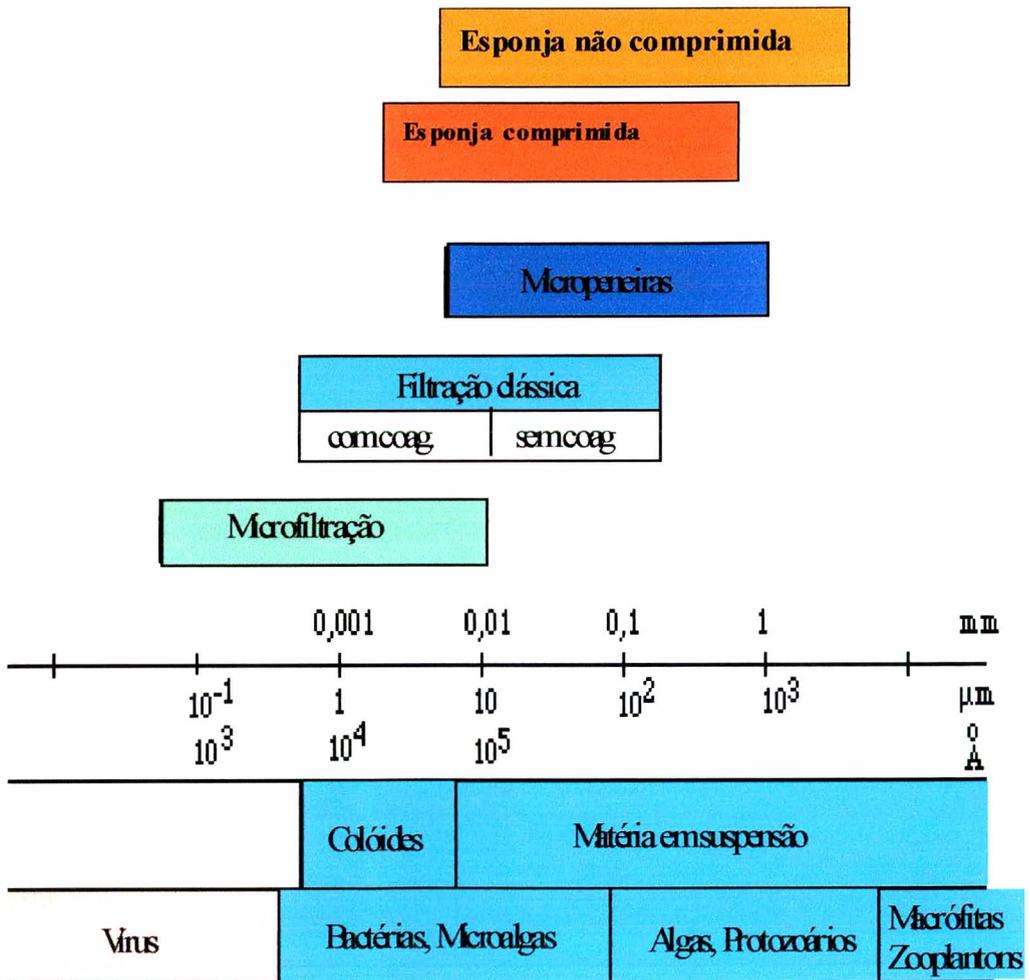


Figura 17: - Esquema de comparação entre diversos processos de filtração e a esponja utilizada.

A esponja preta possui uma espessura de 20 cm, sendo utilizada em uma só camada. A figura 18, abaixo, apresenta a porosidade em escala real e a nível microscópico, cujo aumento foi de cem vezes, não se visualizando nenhum poro. Comercialmente essa esponja possui uma densidade de 26 a 28, que representa a sua porosidade confirmada através de testes laboratoriais.

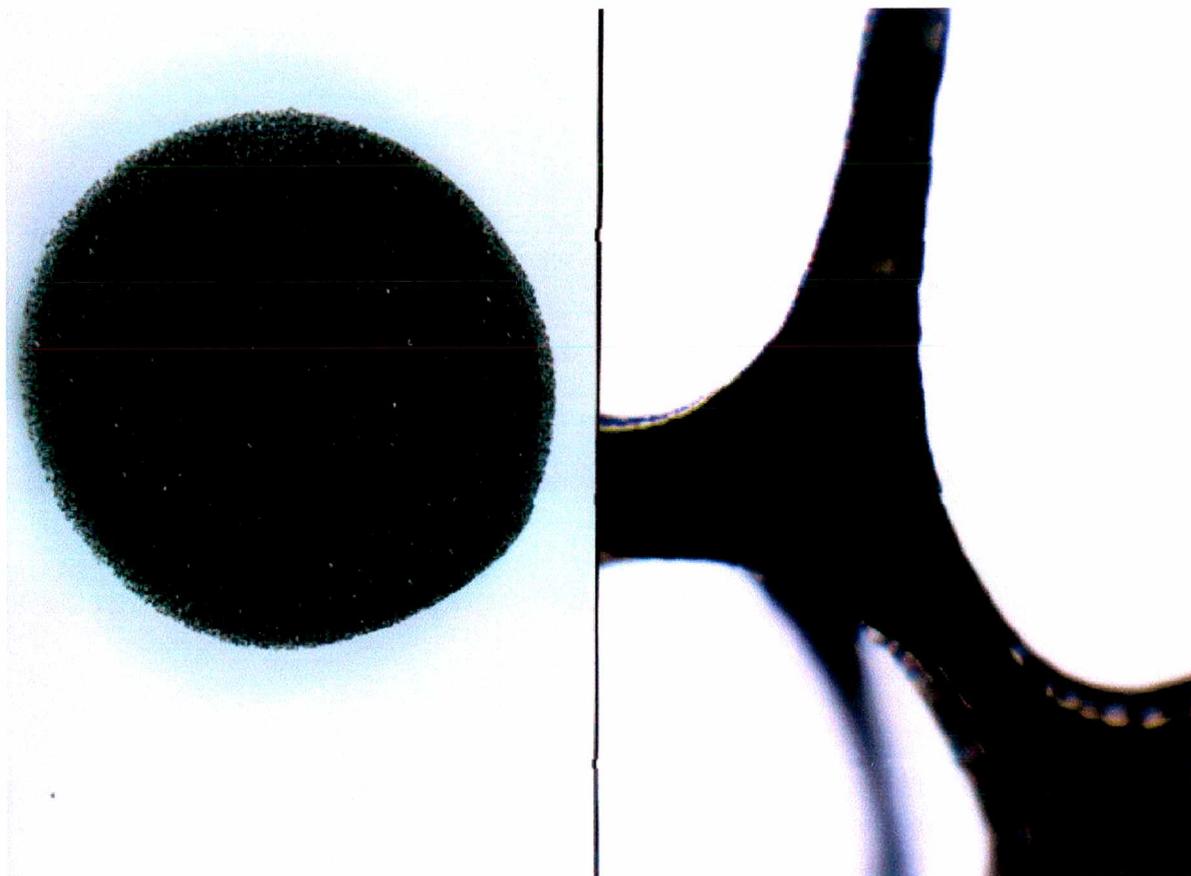


Figura 18: - Fotografias da esponja preta vista em escala real e no microscópio eletrônico com aumento 100x.

O leito filtrante da esponja de cor cinza possuía dez camadas com a espessura de 2 cm cada uma. A porosidade dessa esponja, aumentada cem vezes microscopicamente, é menor do que a esponja preta, conforme ilustra a figura 19, abaixo.

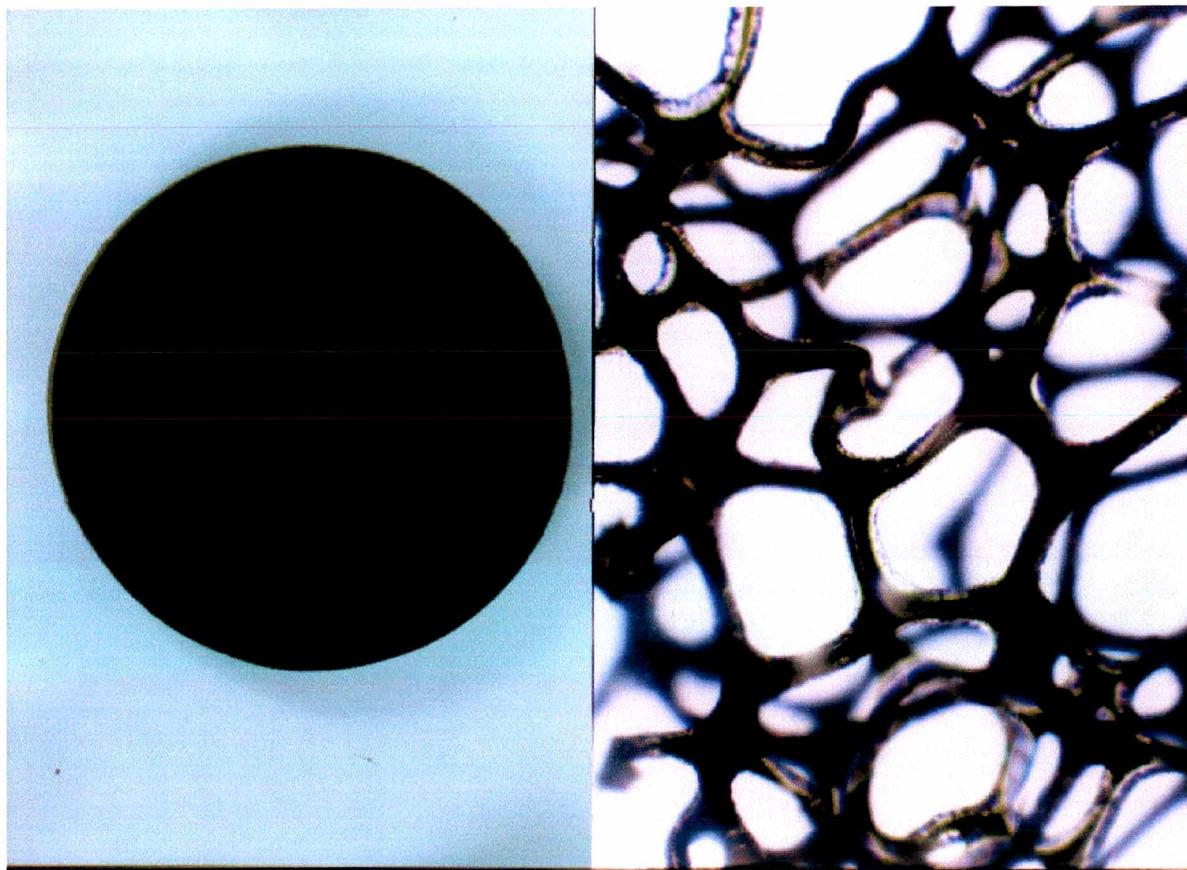


Figura 19: - Fotografias da esponja cinza vista em escala real e ao microscópio eletrônico com aumento 100x.

O leito filtrante da esponja rosa foi constituído por vinte camadas e com a espessura de 1 cm cada uma. Microscopicamente, observou-se que a porosidade desta e da esponja cinza são semelhantes, conforme demonstra a figura 20, abaixo. A quantidade de camadas de cada esponja deu-se conforme sua espessura comercial, de modo a deixar o meio filtrante sempre com a mesma altura (20 cm).

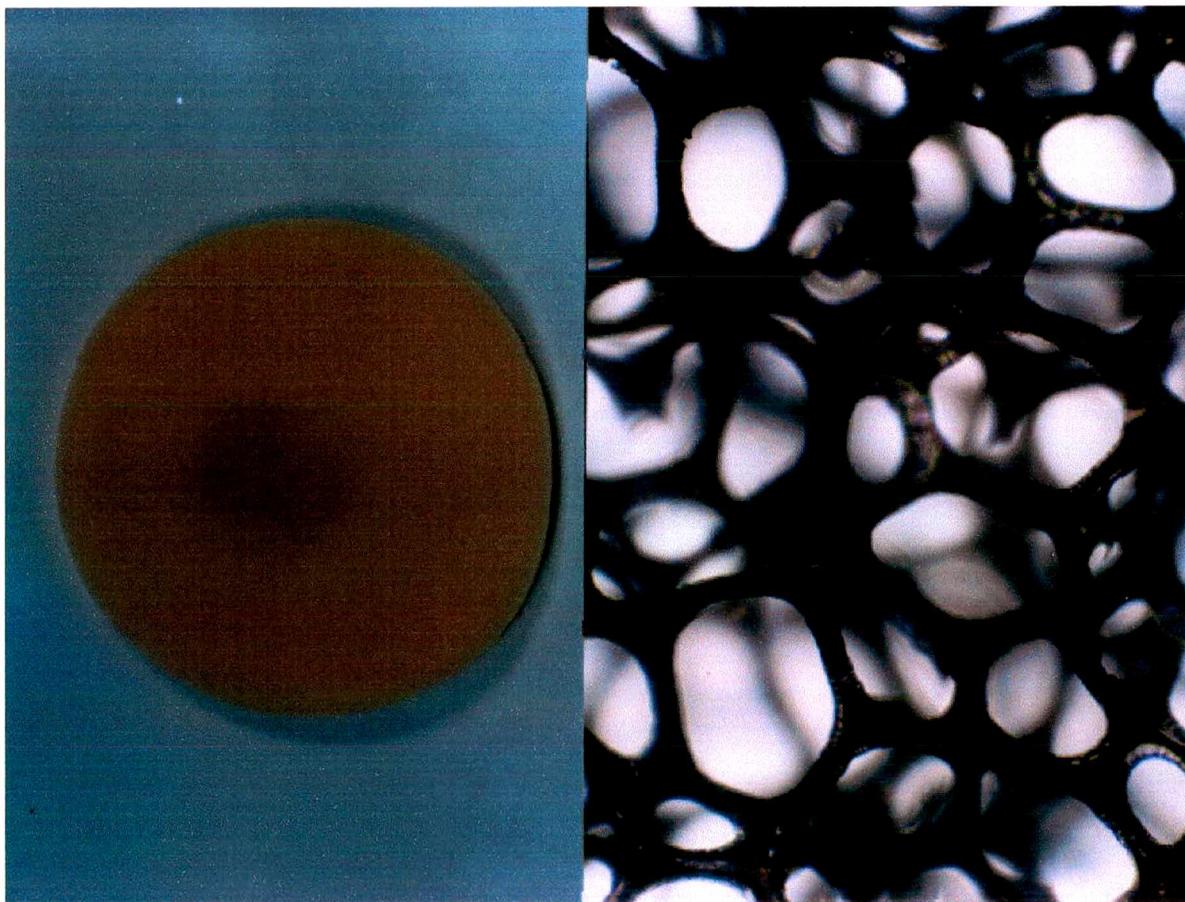


Figura 20: - Fotografias da esponja rosa vista em escala real e ao microscópio eletrônico, com aumento 100x.

O material filtrante utilizado inicialmente foi de esponjas de poliuretano de poliéter, fabricado em Santa Catarina. Em razão de sua característica de baixa resistência ao rasgo, o que nos levou a resultados insatisfatórios com relação à eficiência da filtração, foi posteriormente

descartado. Para o prosseguimento da pesquisa, passou-se a utilizar esponjas de poliuretano de poliéster, cuja característica principal é a sua alta resistência ao rasgo, quando comparadas com as de poliéter. O material foi cedido pela Empresa TRORION de São Paulo.

4.4 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE

A porosidade foi determinada por processo laboratorial, com as massas específicas verdadeiras e aparentes para esponjas.

A determinação da massa específica verdadeira foi realizada com base numa adaptação da metodologia citada na Norma NBR 14234:1998 da ABNT, sendo expressa pela seguinte equação:

$$ME = \frac{m_1}{P_2 + (m_1 - P_1)} \quad (42)$$

ME : é a massa específica verdadeira

P_1 : é a massa do frasco, mais água destilada, mais amostra, em gramas

P_2 : é a massa do frasco, mais água destilada em gramas

m_1 : é a massa da amostra em gramas

A massa específica aparente é expressa pela equação:

$$MA = \frac{m}{V} \quad (43)$$

MA : é a massa específica aparente

m : é a massa da esponja em gramas

V : é o volume da esponja em cm^3

A porosidade, as massas específicas verdadeira e aparente relacionam-se por meio da seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{ME - MA}{ME} \quad (44)$$

ε : é a porosidade

ME : é a massa específica verdadeira em g/cm^3

MA : é a massa específica aparente em g/cm^3

A porosidade de um meio filtrante, ε , é significativamente afetada pela forma da esponja e está fortemente relacionada à taxa de crescimento de perda de carga, resultante da remoção de impurezas durante a filtração. A massa específica e a massa específica aparente, conforme DI BERNARDO (1993), dependem do tipo de material usado como meio filtrante. Os resultados são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - MASSA ESPECÍFICA, MASSA APARENTE E POROSIDADE DOS MATERIAIS FILTRANTES

	ESPONJA ROSA	ESPONJA CINZA	ESPONJA PRETA
ME (g/cm^3)	0,07484667	05932203	1,2078652
MA (g/cm^3)	0,0305301	0,0271223	0,0283653
ε não comprimida (%)	95,25	95,43	97,65
ε 50% compressão (%)	91,14	90,85	95,30
ε 70% compressão (%)	85,23	84,75	92,17
ε 80% compressão (%)	77,85	77,13	88,25

A figura 21, abaixo, mostra o tamanho das esponjas proporcional às suas compressões, evidenciando a correlação com a porosidade.

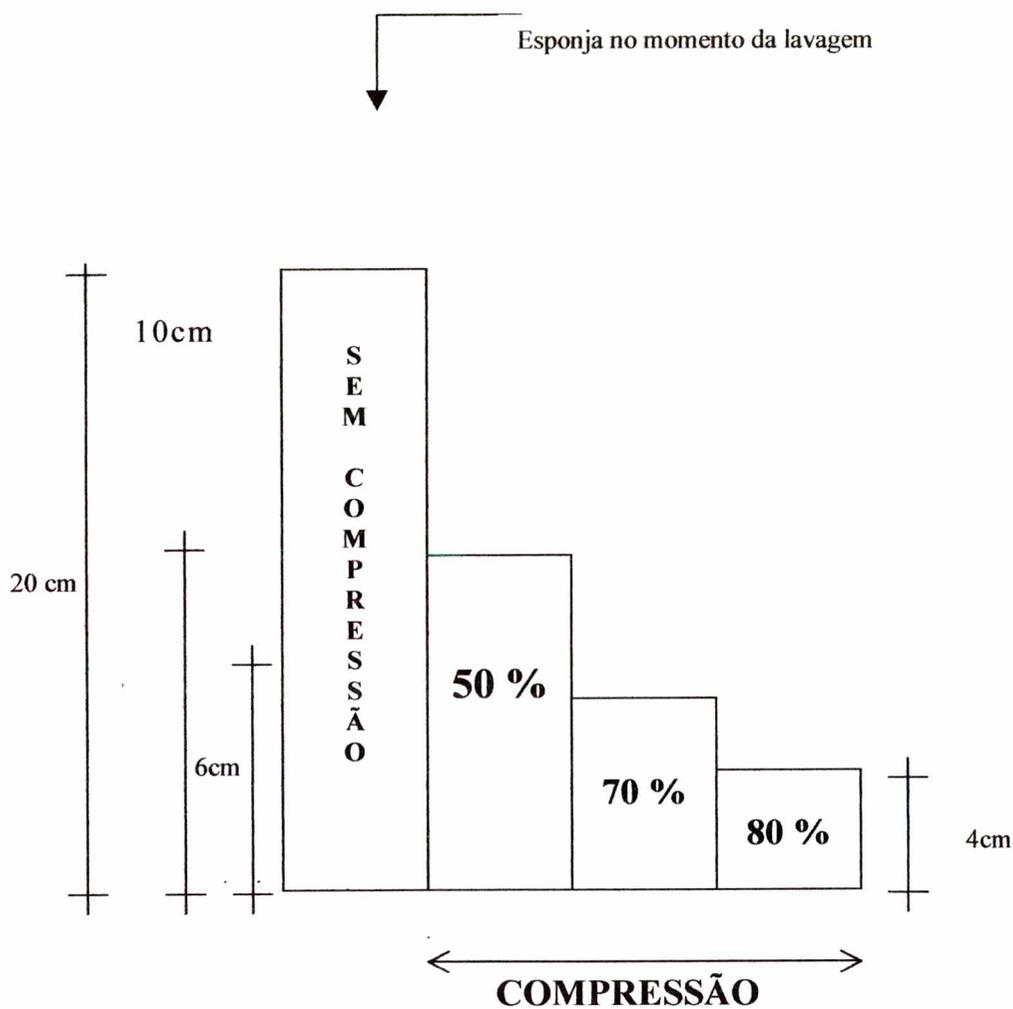


Figura 21: - Esquema de correlação dos tamanhos das esponjas em função da compressões e porosidades.

4.5 - OPERAÇÃO DO FILTRO-PILOTO

4.5.1 - Alimentação do Piloto

A água a ser filtrada é conduzida ao filtro pelo tubo de alimentação que sai de dentro de um dos decantadores da ETA, sendo introduzida

através do leito de filtragem que é a esponja de poliuretano. A água é filtrada no sentido ascendente, sendo descartada pela parte superior do filtro-piloto.

4.5.2 - A Lavagem

A lavagem é realizada quando se obtém determinada perda de carga e descomprimindo-se a esponja, fazendo passar a água no leito filtrante por três minutos, utilizando uma vazão de 1,25 L/min, resultando uma taxa de aplicação de 203 m³/m².dia. Esse sistema é semelhante ao da filtração em meio granular, pelo qual a lavagem é realizada através da expansão da areia no processo de eliminação das impurezas aderidas durante a filtração, conforme evidenciado na figura 22, abaixo, no início da lavagem da esponja preta.

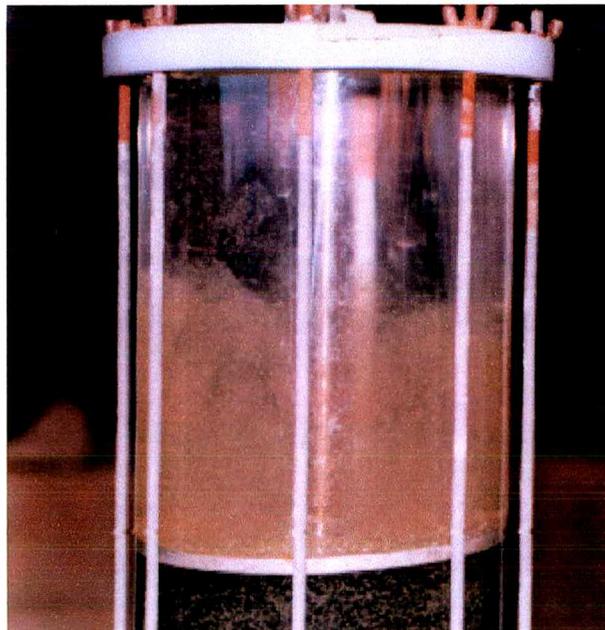


Figura 22: – Fotografia da lavagem do filtro com esponja preta.

4.6 - DAS ANÁLISES

Os principais parâmetros de análises e medidas para os ensaios com o filtro-piloto foram: a turbidez, a cor aparente e a perda de carga do filtro.

4.6.1 -Turbidez

A turbidez é uma medida de resistência da água à passagem de luz, provocada pela presença de materiais em suspensão, tais como sílica, argila, matéria orgânica e inorgânica, finamente dividida em organismos microscópicos. Esses materiais ocorrem em diversos tamanhos, variando desde as partículas maiores que se depositam, até partículas que permanecem em suspensão por muito tempo.

O método utilizado para medir a turbidez foi o nefelométrico, que se baseia na leitura da intensidade da luz dispersa pela amostra em um ângulo de 90° com direção da luz incidente, em relação à intensidade da luz dispersa, por uma suspensão padrão nas mesmas condições.

Esse método apresenta o seguinte procedimento: a amostra é agitada para dispersar perfeitamente os sólidos e em seguida é introduzida em um tubo de vidro até a marca indicada. O tubo com a amostra é inserido no local apropriado em um turbidímetro da marca HACH modelo 2100 N, cobrindo-se a amostra com o aparador. A leitura é realizada diretamente. A turbidez é expressa em Unidade Nefelométrica de Turbidez (NTU).

4.6.2 - Cor

A água adquire cor como resultado da decomposição da matéria orgânica, pela presença de alguns metálicos como ferro e manganês e de material em suspensão.

A cor pode ser de dois tipos: aparente e verdadeira. A cor verdadeira ou real é causada por material dissolvido e colóides e a cor aparente resulta

da adição de turbidez à cor verdadeira. A água sofre alteração de sua coloração original pela reflexão e dispersão da luz pelas partículas em suspensão.

Foram realizadas determinações de cor aparente pela utilização do método nefelométrico. Por esse procedimento, a amostra, após agitação, foi introduzida em uma cubeta de vidro até a marca indicada, sendo inserida no local apropriado do espectrofotometro HACH modelo 2010, cobrindo-se a amostra com seu aparador e em seguida realizada a sua leitura. Esta é realizada diretamente, sendo que a cor é expressa em uC (unidade de Cor).

CAPÍTULO V

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

A operação com o filtro-piloto foi iniciada em agosto de 1998, na ETA de Itajaí, recebendo água da saída dos decantadores lamelares, utilizando-se, conforme visto anteriormente, esponjas de poliuretano à base de poliéter. O filtro-piloto apresentou vários problemas, desde a parte hidráulica até o meio filtrante, resultado de filtração indesejáveis, como turbidez alta. Através de análise mais detalhada do material filtrante, constatou-se que suas propriedades não seriam adequadas para um prosseguimento do estudo.

Em consequência disso, o filtro-piloto foi removido e instalado na ETA de Balneário Camboriú, em maio de 1999 e seu monitoramento foi contínuo num período de oito a dez horas diárias. Durante a noite não foi efetuada a observação, em razão de vários fatores que interferiram no processo, tais como a reforma nos decantadores.

5.1 - FILTRAÇÃO COM ESPONJAS LIMPAS

5.1.1 - Determinação das Perdas de Carga no Filtro Limpo

Os ensaios foram efetuados com esponjas de várias densidades aqui representadas pelas cores cinza, rosa e preta. As figuras 23 ,24 e 25

mostram o comportamento da perda de carga das esponjas cinza, rosa e preta, variando-se a taxa de compressão da esponjas.

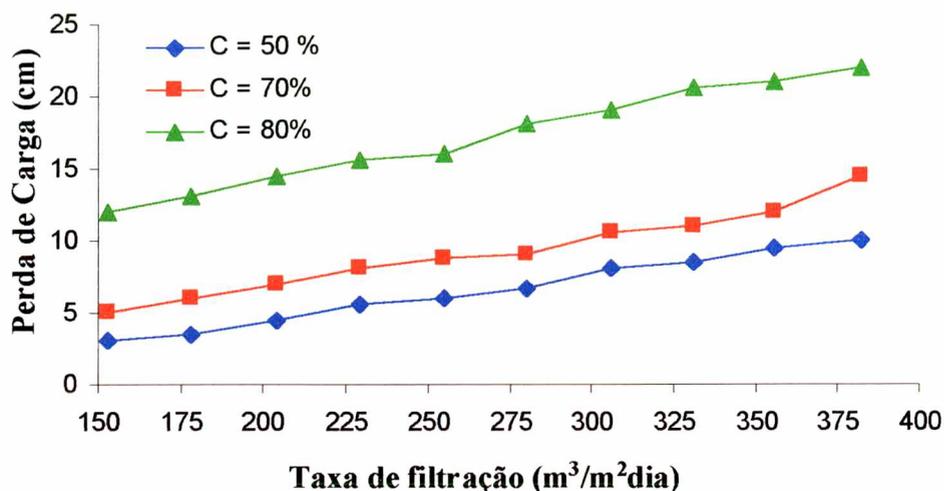


Figura 23: Perda de carga no filtro limpo em função da taxa de filtração e da compressão da esponja cinza.

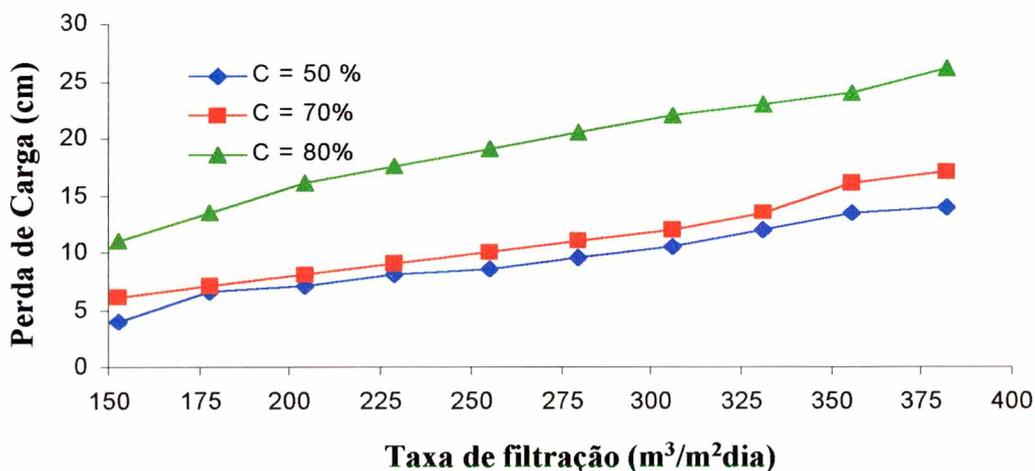


Figura 24: Perda de carga no filtro limpo em função da taxa de filtração e da compressão da esponja rosa.

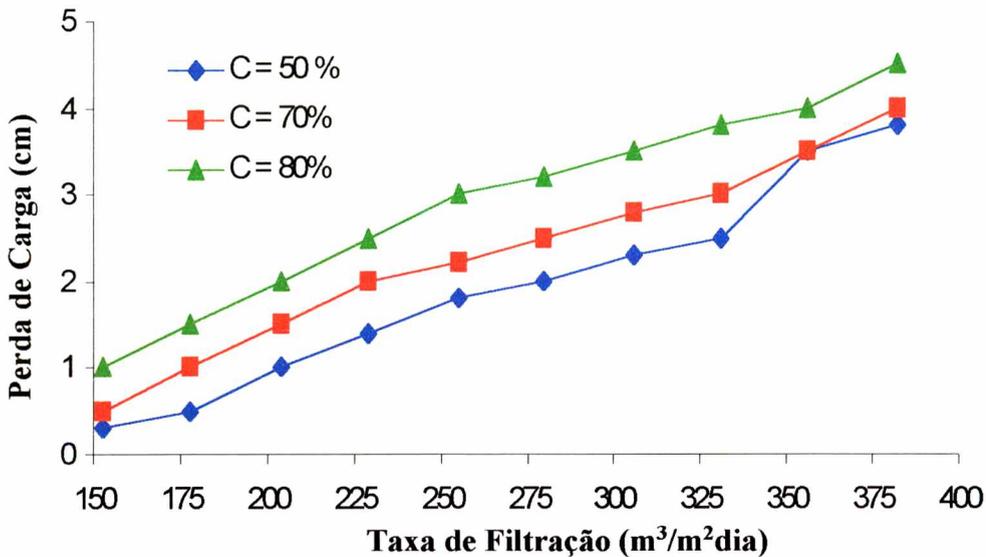


Figura 25: Perda de carga no filtro limpo em função da taxa de filtração e da compressão da esponja preta.

Os resultados das perdas de cargas no meio limpo foram conforme o esperado: uma maior perda de carga para uma maior compressão e um aumento crescente conforme o aumento da taxa de filtração. Observa-se que houve um pequeno aumento das perdas de cargas com o aumento da velocidade da filtração (taxa), como decorrência da grande porosidade do meio filtrante, fazendo com que houvesse um pequeno desprendimento de energia no momento da filtração.

5.1.2 - Ensaios de Filtração

Nos experimentos pertinentes à filtração, foi medida a eficiência por meio de análises de turbidez, com medições descontínuas, aplicando como efluente água decantada do processo de tratamento da ETA.

Foram realizados testes com as esponjas cinza, rosa e preta com a variação de compressões na ordem de 50%, 70% e 80% respectivamente,

bem como a variação da taxa de filtração. Inicialmente os testes foram realizados numa média de oito horas por dia, pois perdia-se muito tempo para realizar a calibração do piloto, sendo que, quando ocorria a saturação do leito filtrante realizava-se a sua retrolavagem durante três minutos, gastando-se 3,75 litros de água tratada da ETA, com uma taxa de aplicação de $203 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$. A pressão necessária para operar o piloto é a mesma pressão do leito filtrante limpo. Para medir a resistência do leito filtrante foram utilizados piezômetros, medindo a diferença de pressão em centímetros de coluna d'água. Para aumentar ou reduzir a vazão, é necessário aumentar ou reduzir a pressão o que resulta em um aumento ou redução da perda de carga. Por isto, é muito importante saber as perdas de carga com o leito filtrante limpo. A pressão que foi utilizada para filtrar foi a mesma para lavar o filtro: a esponja foi descomprimida e a resistência do leito filtrante reduziu, conforme a descompressão.

Foram realizados testes de filtração para os três tipos de esponjas com as diferentes compressões, durante o período de um ano, porém com intervalos ocasionados por fatores intervenientes, alheios a nossa vontade, como a reforma ocorrida nos decantadores da ETA. Para a realização desses testes, foram realizadas as medições para perda de carga, vazões de alimentação do filtro-piloto, taxas de filtração, coleta e análises de cor e turbidez das águas decantadas, filtradas do filtro-piloto e do filtro da ETA, cujos resultados individualizados encontram-se em anexo, nas 27 tabelas e figuras com seus respectivos gráficos. Através de análise mais detalhada com base nos ensaios realizados, criou-se um resumo desses ensaios, tendo-se por parâmetros os seguintes critérios: utilizar somente os resultados que apresentaram na água tratada os seguintes valores para cor e turbidez: cor com valor menor ou igual a 5 (uC) e turbidez menor ou igual a 1 (NTU). Para as taxas de filtração, foi efetuada a média para cada ensaio.

5.1.2.1 - Filtração para as diversas Compressões nas Esponjas Cinza, Rosa e Preta

Os resultados apresentados a seguir, referem-se a taxas de filtração aproximadas em $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$, com várias esponjas e compressões diferentes.

5.1.2.1.1 - Compressão De 80%

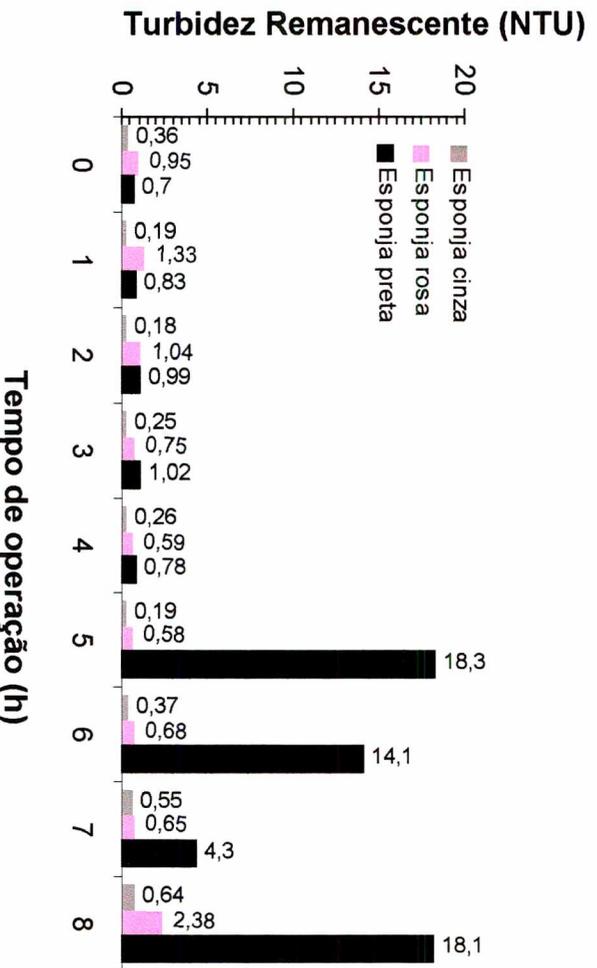


Figura 26: Turbidez Remanescente em função da carreira de filtração para uma compressão de 80% e Taxa Superficial de Filtração ($192 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$).

5.1.2.1.2 - Compressão de 70%

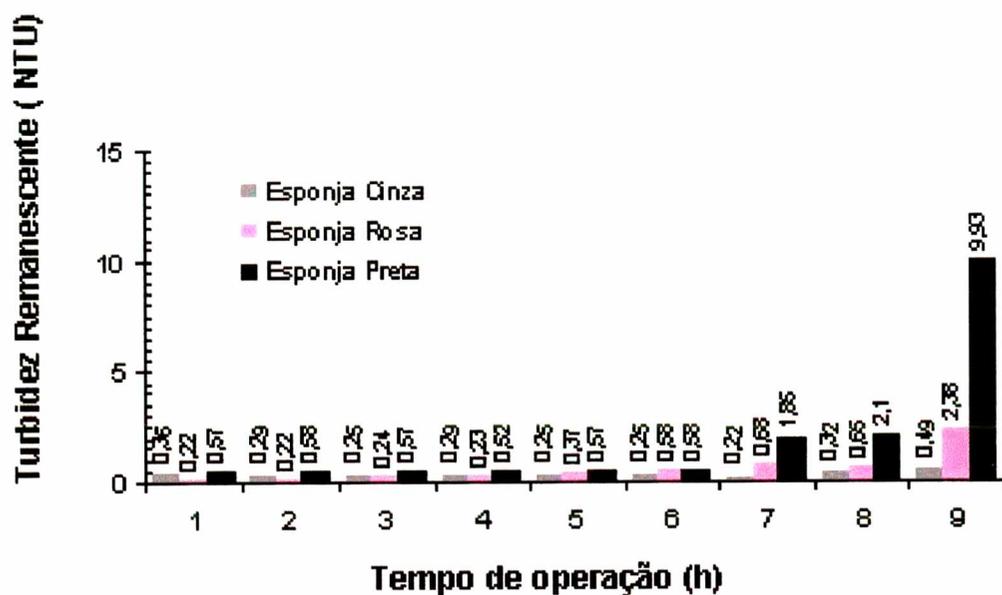


Figura 27: Turbidez Remanescente em função da carreira de filtração para uma compressão de 70% e Taxa Superficial de Filtração ($218 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$).

5.1.2.1.3 - Compressão de 50%

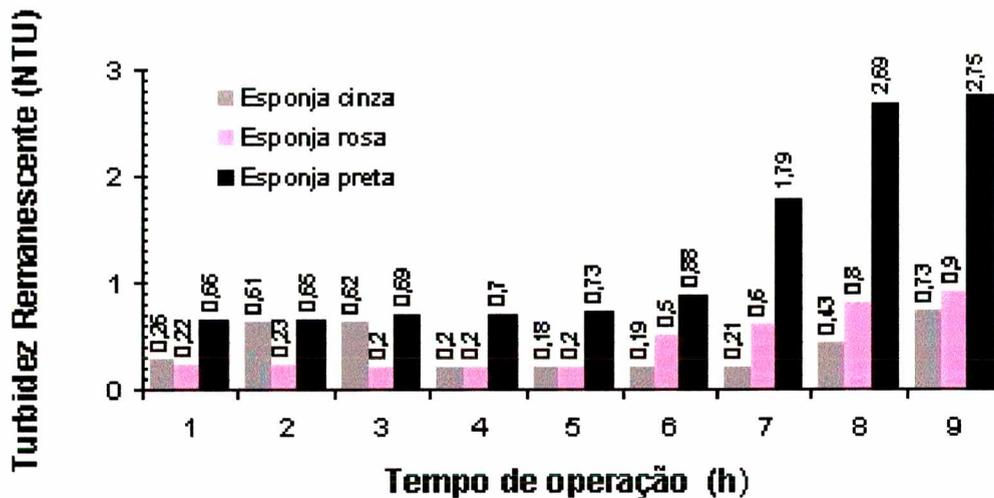


Figura 28: Turbidez Remanescente em função da carreira de filtração para uma compressão de 50% e Taxa Superficial de Filtração ($212 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$).

Foram realizadas as médias para os resultados obtidos durante os ensaios de filtração, considerando-se, como parâmetro fundamental, valores menores ou igual a 1 para a turbidez remanescente e para a cor aparente valor menor ou igual a 15 uC. A esponja preta apresentou resultados mais pobres, após cinco horas de funcionamento passou a reter muito pouco os flocos.

Observa-se pelas figuras 26, 27 e 28 que a esponja cinza, com as diversas compressões, apresentou em relação à turbidez valores menores que 0,5 NTU, determinados pelo tempo de filtração, e uma carreira de filtração maior. A esponja rosa apresentou também bons resultados, porém a turbidez remanescente ficou um pouco maior que a da esponja cinza e apresentou, no final de oito horas de funcionamento, turbidez de 1 NTU.

5.1.3 - Avaliação da Esponja Cinza

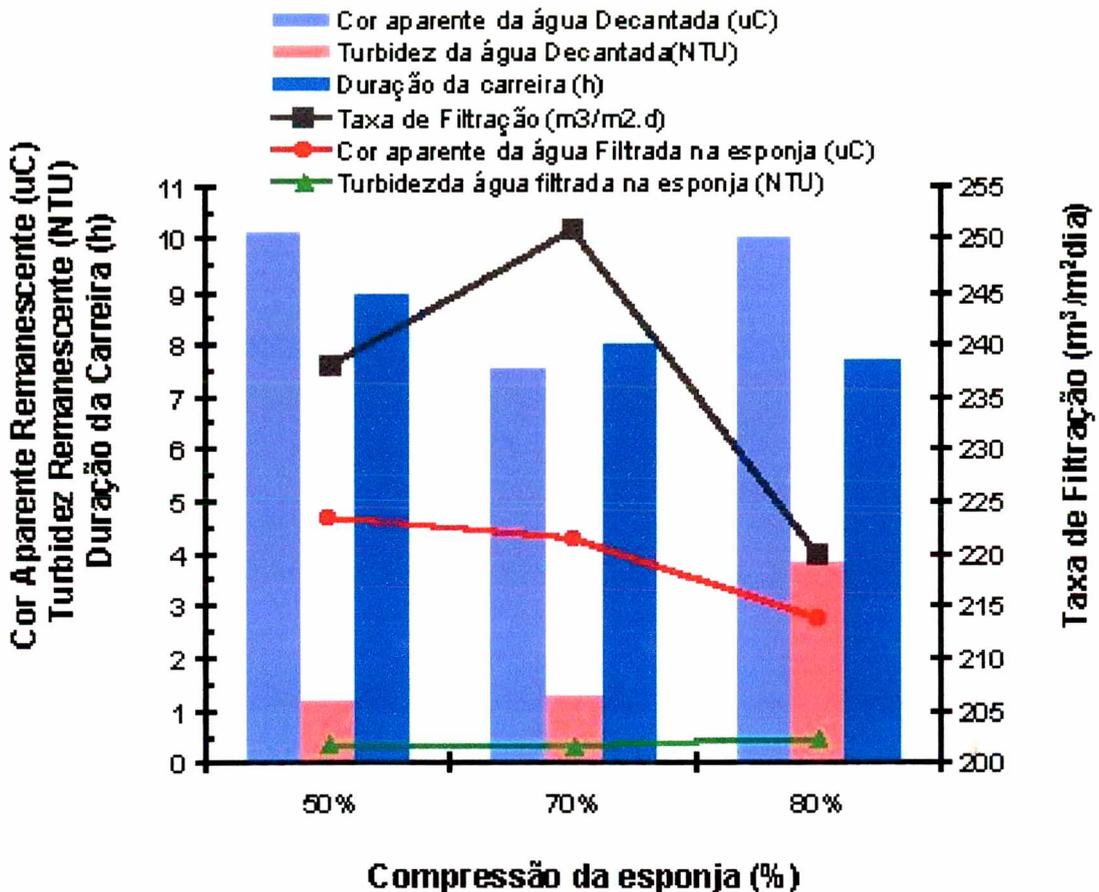


Figura 29: Cor Aparente Remanescente (uC), Turbidez Remanescente (NTU), Duração da Carreira de Filtração (h) e Taxa de Filtração (m^3/m^2 dia) em função da compressão para a esponja cinza.

Observa-se que na esponja cinza houve uma remoção de 68% de turbidez e 54% de cor para uma compressão de 50%, enquanto que na compressão de 70%, uma remoção de 76% de turbidez e 44% de cor aparente. Para a compressão de 80%, a remoção foi de 67% de turbidez e 72% de cor aparente. Porém, deve-se considerar que a mais eficiente não foi aquela que apresentou os maiores valores no que se refere à porcentagem, pois as características da entrada da água no filtro mostra que a maior remoção de turbidez foi na esponja com uma compressão de 70% e

com uma taxa de filtração maior. Quanto à carreira de filtração, houve uma diminuição conforme o aumento da taxa de compressão, e isso ocorreu, provavelmente, pela diminuição dos espaços vazios com a compressão, fazendo com que houvesse menos espaço de acúmulo para o lodo. Observa-se que em qualquer das três compressões a qualidade da água filtrada ficou boa, menor que 0,5 NTU de turbidez remanescente e cor aparente sempre abaixo de 5 uC.

5.1.4 - Avaliação da Esponja Rosa

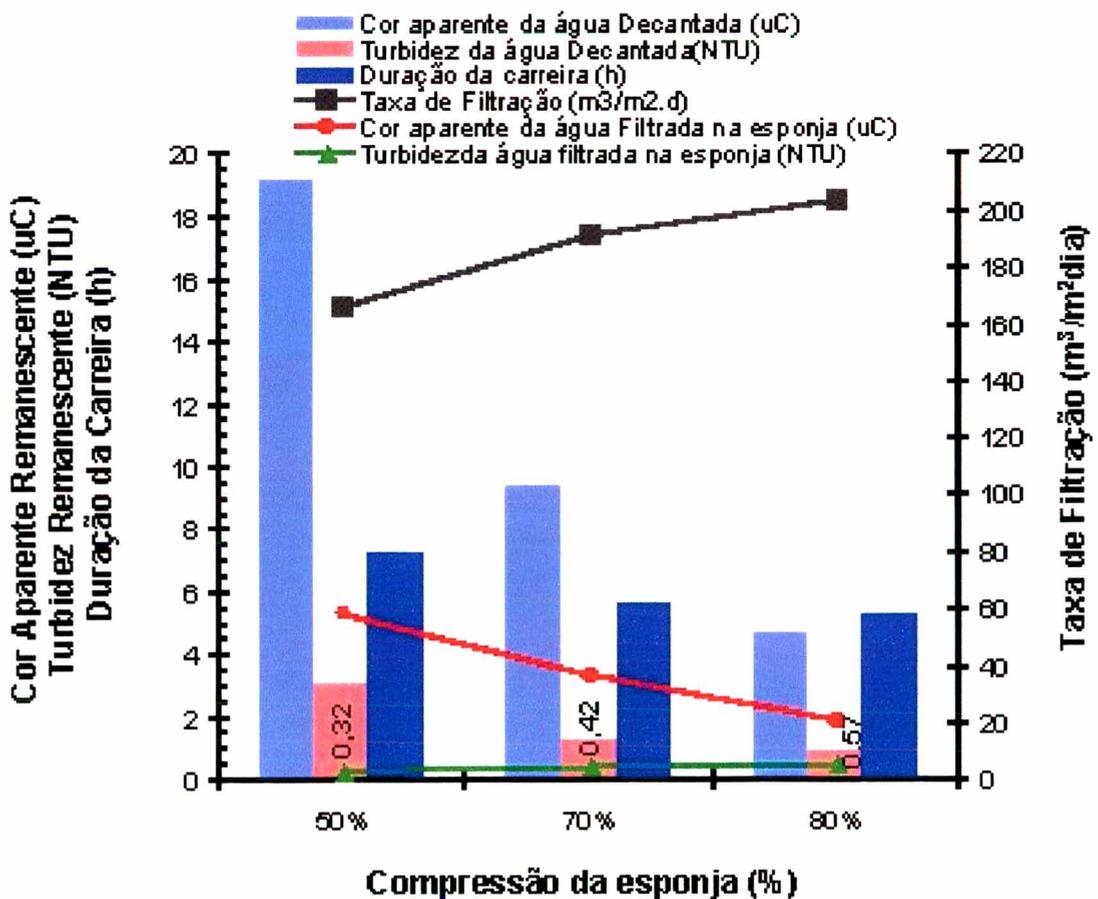


Figura 30: Cor Aparente Remanescente (uC), Turbidez Remanescente (NTU), Duração da Carreira de Filtração (h) e Taxa de Filtração (m^3/m^2 dia) em função da compressão para a esponja rosa.

Observa-se que na esponja rosa houve uma remoção de 90% de turbidez e 73% de cor aparente para uma compressão de 50%, enquanto que na compressão de 70%, uma remoção de 67% de turbidez e 64% de cor aparente. Já para a compressão de 80%, a remoção foi de 40% de turbidez e 60% de cor aparente. Podemos considerar que a compressão de 80% apresentou maior eficiência, levando-se em consideração que a taxa de filtração foi maior.

Da mesma maneira que na esponja anterior, a carreira de filtração diminuiu com o aumento da compressão pelo mesmo motivo, porém, aqui ficou menos acentuada em consequência de a turbidez da água afluyente também ter diminuído gradativamente, dos testes de menor compressão para os de maior compressão.

Nessa esponja, a qualidade da água também ficou boa, com turbidez remanescente abaixo de 1,0 NTU e cor aparente menor, igual a 5 uC, porém, nesses ensaios as taxas de filtração foram um pouco maiores.

5.1.5 - Avaliação da Esponja Preta

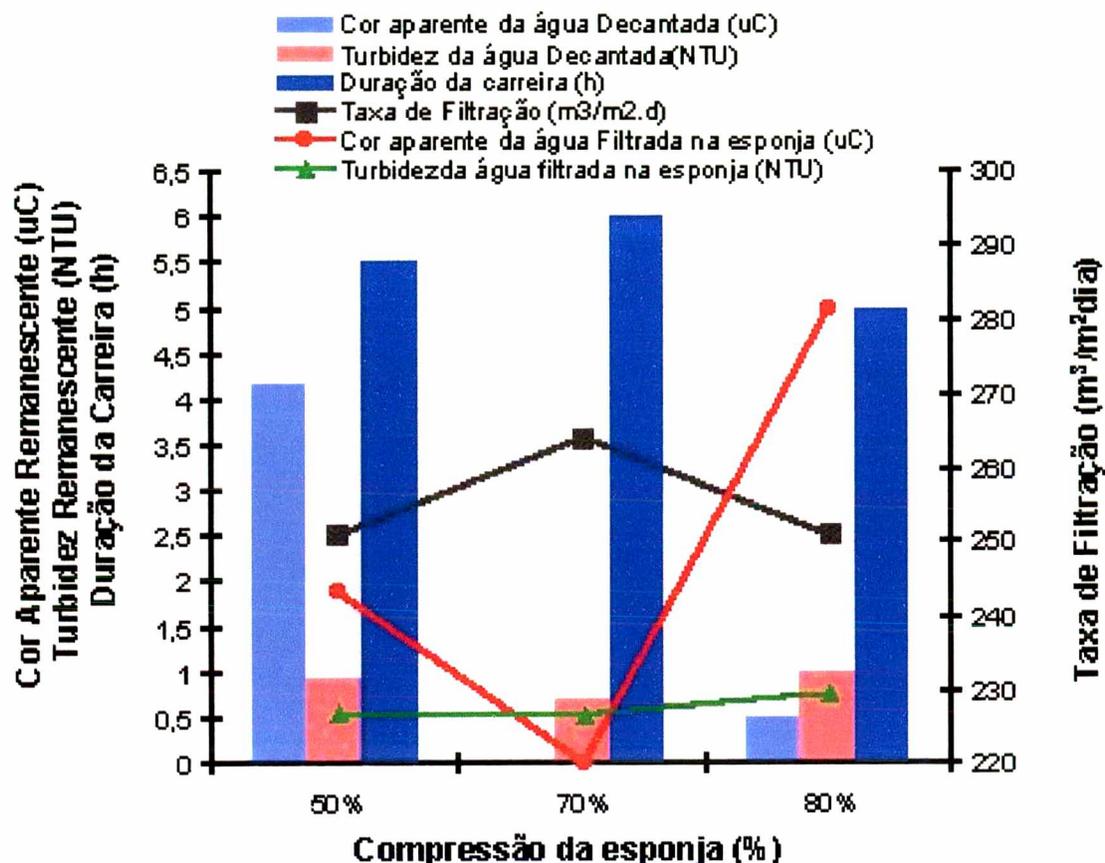


Figura 31: Cor Aparente Remanescente (uC), Turbidez Remanescente (NTU), Duração da Carreira de Filtração (h) e Taxa de Filtração (m^3/m^2 dia) em função da compressão para a esponja preta.

Observa-se que na esponja preta houve uma remoção de 40% de turbidez remanescente e 54 % de cor aparente, para uma compressão de 50%, enquanto que na compressão de 70%, houve uma remoção de 20% de turbidez remanescente sem remoção da cor aparente, pois apresentou a sua cor em 0 uC. Já para uma compressão de 80%, a remoção foi de 24% de turbidez remanescente e um acréscimo de cor. Convém salientar que a proposta do trabalho não consistia em tratar a água, ou seja, realizar as etapas iniciais no processo de tratamento de água. Nos processos de tratamento de água, quando a água não é devidamente coagulada e floculada, o filtro não remove totalmente a cor. Podemos considerar que a

compressão de 50% apresentou uma maior eficiência levando-se em consideração a sua alta porosidade (97%).

5.2 AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE AS ESPONJAS CINZA, ROSA E PRETA

Dos resultados obtidos, as esponjas que apresentaram maior eficiência de filtração estão evidenciados nas Figuras 32 e 33, em cujo processo a esponja cinza apresentou, na compressão de 70%, uma remoção de 76% de turbidez e 44% de remoção de cor com uma taxa de filtração de 251 m³/m².dia, enquanto que para as esponjas rosa e preta a remoção de turbidez foi inferior: 40% para ambas. Porém, a taxa de filtração também foi inferior quando comparada com as esponjas cinza e preta.

Quanto à remoção de cor, as esponjas rosa e preta apresentaram valores superiores em relação à esponja cinza, isto é, uma remoção de 60% e 54% respectivamente. Salienta-se que neste estudo não se elegeu como prioridade a remoção de cor, pois essa etapa depende do processo de coagulação e floculação, já inserido no tratamento de água da ETA.

Quanto à taxa de filtração, observa-se que as esponjas cinza e preta apresentaram os mesmos valores, porém verifica-se pela perda de carga que a resistência do leito é bem superior para a esponja cinza. Já em relação à esponja preta, em determinados ensaios, ocorria um rápido saturamento no leito que está evidenciado por sua carreira de filtração reduzida.

Observou-se que a esponja preta criou uma camada de lodo em seu leito, ajudando a prolongar a carreira de filtração, o que evidencia ser perfeitamente viável criar uma camada suporte para a filtração ascendente com camadas diferentes de esponjas. Nesse caso, se colocaria, na camada inferior, a esponja preta e na superior, a esponja cinza a qual apresentou bons resultados durante os ensaios. A esponja rosa apresentou valores um pouco baixos quando comparada com as outras duas esponjas, porém sua taxa de filtração também foi menor, bem como a carreira de filtração. Nessa esponja, várias vezes durante o processo, a filtração apresentou

caminhos preferenciais, o que levou a saturar mais rapidamente o leito filtrante. Nesse caso, justifica-se então esses valores reduzidos.

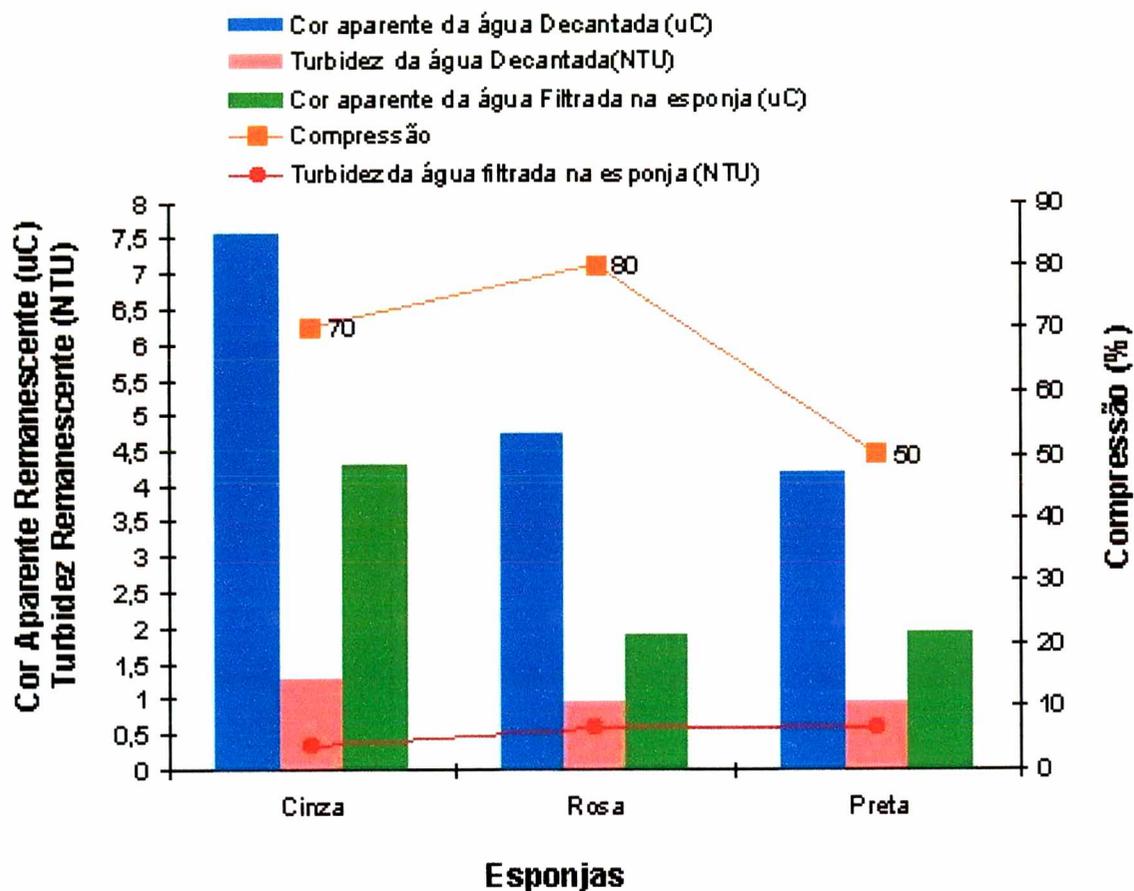


Figura 32: Cor aparente Remanescente (uC), Turbidez Remanescente (NTU), Compressão (%) em função das esponjas cinza, rosa e preta.

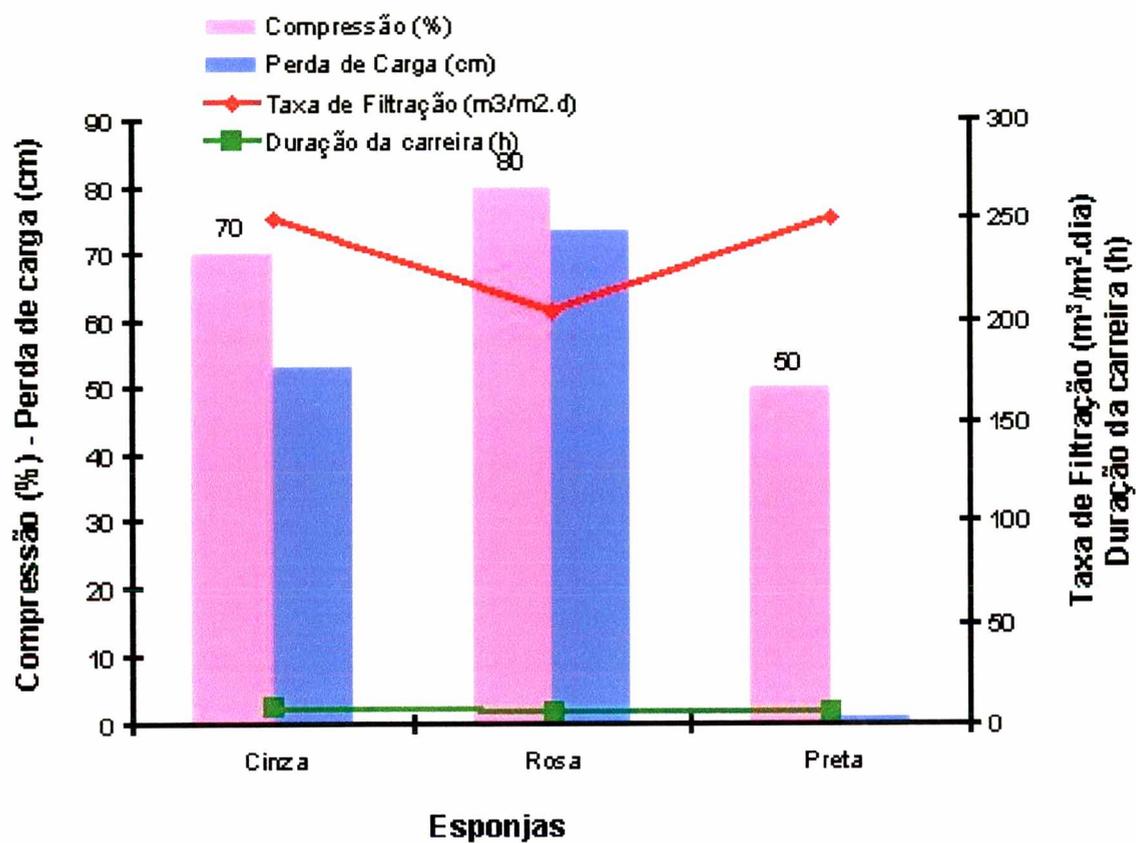


Figura 33: Compressão (%) – Perda de carga (cm) – Taxa de filtração (m³/m².dia) e Duração da carreira (h) em função das esponjas cinza, rosa e preta.

CAPÍTULO VI

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 - CONCLUSÕES

As análises e descrições efetuadas ao longo deste trabalho, em relação à filtração com esponjas de poliuretano, em potabilizações de águas, permitem concluir:

- a) A compressão utilizada para os três tipos de esponjas (cinza, rosa e preta) apresentou condições de filtrabilidade, tendo sido utilizada a esponja cinza com 70%, a esponja rosa com 80% e a esponja preta com 80% de compressão;
- b) A esponja cinza apresentou o melhor desempenho na compressão de 70%, atendendo aos padrões de potabilidade em vigência em nosso país;
- c) A lavagem requer quantidades menores de volume de água para a filtração de esponjas, quando comparadas com o leito filtrante de areia;
- d) A aplicação em contínuo desse processo de filtração é viável pela facilidade de descolmatagem do filtro, graças à característica e elasticidade do material, permitindo a compressão e descompressão;

- e) As esponjas utilizadas permitem a regeneração do meio filtrante com uma simples lavagem com água, como se faz com os filtros granulares;
- f) Esponjas de poliuretano são promissoras, considerando sua aplicabilidade em tratamento de água, em estações transportáveis ou compactas. Os resultados das esponjas rosa e preta apresentaram valores inferiores ao da esponja cinza, porém não se descarta a sua aplicação para águas que apresentem valores reduzidos de turbidez;
- g) Esponjas com até 92,17% de porosidade apresentaram eficientes índices de filtrabilidade, atendendo aos Padrões de Potabilidade para águas de consumo humano e surpreendentes resultados em razão de sua alta porosidade;
- h) Os filtros de esponjas trataram 3,6 vezes mais água que um filtro equivalente de areia descendente, numa mesma área e 5,2 vezes mais que um filtro ascendente. Observa-se que para esta comparação utilizou-se uma taxa de filtração de $200 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e uma carreira de filtração na esponja de 5 horas. Já para o filtro de areia descendente, a carreira de filtração na esponja totalizou 24 horas e para o filtro de areia ascendente, 48 horas.

6.2 - RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados, recomenda-se:

- a) Utilizar a esponja como leito misto, ou seja, na primeira camada, a esponja preta em razão de sua alta porosidade, em seguida, as esponjas rosa e cinza com compressão de 70%;

- b) aplicar a filtração com esponjas de poliuretano como uma etapa de polimento final em estações de tratamento de água, garantindo uma maior carreira de filtração, mantendo a qualidade de água durante as variações de turbidez da água filtrada, principalmente com o levante de flocos nos decantadores, em dias em que ocorre a elevação de temperatura na água superior a 28° C;
- c) Continuidade dos estudos com esponjas para a filtração direta, comparando com a filtração lenta em areia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADIN, A; REBHUN, M. A model to predict concentration and head loss profiles in filtration. **Journal of American Water Works Association**, Denver, CO, v. 69, n. 6, p. 444, 1974.
- AMIRTHARAJAH, A., MILLS, K.M. Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation. **Journal of American Water Works Association**, Denver, CO, v. 74, n. 4, p. 210 -216, apr. 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NB-592: **Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1989. 19p.
- . NBR 14234: **Produtos químicos para tratamento de água de abastecimento - carvão antracitoso - especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 1998. 16p.
- . Apêndice 1. In: **Elaboração de projetos de sistemas de adução de água para abastecimento público: P-NB - 591.-** CETESB, São Paulo, 1977.
- AZEVEDO NETTO, J. M. Filtração lenta. In: **Técnicas de abastecimento e tratamento de água**, São Paulo: Convênio BNH, ABES, CETESB. 1977. p. 869-71. v. 2.
- . **Filtros de fluxo ascendente**. Curso sobre Técnicas Avançadas de Tratamento de Água. Planidro. 1971.
- AZEVEDO NETTO, J. M. & DI BERNARDO, L. Instalação piloto de super-filtração. **XIV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária**. México, 1974.
- BRANCO, S. **Hidrologia aplicada à engenharia sanitária**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1978.
- CAMPOS, J. R., POVINELLI, J. Coagulação. In: **CETESB-Técnica de abastecimento e tratamento de água**. São Paulo: CETESB, 1974. v.2.

CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARY Y CIENCIAS DEL AMBIENT (CEPIS). **Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua**. Lima: OPS-OMS, 1981. Cap. VII e VIII.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Apêndice 1. In: **Elaboração de projetos de sistemas de adução de água para abastecimento público**: P-NB-591. CETESB, São Paulo, 1977.

DALSASSO, R. L. **Pré-ozonização de águas contendo agrotóxicos, seguida de filtração direta**. Florianópolis, 1999. 197p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina.

DI BERNARDO, L. Teoria da Filtração. **Rev. DAE**, São Paulo, ano 40, n. 123, 1980.

----- . Características hidráulicas dos métodos de operação dos filtros rápidos de gravidade. **Rev. DAE**, São Paulo, ano 44, n. 135, dez., 1983.

----- . Considerações hidráulicas sobre o funcionamento de sistemas de filtração direta ascendente. **Rev. de Engenharia Sanitária**, Rio de Janeiro, n. 4, p. 427-434, out./dez., 1986.

----- . **Coagulação-Floculação**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, SP: 1990. 129p. Trabalho não publicado.

----- . Métodos e técnicas de tratamento de água. **ABES**, Rio de Janeiro. v. 2, 1993.

DI BERNARDO, L.; YATSUGAFU, H. P. Filtração direta ascendente. **Rev. DAE**, São Paulo, v. 48, n. 152, p. 53-65, jul./set., 1998.

DI BERNARDO, L. et al. Estudo das influências das características hidráulicas e da camada de areia na filtração ascendente. **Rev. DAE**, São Paulo, ano XLII, n. 131, p.94, p.94-10, dec., 1982.

----- . Contribuição ao estudo da filtração direta. **IX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária**, Belo Horizonte, MG, 3 a 8 jul., 1977.

GRINPLASTCH, B. S. Nova técnica em uso no Brasil. **VI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária**, São Paulo, Tema 1, vol. 1, p.97-100, 1971.

GONÇALVES, M. de F. F. **Caracterização e estudo de tratabilidade pelas vias físico-químicas e biológica aeróbia dos efluente líquidos das lavanderias industriais de Colatina**. Vitória, Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Civil, 1996. Curso de Pós Graduação de Engenharia Civil.

HABERER, K.; WENDLING, E. Zur Schadstoffeliminierung bei der Wasseraubereitung. **Z Fur Wasser und Abwasserforsch.** [s.l.], v. 12, n. 6, p. 230-236, 1979.

- IWASAKI, T. Some notes on sand filtration. **Journal of American Water Works Association**, Denver, CO, v. 29, n. 10, p. 1591-1602, 1927.
- LIBÂNIO, M. A filtração direta como alternativa na potabilização das águas de abastecimento das pequenas e médias comunidades. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA CIVIL, 3., 1991, Ilha Solteira, SP. **Anais ...** São Paulo: UNESP, 1991. p. 175 - 185.
- RICHTER, C.A. et al. A evolução tecnológica do tratamento de água. **Rev. DAE**, [s.l.], n. 161, p. 1-12, jul./ago., 1991.
- RICHTER, C. A. Fundamentos teóricos da floculação em meio granular. **Rev. DAE**, São Paulo, n. 429, p. 20-24, [s.d.].
- SENS, M. L. et. al. Filtration-adsorption déau à potabiliser sur mousse polyuréthane imprégnée de charbon actif. **T. S. M.**, [s.l.], n. 5, p. 241-46, 1993.
- SPAANS, P.H. **Praktijkonderzoek en ontwerp van fosfaatverwijdering met dynamische vlokken filtratie**. Delft. 1996. 129p. Thesis. TU DELFT (Technische Universiteit Delft) Faculteit der Civiele Techniek Vakgroep Waterbeheer Milieu en Gezondheidstechniek Sectie Drink Water.
- STANDART Methods for Examination of Water and Waste Water. Edited by L. S. Clescerii et al. **A.W.W.A. and Water Pollution Control Federation** (17 th ed), 1989.
- TITO, M. P.; CANTO, E. L. **Química na abordagem do cotidiano**. [s.l.]: Moderna, [s.d.]. v. 3.
- VALENCIA, J. A., RICHTER, C. A. Filtration ascendente y descendente aspectos operacionales y de proyecto. **Revista DIAPA**, 1980. Separata ACODAL.
- VIANNA, M.R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 3.ed. São Paulo: [s.n.], 1997.
- _____. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 2.ed. São Paulo: [s.n.], 1992.
- VIEIRA J. M. P. **Qualidade da água para abastecimento público**. Universidade do Minho. [Portugal], 1997. 39 p. Trabalho não publicado.
- VISSCHER, J. T. Slow sand filtration: design, operation and maintenance. **Journal of American Water Works Association**, Denver, CO, v.82, n. 6, p. 67-71, 1990.

ANEXOS

Anexo 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NO FILTRO PILOTO COM A ESPONJA CINZA PARA VERIFICAR A EFICIÊNCIA DA FILTRAÇÃO

Tabela 1 - Ensaio 1 de filtração para a esponja cinza com compressão de 80%									
DATA: 12/10/99				Vazão média = 0,87 L/min - Taxa média de filtração= 115 m ³ /m ² .d					
C (%) =80 ESPONJA CINZA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	157093	0	80	1,23	2	0,55	0	1,95	2
09:00	157168	75	94	0,89	0	0,83	2	0,51	0
10:00	157237	69	95	1,04	0	0,94	2	0,45	0
11:00	157311	74	96,5	1,09	0	0,87	8	0,46	0
12:00	157344	33	99	0,96	0	0,83	0	0,02	0
13:00	157395	51	100	0,85	0	0,81	0	7,12	37
14:00	157455	60	148	1,08	0	0,76	0	7,15	41
15:00	157496	41	149	2,93	18	1,05	14	0,47	0
16:00	157556	60	149	2,63	5	1,96	4	0,29	0
17:00	157617	61	149	2,82	26	2,07	10	0,32	0
	Soma >>>	524	Médias >>>	1,02	0,29	0,8	1,71	2,52	11,43

Tabela 2 - Ensaio 1 de filtração para a esponja cinza com compressão de 50%									
DATA: 09/11/99				Vazão média = 1,55 L/min - Taxa média de filtração= 205 m ³ /m ² .d					
C (%) =50 ESPONJA CINZA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	166829	0	8	1,01	9	0,26	3	0,27	4
09:00	166941	112	9,5	1,66	16	0,61	5	0,67	7
10:00	167048	107	11	1,6	11	0,62	5	0,98	8
11:00	167151	103	11	0,57	6	0,2	4	0,45	0
12:00	167250	99	11,5	0,53	6	0,18	5	0,23	1
13:00	167359	109	12	0,63	7	0,19	0	0,22	8
14:00	167449	90	12,5	1,21	8	0,21	2	0,26	9
15:00	167556	107	14,5	1,48	14	0,43	5	0,31	0
16:00	167668	112	16,5	1,86	14	0,73	13	0,82	0
	Soma >>>	839	Médias >>>	1,17	10,11	0,38	4,67	0,47	4,11

Tabela 3 - Ensaio 1 de filtração para a esponja cinza com compressão de 70%

DATA: 10/11/99				Vazão média = 1,29 L/min - Taxa média de filtração= 170,8 m3/m2.d					
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
09:00	167784	0	23,5	2,18	15	0,53	12	1,19	2
10:00	167859	75	28,5	2,34	8	0,51	9	1,93	7
11:00	167978	119	34	0,96	4	0,25	6	2,03	10
12:00	168037	59	37	0,69	0	0,48	2	0,51	0
13:00	168155	118	40	0,58	0	0,17	4	0,26	0
14:00	168240	85	41,5	0,78	0	0,2	2	0,39	0
15:00	168327	87	43,5	1,71	0	0,22	2	0,41	0
	Soma >>>	543	Médias >>>	1,32	3,86	0,34	5,29	0,96	2,71

Tabela 4 - Ensaio 1 de filtração para a esponja cinza com compressão de 80%

DATA: 11/11/99				Vazão média = 1,4 L/min - Taxa média de filtração= 186 m3/m2.d					
C (%) =80 ESPONJA CINZA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	168434	0	60	0,89	14	0,36	12		
09:00	168531	97	69	0,81	4	0,19	0		
10:00	168643	112	75	0,83	19	0,18	14		
11:00	168722	79	80	0,78	12	0,25	1		
12:00	168805	83	86	2,27	12	0,26	0	0,48	0
13:00	168915	110	100	10	0	0,19	0	0,39	0
14:00	169031	116	120	45,3	39	0,37	0	0,26	0
15:00	169110	79	145	13,2	67	0,55	0	0,27	0
	Soma >>>	676	Médias >>>	9,26	20,88	0,29	3,38	0,35	0

Tabela 5 - Ensaio 1 de filtração para a esponja cinza com compressão de 70%

DATA: 25/11/99

Vazão média = 1,62 L/min - Taxa média de filtração = 214,8 m³/m².d

C (%) = 70 ESPONJA CINZA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	168434	0	26	0,81	26	0,36	22	0,36	3
09:00	168531	98	30	0,89	10	0,29	0	0,46	3
10:00	168643	121	34,5	0,57	7	0,25	0	0,43	1
11:00	168722	102	37,5	0,59	5	0,29	0	0,28	4
12:00	168805	95	39	0,58	8	0,25	6	0,3	2
13:00	168915	158	42	0,92	4	0,25	1	0,37	3
14:00	169031	114	46,5	1,3	5	0,22	0	0,36	0
15:00	169110	105	58,5	2,62	16	0,32	0	0,29	1
16:00	177514	85	63	3	20	0,49	0	0,24	0
	Soma >>>	878	Médias >>>	1,31	9,38	0,3	0,88	0,34	1,75

Tabela 6 - Ensaio 1 de filtração para a esponja cinza com compressão de 80%

DATA: 26/11/99

Vazão média = 1,61 L/min - Taxa média de filtração = 213 m³/m².d

C (%) = 80 ESPONJA CINZA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	177678	0	82,5	0,58	5	0,32	4	0,27	1
09:00	177818	140	92	0,6	10	0,27	1	0,25	1
10:00	177903	85	96,5	0,53	2	0,27	0	0,29	0
11:00	178014	111	97	0,64	10	0,26	4	0,35	3
12:00	178117	103	100	0,62	1	0,31	0	0,28	3
13:00	178246	129	105	1,77	7	0,33	3	0,28	4
14:00	178347	101	110	2,49	21	0,43	10	0,29	7
15:00	178425	105	115	2,11	16	0,62	4	0,28	0
	Soma >>>	774	Médias >>>	1,17	9	0,35	3,25	0,29	2,38

Tabela 7 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 50%									
DATA: 16/10/99				Vazão média = 1,04 L/min - Taxa média de filtração= 137,7 m ³ /m ² .d					
C (%) = 50 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	177678	0	82,5	0,58	5	0,32	4	0,27	1
09:00	177818	140	92	0,6	10	0,27	1	0,25	1
10:00	177903	85	96,5	0,53	2	0,27	0	0,29	0
11:00	178014	111	97	0,64	10	0,26	4	0,35	3
12:00	178117	103	100	0,62	1	0,31	0	0,28	3
13:00	178246	129	105	1,77	7	0,33	3	0,28	4
14:00	178347	101	110	2,49	21	0,43	10	0,29	7
15:00	178425	105	115	2,11	16	0,62	4	0,28	0
	Soma >>>	774	Médias >>>	1,17	9	0,35	3,25	0,29	2,38

Tabela 8 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 70%									
DATA: 19/10/99				Vazão média = 0,98 L/min - Taxa média de filtração= 129,9 m ³ /m ² .d					
C (%) = 70 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	160243	0	22	4,32	28	0,35	25	0,86	7
09:00	160299	56	22,5	1,44	25	0,53	0	0,91	4
10:00	160390	91	22,5	0,78	12	0,73	0	1,82	12
11:00	160441	51	29	0,6	6	0,98	0	2,74	14
12:00	160528	87	29	0,51	8	0,99	0	1,3	14
13:00	160597	69	29	0,17	0	1,58	13	3,12	25
	Soma >>>	354	Médias >>>	1,53	15,8	0,72	5	1,53	10,2

Tabela 9 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 50%									
DATA: 18/10/99				Vazão média = 1,04 L/min - Taxa média de filtração= 138,1 m ³ /m ² .d					
C (%) = 50 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	159475	0	12	2,08	12	0,22	0	0,31	63
09:00	159527	52	12,5	3,31	21	0,28	3	0,39	0
10:00	159599	72	13	2,42	17	0,22	4	0,25	1
11:00	159666	67	13,5	2,63	16	0,23	0	0,25	30
12:00	159712	46	13,5	2,31	18	0,26	5	0,32	7
14:00	159847	135	22	9,98	18	0,4	0	0,35	18
15:00	159914	67	22	16,2	144	0,23	0	0,67	18
	Soma >>>	439	Médias >>>	5,56	35,14	0,26	1,71	0,36	19,57

Tabela 10 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 80%									
DATA: 20/10/99				Vazão média = 0,92 L/min - Taxa média de filtração= 121,8 m ³ /m ² .d					
C (%) = 80 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	161059	0	50	0,26	15	3,46	26	5,53	38
09:00	161127	68	50	0,24	3	2,63	21	2,25	29
10:00	161221	94	46	0,27	5	2,99	17	2,75	20
11:00	161279	58	44,5	0,29	10	2,95	17	2,79	29
12:00	161344	65	47,5	0,32	2	2,28	15	1,32	6
13:00	161391	47	48	0,32	3	1,02	10	1,24	11
	Soma >>>	332	Médias >>>	0,28	6,33	2,56	17,67	2,65	22,17

Tabela 11 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 50%									
DATA: 27/10/99				Vazão média = 0,78 L/min - Taxa média de filtração= 103,8 m ³ /m ² .d					
C (%) = 50 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
10:00	162386	0	3,7	1,74	17	0,57	10	0,36	5
11:00	162434	48	4,5	1,23	13	0,29	13	0,17	0
12:00	162463	29	5	1,11	13	0,29	12	0,21	3
13:00	162506	43	5,5	0,78	12	0,18	7	0,18	10
14:00	162557	51	6,5	0,78	16	0,22	7	0,2	8
16:30	162671	114	11,5	7,07	64	0,63	14	0,18	14
17:30	162711	40	11,5	3,03	23	0,51	3	0,56	13
18:30	162763	52	12,5	1,16	12	0,2	0	0,66	15
	Soma >>>	377	Médias >>>	2,11	21,25	0,36	8,25	0,32	8,5

Tabela 12 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 70%									
DATA: 28/10/99				Vazão média = 0,64 L/min - Taxa média de filtração= 85,38 m ³ /m ² .d					
C (%) = 70 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
09:00	162865	0	8,5	1,79	16	0,93	9	0,77	12
10:00	162926	61	10	2,3	15	0,93	8	3,42	27
11:00	162979	53	11,5	0,97	3	0,26	3	1,25	10
12:00	163000	21	12,5	0,89	15	0,27	2	0,34	8
13:00	163042	42	14	0,83	15	0,23	5	0,2	7
14:00	163097	55	15,5	0,8	16	0,18	7	0,2	8
15:00	163130	33	19,5	9,93	53	0,21	13	0,17	9
16:00	163172	42	25,5	56,8	303	1,41	10	0,3	9
17:00	163214	42	26,5	80	465	2,37	10	0,43	7
	Soma >>>	349	Médias >>>	2,5	19	0,43	6,71	0,91	11,57

Tabela 13 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 70%									
DATA: 29/10/99				Vazão média = 0,70 L/min - Taxa média de filtração = 92,7 m ³ /m ² .d					
C (%) = 70 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	163295	0	16,5	1,46	14	0,58	10	0,72	13
09:00	163331	36	18,5	1,17	12	0,35	5	0,63	6
10:00	163381	50	21	1,16	16	0,32	4	0,63	0
11:00	163446	65	22,5	0,58	11	0,21	0	0,26	0
12:00	163482	36	22,5	0,6	14	0,23	3	0,19	0
13:00	163540	58	28,5	57,8	368	1,9	21	0,21	0
14:00	163585	45	39,5	52,3	338	29,9	205	0,79	0
15:00	163632	47	57,5	46,5	315	55,5	333	1,12	0
	Soma >>>	337	Médias >>>	0,99	13,4	0,34	4,4	0,49	3,8

Tabela 14 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 80%									
DATA: 30/10/99				Vazão média = 0,56 L/min - Taxa média de filtração = 74 m ³ /m ² .d					
C (%) = 800 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	163687	0	65	1,68	4	0,91	10	0,28	0
09:00	163732	45	68	1,93	0	0,66	0	0,39	5
10:00	163787	55	70	0,9	8	0,59	0	0,56	0
11:00	163819	32	72	1,17	0	0,72	0	0,56	8
12:00	163855	36	72	0,86	9	0,58	0	0,55	2
	Soma >>>	168	Médias >>>	1,31	4,2	0,69	2	0,47	3

Tabela 15 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 50%

DATA: 31/10/99

Vazão média = 1,61 L/min - Taxa média de filtração = 213,6 m³/m².d

C (%) = 50 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00		0	15	0,79	2	0,22	5	0,48	2
09:00	163732	112	16,5	0,92	0	0,23	0	0,23	0
10:00	163787	139	21	0,79	0	0,2	0	0,25	0
11:00	163819	122	27	1,62	0	0,2	0	0,21	0
12:00	163855	112	34,5	1,59	0	0,2	0	0,18	0
	Soma >>>	485	Médias >>>	1,14	0,4	0,21	1	0,27	0,4

Tabela 16 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 70%

DATA: 03/11/99

Vazão média = 1,35 L/min - Taxa média de filtração = 178,3 m³/m².d

C (%) = 70 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	164489	0	30	1,16	1	0,35	1	0,65	3
09:00	164582	93	34,5	0,68	5	0,28	2	0,55	4
10:00	164699	117	39	0,6	8	0,21	2	0,3	2
11:00	164786	87	42,5	0,66	5	0,28	3	0,2	3
12:00	164877	91	45	0,61	3	0,29	1	0,22	1
13:00	164999	122	45,5	0,65	6	0,29	8	0,21	2
14:00	165091	92	32	4,75	24	2,55	40	0,26	4
15:00	165191	100	27,5	6,97	35	4,47	23	0,66	3
16:00	165281	90	27	9,27	35	4,31	34	0,84	5
	Soma >>>	792	Médias >>>	0,73	4,67	0,28	2,83	0,36	2,5

Tabela 17 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 80%									
DATA: 04/11/99				Vazão média = 1,47 L/min - Taxa média de filtração= 195,2 m ³ /m ² .d					
C (%) = 80 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	165425	0	87	1,16	5	0,95	0	1,41	4
09:00	165519	94	89	1,6	10	1,33	5	1,06	0
10:00	165629	110	90	1,22	0	1,04	0	1,03	0
11:00	165741	112	88,5	0,84	3	0,75	0	0,54	0
12:00	165803	62	89	0,63	0	0,59	0	0,34	0
13:00	165917	114	89	0,69	10	0,58	4	0,33	0
14:00	166012	95	84,5	0,69	0	0,68	0	0,31	0
15:00	166121	109	84	0,68	0	0,65	0	0,26	0
16:00	166223	102	89	2,58	3	2,38	2	0,32	0
	Soma >>>	798	Médias >>>	0,71	2,6	0,65	0,8	0,36	0

Tabela 18 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 50%									
DATA: 27/11/99				Vazão média = 1,48 L/min - Taxa média de filtração= 196,4 m ³ /m ² .d					
C (%) = 50 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	178572	0	5	2,5	17	1,01	5	0,84	5
09:00	178706	134	7,5	5,67	28	2,9	22	3,43	20
10:00	178825	119	10,5	5,49	36	2,55	32	3,95	20
11:00	178928	103	17,5	3,8	17	1,33	10	4,35	32
12:00	179018	90	18	1,34	5	0,43	0	2,45	14
	Soma >>>	446	Médias >>>	4,37	24,5	1,95	17,25	3,14	19,25

Tabela 19 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 70%									
DATA: 29/11/99				Vazão média = 1,63 L/min - Taxa média de filtração = 216,2 m ³ /m ² .d					
C (%) = 70 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
09:00	179014	0	18	0,5	3	0,22	2	0,34	0
10:00	179223	209	21	0,46	1	0,22	0	0,2	0
11:00	179344	121	24	0,6	1	0,24	0	0,28	0
12:00	179430	86	25,5	0,46	0	0,23	0	0,23	0
13:00	179505	75	29	1,56	10	0,37	0	0,3	0
	Soma >>>	491	Médias >>>	0,72	3	0,26	0,4	0,27	0

Tabela 20 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 80%									
DATA: 01/12/99				Vazão média = 1,76 L/min - Taxa média de filtração = 233,7 m ³ /m ² .d					
C (%) = 80 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	180015	0	57	0,82	18	0,36	12	0,48	15
09:00	180102	87	61	0,82	0	0,33	0	0,42	6
10:00	180219	117	65	0,86	7	0,37	0	0,43	4
11:00	180449	230	70	0,76	6	0,35	4	0,41	5
12:00	180560	111	72	0,74	4	0,36	0	0,82	6
13:00	180657	97	75	1,05	9	0,47	1	0,31	3
14:00	180758	101	79	3,48	26	1,21	9	0,56	9
	Soma >>>	743	Médias >>>	0,84	7,33	0,37	2,83	0,48	6,5

Tabela 21 - Ensaio 2 de filtração para a esponja rosa com compressão de 70%									
DATA: 02/12/99				Vazão média = 1,66 L/min - Taxa média de filtração= 219,5 m ³ /m ² .d					
C (%) = 70 ESPONJA ROSA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	180015	0	57	0,82	18	0,36	12	0,48	15
09:00	180102	87	61	0,82	0	0,33	0	0,42	6
10:00	180219	117	65	0,86	7	0,37	0	0,43	4
11:00	180449	230	70	0,76	6	0,35	4	0,41	5
12:00	180560	111	72	0,74	4	0,36	0	0,82	6
13:00	180657	97	75	1,05	9	0,47	1	0,31	3
14:00	180758	101	79	3,48	26	1,21	9	0,56	9
	Soma >>>	743	Médias >>>	0,84	7,33	0,37	2,83	0,48	6,5

Tabela 22 - Ensaio 3 de filtração para a esponja preta com compressão de 50%									
DATA: 12/11/99				Vazão média = 1,63 L/min - Taxa média de filtração= 216 m ³ /m ² .d					
C (%) = 50 ESPONJA PRETA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	169212	0	0,5	0,73	10	0,66	4	0,2	0
09:00	169301	89	0,5	0,77	8	0,65	6	0,24	0
10:00	169399	98	0,5	1,02	5	0,69	3	0,25	0
11:00	169429	93	0,5	0,71	4	0,7	3	0,28	0
12:00	169569	77	1	0,81	4	0,73	4	0,31	0
14:00	169816	247	1	1,11	13	0,88	1	0,38	0
15:00	169909	93	1	2,47	8	1,79	7	0,71	2
16:00	169997	88	1	3,05	14	2,69	13	1,75	4
	Soma >>>	785	Médias >>>	0,86	7,33	0,72	3,5	0,28	0

Tabela 23 - Ensaio 3 de filtração para a esponja preta com compressão de 70%

DATA: 13/11/99

Vazão média = 1,37 L/min - Taxa média de filtração = 181,8 m³/m².d

C (%) = 70 ESPONJA PRETA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	170072	0	1	0,83	12	0,66	11	0,27	7
09:00	170181	109	1	1,38	14	1,21	12	0,43	10
10:00	170293	112	1	1,63	18	1,5	16	0,66	10
11:00	170380	87	1	1,33	13	1,27	13	0,85	12
12:00	170485	105	1	1,04	12	0,9	11	0,87	11
	Soma >>>	413	Médias >>>	1,24	13,8	1,11	12,6	0,62	10

Tabela 24 - Ensaio 3 de filtração para a esponja preta com compressão de 80%

DATA: 16/11/99

Vazão média = 1,46 L/min - Taxa média de filtração = 194 m³/m².d

C (%) = 80 ESPONJA PRETA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	170717	0	1	0,82	0	0,7	0	0,24	0
09:00	170795	78	1	1,02	0	0,83	0	0,21	0
10:00	170915	120	1	1,26	1	0,99	1	0,27	0
11:00	171033	118	1,5	1,23	1	0,98	0	0,36	0
12:00	171133	100	1,5	0,81	3	0,78	1	0,29	0
13:00	171213	80	2	34,6	48	18,3	40	0,58	0
14:00	171341	128	3,5	31,1	33	14,1	13	0,55	0
15:00	171443	102	4	7,71	20	4,3	15	0,35	1
16:00	171540	67	6	26,1	81	18,1	41	0,67	8
	Soma >>>	793	Médias >>>	1,03	1	0,86	0,4	0,27	0

Tabela 25 - Ensaio 3 de filtração para a esponja preta com compressão de 50%

C (%) = 50 ESPONJA PRETA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	171683	0	0,5	1,91	0	1,66	0	0,49	0
09:00	171811	128	0,5	1,05	0	0,63	0	0,3	0
10:00	171932	121	0,5	1,58	4	0,74	2	0,35	0
11:00	172060	128	0,5	0,89	0	0,66	0	0,34	0
12:00	172142	82	0,5	0,75	0	0,72	0	0,29	3
13:00	172260	118	1	0,74	2	0,59	0	0,23	0
14:00	172396	136	1	4,16	61	3,9	24	0,33	0
	Soma >>>	713	Médias >>>	1	1,2	0,67	0,4	0,3	0,6

Tabela 26 - Ensaio 3 de filtração para a esponja preta com compressão de 70%

C (%) = 70 ESPONJA PRETA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	172640	0	1	0,71	0	0,57	0	0,37	0
09:00	172770	130	1	0,7	0	0,48	0	0,3	0
10:00	172861	81	1	0,62	0	0,57	0	0,33	0
11:00	172992	131	1,5	0,65	0	0,52	0	0,29	0
12:00	173085	93	1,5	0,62	0	0,57	0	0,35	0
13:00	173205	120	1,5	0,81	0	0,58	0	0,23	0
14:00	173321	116	1,5	5,5	23	1,85	8	0,32	0
15:00	173430	109	1,5	3,39	20	2,1	7	0,28	0
16:00	173559	129	2,5	13,8	77	9,93	37	0,38	0
	Soma >>>	909	Médias >>>	0,69	0	0,55	0	0,31	0

Tabela 27 - Ensaio 3 de filtração para a esponja preta com compressão de 80%

DATA: 19/11/99

Vazão média = 1,59 L/min - Taxa média de filtração = 210,15 m³/m².d

C (%) = 80 ESPONJA PRETA				DECANTADOR		FILTRO ESPONJA		FILTRO CASAN	
Hora	Leitura	Volume	Perda carga	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
		L	cm	NTU	uc	NTU	uc	NTU	uc
08:00	173747	0	2	0,75	0	0,47	0	0,3	4
09:00	173852	105	2	0,99	0	0,51	0	0,28	0
10:00	173936	84	2	0,87	0	0,59	0	0,25	0
11:00	174059	123	2	0,94	0	0,92	0	0,26	0
12:00	174158	99	2	1,32	0	0,82	0	0,23	0
13:00	174297	139	3	4,55	33	4,21	29	0,3	0
14:00	174405	108	3	3,19	14	3,44	11	0,3	0
15:00	174528	123	4	4,2	18	3,12	12	3	0
16:00	174606	78	4	2,73	18	2,59	14	0,44	0
	Soma »»	859	Médias »»	0,97	0	0,66	0	0,26	0,8

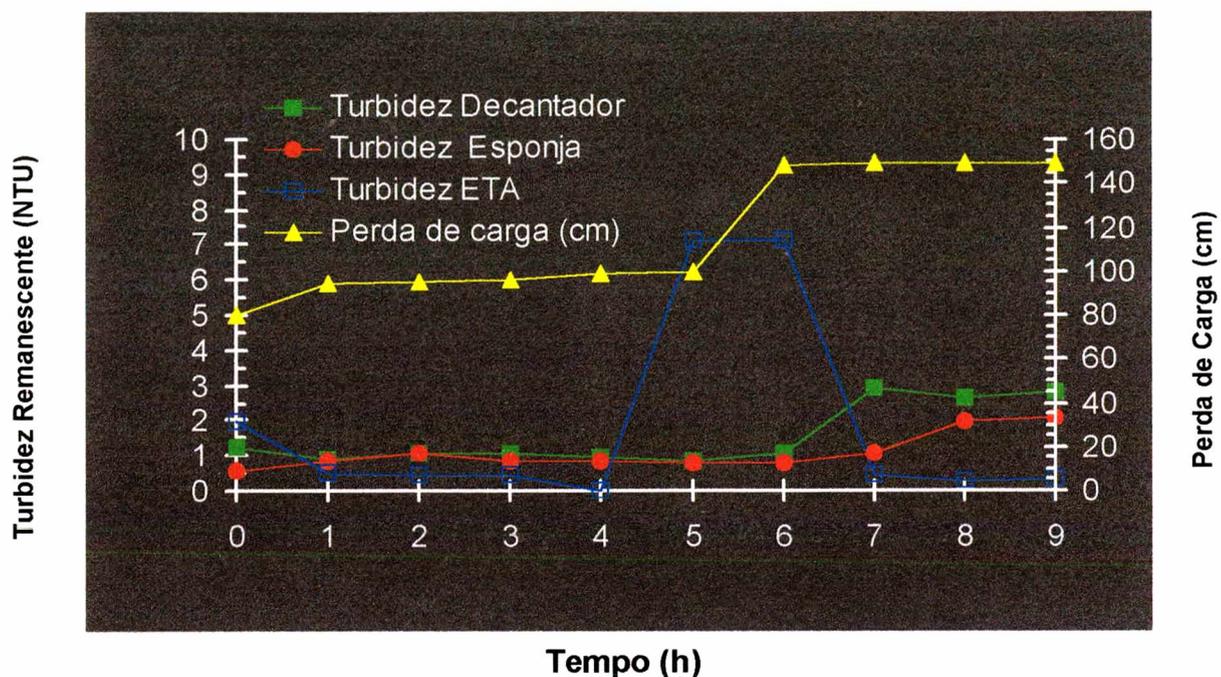


Figura 1 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 1)
(Esponja cinza: compressão = 80% taxa de filtração = $115,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$)

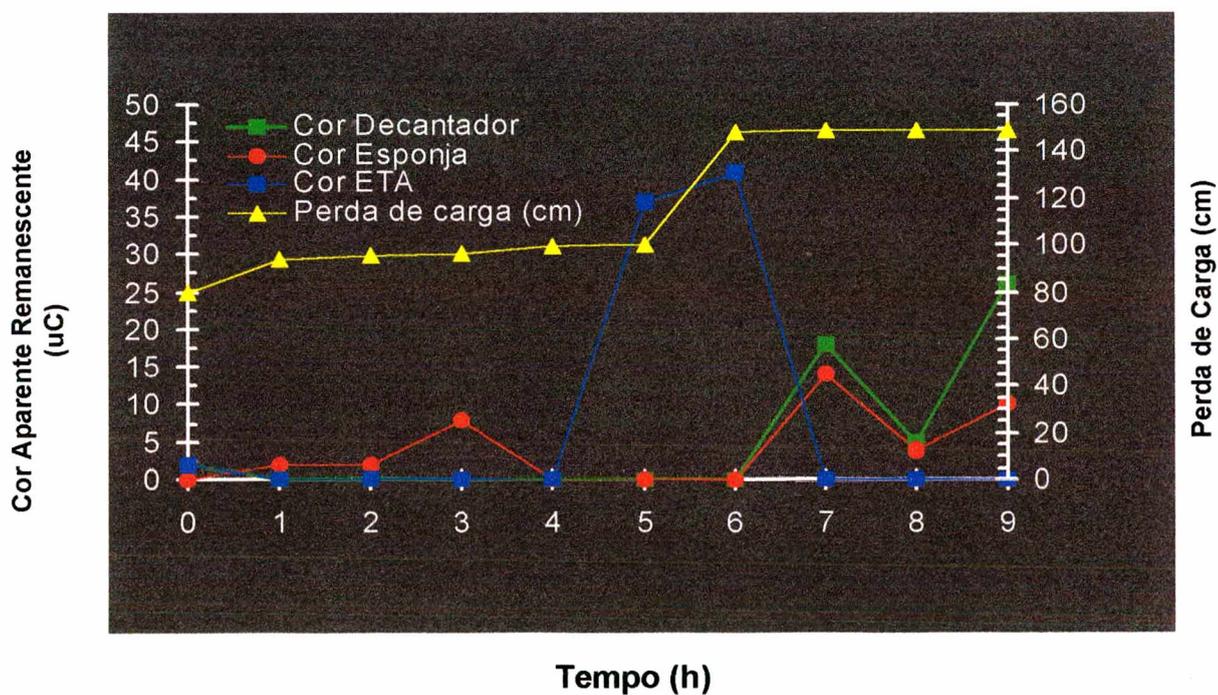


Figura 2 - Cor Aparente Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 1)
(Esponja cinza: compressão = 80% Taxa de filtração = $115,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$)

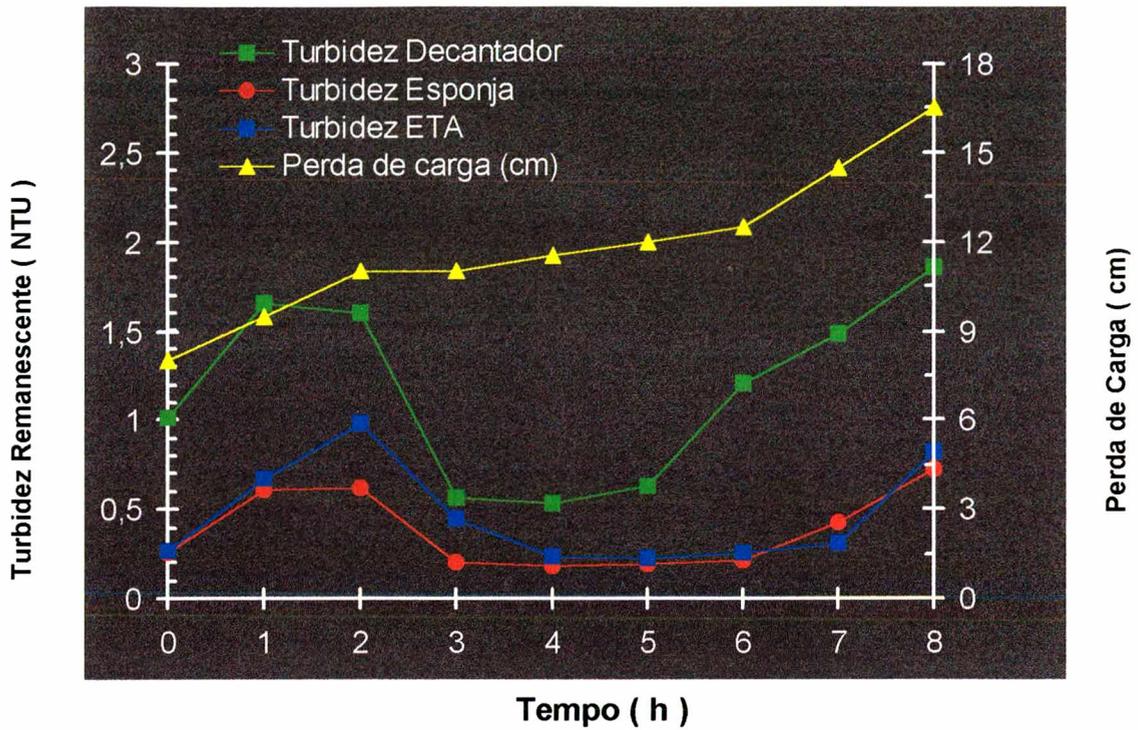


Figura 3 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 2)
 (Esponja cinza: compressão = 50% Taxa de filtração = 205 m³/m²/dia)

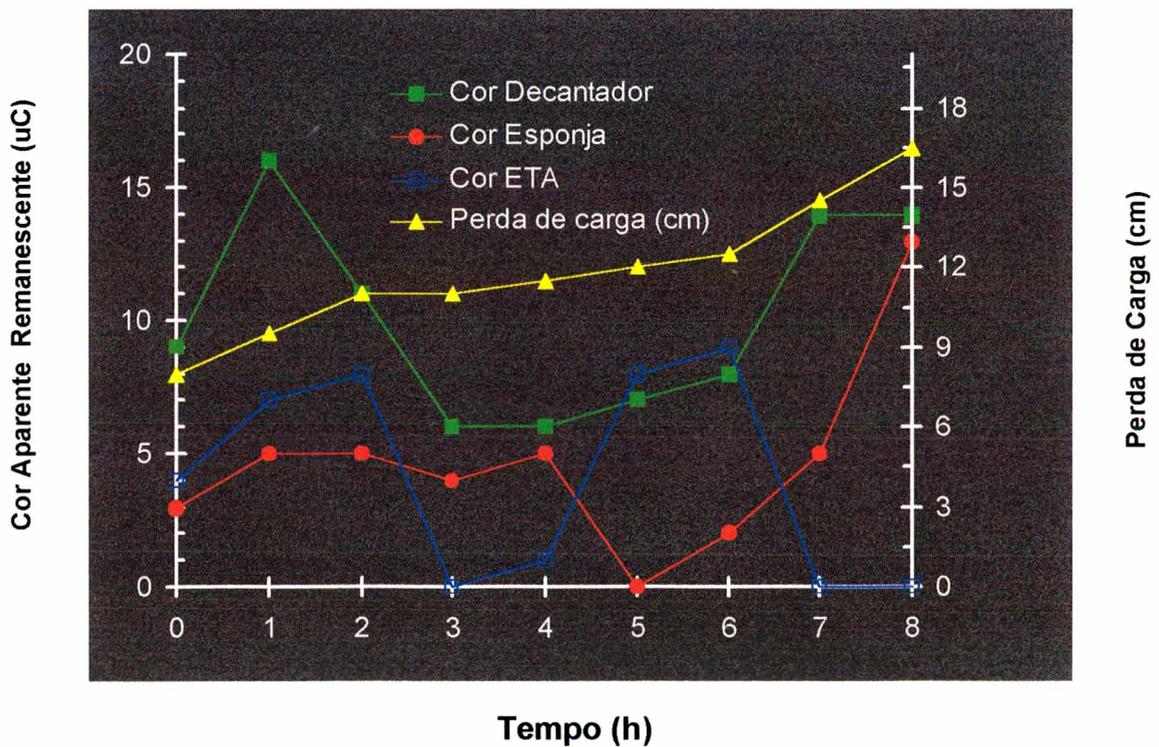


Figura 4 - Cor Aparente Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 2)
 (Esponja cinza: compressão = 50% Taxa de filtração = 205 m³/m²/dia)

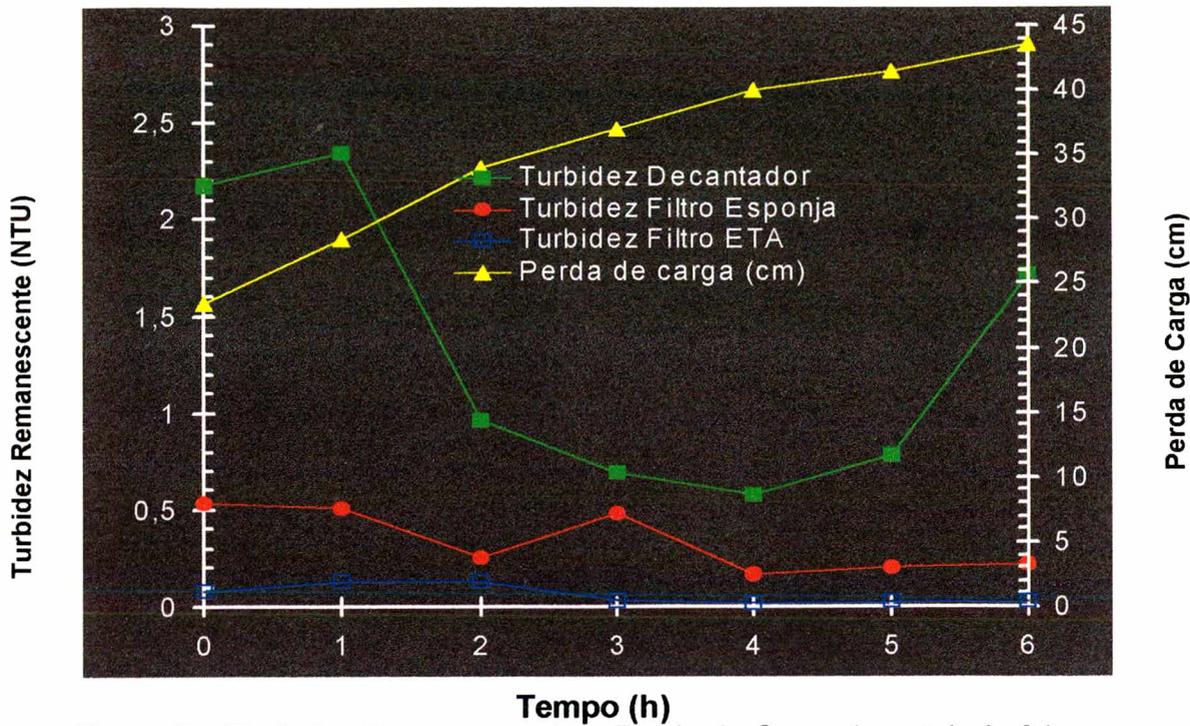


Figura 5 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 3)
 (Esponja cinza: Compressão = 70% e Taxa de Filtração = 170,8 m³/m²dia)

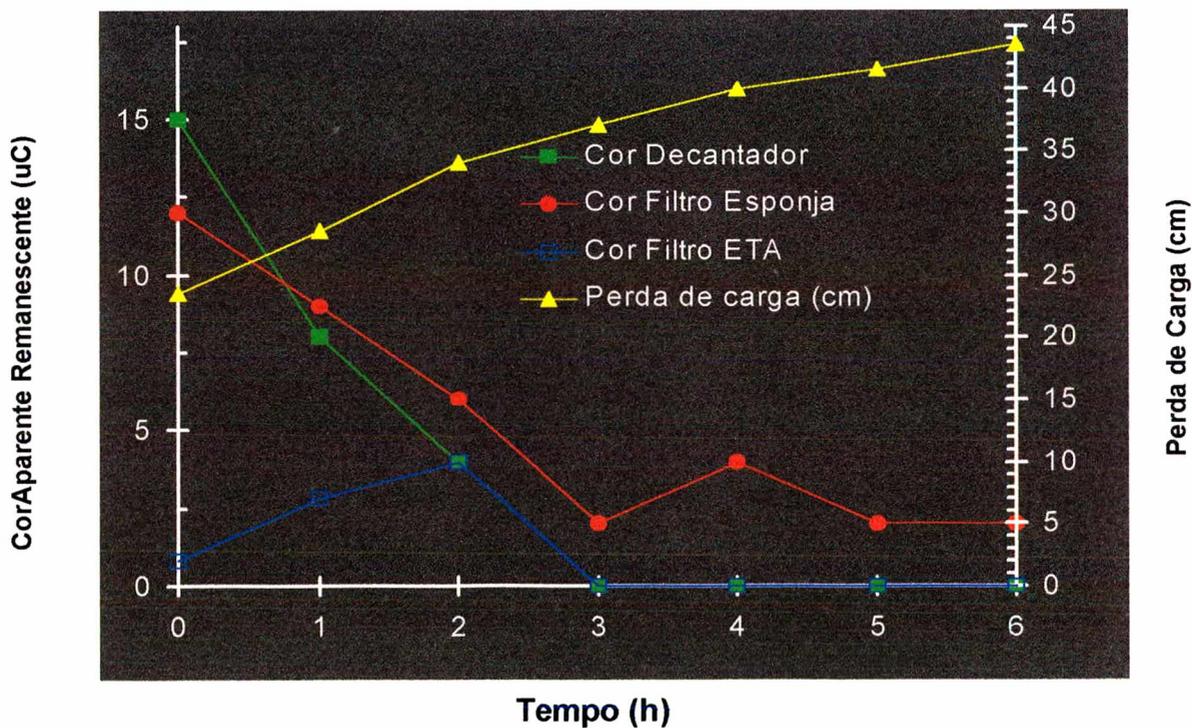


Figura 6 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 3)
 (Esponja cinza: Compressão de 70% Taxa de Filtração = 170,8 m³/m²dia)

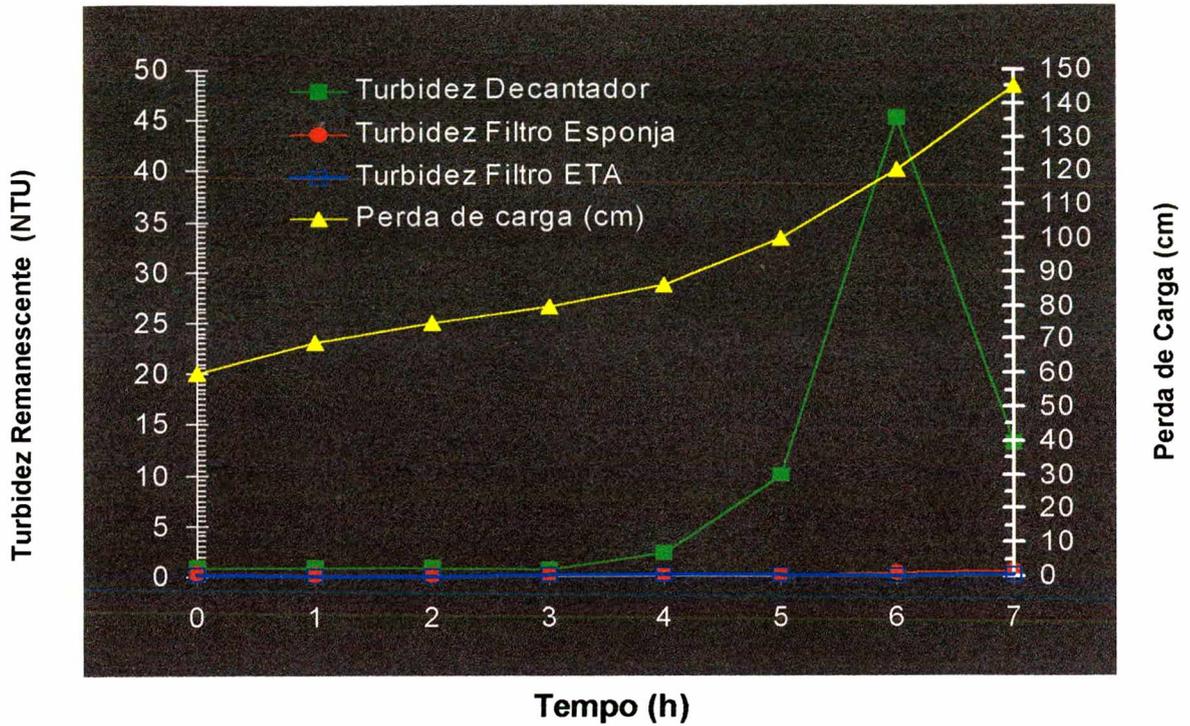


Figura 7 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 4)
(Esponja cinza: Compressão = 80% Taxa de Filtração = 186,1 m³/m²dia)

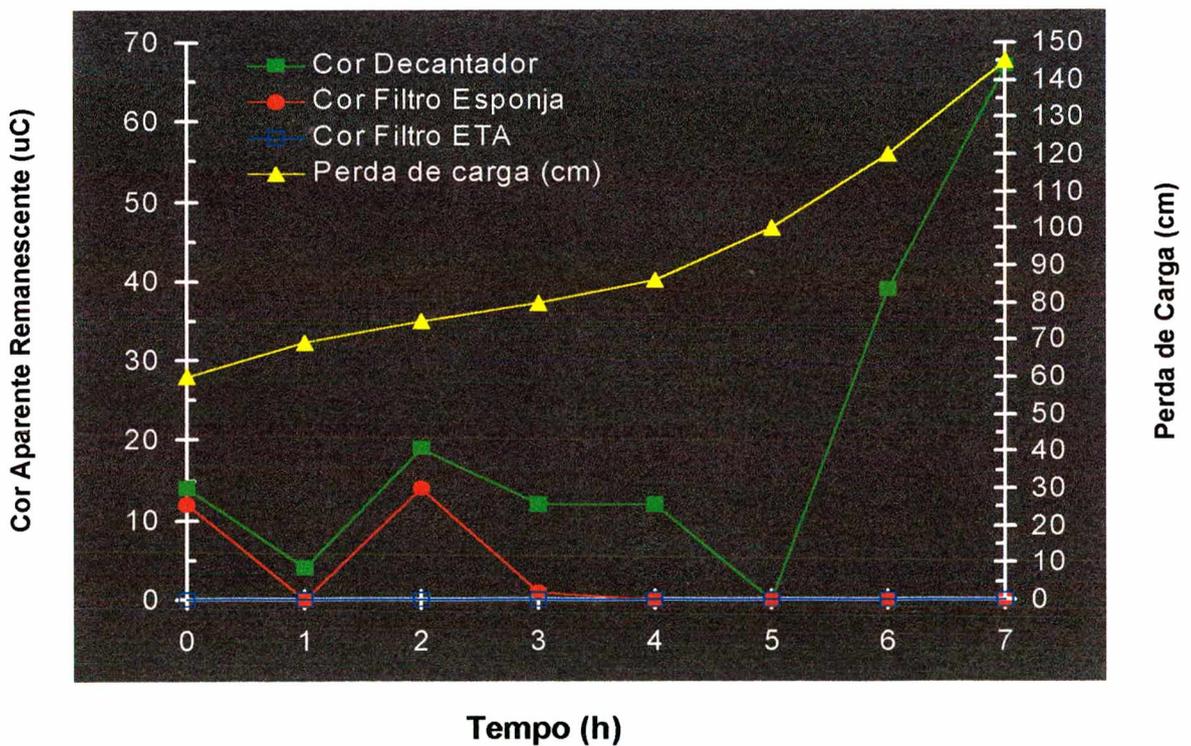


Figura 8 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 4)
(Esponja cinza: Compressão = 80% e Taxa de Filtração = 186,1 m³/m²dia)

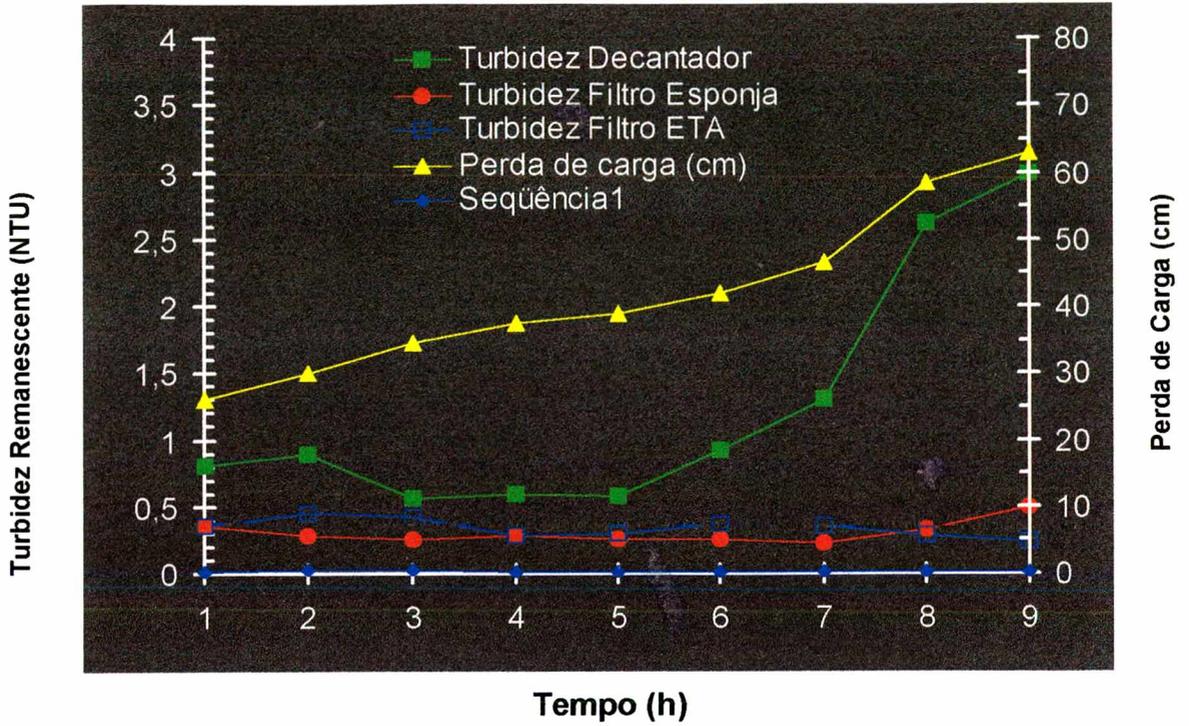


Figura 9 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 5)
 (Esponja cinza: Compressão = 70% e Taxa de filtração = 214,8 m³/m²/dia)

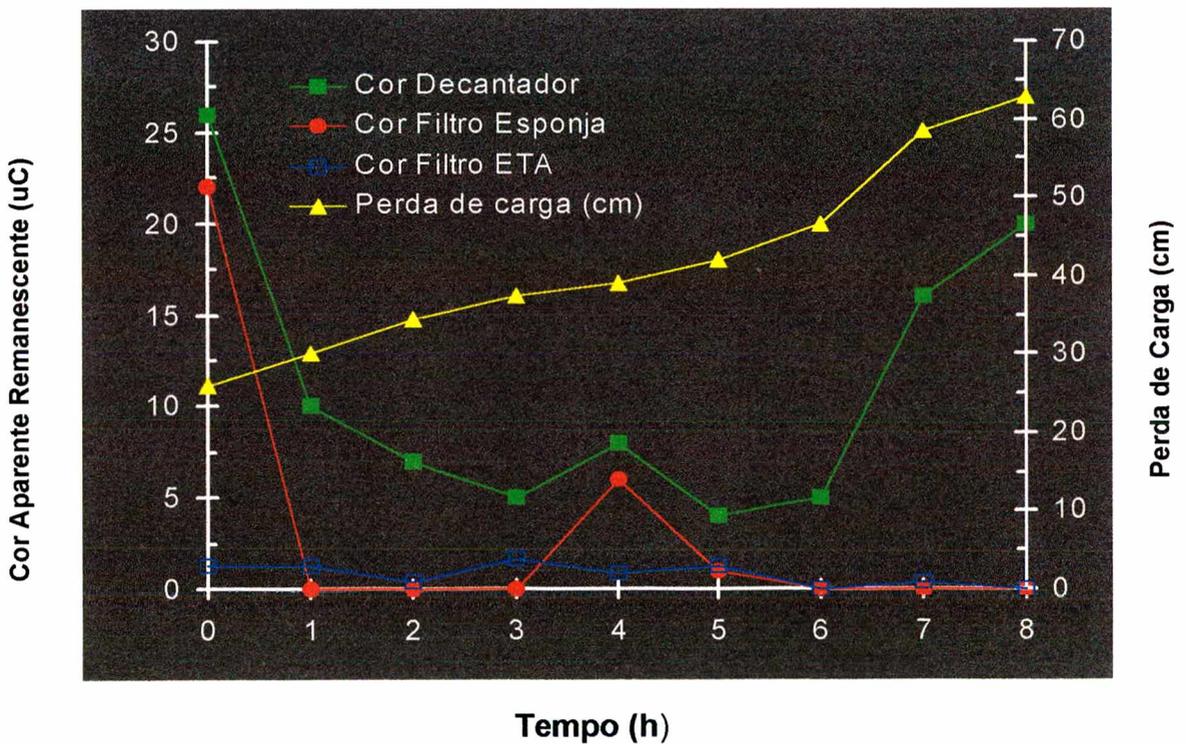


Figura 10 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 5)
 (Esponja cinza: Compressão = 70% Taxa de Filtração = 214,8 m³/m²/dia)

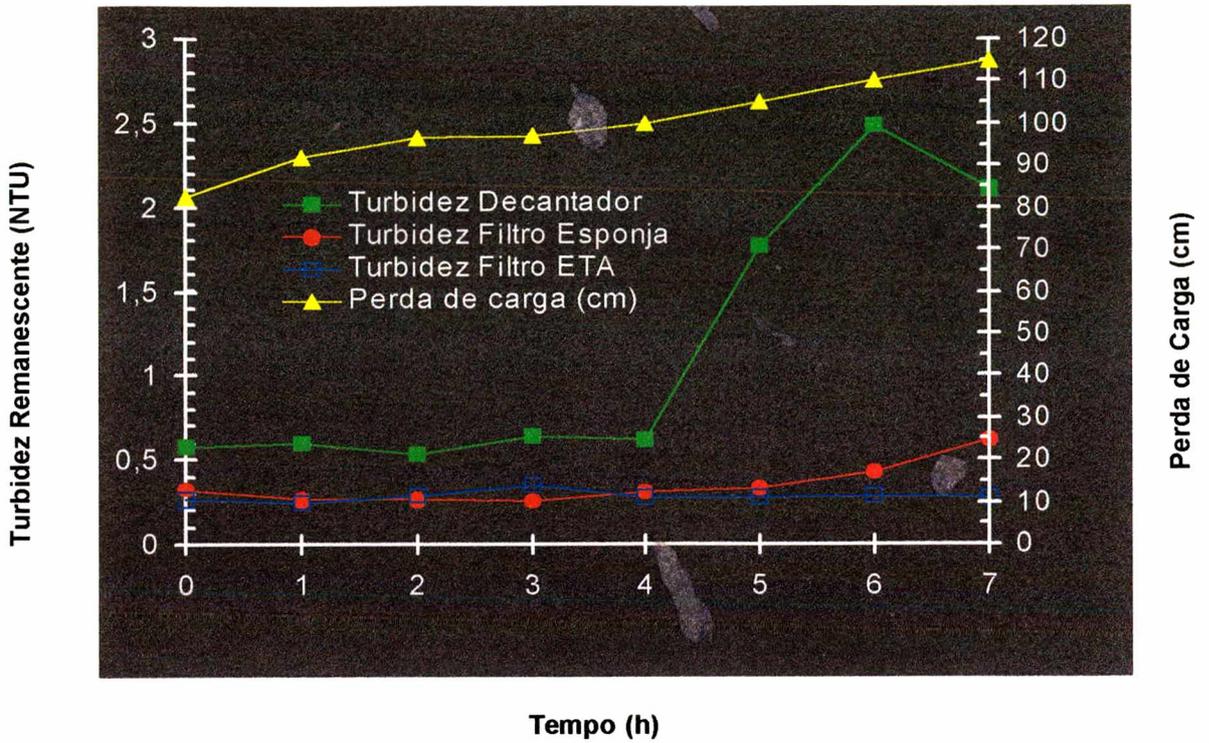


Figura 11 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 6)
 (Esponja cinza: Compressão = 80% e Taxa de Filtração = 213 m³/m²dia)

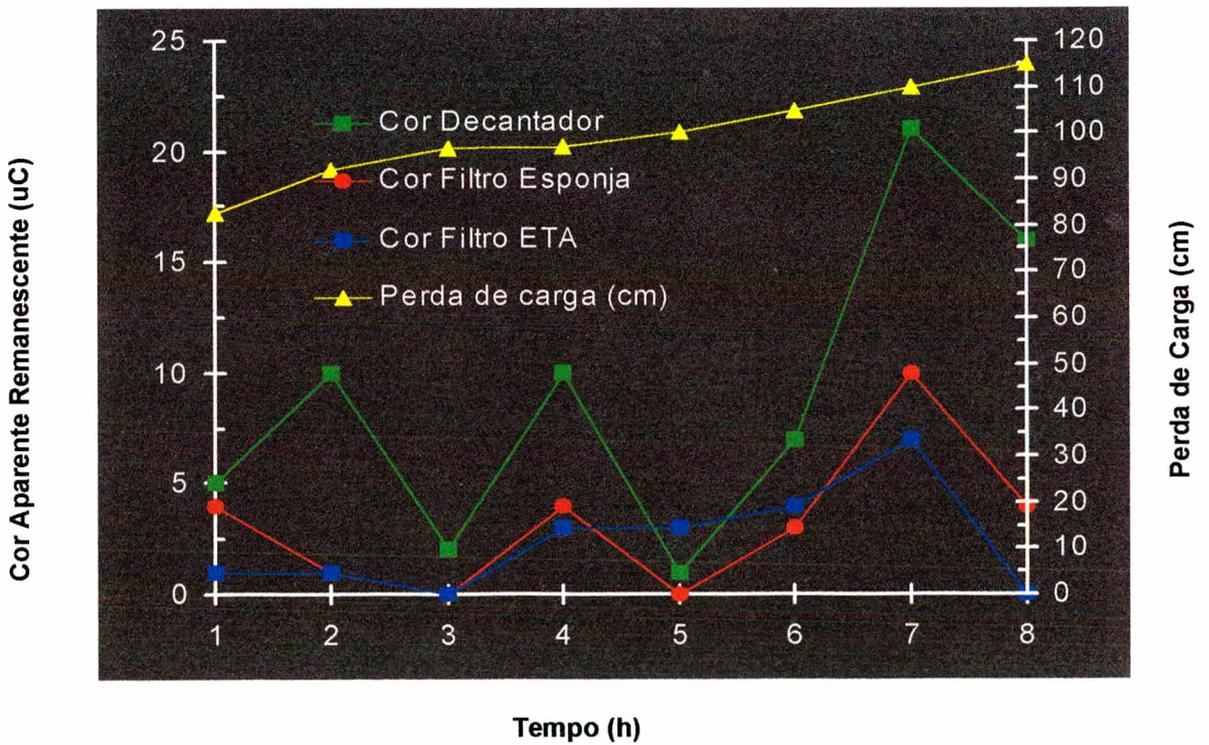


Figura 12 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 6)
 (Esponja cinza: Compressão = 80% e Taxa de Filtração = 213 m³/m²dia)

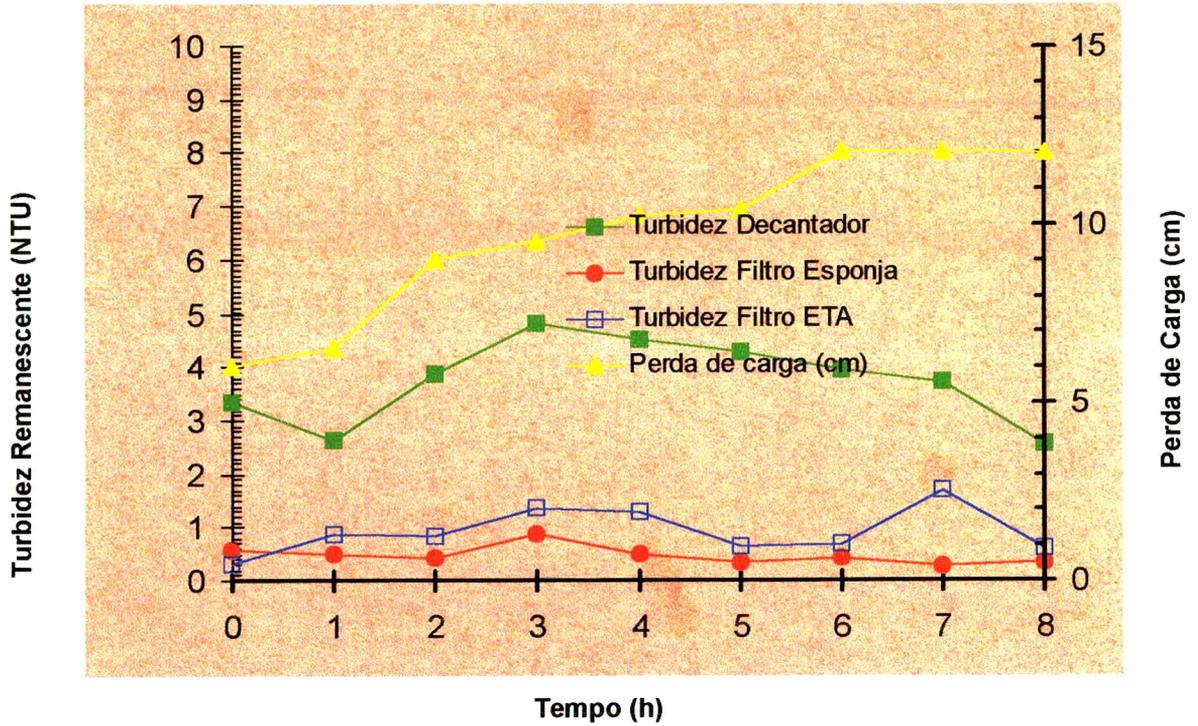


Figura 13 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 7)
 (Esponja rosa: Compressão = 50% Taxa de Filtração = $137,7 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$)

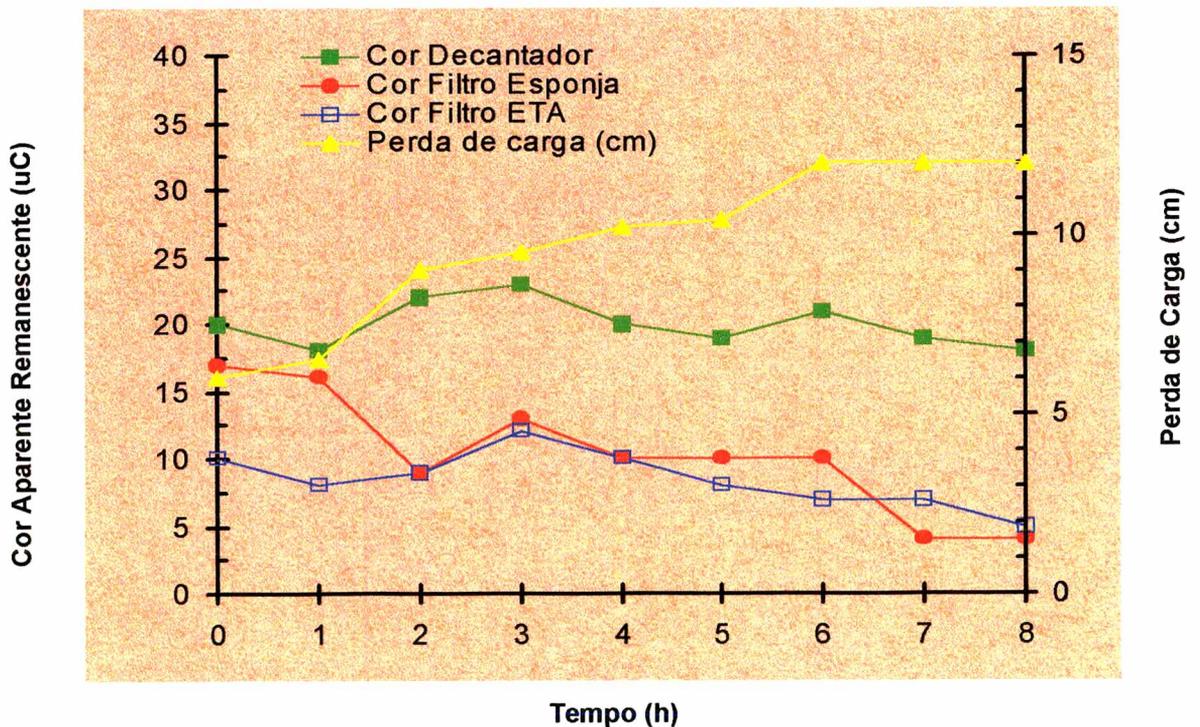


Figura 14 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 7)
 (Esponja rosa: Compressão = 50% Taxa de Filtração = $137,7 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$)

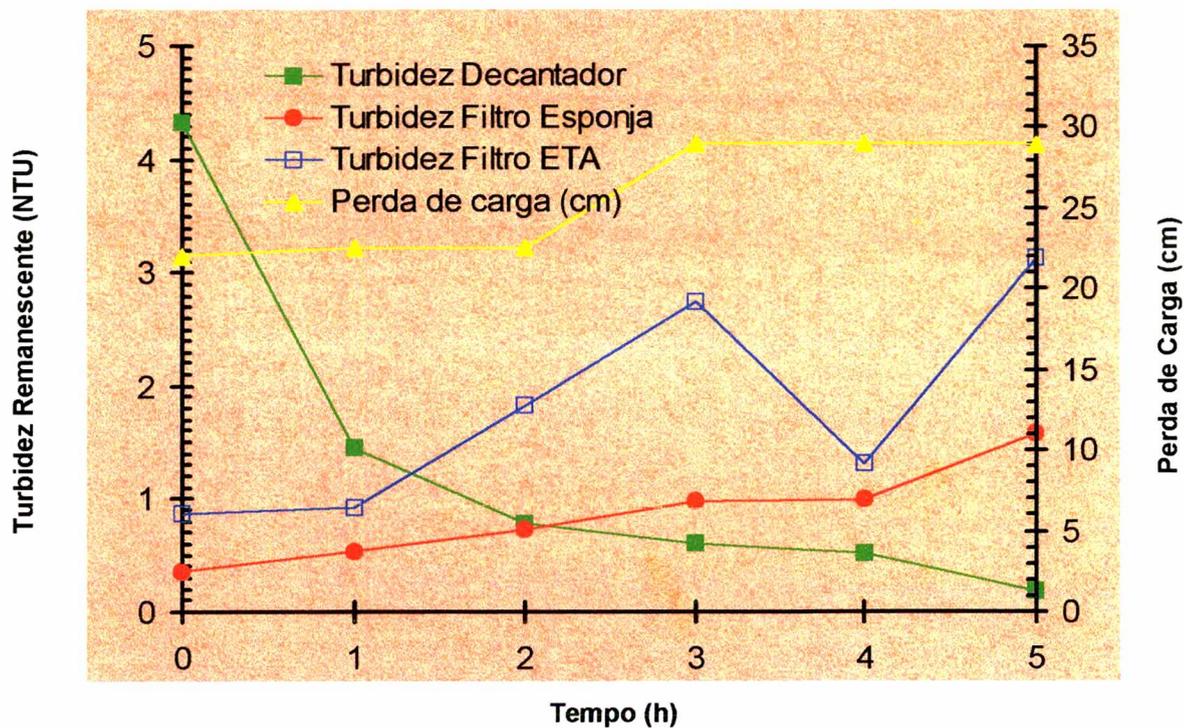


Figura 15 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 8)
(Esponja rosa: Compressão = 70% Taxa de filtração = $129,9 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$)

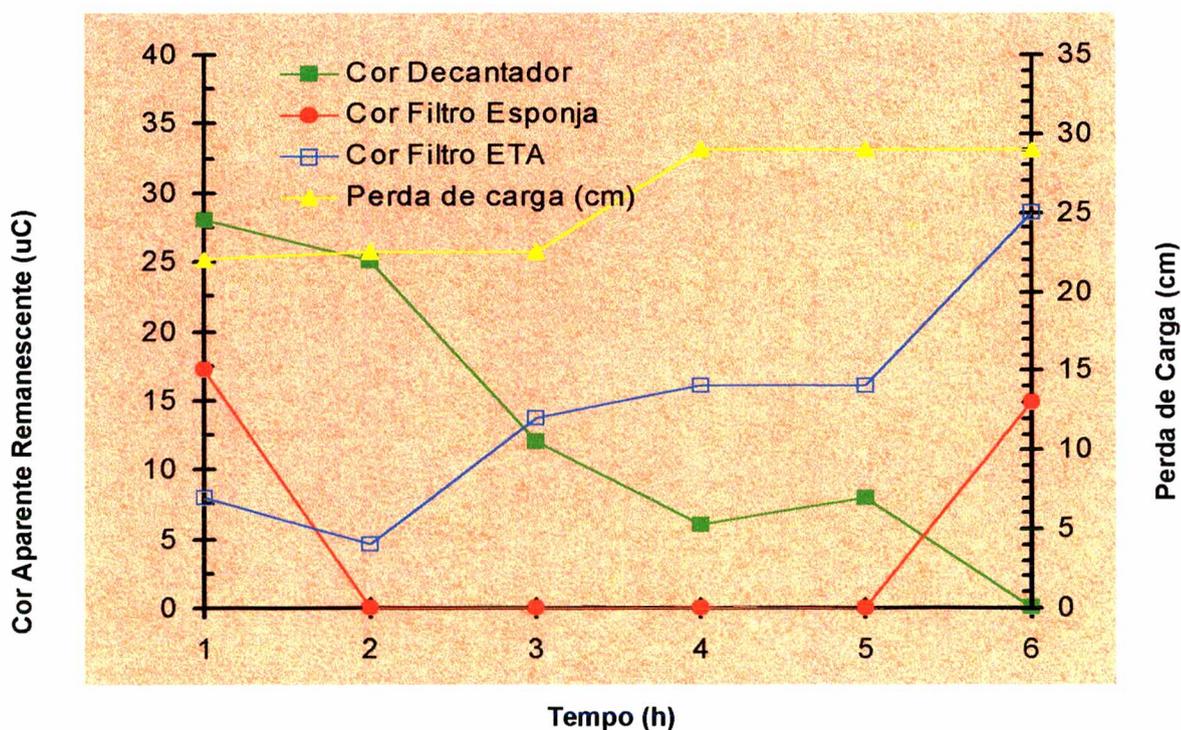


Figura 16 - Cor remanescente e perda de Carga (ver tabela 8)
(Esponja rosa: Compressão de 70% Taxa de Filtração = $129,9 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$)

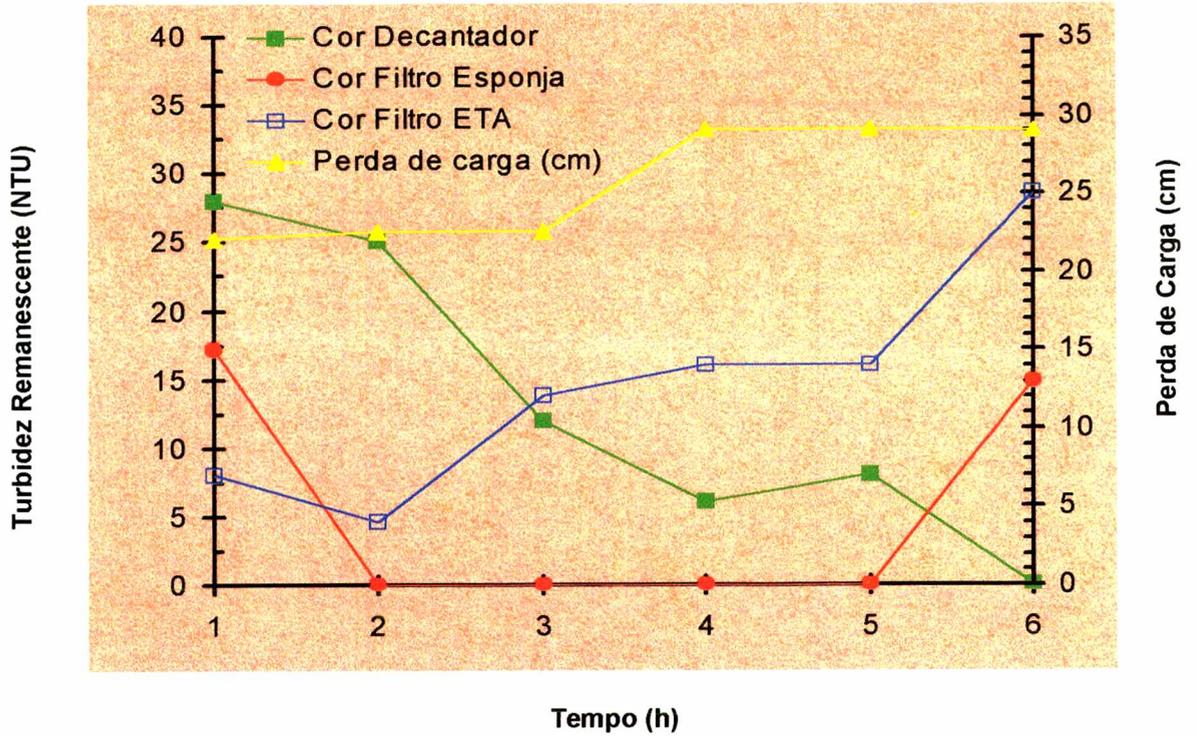


Figura 17 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 9)
 (Esponja rosa: Compressão de 50% Taxa de Filtração = 138,1 m³/m²/dia)

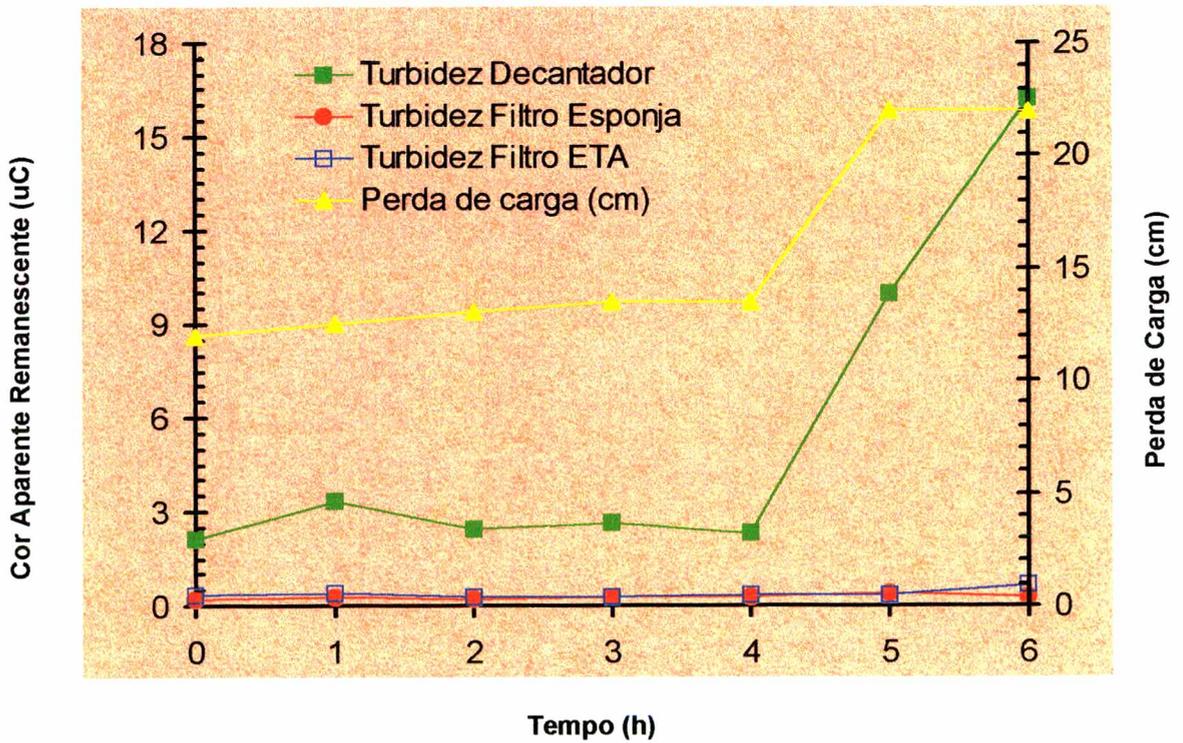


Figura 18 - Cor remanescente e Perda de Carga (ver tabela 9)
 (Esponja rosa: Compressão = 50% Taxa de Filtração = 138,1 m³/m²/dia)

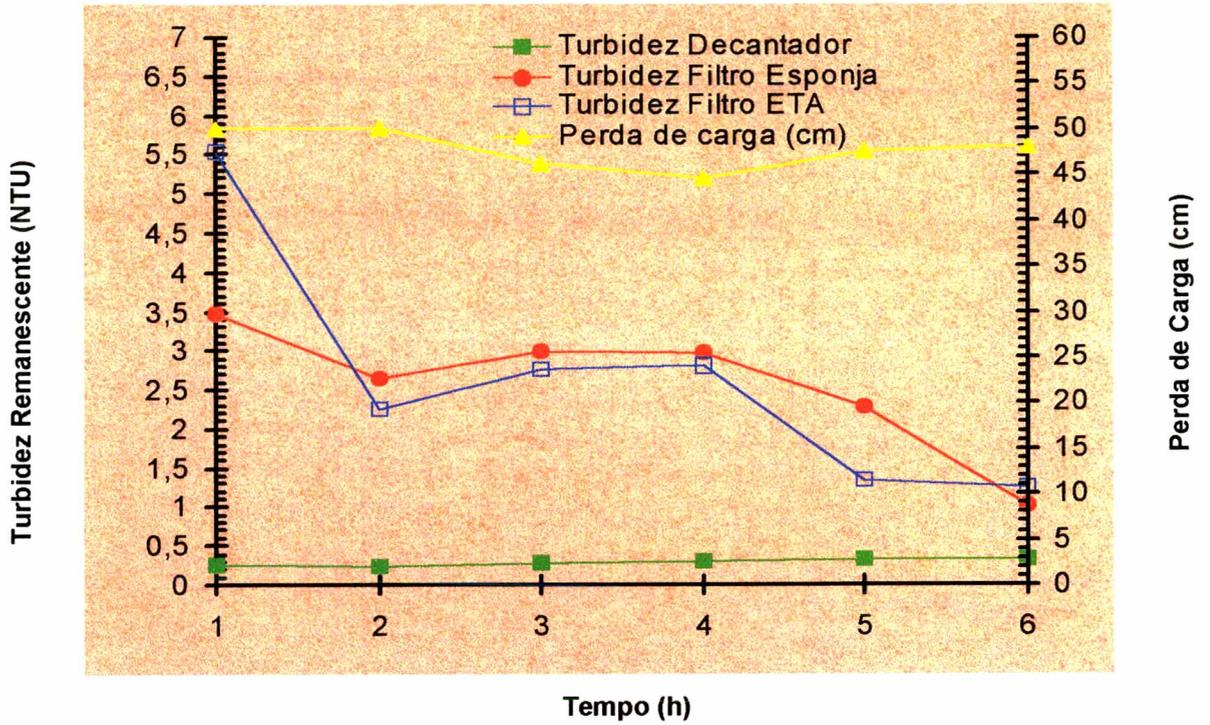


Figura 19 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 10)
 (Esponja rosa: Compressão = 80% Taxa de Filtração = 121,8 m³/m²dia)

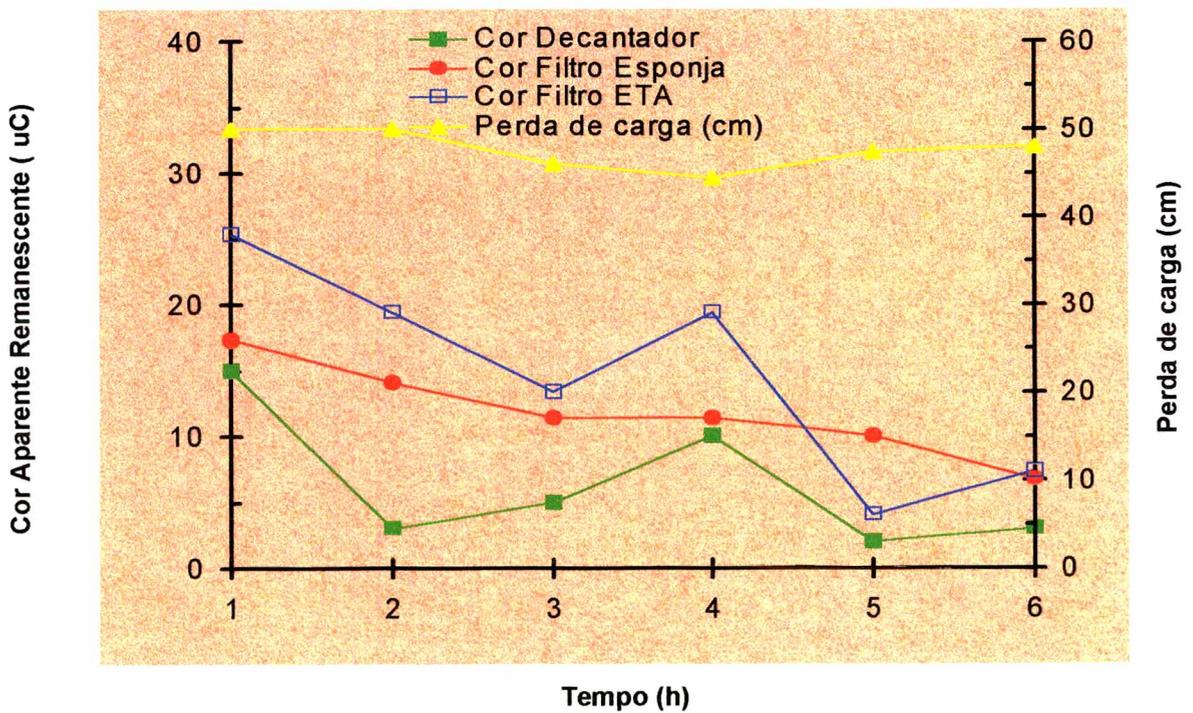


Figura 20 - Cor remanescente e Perda de Carga (ver tabela 10)
 (Esponja rosa: Compressão = 80% Taxa de Filtração = 121,8 m³/m²dia)

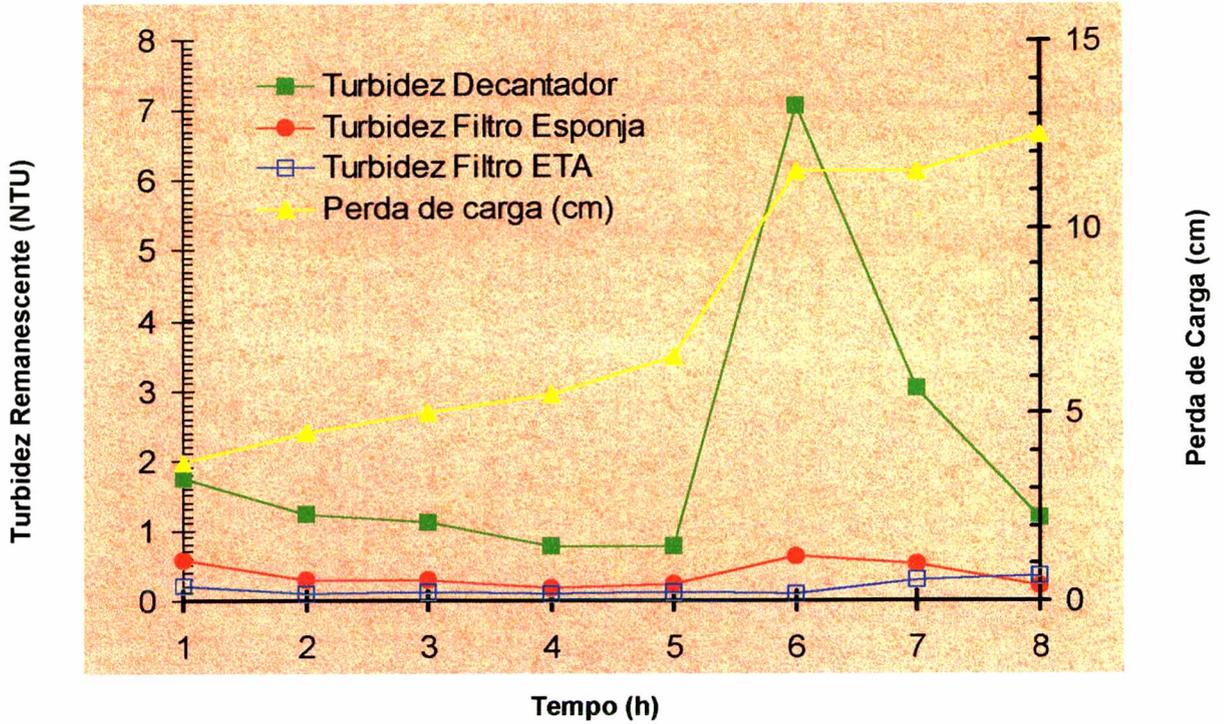


Figura 21 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 11)
(Esponja rosa: Compressão = 50% Taxa de Filtração = $103,8 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$)

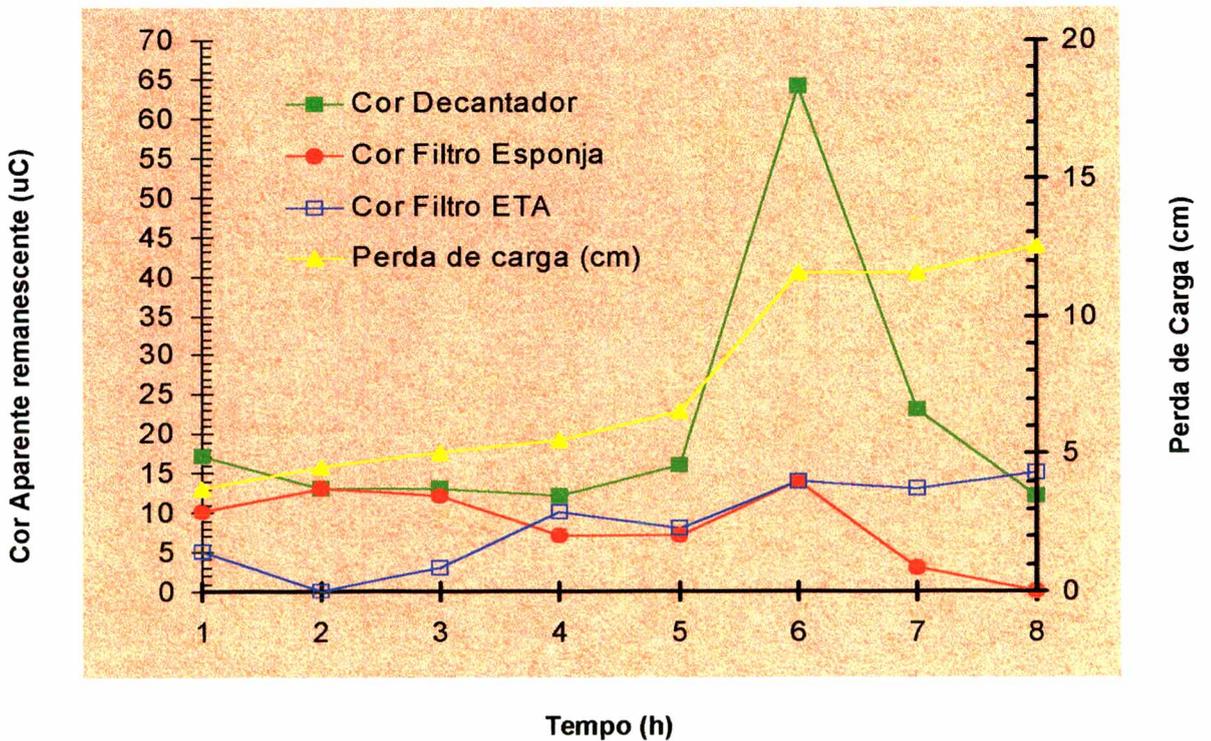


Figura 22 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 11)
(Esponja rosa: Compressão = 50% Taxa de Filtração = $103,8 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$)

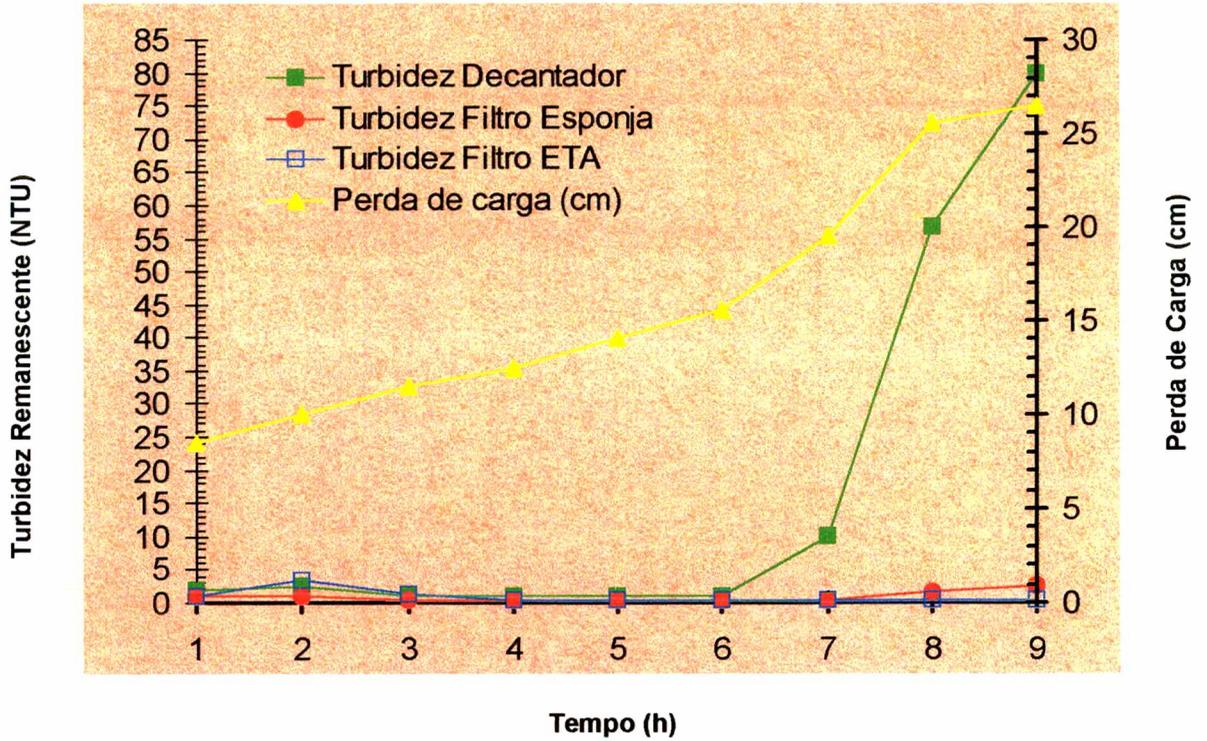


Figura 23 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 12)
 (Esponja rosa: Compressão = 70% Taxa de Filtração = 85,4 m³/m²/dia)

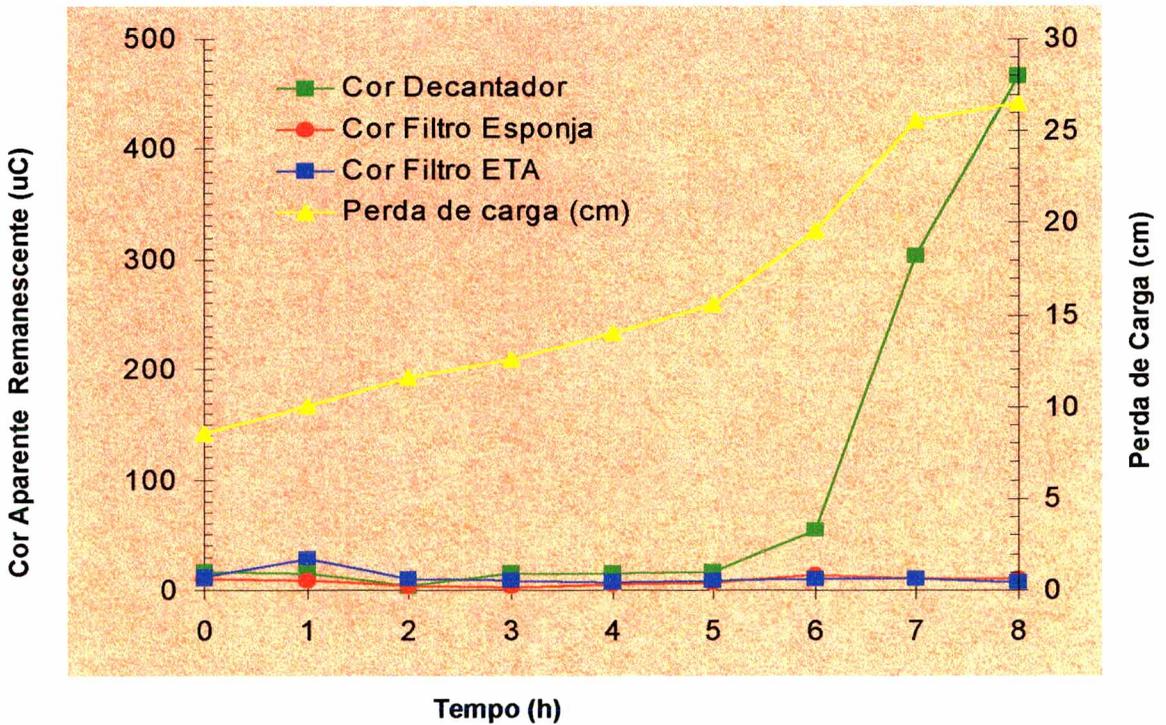


Figura 24 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 12)
 (Esponja rosa: Compressão = 70% Taxa de Filtração = 85,4 m³/m²/dia)

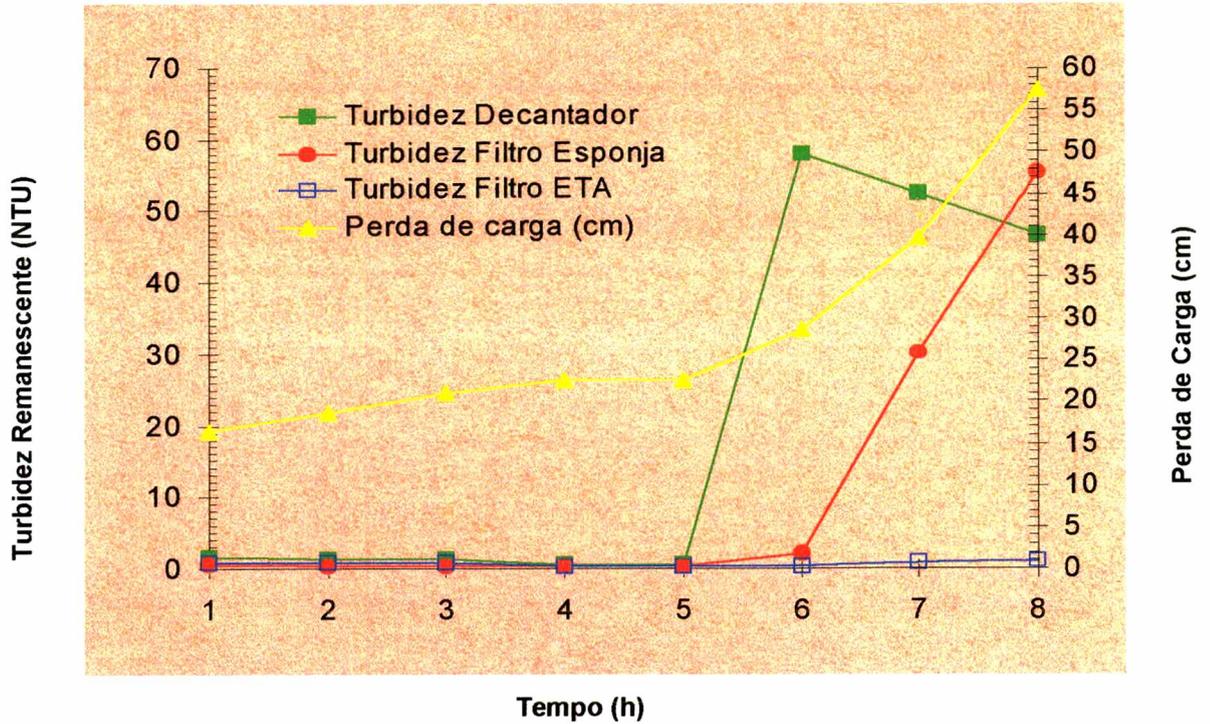


Figura 25 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 13)
(Esponja rosa: (Compressão = 70% Taxa de Filtração = 92,7 m³/m²dia)

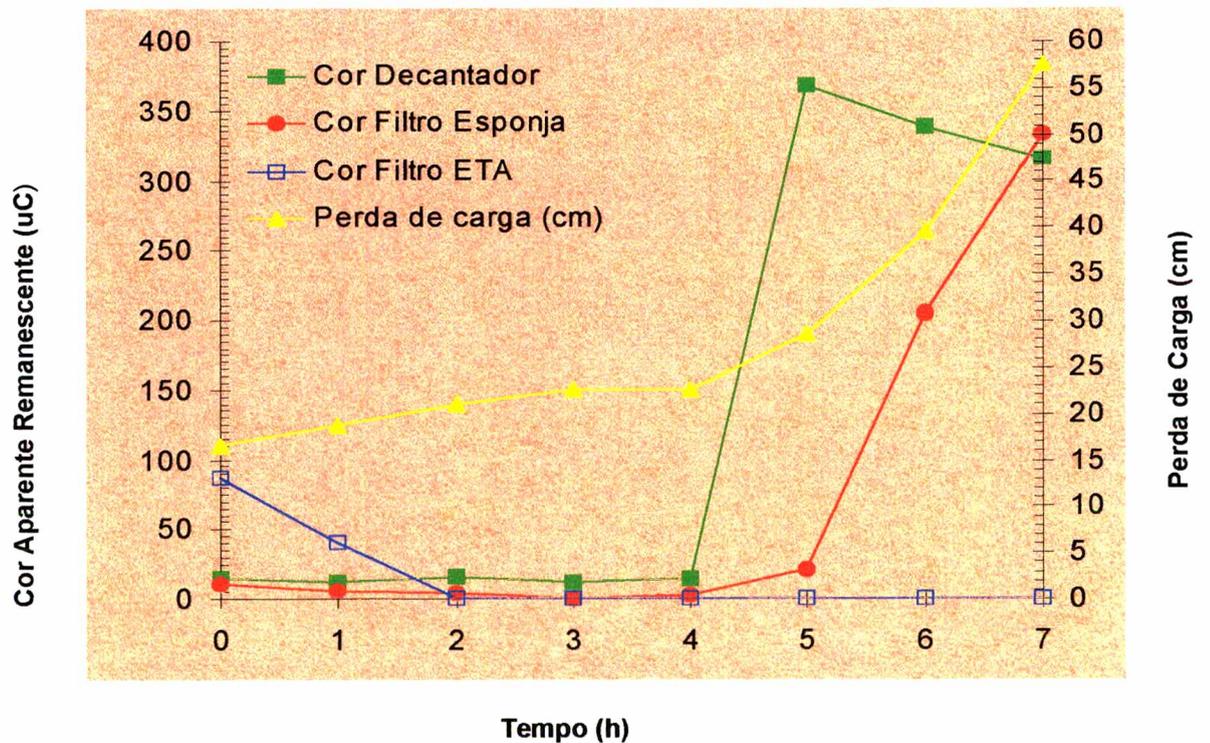


Figura 26 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 13)
(Esponja rosa: Compressão = 70% Taxa = Filtração de 92,7 m³/m²dia)

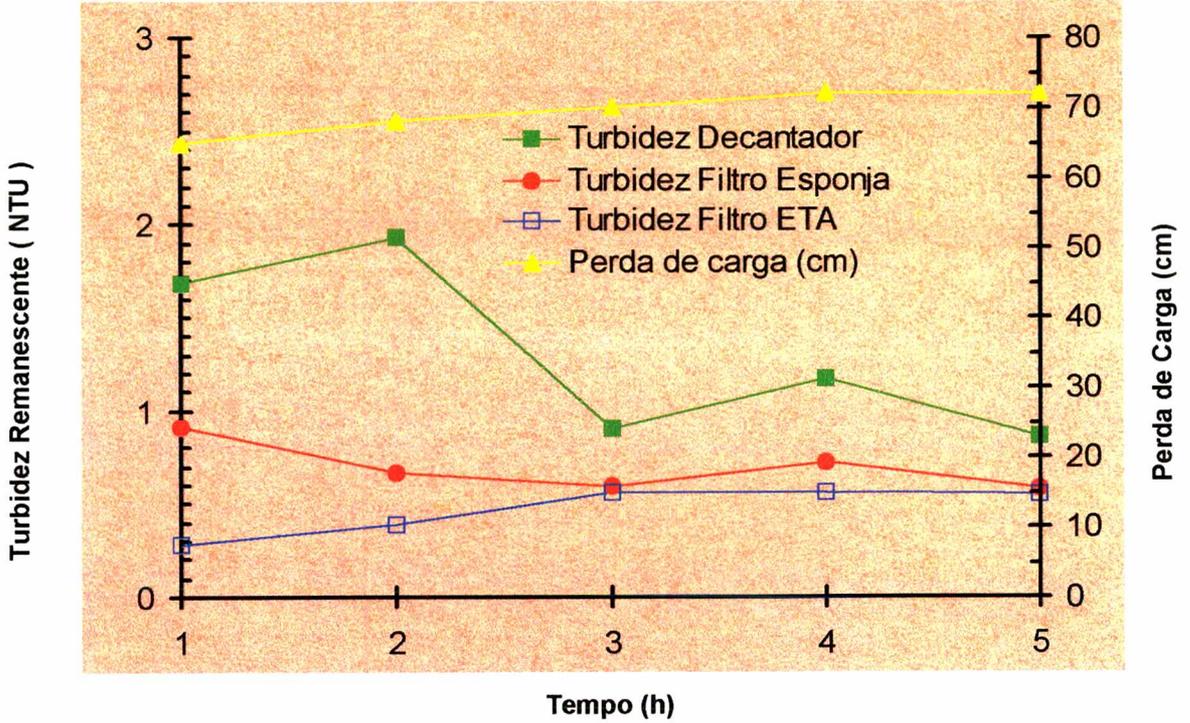


Figura 27 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 14)
 (Esponja rosa: (Compressão = 80% Taxa de Filtração = 74 m³/m²/dia)

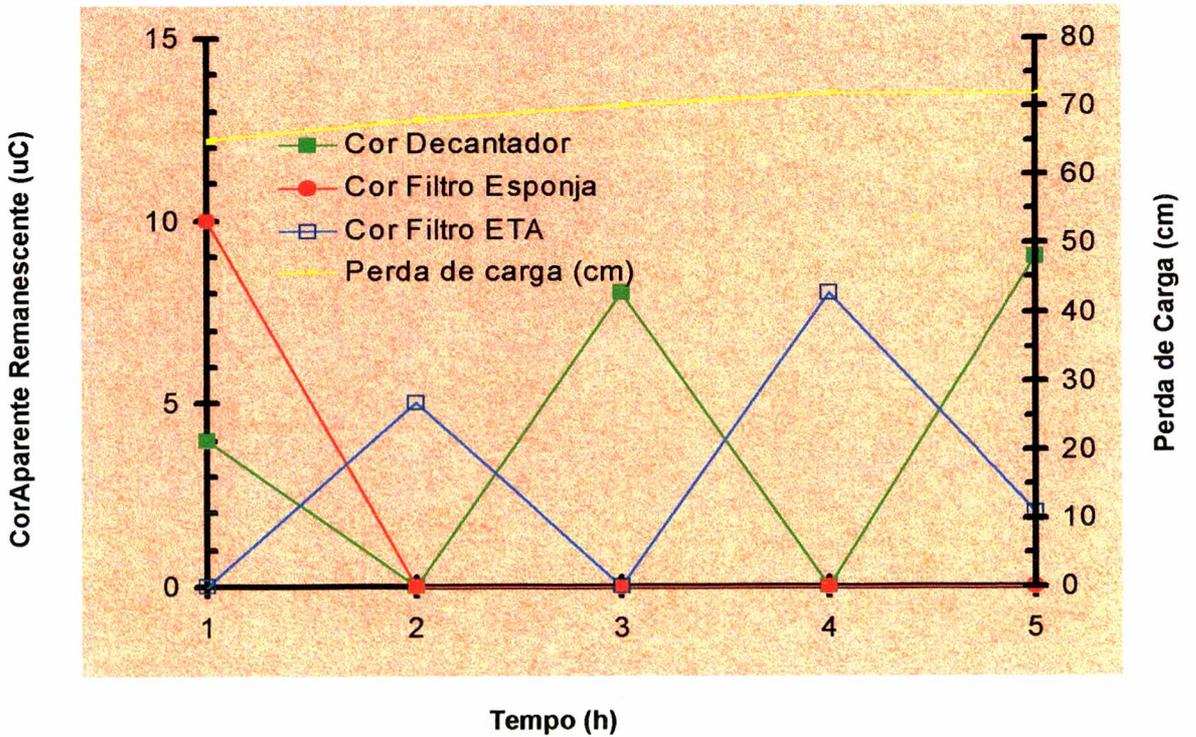


Figura 28 - Cor Remanescente e Perda de Carga (Ver tabela 14)
 (Esponja rosa: (Compressão = 80% Taxa de Filtração = 74 m³/m²/dia)

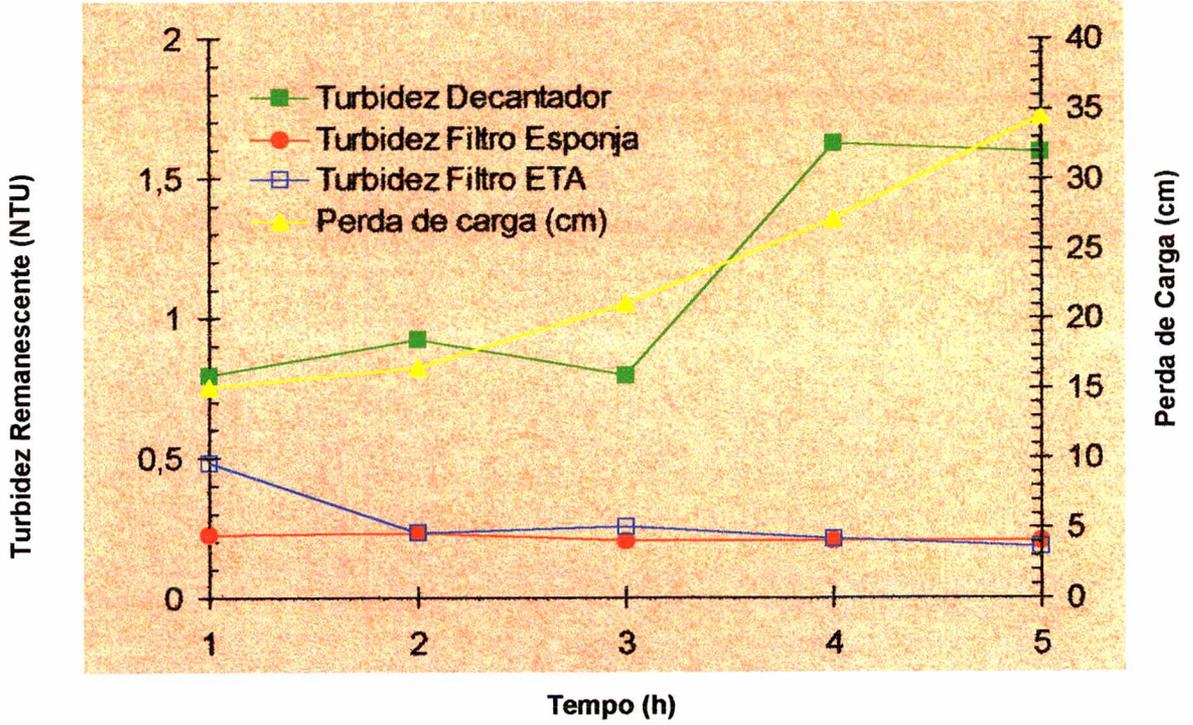


Figura 29 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 15)
 (Esponja rosa: (Compressão = 50% taxa de Filtração = 213,6 m³/m²dia)

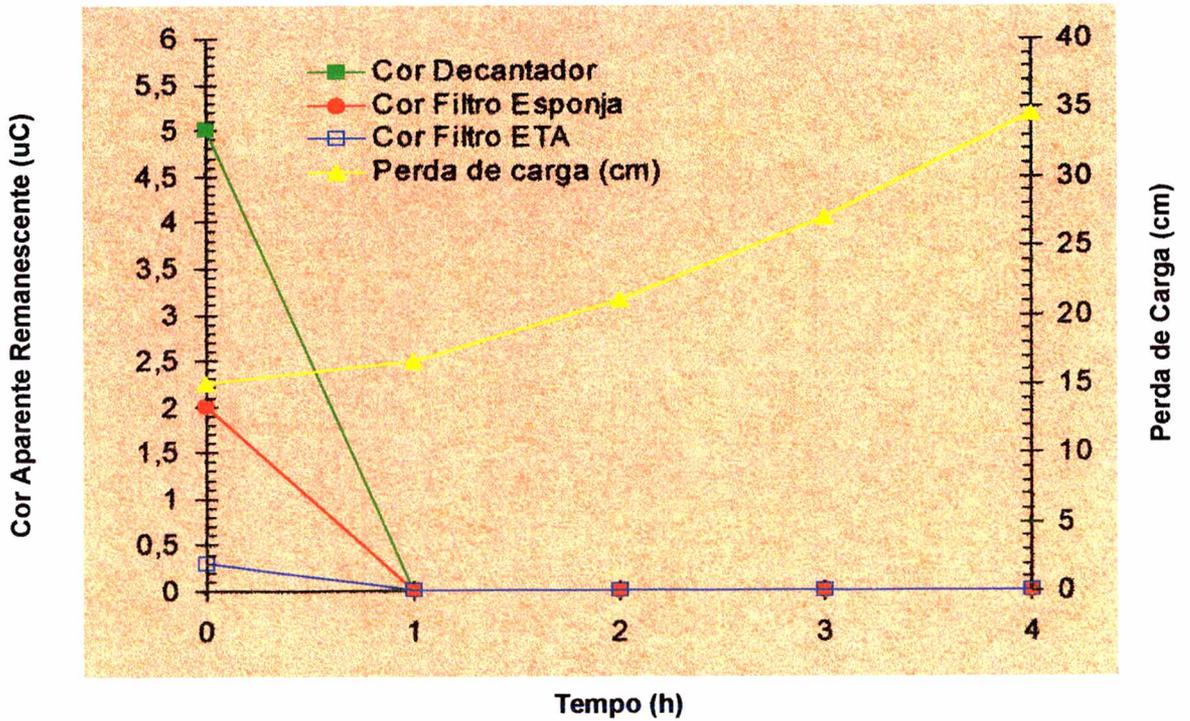


Figura 30 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 15)
 (Esponja rosa: (Compressão = 50% Taxa de Filtração = 213,6 m³/m²dia)

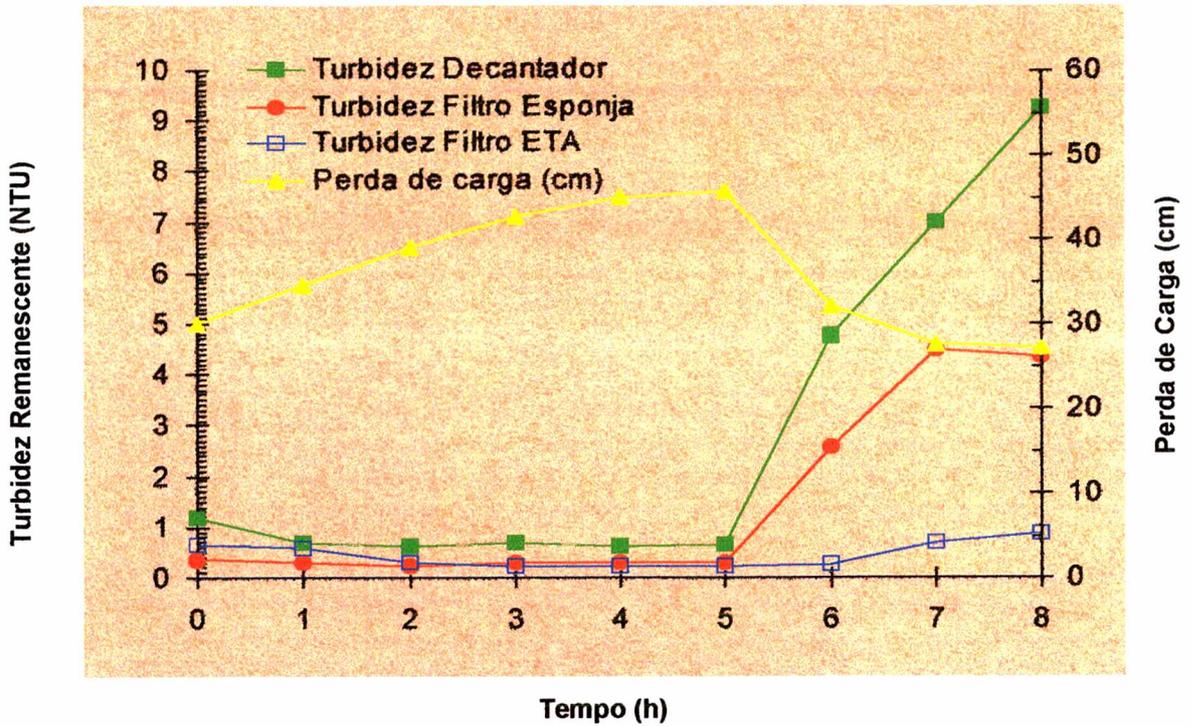


Figura 31 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 16)
Esponja rosa: (Compressão = 70 % Taxa de Filtração = 178,3 m³/m²dia)

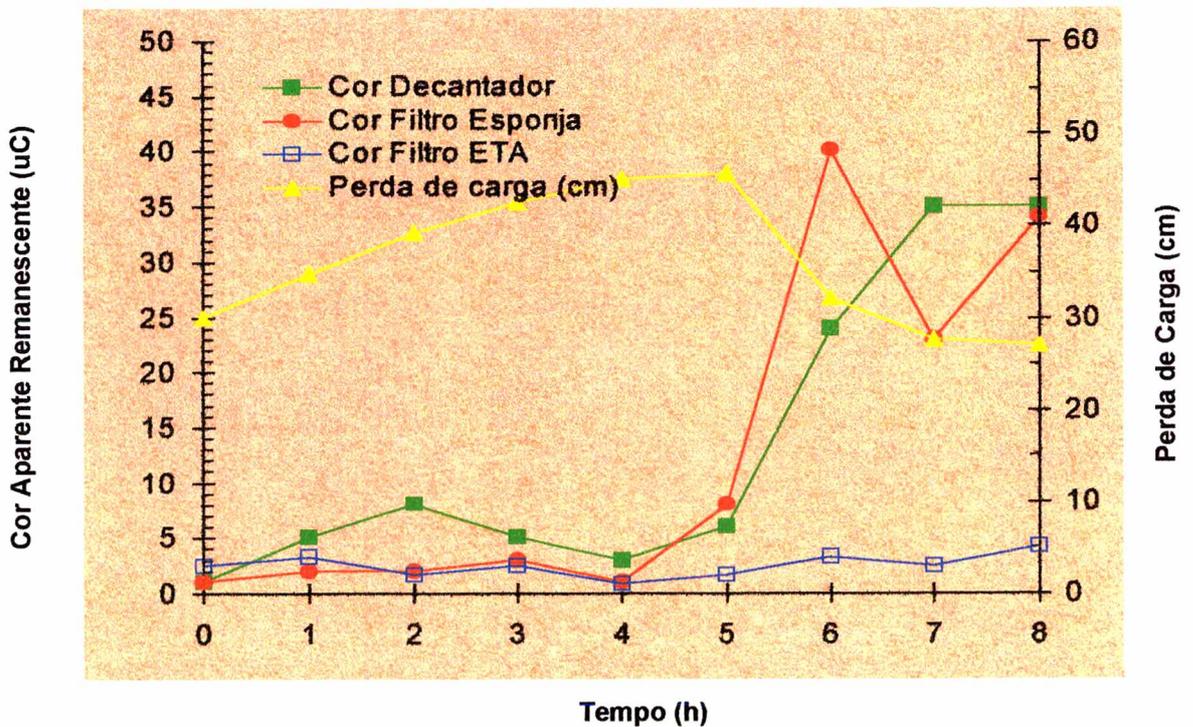


Figura 32 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 16)
(Esponja rosa: Compressão = 70% Taxa de Filtração = 178,3 m³/m²dia)

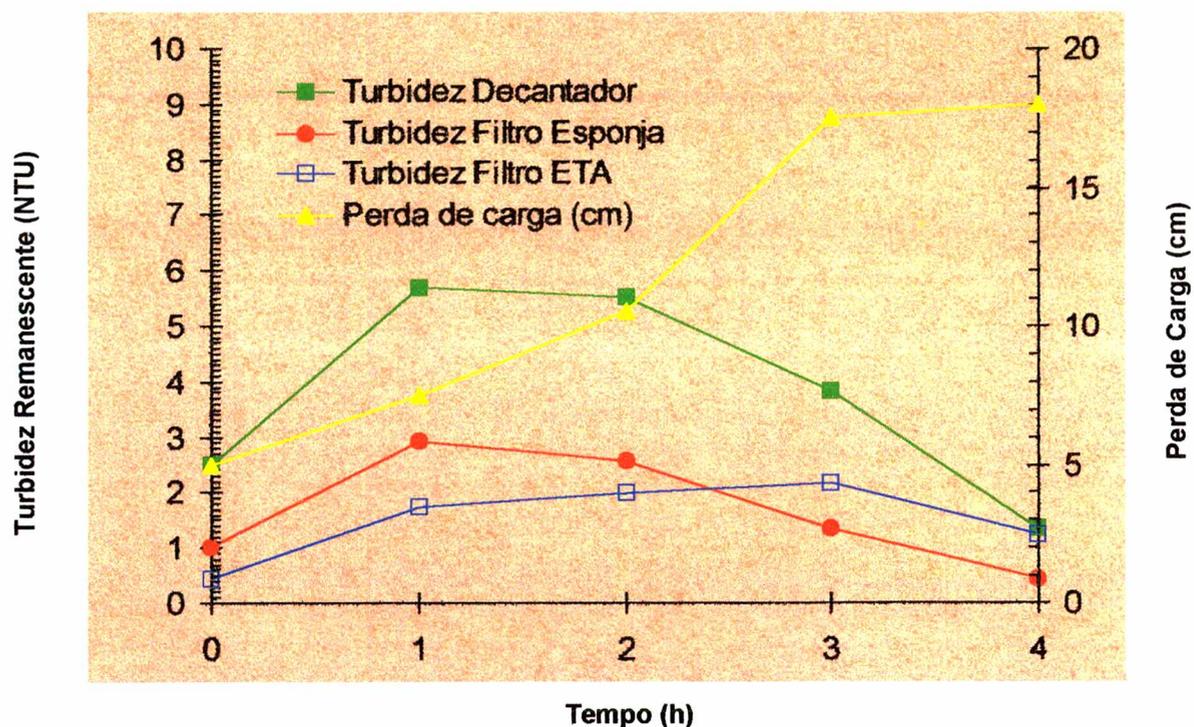


Figura 33 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 17)
(Esponja rosa: Compressão = 50% Taxa de Filtração = 195,2 m³/m²dia)

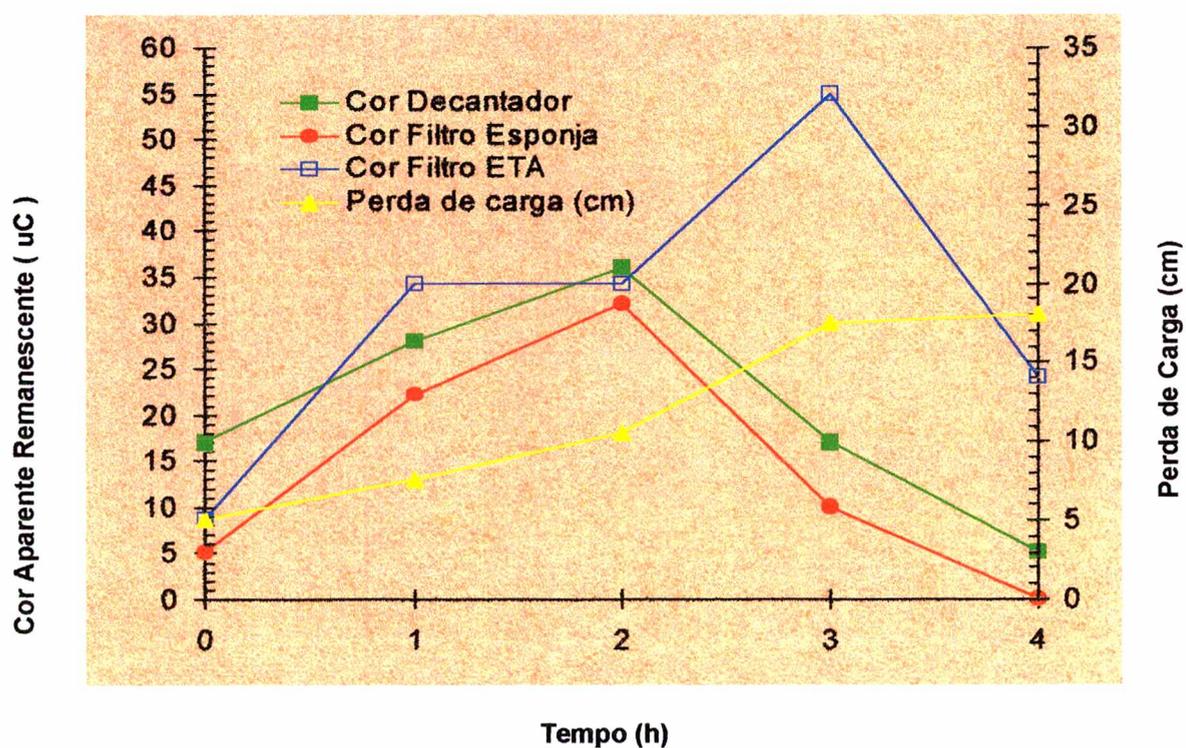


Figura 34 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 17)
(Esponja rosa: Compressão = 50% e Taxa de Filtração = 195,2 m³/m²dia)

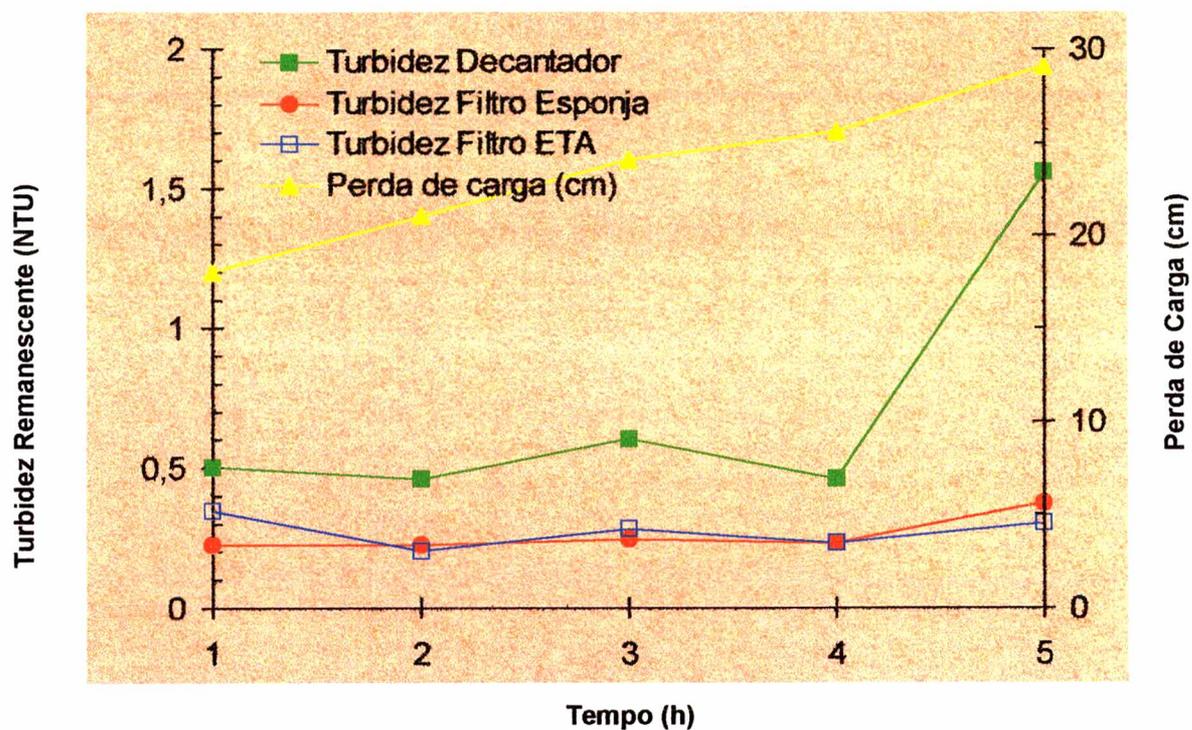


Figura 35 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 19)
(Esponja rosa: Compressão = 70% Taxa de Filtração = 216,2 m³/m²dia)

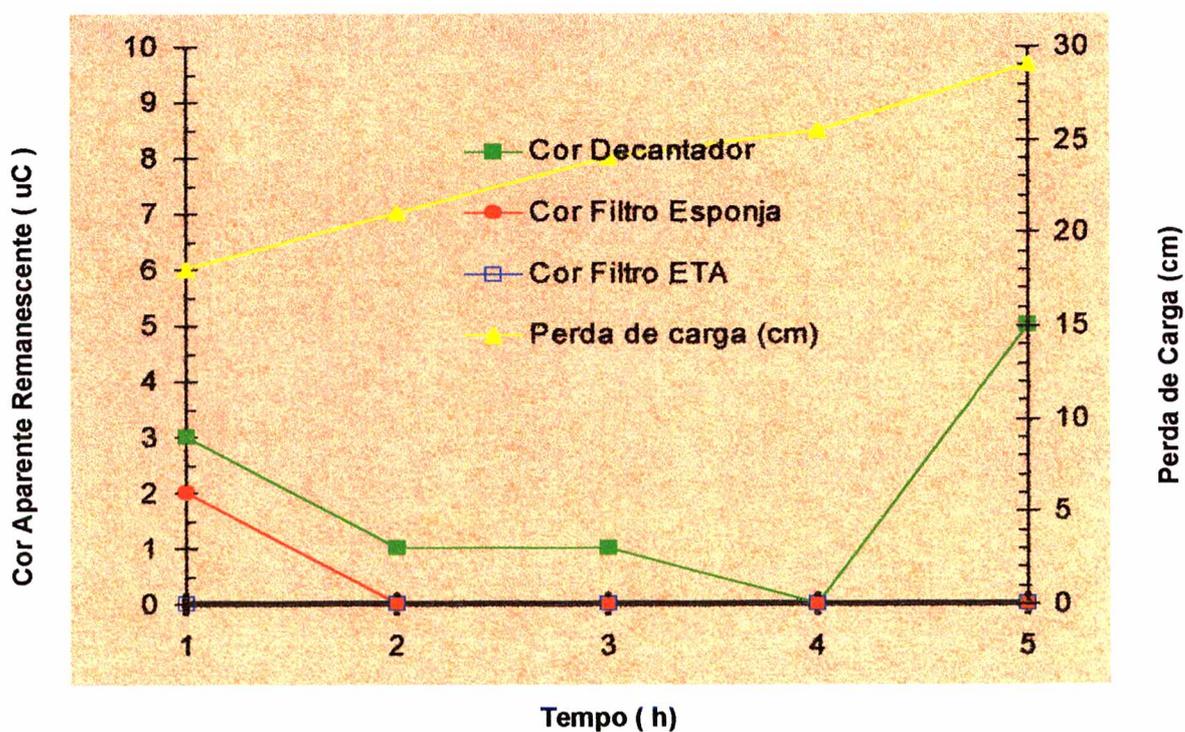


Figura 36 - Cor Aparente Remanescente e Perda de carga (ver tabela 19)
(Esponja rosa: Compressão = 70% Taxa de Filtração = 216,2 m³/m²dia)

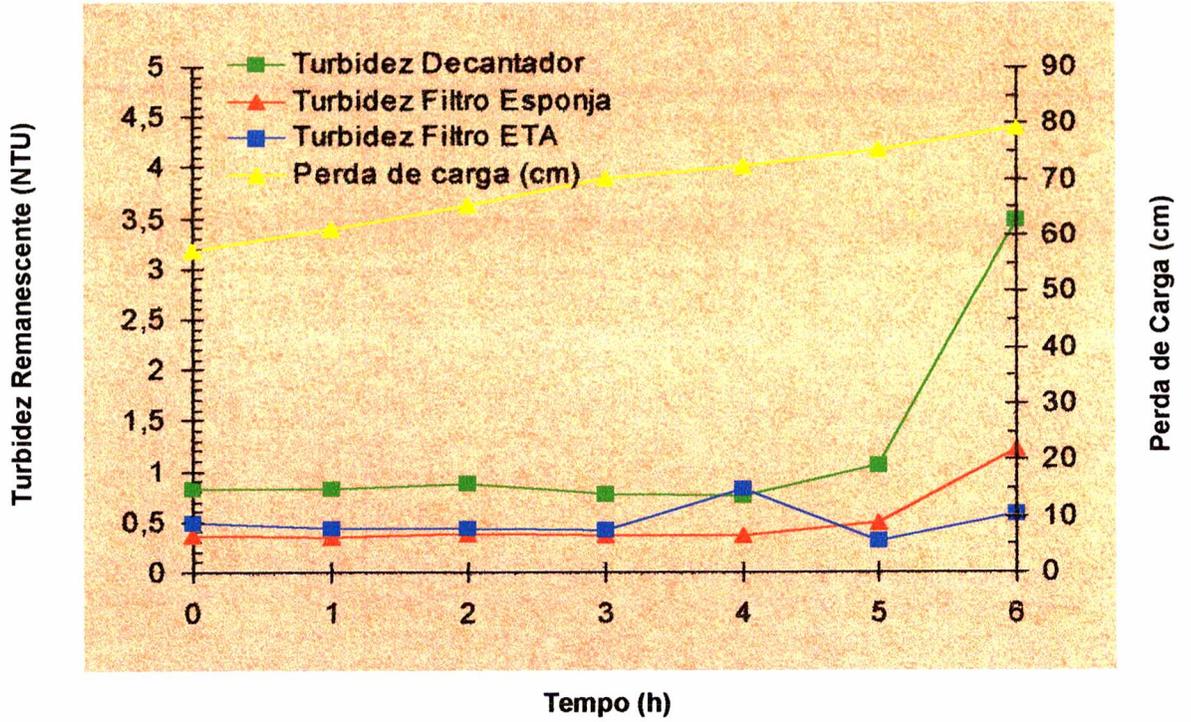


Figura 37 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 20)
 (Esponja rosa: Compressão = 80% Taxa de Filtração = 233,7 m³/m²/dia)

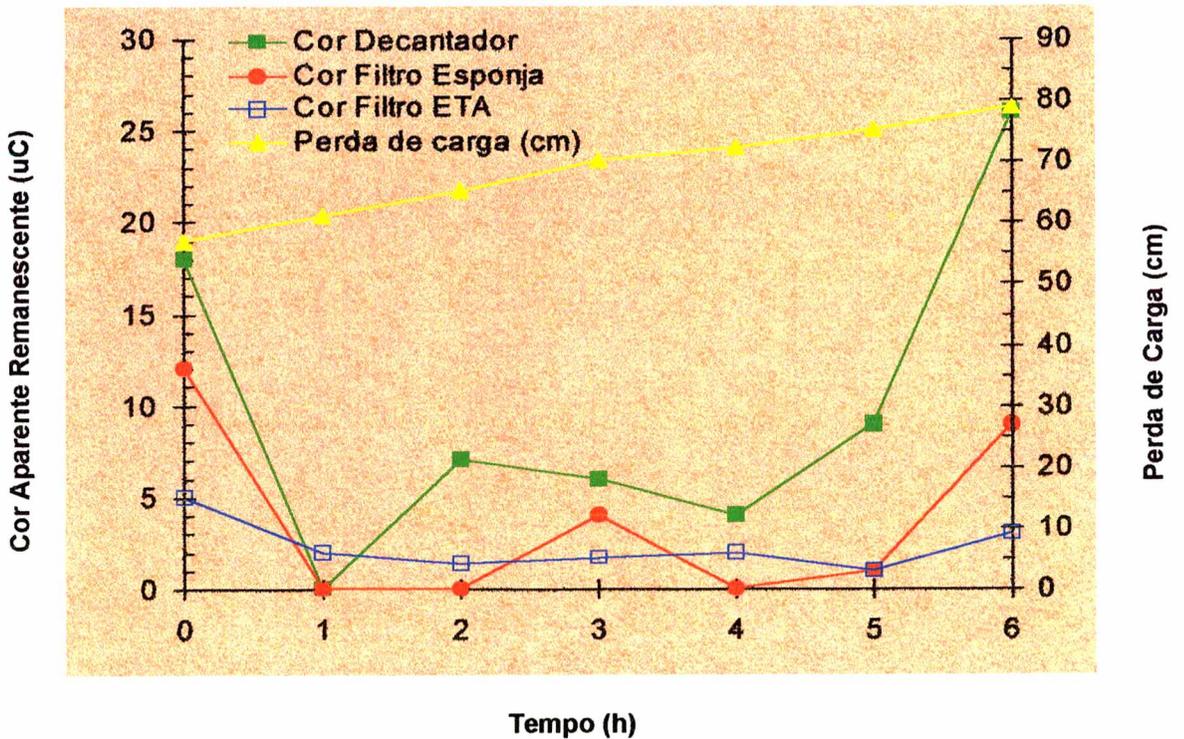


Figura 38 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 20)
 (Esponja rosa: Compressão = 80% Taxa de filtração = 233,7 m³/m²/dia)

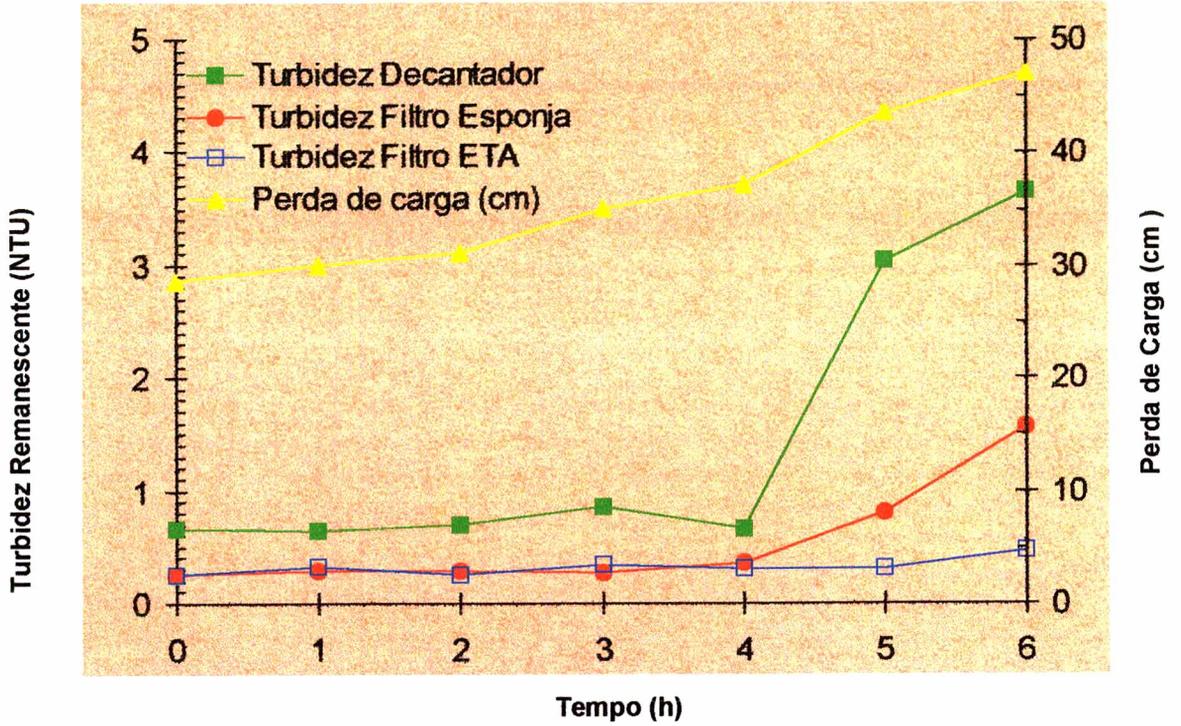


Figura 39 -Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 21)
 (Esponja rosa:Compressão = 70% Taxa de Filtração = 219,5 m³/m²dia)

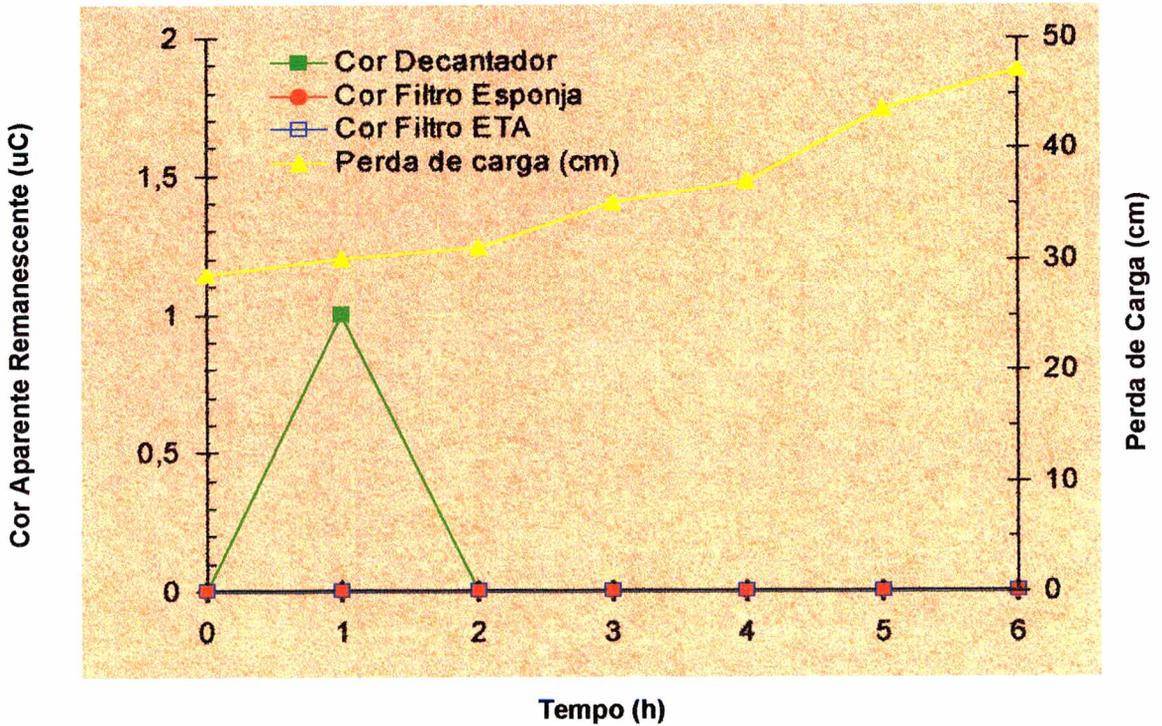


Figura 40 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 21)
 (Esponja rosa:Compressão = 70% Taxa de Filtração = 219,5 m³/m²dia)

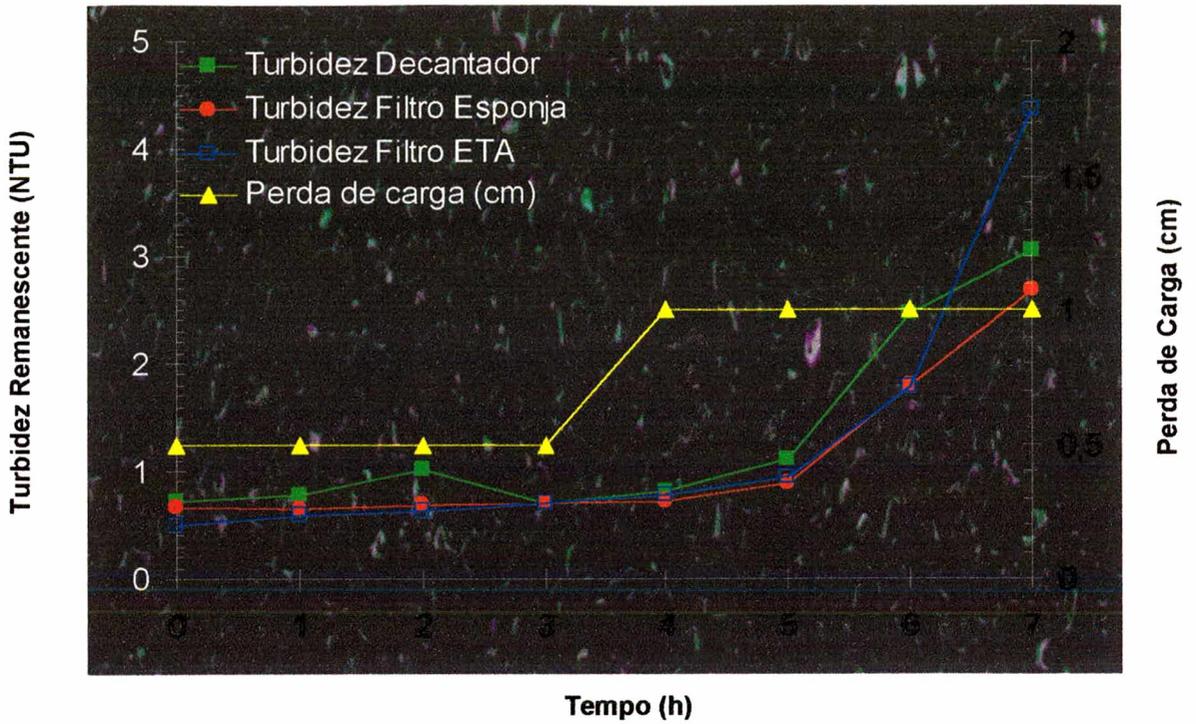


Figura 41 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver figura 22)
 (Esponja preta: Compressão = 50% Taxa de Filtração = 216 m³/m²/dia)

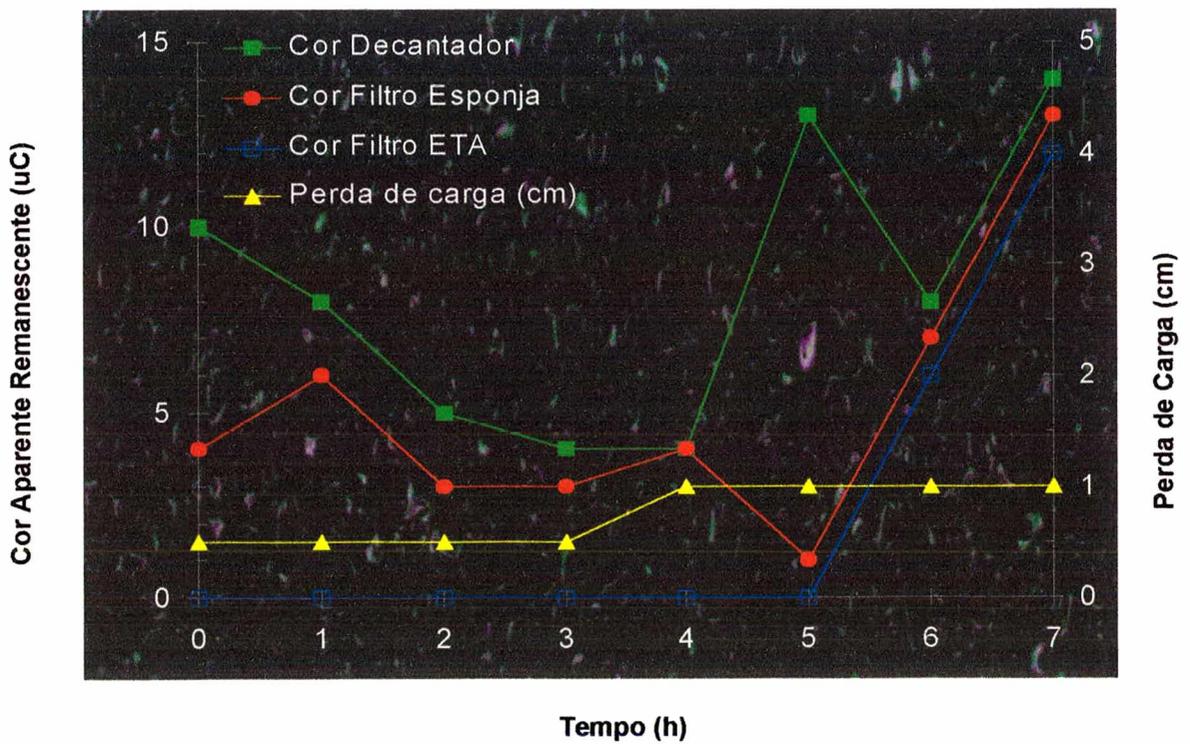


Figura 42 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver figura 22)
 (Esponja preta: Compressão = 50% Taxa de Filtração = 216 m³/m²/dia)

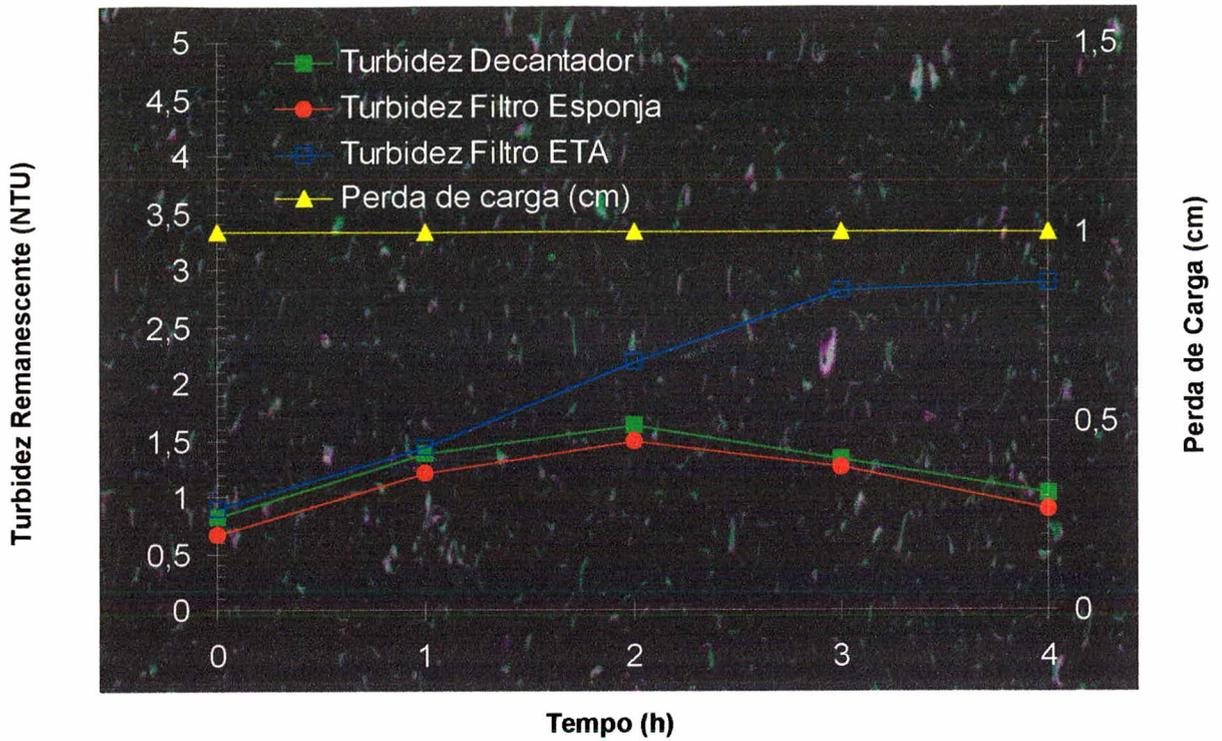


Figura 43 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver figura 23)
 (Esponja preta: Compressão = 70% Taxa de Filtração = 181,8 m³/m²dia

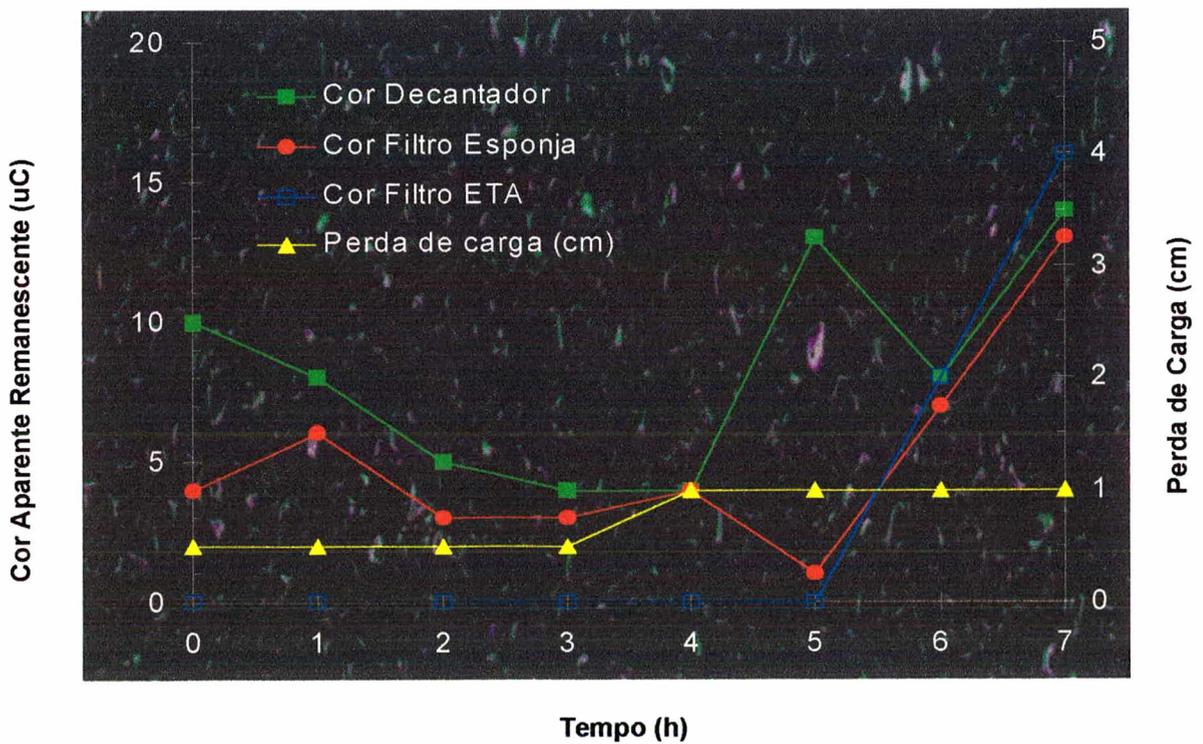


Figura 44 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver figura 23)
 (Esponja preta: Compressão = 70% Taxa de Filtração = 181,8 m³/m²dia)

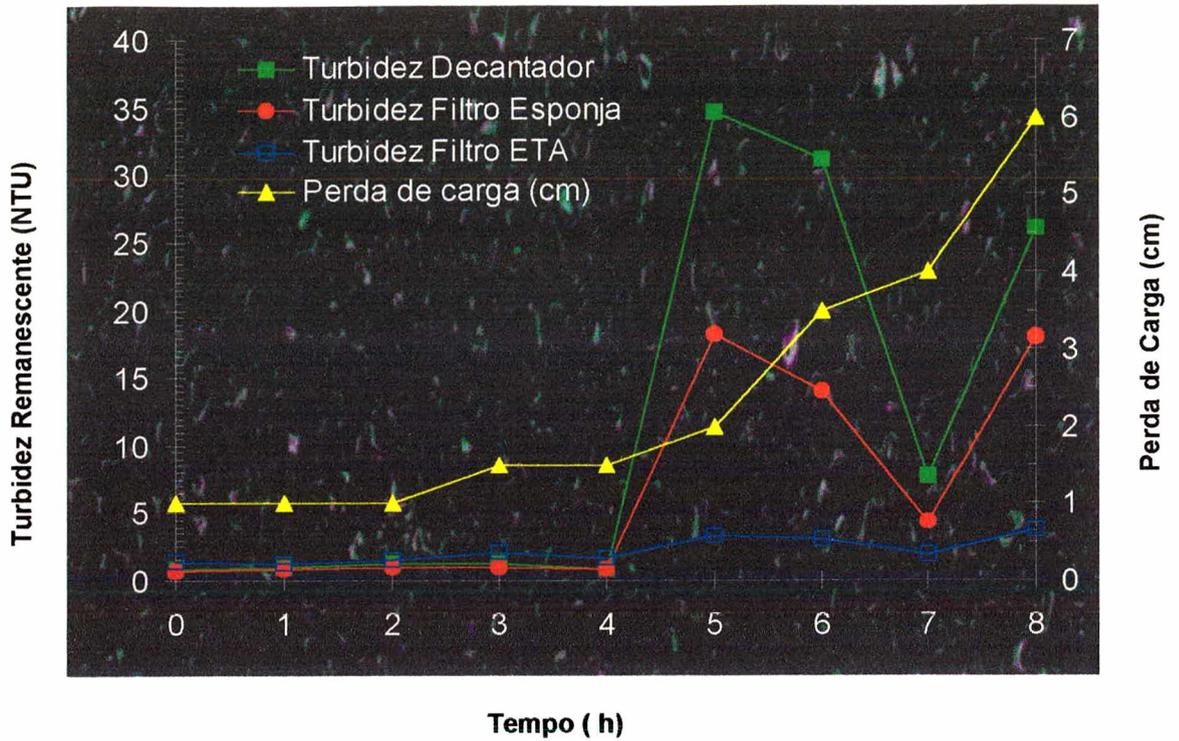


Figura 45 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver figura 24)
(Esponja preta: Compressão = 80% Taxa de Filtração = $194 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$)

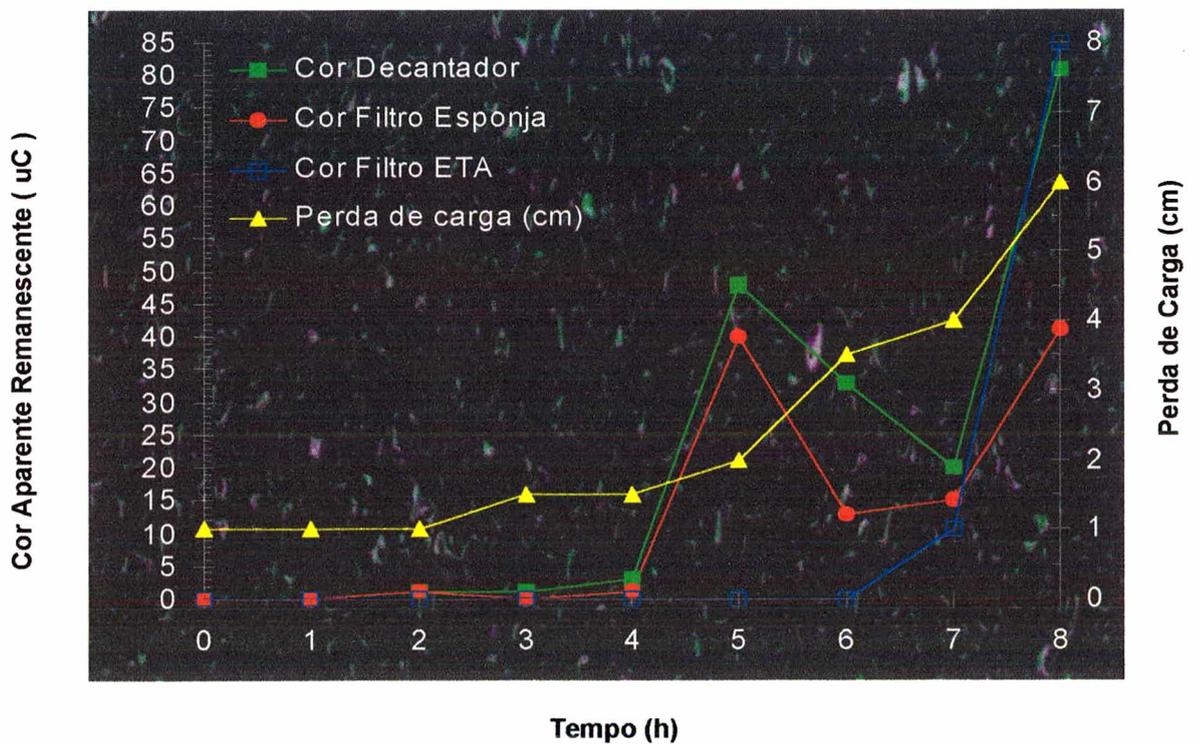


Figura 46 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver figura 24)
(Esponja preta: Compressão = 80% Taxa de Filtração = $194 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$)

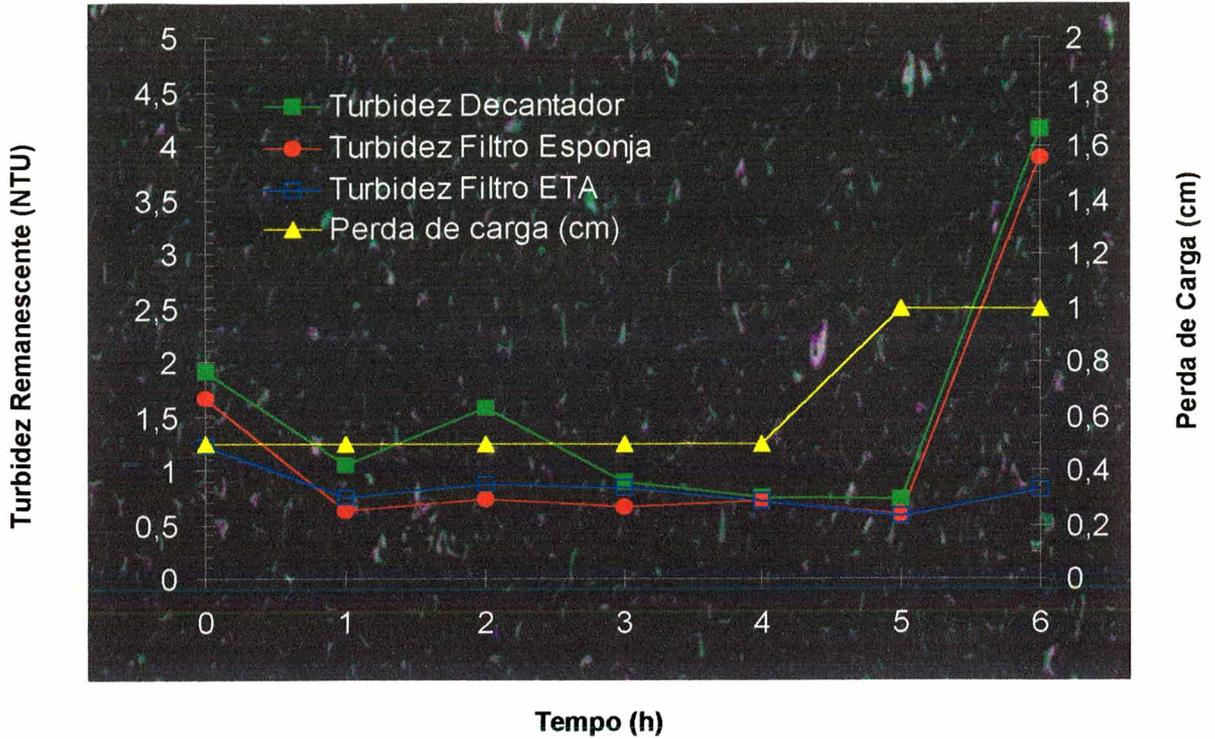


Figura 47 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver figura 25)
 (Esponja preta: Compressão = 50% Taxa de Filtração = 224,3 m³/m²/dia)

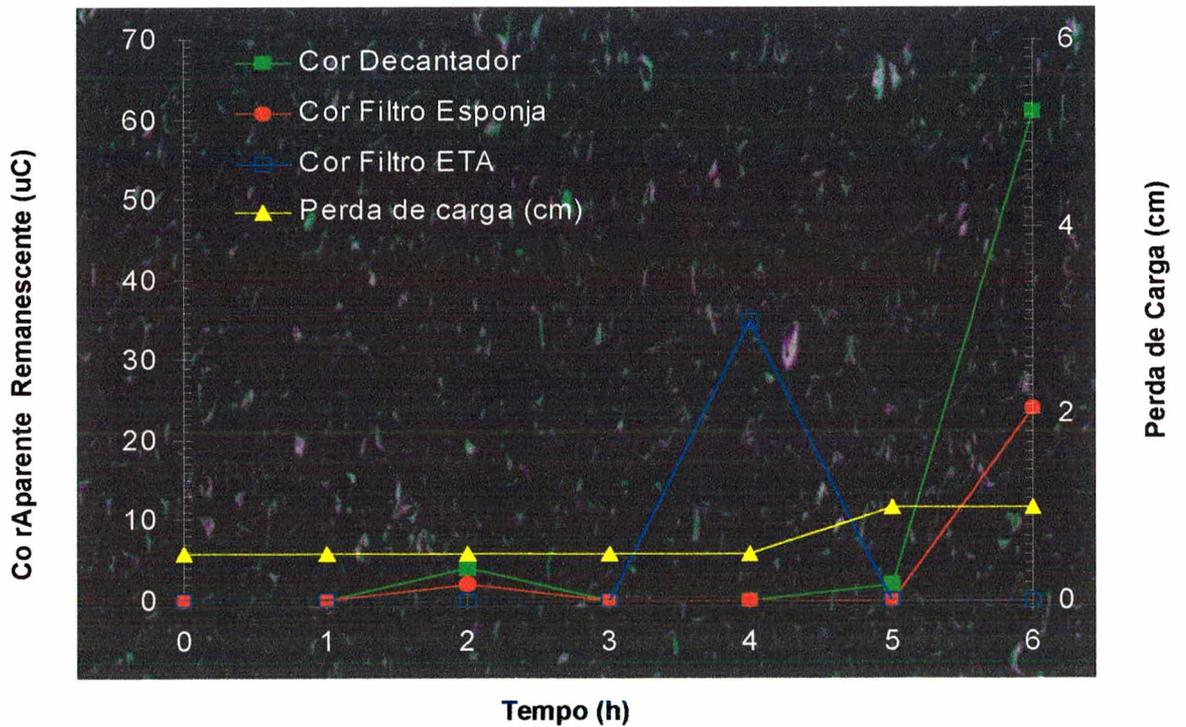


Figura 48 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver figura 25)
 (Esponja preta: Compressão = 50% Taxa de Filtração = 224,3 m³/m²/dia)

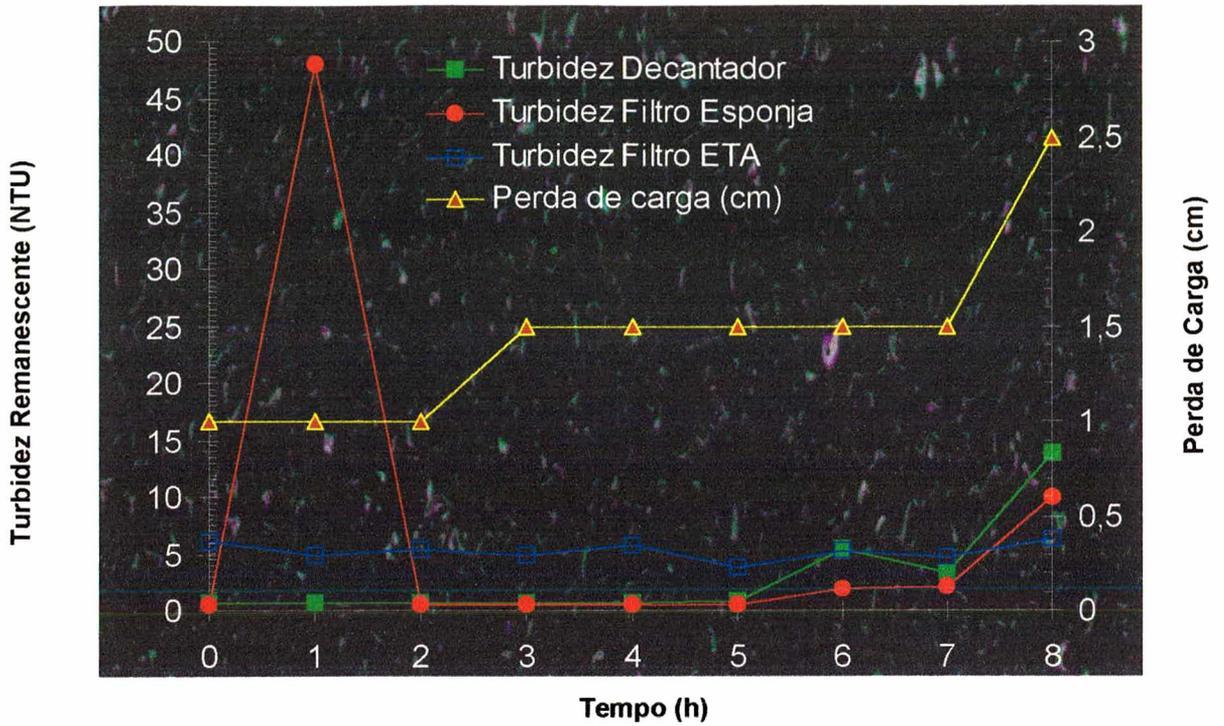


Figura 49 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 26)
 (Esponja preta: Compressão = 70% Taxa de Filtração = 222,4 m³/m²/dia)

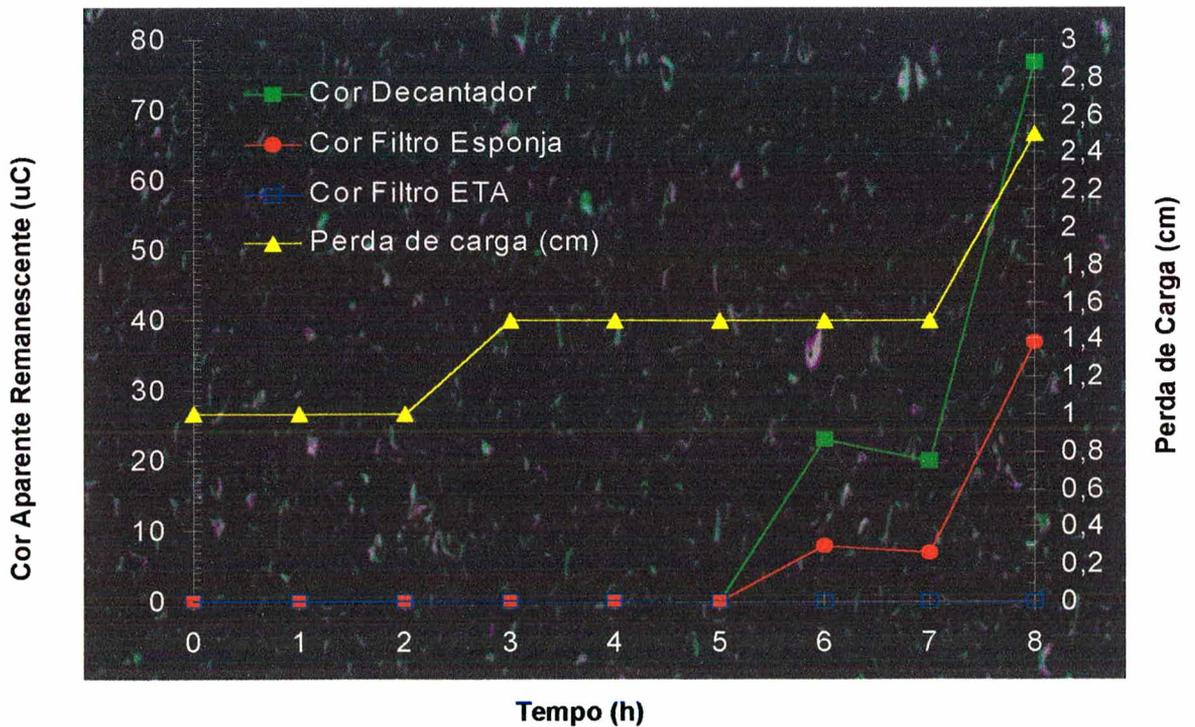


Figura 50 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 26)
 (Esponja preta: Compressão = 70% Taxa de Filtração = 222,4 m³/m²/dia)

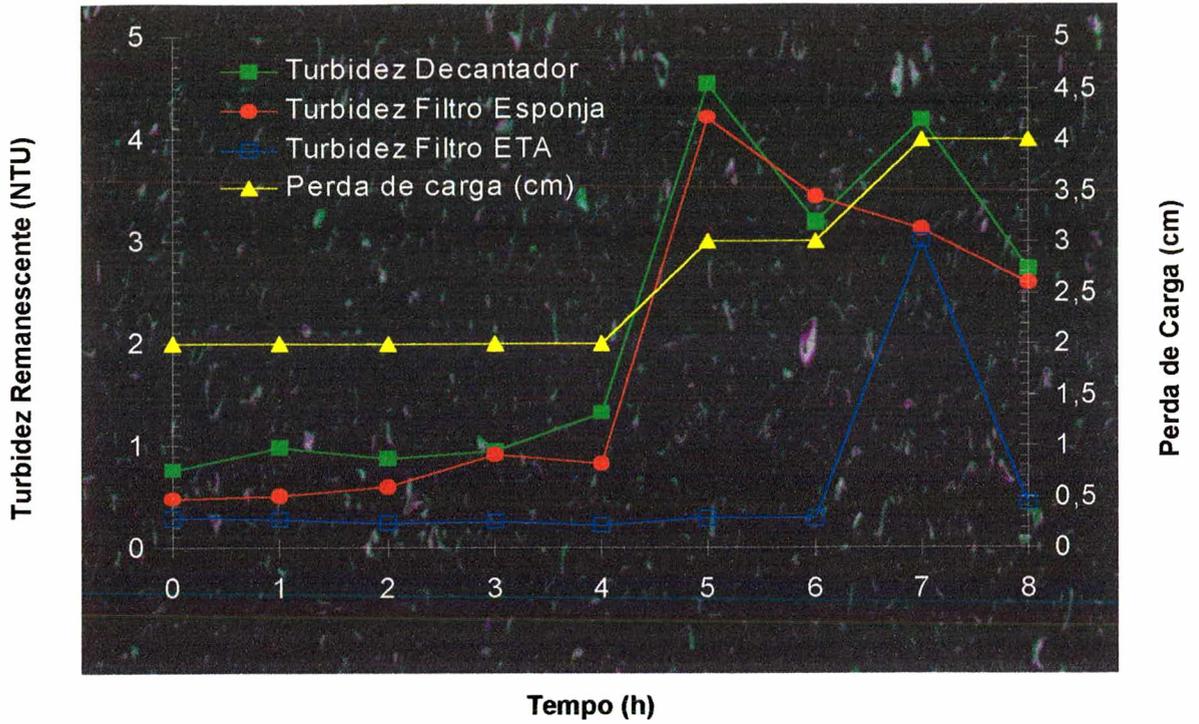


Figura 51 - Turbidez Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 27)
 (Esponja preta: Compressão de 80% e Taxa de Filtração de 210,2 m³/m²dia)

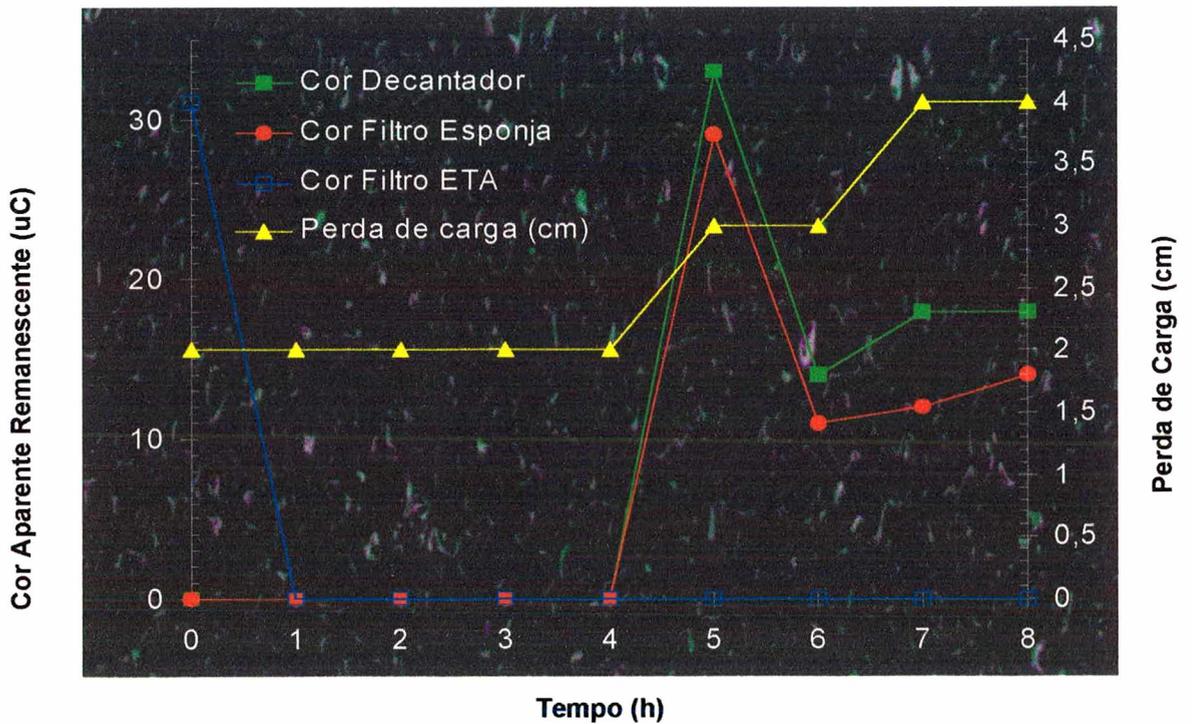


Figura 52 - Cor Remanescente e Perda de Carga (ver tabela 27)
 (Esponja preta: Compressão = 80% Taxa de Filtração = 210,2 m³/m²dia)

**Anexo 2 – RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DAS TABELAS INDIVIDUAIS
PARA A ESCOLHA DOS PARÂMETROS TURBIDEZ REMANESCENTE (NTU)
EM FUNÇÃO DA CARREIRA DE FILTRAÇÃO (H)**

Tabela 28 - Dados extraídos das tabelas 4, 17 e 24 com base nas taxas de filtrações aproximadas com as três esponjas para a compressão de 80%

C = 80% Turbidez remanescente (NTU)

Tempo (h)	Esponja Cinza	Esponja Rosa	Esponja Preta
0	0,36	0,95	0,7
1	0,19	1,33	0,83
2	0,18	1,04	0,99
3	0,25	0,75	1,02
4	0,26	0,59	0,78
5	0,19	0,58	18,3
6	0,37	0,68	14,1
7	0,55	0,65	4,3
8	0,64	2,38	18,1

Tabela 29 - Dados extraídos das tabelas 5, 19 e 26 com base nas taxas de filtrações aproximadas com as três esponjas para a compressão de 70%

C = 70% Turbidez remanescente (NTU)

Tempo (h)	Esponja Cinza	Esponja Rosa	Esponja Preta
0	0,36	0,22	0,57
1	0,29	0,22	0,58
2	0,25	0,24	0,57
3	0,29	0,23	0,52
4	0,25	0,37	0,57
5	0,25	0,58	0,58
6	0,22	0,68	1,85
7	0,32	0,65	2,1
8	0,49	2,38	9,93

Tabela 30 - Dados extraídos das tabelas 2, 15 e 22 com base nas taxas de filtrações aproximadas com as três esponjas para a compressão de 50%

C = 50% Turbidez remanescente (NTU)

Tempo (h)	Esponja cinza	Esponja rosa	Esponja preta
0	0,26	0,22	0,66
1	0,61	0,23	0,65
2	0,62	0,2	0,69
3	0,2	0,2	0,7
4	0,18	0,2	0,73
5	0,19	0,5	0,88
6	0,21	0,6	1,79
7	0,43	0,8	2,69
8	0,73	0,9	2,75

**Anexo 3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS EM FUNÇÃO DOS CRITÉRIOS UTILIZADOS
PARA AVALIAR A EFICIÊNCIA DA FILTRAÇÃO: COR APARENTE MENOR OU
IGUAL A 5 UC TURBIDEZ IGUAL OU MENOR QUE 1 NTU**

Tabela 31 - Esponja cinza			
C = 80%	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Cor aparente da água Decantada (uC)	0,29	20,88	9
Turbidez da água Decantada(NTU)	1,02	9,26	1,17
Taxa de Filtração (m ³ /m ² .d)	158	238	264
Duração da carreira (h)	7	8	8
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	1,71	3,38	3,25
Turbidezda água filtrada na esponja (NTU)	0,8	0,29	0,35
Volume Produzido (L)	521	897	995

Tabela 32 - Esponja cinza			
C = 70%	Corrida 1	Corrida 2	MÉDIA
Cor aparente da água Decantada (uC)	3,86	11,22	7,54
Turbidez da água Decantada(NTU)	1,32	1,25	1,29
Taxa de Filtração (m ³ /m ² .d)	238	264	251
Duração da carreira (h)	7	9	8
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	5,29	3,22	4,26
Turbidezda água filtrada na esponja (NTU)	0,34	0,3	0,32
Volume Produzido (L)	785	1119	952

Tabela 33 - Esponja cinza			
C = 50%	Corrida 1		
Cor aparente da água Decantada (uC)	10,11		
Turbidez da água Decantada(NTU)	1,17		
Taxa de Filtração (m ³ /m ² .d)	238		
Duração da carreira (h)	9		
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	4,67		
Turbidezda água filtrada na esponja (NTU)	0,38		
Volume Produzido (L)	1000		

Tabela 34 - Esponja rosa			
C = 80%	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Cor aparente da água Decantada (uC)	4,2	2,6	7,33
Turbidez da água Decantada(NTU)	1,31	0,71	0,84
Taxa de Filtração (m ³ /m ² .d)	111	238	264
Duração da carreira (h)	5	5	6
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	2	0,8	2,83
Turbidezda água filtrada na esponja (NTU)	0,69	0,65	0,37
Volume Produzido (L)	261	560	746

Tabela 35 - Esponja rosa			
C = 70%	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Cor aparente da água Decantada (uC)	15,8	19	13,4
Turbidez da água Decantada(NTU)	1,53	2,5	0,99
Taxa de Filtração (m3/m2.d)	158	111	111
Duração da carreira (h)	5	7	5
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	5	6,71	4,4
Turbidez da água filtrada na esponja (NTU)	0,72	0,43	0,34
Volume Produzido (L)	372	366	261

Tabela 36 - Esponja rosa			
C = 50%	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Cor aparente da água Decantada (uC)	20	35,14	21,25
Turbidez da água Decantada(NTU)	3,73	5,56	2,11
Taxa de Filtração (m3/m2.d)	158	158	111
Duração da carreira (h)	9	7	8
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	10,33	1,71	8,25
Turbidez da água filtrada na esponja (NTU)	0,46	0,26	0,36
Volume Produzido (L)	670	521	418

Tabela 37 - Esponja preta			
C = 80%	Corrida 1	Corrida 2	MÉDIA
Cor aparente da água Decantada (uC)	1	0	0,5
Turbidez da água Decantada(NTU)	1,03	0,97	1
Taxa de Filtração (m3/m2.d)	238	264	251
Duração da carreira (h)	5	5	5
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	0,4	0	0,2
Turbidez da água filtrada na esponja (NTU)	0,86	0,66	0,76
Volume Produzido (L)	560	621	590,5

Tabela 38 - Esponja preta			
C = 70%	Corrida 1		
Cor aparente da água Decantada (uC)	0		
Turbidez da água Decantada(NTU)	0,69		
Taxa de Filtração (m3/m2.d)	264		
Duração da carreira (h)	6		
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	0		
Turbidez da água filtrada na esponja (NTU)	0,55		
Volume Produzido (L)	746		

Tabela 39 - Esponja preta			
C = 50%	Corrida 1	Corrida 2	MÉDIA
Cor aparente da água Decantada (uC)	7,33	1,2	4,27
Turbidez da água Decantada(NTU)	0,86	1	0,93
Taxa de Filtração (m3/m2.d)	238	264	251
Duração da carreira (h)	6	5	5,5
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	3,5	0,3	1,9
Turbidez da água filtrada na esponja (NTU)	0,72	0,4	0,56
Volume Produzido (L)	672	621	646,5

Tabela 40 - Resultados em função das médias para as esponjas cinza, rosa e preta			
	Compressão		
	50%	70%	80%
ESPONJA CINZA			
Cor aparente da água Decantada (uC)	10,11	7,54	10,06
Turbidez da água Decantada(NTU)	1,17	1,29	3,82
Duração da carreira (h)	9	8	7,67
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	4,67	4,26	2,78
Turbidez da água filtrada na esponja (NTU)	0,38	0,32	0,48
Taxa de Filtração (m3/m2.d)	238	251	220
ESPONJA ROSA			
Cor aparente da água Decantada (uC)	19,2	9,34	4,71
Turbidez da água Decantada(NTU)	3,14	1,26	0,95
Duração da carreira (h)	7,25	5,67	5,33
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	5,32	3,4	1,88
Turbidez da água filtrada na esponja (NTU)	0,32	0,42	0,57
Taxa de Filtração (m3/m2.d)	166	191	204
ESPONJA PRETA			
Cor aparente da água Decantada (uC)	4,17	0	0,5
Turbidez da água Decantada(NTU)	0,93	0,69	1
Duração da carreira (h)	5,5	6	5
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	1,9	0	5
Turbidez da água filtrada na esponja (NTU)	0,56	0,55	0,76
Taxa de Filtração (m3/m2.d)	251	264	251

Tabela 41 - Resultados das esponjas que apresentaram melhor eficiência na filtração			
Compressão (%)	70	80	50
Esponjas	Cinza	Rosa	Preta
Cor aparente da água Decantada (uC)	7,54	4,71	4,17
Turbidez da água Decantada(NTU)	1,29	0,95	0,93
Compressão (%)	70	80	50
Duração da carreira (h)	8	5,33	5,5
Cor aparente da água Filtrada na esponja (uC)	4,26	1,88	1,9
Turbidez da água filtrada na esponja (NTU)	0,32	0,57	0,56
Perda de Carga (cm)	53,25	73,5	1
Taxa de Filtração (m3/m2.d)	251	204	251