

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Avaliação do desempenho de mantas sintéticas não tecidas no  
tratamento de água para consumo humano visando utilização em  
comunidades rurais - ensaio em escala piloto**

**Hélder Albino Cumbi**

**Belo Horizonte**

**2013**

**Hélder Albino Cumbi**

**Avaliação do desempenho de mantas sintéticas não tecidas no tratamento de água para consumo humano visando utilização em comunidades rurais - ensaio em escala piloto**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção de título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

**Área de concentração:** Saneamento

**Linha de pesquisa:** Qualidade e tratamento de água para o consumo humano

**Orientador:** Prof. Dr. Valter Lúcio de Pádua

Escola de Engenharia da UFMG

Belo Horizonte

2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos  
Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL  
Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br  
<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

**ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E  
RECURSOS HÍDRICOS**

**ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE HELDER ALBINO CUMBI**  
NÚMERO DE REGISTRO: 473

Às 13:00 horas do dia 11 de dezembro de 2013, reuniu-se na Escola de Engenharia da UFMG a Comissão Examinadora de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, indicada pelo Colegiado do PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, para julgar, em exame final, o trabalho final intitulado:

**"AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MANTAS SINTÉTICAS NÃO TECIDAS NO  
TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO VISANDO UTILIZAÇÃO EM  
COMUNIDADES RURAIS - ENSAIO EM ESCALA PILOTO"**

requisito parcial para a obtenção do Grau de MESTRE em SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, Área de Concentração: SANEAMENTO

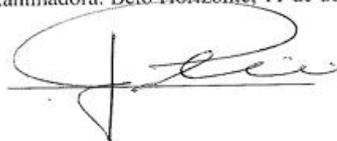
Abrindo a sessão, o Orientador, Prof. Valter Lúcio de Pádua, após dar conhecimento aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores com a respectiva defesa pelo candidato. Logo após, a Comissão se reuniu sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foram atribuídas as seguintes indicações:

BANCA EXAMINADORA	INSTITUIÇÃO	INDICAÇÃO
Prof. Dr. Valter Lúcio de Pádua - Orientador	DESA/UFMG	Aprovado
Profa. Dra. Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira	DESA/UFMG	Aprovado
Prof. Dr. José Euclides Stipp Paterniani	UNICAMP	Aprovado

Pelas indicações, o candidato foi considerado aprovado, devendo proceder a pequenas alterações no trabalho, para a sua edição definitiva, a ser entregue no prazo de 2 meses.

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 11 de dezembro de 2013.

  
Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira



## **DEDICATÓRIA**

Dedico em especial ao meu primo e/ou irmão Armindo Anastácio que em muitos casos desempenhou papel que talvez não lhe coubesse.

Ao meu pai, em memória!

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiro a Deus pela saúde e forças durante todo período deste trabalho;

Ao meu orientador, Prof. Valter Lúcio de Pádua, pela paciência, dedicação, ensinamentos e correções durante todas as etapas desta pesquisa;

À Escola de Engenharia da UFMG, em especial ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) e ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos (DEHRH) pela oportunidade concedida para pertencer a esta excelência de ensino.

Ao CNPq e MCT-Moçambique pela bolsa de estudos concedida;

Ao meu irmão Edson Cumbi e justamente por ser a fonte da minha motivação na minha carreira estudantil;

A minha mãe Ermentina S. Canda pelo carisma, força e vontade de me ver formado e por reverência nos momentos mais difícil que a família passou.

Aos colegas da turma e amigos: Misael, Fernando, Daniel, Karol, Felisberto, Thiago, Delmo, Marcelle, Bruna, Danusa, Valéria, Guilherme, Aline, Júlia pela recepção, companheirismo e ajuda durante o período desta formação.

Aos bolsistas de iniciação científica do DESA: Aline, Igor, Marcos, Mirene, Pâmela e Vanessa, pela ajuda durante os experimentos laboratoriais.

Especial agradecimento para Mabuie, Zavala, Elias, Felícia, Esperança, Neide pela presença em quase todos os momentos da minha formação no Brasil.

Às famílias Cumbi e Cande que direta ou indiretamente contribuem para a minha formação.

A todos vocês, vai o meu muito obrigado!

*“Não há missão mais nobre para  
o homem civilizado do que melhorar  
as condições sanitárias da humanidade”*  
(CONSELHO DE SAÚDE DE BOSTON, 1869)

## RESUMO

Esta pesquisa procura ampliar a potencialidade de emprego das tecnologias não convencionais de tratamento de água para o consumo humano, com vista a responder aos atuais anseios enfrentados nas regiões rurais no que concerne à potabilização da água. Em virtude disto, construiu-se uma ETA piloto para a filtração de água em manta sintética não tecida. A manta utilizada foi escolhida a partir dos resultados observados nos ensaios preliminares que abarcaram oito mantas, onde a manta M8 de 1200 g/m<sup>2</sup> apresentou capacidade de remoção de impurezas expressivamente superior às demais no nível de significância de 5%. A posterior, a manta foi submetida à filtração de água com valores de turbidez de 10, 50 e 100 uT (águas Tipo I, Tipo II e Tipo III, respectivamente) em taxas de 5, 20 e 50 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, para os ensaios de filtração sem coagulação e 20, 50 e 100 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, para os ensaios de filtração de água previamente coagulada. Nos ensaios sem coagulação, apenas a água Tipo I quando combinada a menor taxa de filtração, permitiu a produção de água com maior número de amostras com turbidez inferior que 5,0 uT durante as doze horas de monitoramento. Porém, para a água Tipo III submetida à taxa de 20 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, observou-se uma rápida maturação do meio filtrante que se testifica pelos baixos valores de turbidez efluente e valores significativos de perda de carga registrados em curto tempo de operação. Por outro lado, quando a água bruta foi previamente coagulada, a manta possibilitou resultados de turbidez remanescente menores que 0,5 uT em todas as taxas testadas, atendendo desta forma os limites máximos estabelecidos nos padrões de potabilidade de água no Brasil, que de acordo com a portaria 2914/2011 de MS coloca como valores máximos de turbidez de 0,5 uT e 1,0 uT para a filtração rápida e filtração lenta, respectivamente até o final do quarto ano da data de publicação (12/12/2011). Todavia, as menores durações das carreiras de filtração registradas nos ensaios envolvendo a taxa de 100 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, onde a média foi de quatro horas, figuram como o principal entrave para o uso dessa manta, mas a taxa de 20 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> se mostrou robusta quanto a essa questão, visto que as carreiras de filtração ultrapassaram as 12 horas de monitoramento. A taxa de 50 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> foi mais eficiente para a água coagulada, uma vez que apresentou maior produção efetiva de água em comparação com as demais taxas de filtração para a perda de carga máxima de 80 cm. Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam a potencialidade do emprego da manta no tratamento de água com turbidez elevada, justificando o desenvolvimento de outros trabalhos para aprimoramento desta técnica.

**Palavras chaves:** Mantas sintéticas não-tecidas, filtração, tratamento de água, turbidez

## ABSTRACT

The aim of this research is to increase the alternative potentiality of water treatment for human consumption in rural communities. Thus, was built a pilot plant for water filtration in blanket woven synthetic nonwoven. The blanket used was chosen as from the results obtained in preliminary tests which covered eight blankets. The M8 blanket with 1200 g/m<sup>2</sup> of weight presented higher significant capable of impurities removing than the others at a significance level of 5%. The water with 10, 50 and 100 NTU (Type I, Type II and Type III, respectively) was filtrated using M8 blanket at three different filtration rates of 5; 20 and 50 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, for testing without coagulation and 20, 50 and 100 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> for testing with coagulation and the period of monitoring was twelve hours for each test. The results showed that combined the Type I without coagulation with low filtration rate (5 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>) was obtained production of effluent with many values of turbidity less than 5.0 NTU. However, in Type III water with filtration rate of 20 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, was observed a rapid maturation of the filtration media, this can be justified by the low effluent turbidity and significant head loss recorded in the short time of operation. On the other hand, when the raw water has previously been coagulated, the blanket possible to obtain results remaining turbidity less than 0.5 NTU at all rates tested, thus having the maximum established acceptable for drinking water in Brazil that according to the decree 2914/2011 MS poses as maximum turbidity of 0.5 NTU and 1.0 NTU for rapid filtration and slow sand filtration, respectively by the end of the fourth year from the date of publication (12/12 / 2011). Nevertheless, the main obstacle to use this blanket was the smallest careers filtration, around four hours, which verified in tests involving the filtration rate of 100 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>. The filtration rate of 20 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> had greatest careers filtration which exceeded the twelve hours. It is noteworthy that the rate of 50 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> for value of lost head of 80 cm was more efficient for the filtration of coagulated water, once produced most effective water compared with other filtration rates. This research proved the potential of the use of non-woven synthetic blanket in the treatment of water with high turbidity, but it becomes necessary to develop other research to improve this technique.

**Key words:** Synthetic nonwoven blanket, filtration, water treatment, turbidity

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b> - Mecanismos de filtração.....	11
<b>Figura 3.2</b> – Mecanismos de transporte de uma partícula em filtração.....	12
<b>Figura 3.3</b> – Filtro lento de escoamento descendente.....	16
<b>Figura 3.4</b> - Raspagem de <i>Schmutzdecke</i> ou camada biológica.....	18
<b>Figura 3.5</b> – Tecnologias de tratamento de água por filtração rápida.....	19
<b>Figura 3.6</b> - Manta sintética não tecida utilizada para filtração de água.....	20
<b>Figura 3.7</b> – Limpeza da manta utilizada na filtração lenta por meio de jatos de água.	36
<b>Figura 3.8</b> – Propriedades estruturais da manta que influenciam na filtração.....	27
<b>Figura 3.9</b> - Alteração na duração da carreira de filtros lentos em função da   espessura e da superfície específica das mantas.....	28
<b>Figura 4.1</b> – Arranjo do procedimento experimental para a pesquisa.....	40
<b>Figura 4.2</b> - Desenho esquemático da estação piloto.....	41
<b>Figura 4.3</b> – Estação piloto utilizada nesta pesquisa.....	42
<b>Figura 4.4</b> – Flanges utilizados para a fixação das mantas durante a filtração.....	43
<b>Figura 4.5</b> – Desenho esquemático das juntas usadas na vedação dos flanges para evitar vazamentos.....	44
<b>Figura 4.6</b> – <i>Jartest</i> utilizado para os ensaios de coagulação em bancada.....	49
<b>Figura 5.1</b> – Resultados que relacionam as doses de caulim e turbidez resultante .....	52
<b>Figura 5.2</b> – Relação entre dose de caulim e turbidez da água para a taxa de filtração de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .....	53
<b>Figura 5.3</b> – Percentagem da remoção de turbidez na água Tipo II pelas mantas.....	57
<b>Figura 5.4</b> – Resultados de turbidez remanescente dos ensaios de filtração da água Tipo I em taxa de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ nas mantas M7 e M8.....	59
<b>Figura 5.5</b> – Resultados da percentagem de remoção de turbidez na água Tipo I pelas mantas M7 e M2 com taxa de filtração de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .....	60
<b>Figura 5.6</b> – Filtração da água Tipo I em diferentes taxas de filtração.....	62
<b>Figura 5.7</b> - Resultados de comparação da remoção de turbidez entre as taxas de 5, 20 e $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .....	63
<b>Figura 5.8</b> – Filtração da água Tipo II em diferentes taxas de filtração.....	63
<b>Figura 5.9</b> – Filtração da água Tipo III em diferentes taxas de filtração.....	65
<b>Figura 5.10</b> – Filtração dos três tipos de água na taxa de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .....	66
<b>Figura 5.11</b> – Filtração dos três tipos de água na taxa de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .....	67

<b>Figura 5.12</b> – Filtração dos três tipos de água na taxa de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .....	68
<b>Figura 5.13</b> – Filtração da água Tipo II com $5 \text{ mg/L}$ de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .....	70
<b>Figura 5.14</b> – Filtração da água Tipo III em distintas doses coagulantes e mesma taxa de filtração ( $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ).....	71
<b>Figura 5.15</b> – Filtração da água Tipo III com a dose de $10 \text{ mg/L}$ de sulfato de alumínio.....	72
<b>Figura 5.16</b> – Camada de impurezas formada na superfície da manta durante a filtração da água tipo III em $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .....	73

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> - Metas progressivas para atendimento ao valor máximo permitido de 0,5 uT para filtração rápida e de 1,0 uT para filtração lenta.....	7
<b>Tabela 3.2</b> – Valores máximos permitidos e recomendados na Portaria MS Nº 2914 de 2011.....	7
<b>Tabela 3.3</b> - Características dos filtros lentos e rápidos.....	10
<b>Tabela 3.4</b> – Faixas de pH de alguns coagulantes.....	20
<b>Tabela 3.5</b> - Principais propriedades das mantas sintéticas não tecidas.....	23
<b>Tabela 3.6</b> - Exemplo de algumas fibras naturais utilizadas na produção das mantas .....	29
<b>Tabela 3.7</b> - Exemplo de algumas fibras não naturais utilizadas na produção das mantas .....	29
<b>Tabela 3.8</b> - Condutividade hidráulica e porosidade de meios porosos.....	38
<b>Tabela 3.9</b> - Critério de desenho do filtro de geotêxtil não tecido.....	32
<b>Tabela 3.10</b> - Condutividade hidráulica e porosidade de meios porosos.....	40
<b>Tabela 4.1</b> - Valores de turbidez resultantes da adição de caulim na água.....	45
<b>Tabela 4.2</b> – Doses de caulim para as águas Tipos I, Tipo II e Tipo III.....	45
<b>Tabela 4.3</b> – Instrumentos e métodos analíticos usados no monitoramento dos parâmetros da qualidade da água durante a filtração.....	46
<b>Tabela 4.4</b> – Propriedades das mantas utilizadas nos ensaios de seleção.....	47
<b>Tabela 4.5</b> – Normas utilizadas na especificação das propriedades das mantas segundo os fabricantes.....	47
<b>Tabela 5.1</b> – Valores médios da turbidez resultante da adição de caulim na água.....	51
<b>Tabela 5.2</b> – Resultados de regressão linear para a análise de correlação entre caulim e turbidez da água.....	52
<b>Tabela 5.3</b> – Faixa de variação das características da água bruta utilizada nesta pesquisa.....	54
<b>Tabela 5.4</b> - Comparação múltipla de capacidade de remoção de impurezas das mantas.....	58
<b>Tabela 5.5</b> - Teste Mann-Whitney U para a comparação das percentagens de remoção de turbidez entre a M7 e a M8.....	60
<b>Tabela 5.6</b> Teste Mann-Whitney U para a comparação das perdas de carga entre as mantas M7 e M8.....	60

<b>Tabela 5.7</b> - Resultados de comparação da remoção de turbidez entre as taxas de 5 e 20 $m^3.m^{-2}.d^{-1}$ .....	63
<b>Tabela 5.8</b> – Produção efetiva da água Tipo III submetida à taxa de filtração de 50 $m^3.m^{-2}.d^{-1}$ .....	63
<b>Tabela 5.9</b> – Valores mínimos, medianos e máximos das características da água filtrada.....	75

## **LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNICOS**

ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental

ABINT - Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos

AWWA - American Water Works Association

DESA - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

ETA - Estação de Tratamento de Água

EUA – Estados Unidos de América

MSNT - Manta Sintética Não Tecida

MS – Ministério de Saúde

OMS – Organização Mundial de Saúde

PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

uH – unidade de Hazen

uT – unidade de turbidez

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
2.1	<i>Objetivo geral</i>	3
2.2	<i>Objetivos específicos</i>	3
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>3</b>
3.1	<i>Tratamento de água em regiões rurais</i>	4
3.2	<i>Padrões de potabilidade da água para o consumo humano</i>	5
3.3	<i>Pré-filtração</i>	8
3.4	<i>Filtração</i>	9
3.4.1	<i>Mecanismos intervenientes na filtração</i>	10
3.4.1.1	<i>Mecanismos de transporte</i>	11
3.4.1.2	<i>Mecanismos de aderência</i>	14
3.4.2	<i>Filtração lenta</i>	15
3.4.3	<i>Filtração rápida</i>	19
3.5	<i>Manta Sintética Não Tecida</i>	22
3.5.1	<i>Propriedades hidráulicas</i>	23
3.5.1.1	<i>Porosidade</i>	23
3.5.1.2	<i>Tamanho do poro</i>	24
3.5.1.3	<i>Condutividade hidráulica</i>	24
3.5.1.4	<i>Permeabilidade</i>	25
3.5.1.5	<i>Permissividade</i>	25
3.5.1.6	<i>Superfície específica</i>	26
3.5.2	<i>Matéria-prima das mantas sintéticas não tecidas</i>	28
3.5.3	<i>Classificação e/ou processo de fabricação das mantas sintéticas não tecidas</i>	31
3.5.3.1	<i>Gramatura</i>	31
3.5.3.2	<i>Formação da manta</i>	31
3.5.3.3	<i>Consolidação da manta</i>	32
3.5.3.4	<i>Transformação, acabamento e conversão da manta</i>	33
3.5.4	<i>Aplicações das mantas sintéticas não tecidas</i>	33
3.5.5	<i>Emprego de mantas no tratamento de água</i>	33
3.5.6	<i>Limpeza da manta sintética não tecida</i>	35
3.5.7	<i>3.5.6 Propriedades dos meios fibrosos versus meios granulares</i>	37
3.6	<i>Considerações finais</i>	39
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>40</b>
4.1	<i>Estação piloto</i>	41

4.2	<i>Água de estudo</i> .....	44
4.3	<i>Análises físico-químicas</i> .....	45
4.4	<i>Ensaio para a seleção da manta</i> .....	46
4.5	<i>Ensaio de filtração sem coagulação em escala piloto</i> .....	48
4.6	<i>Ensaio de filtração com coagulação em escala piloto</i> .....	48
4.7	<i>Tratamento de dados</i> .....	49
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>51</b>
5.1	<i>Preparo da água de estudo</i> .....	51
5.2	<i>Características da água de estudo</i> .....	53
5.3	<i>Ensaio para a seleção da manta</i> .....	56
5.4	<i>Comparação da capacidade de remoção de impurezas entre M7 e M8</i> .....	58
5.4.1	<i>Ensaio de filtração para distintas taxas de filtração em mesma água bruta</i> .	61
5.4.2	<i>Ensaio de filtração para água com turbidez diferente e mesma taxa de filtração</i> .....	66
5.5	<i>Ensaio de filtração da água previamente coagulada na M8</i> .....	68
5.6	<i>Evolução das perdas de carga e carreiras de filtração na manta</i> .....	73
5.7	<i>Qualidade da água filtrada pela manta</i> .....	74
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>77</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>80</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água consumida pelo ser humano deve satisfazer aos critérios de qualidade definidos por normas nacionais ou internacionais. A seleção da tecnologia de tratamento a ser adotada deve considerar, dentre outros aspectos, as características socioeconômicas e culturais da comunidade a ser beneficiada e a qualidade da água a ser tratada. Em muitos países em desenvolvimento, não há disponibilidade de recursos financeiros para construir estações de tratamento sofisticadas, exigindo dos pesquisadores que difundam tecnologias econômicas, social e tecnicamente apropriadas, visando convertê-las em projetos realistas e confiáveis.

Geralmente, verificam-se muitos investimentos em novas tecnologias de tratamento de água e cada vez mais eficientes, porém estão voltadas para atender os grandes centros urbanos. Em contrapartida, poucos projetos concretos propõem melhorar a qualidade da água consumida em pequenas comunidades. Atualmente, registra-se uma demanda crescente por tecnologias não convencionais de tratamento de água, com vista a dar resposta aos problemas enfrentados nessas regiões, no que concerne à crescente alteração da qualidade da água bruta (NASCIMENTO *et al.*, 2012). Todavia, é pertinente buscar tecnologias alternativas que assegurem a produção da água potável, porém precisam paralelamente viabilizar a universalização do acesso à água em qualidade e quantidade necessárias para a satisfação dos objetivos preconizados (DI BERNARDO, 2003).

A despeito disto, a filtração lenta mostra-se adequada para regiões com baixa densidade populacional, principalmente nos países em desenvolvimento, onde esta situação está associada ao baixo poder econômico, pois ela apresenta algumas vantagens sobre outras tecnologias, destacando-se: a não utilização de produtos químicos para coagulação, não exige equipamentos sofisticados, não necessita operadores altamente qualificados, é de simples construção, além de ser um dos processos de tratamento de águas de abastecimento que produz menos quantidade de lodo (HUISMAN & WOOD, 1974; PATERNIANI, 1991; NDWC, 2000; FERRAZ & PATERNIANI, 2000; PÁDUA, 2006, NASCIMENTO *et al.*, 2012).

No entanto, as vantagens relatadas acima podem diminuir drasticamente em algumas épocas do ano, por vários fatores que influem no seu desempenho, destacando-se: qualidade da água bruta; projeto inadequado dos filtros lentos (tipo de pré-tratamento e características das unidades, número de filtros, taxa de filtração, carga hidráulica disponível, características do meio filtrante, métodos de controle da taxa de filtração e do nível de água no interior do filtro); operação e manutenção (frequência e os métodos de limpeza, tempo de

amadurecimento e reposição da camada de areia) (DI BERNARDO & BOJORGE, 2000).

Ademais, as menores taxas de filtração e a sua exigência quanto à qualidade de água bruta (baixa turbidez e cor verdadeira), concorrem para maiores áreas exigidas para sua instalação e seleção mais apurada dos mananciais de água bruta comparativamente às outras técnicas de filtração. Esta realidade pode dificultar a sua implantação em diversas regiões onde a filtração lenta se mostra adequada.

Assim, com o propósito de atenuar os efeitos de variações sazonais na água bruta que influenciam o desempenho dos filtros lentos e propiciar condições para se conseguir realizar a limpeza mais rapidamente, pesquisadores como: PATERNIANI, 1991; PÁDUA, 1997; DI BERNARDO & BOJORGE, 2000; PATERNIANI & DA CONCEIÇÃO, 2004; PEREIRA, 2005; GIROUD, 2010; SATO *et al.*, 2011, investigaram o uso de mantas sintéticas não tecidas (MSNT) no topo da camada de areia comprovando a sua eficiência no tratamento de água de diferentes características de qualidade (turbidez, cor, microrganismos patogênicos e algas). Pois, a sua aplicação no topo da areia, concentra o processo de tratamento sobre ela e, terminada a sua carreira de filtração, a manta é facilmente removida e lavada para posterior recolocação no filtro.

Em decorrência disto, o emprego de Manta Sintética Não Tecida (MSNT) no tratamento de água para o consumo humano pode figurar como uma solução para as regiões rurais, pois ela é uma estrutura porosa como os demais meios filtrantes, permitindo a retenção de impurezas de acordo com o tamanho dos poros e as partículas inerentes. Este meio fibroso sintético pode viabilizar o tratamento de água, onde a turbidez figura como principal problema na qualidade da água a ser consumida (FERRAZ e PATERNIANI, 2000). A menor espessura e flexibilidade da manta podem permitir o seu emprego no tratamento da água em comunidades rurais, situações de emergências e ser integrado aos filtros lentos de areia reduzindo a espessura da camada de areia.

Contudo, muitos estudos relacionados ao emprego de MSNT têm se restringido à água bruta com valor de turbidez relativamente baixo ( $\leq 10$  uT). Todavia, nesta pesquisa objetiva-se avaliar o desempenho de mantas como um único meio filtrante no tratamento de água para o consumo humano em comunidades rurais e, concomitantemente visa-se o tratamento de água com valores de turbidez e em taxas de filtração mais elevados, procurando abarcar valores superiores aos relatados na literatura para a filtração lenta. Adicionalmente, estas mantas foram submetidas à filtração direta com prévia coagulação da água. A investigação experimental visou à ampliação do escopo de aplicabilidade das mantas para a potabilização

de água mais compatível com a maioria dos mananciais encontrados nos países tropicais, que são o objeto desta pesquisa.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

- Avaliar o desempenho da manta sintética não tecida no tratamento de água com turbidez visando o emprego em pequenas comunidades por meio de estudo em escala piloto.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Propor procedimento experimental para selecionar manta sintética não tecida utilizada no tratamento de água;
- Avaliar a influência de diferentes taxas de filtração e distintos valores de turbidez da água bruta na qualidade de água produzida pelas mantas sintéticas não tecidas;
- Avaliar a influência da coagulação na duração das carreiras de filtração, na qualidade e na produção efetiva da água filtrada em manta sintética não tecida.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo pretende-se despontar o panorama de tecnologias de tratamento de água não convencionais, com destaque para a filtração lenta e filtração direta que são as tecnologias de maior alcance nos países em desenvolvimento. Em ambas as tecnologias, os filtros são as únicas unidades responsáveis pela retenção do material em suspensão presente na água bruta, o que contribui para o detalhamento dos diversos processos inerentes. Posteriormente, foi apresentada a manta sintética não tecida no que concerne à classificação, tipo de matéria-prima, técnicas de produção. Finalmente, são mencionados fatores que influenciam as propriedades destes materiais fibrosos sintéticos, o seu emprego no tratamento de água, destacando-se suas propriedades hidráulicas e técnicas de limpeza e foram arroladas algumas diferenças entre os meios filtrantes granulares e fibrosos.

### **3.1 Tratamento de água em regiões rurais**

O tratamento de água tem a finalidade de torná-la potável, reduzindo os riscos à saúde humana, adequando-a aos padrões de potabilidade vigentes e em simultâneo deve preservar o meio ambiente. Nesse contexto, destacam-se dois objetivos principais de tratamento de água, sanitário e estético. No que tange ao primeiro, refere-se à remoção de organismos patogênicos e substâncias químicas orgânicas ou inorgânicas nocivas à saúde humana, enquanto o segundo encarrega-se na redução de concentração de substâncias causadoras de turbidez, cor, odor e gosto.

O acesso universal à água potável é um desafio para a comunidade científica a quem a responsabilidade está incumbida no desenvolvimento de tecnologias apropriadas, com vista a tornar prático o abastecimento de água tanto nas regiões urbanizadas quanto nas regiões rurais. O tratamento convencional, as filtrações lenta e direta são as tecnologias mais comumente utilizadas no tratamento de água para consumo humano. No entanto, o tratamento convencional não se tem mostrado adequado para as pequenas comunidades, principalmente nos países em desenvolvimento, devido à fragilidade financeira e muitas vezes associada à falta de técnicos especializados. Assim, cabe aos pesquisadores a investigação e difusão de tecnologias que se adequem a essas condições e respondam os anseios inerentes a área específica (DI BERNARDO *et al.*, 1999; DI BERNARDO, 2003, NASCIMENTO *et al.*, 2012).

O perfil de distribuição por tamanho dos municípios brasileiros, até o ano de 1997 mais de 80% possuíam menos de 20.000 habitantes, o déficit de atendimento era mais de 30% dos brasileiros que não possuíam abastecimento de água potável (MURTHA *et al.*, 1997). Situação similar é encontrada atualmente na maioria dos países africanos em desenvolvimento, com principal destaque para as regiões rurais que ainda apresentam maior concentração populacional. Por isso, a adequabilidade em termos de custos e simplicidade operacional da tecnologia para as pequenas comunidades se tornam instrumentos fundamentais com vista à almejada universalização do atendimento por água potável.

A esse respeito, tem sido consensual no seio dos pesquisadores que a filtração lenta se constitui em uma alternativa de imenso potencial para a aplicabilidade em pequenas comunidades dos países em desenvolvimento. A facilidade operacional, baixos custos de implantação e operação e grande eficiência na remoção de organismos patogênicos são características que concorrem para o seu emprego em detrimento das demais tecnologias. Adiciona-se a ausência de resíduos tóxicos no lodo gerado que sustenta a possibilidade do seu

uso na agricultura e na piscicultura (MURTHA *et al.*, 1997; NASCIMENTO *et al.*, 2012). Ademais, como as principais desvantagens da filtração lenta em relação ao tratamento convencional são a grande demanda de área, limitação das características da água bruta e especialmente a concentração de sólidos, são compensadas pela maior oferta de terra que resulta em baixo preço de aquisição nas localidades, pela existência de mananciais relativamente preservados nestas regiões e pela possibilidade de utilização de processos complementares no sistema de tratamento.

A filtração direta é outra tecnologia que apresenta diversas vantagens em relação ao tratamento convencional. A primeira é menor número de unidades envolvidas, já que o tratamento convencional é constituído por unidades de mistura rápida e coagulação, de floculação, de decantação ou flotação e de filtração, enquanto a filtração direta apresenta apenas as unidades de coagulação, floculação (eventualmente) e filtração. Outra vantagem é o menor consumo de produtos químicos durante o processo de tratamento (DI BERNARDO, 2003).

As vantagens acima relatadas geram grande economia de recursos pela redução na quantidade de produtos químicos, menores custos construtivos e operacionais, e menor geração de lodo, que tornam estas tecnologias viáveis para as comunidades desfavorecidas. Assim, essas tecnologias serão posteriormente detalhadas nos capítulos subsequentes.

### **3.2 Padrões de potabilidade da água para o consumo humano**

Até finais do século XIX a qualidade de água para consumo humano era avaliada apenas pelo aspecto físico. Mais tarde, depois de ocorrência de surtos de doenças de vinculação hídrica e com o avanço do conhecimento científico na área concorreram para a criação de instrumentos legais que balizassem as características da água para se considerar potável. Assim sendo, a qualidade de água para consumo humano passou a ser estabelecida com base em valores máximos permitidos para diversos contaminantes ou indicadores de qualidade de água (LIBÂNIO, 2010).

Os padrões de potabilidade e respectivos conceitos têm mudado com o decorrer do tempo devido aos novos estudos apresentando evidências de existência de substâncias ou microrganismos nocivos à saúde humana. No geral, uma portaria recente amplia e vem aprimorar o escopo da legislação anterior, tornando-se quase sempre mais exigente e restritivo. No Brasil, por exemplo, a portaria 56/1977 foi a primeira a ser publicada e

posteriormente foram publicadas as portarias 36/1990, 1469/2000, 518/2004 e 2914/2011, sendo a última a que está em vigor atualmente.

Os padrões de potabilidade têm sido cada vez mais exigentes, porém, para o estabelecimento de um padrão para determinado contaminante, tanto microbiológico quanto físico-químico. Para tal, as entidades de controle e vigilância, delimitam e responsabilizam-se pela coleta e disseminação sistemática de informações e a análise adequada dos dados (WALDMAN, 1998). Segundo o mesmo autor, nos objetivos de vigilância da saúde podem se destacar:

- Identificar tendência, grupos e fatores de risco para elaborar estratégias de controle de eventos específicos adversos à saúde;
- Descrever o padrão de ocorrência de doenças de relevância em saúde pública;
- Recomendar cientificamente as medidas necessárias para prevenir ou controlar a ocorrência de casos graves específicos em saúde;
- Avaliar o impacto de medidas de intervenção.

Embora se registrem grandes avanços no tratamento de água, há ainda países que os órgãos de controle e vigilância não adotam certos padrões mesmo sendo relevantes por fatores econômicos, falta de métodos analíticos de detecção e déficit de pessoal tecnicamente qualificado.

Por via disso, a maioria dos países em desenvolvimento baseia-se nos padrões de potabilidade estabelecidos pela OMS, por exemplo, o Diploma Ministerial, MS – Moçambique nº. 180/2004 ainda vigente, estabelece como valor máximo permitido de turbidez 5 uT para água destinada ao consumo humano, sem distinção do tipo manancial de proveniência. Contudo, esses países têm enfrentado diversas dificuldades para produzir água que responda satisfatoriamente essa premissa, mas no seio disso aparecem alguns países, como o Brasil, que registram avanços significativos nesse aspecto, com o intuito de garantir a qualidade microbiológica da água associada a este parâmetro.

O Brasil, segundo a portaria 2914/2011 que estabelece valores máximos de 0,5 uT e 1,0 uT para a filtração rápida e filtração lenta, respectivamente até o final do quarto ano da data de publicação (12/12/2011), sendo que a sua aplicação será faseada (**Tabela 3.1**). Adicionalmente, recomenda que, se a média aritmética da concentração de oocistos de *Cryptosporidium* spp for maior ou igual a 3,0 oocistos/L no ponto de captação da água, deve-se obter um efluente em filtração rápida com valor de turbidez menor ou igual a 0,3 uT em

95% das amostras mensais, ou uso de processo de desinfecção que comprovadamente alcance a mesma eficiência de remoção de oocistos de *Cryptosporidium* ssp.

**Tabela 3.1** - Metas progressivas para atendimento ao valor máximo permitido de 0,5 uT para filtração rápida e de 1,0 uT para filtração lenta

<b>Filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta)</b>		
Período após a publicação da Portaria	Turbidez $\leq$ 0,5 uT	Turbidez $\leq$ 1,0 uT
Final do 1º ano	Em no mínimo 25% das amostras mensais coletadas	
Final do 2º ano	Em no mínimo 50% das amostras mensais coletadas	No restante das amostras mensais coletadas
Final do 3º ano	Em no mínimo 75% das amostras mensais coletadas	
Final do 4º ano	Em no mínimo 95% das amostras mensais coletadas	
<b>Filtração Lenta</b>		
Período após a publicação da Portaria	Turbidez $\leq$ 1,0 uT	Turbidez $\leq$ 2,0 uT
Final do 1º ano	Em no mínimo 25% das amostras mensais coletadas	
Final do 2º ano	Em no mínimo 50% das amostras mensais coletadas	No restante das amostras mensais coletadas
Final do 3º ano	Em no mínimo 75% das amostras mensais coletadas	
Final do 4º ano	Em no mínimo 95% das amostras mensais coletadas	

Fonte: Portaria MS Nº 2914 de 2011

Na **Tabela 3.2** podem ser visualizados alguns valores máximos permitidos e recomendados no padrão de potabilidade vigente no Brasil que fazem parte do escopo deste trabalho.

**Tabela 3.2** – Valores máximos permitidos e recomendados na Portaria MS Nº 2914 de 2011

Parâmetro	Valor limite	
Turbidez <sup>1</sup>	Desinfecção (água subterrânea)	1,0 uT em 95% de amostras
	Filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta)	0,5 uT em 95% das amostras
	Filtração lenta	1,0 uT em 95% de amostras
Cor aparente <sup>2</sup>	15 uH	
pH <sup>3</sup>	6,0 - 9,5	

<sup>1</sup> máximo permitido pela Portaria 2914/2011 de MS

<sup>2</sup> máximo permitido pela Portaria 2914/2011 de MS

<sup>3</sup> Faixa de valores recomendada pela Portaria 2914/2011 de MS

O monitoramento constante da qualidade das águas dos corpos hídricos é preponderante e necessário para se lograr a efetividade da produção de água que responda as exigências da portaria vigente pela tecnologia projetada para o efeito. Pois, permite a determinação do índice de qualidade de água (IQA), que é um valor resultante da síntese de vários parâmetros analisados, indicando a qualidade relativa da água em diferentes pontos geográficos ou ao longo do tempo (BOLLMANN & EDWIGES, 2008). O monitoramento de qualidade das águas é também um mecanismo de avaliação, podendo contribuir como base para planejamento de seu manejo ou mesmo do uso das áreas ao seu redor.

De acordo com VON SPERLING (2005), os principais parâmetros para avaliação da qualidade da água de corpos hídricos são:

- Parâmetros físicos: cor, turbidez, sabor e odor, temperatura;
- Parâmetros químicos: pH, alcalinidade, acidez, nitrogênio, fósforo, oxigênio dissolvido e matéria orgânica. Caso se justifique também são monitorados a dureza, ferro e manganês, cloretos, micropoluentes orgânicos e micropoluentes inorgânicos;
- Parâmetros biológicos: organismos indicadores de contaminação fecal.

### **3.3 Pré-filtração**

Os pré-filtros empregados no pré-tratamento surgiram com o intuito de minimizar o aporte de sólidos às unidades de filtração e, geralmente, são empregados na filtração lenta. Esta característica de reduzir a afluência de sólidos tem maior relevância em países tropicais cujo regime de chuvas resulta em alterações acentuadas nas características de água bruta (LIBÂNIO, 2010).

Atualmente, mantendo as características originais, os pré-filtros prestam-se ao pré-tratamento conjunto ou isolado às outras unidades, como integrantes de sistemas de tratamento em múltiplas etapas de águas passíveis de afluir posteriormente às unidades de filtração lenta. Destaca-se o fato de terem passado a constituírem-se apenas de pedregulho e seu emprego depende da qualidade da água bruta (LIBÂNIO, 2010).

Numa pesquisa em escala piloto de PATERNIANI & DA CONCEIÇÃO (2002) testemunharam a redução de turbidez em média 54% pelo pré-filtro em relação à água bruta e 96% pelo filtro lento em relação à água bruta para a taxa de filtração de  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  no filtro lento. Para a taxa de  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , a redução média da turbidez obtida em relação a água bruta foi de 62% no pré-filtro e 93% no filtro lento. Embora a qualidade da água bruta, avaliada pela turbidez, tenha sido ligeiramente inferior no ensaio com a taxa de filtração no filtro lento

de  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , a eficiência de redução deste parâmetro de controle não foi significativamente afetada pela variação da taxa de filtração.

Deve se ter atenção na limpeza do pedregulho usado na pré-filtração, pois pode concorrer para contaminação da água após a sua recolocação. Isto pode ser sustentado pela pesquisa de PEREIRA (2005) sobre filtração lenta precedida de pré-filtração com pedregulho, onde se verificou que durante os primeiros dias de operação de pré-filtro, os efluentes de cor aparente e turbidez foram maiores que os valores da água afluyente, resultando em uma remoção negativa.

### 3.4 **Filtração**

O emprego de filtração no tratamento de água remonta séculos, tendo-se centrado inicialmente nos filtros lentos. Muitas regiões adotaram a tecnologia com sucesso, o que influenciou a Inglaterra a forçar a filtração de água dos rios para o consumo humano por volta de 1952. A relevância deste processo na segurança sanitária testemunhou-se no surto de cólera em 1892 nas cidades alemãs de Hamburgo e Altona, que formam um único conjunto urbano, abastecidas por meio das águas rio Elba. Durante essa epidemia, Altona, que tinha filtros lentos, não registrou casos dessa doença, enquanto que em Hamburgo, sem filtros instalados registraram-se 8.000 óbitos (HUISMAN & WOOD, 1974; RICHTER, 2009; LIBÂNIO, 2010).

A filtração é um dos processos unitários mais importantes no tratamento de água, podendo ser empregado isoladamente como na filtração lenta, ou apenas precedido pela coagulo-floculação na filtração direta. Os filtros são classificados em lentos e rápidos, sendo a taxa de filtração e mecanismo de limpeza os principais balizadores para a sua distinção. Os filtros lentos operam em taxas de filtração menores do que as taxas dos filtros rápidos, são limpos com menor frequência, geralmente pela remoção manual da camada superior do leito onde se acumulam as impurezas e esta operação tem sido morosa, enquanto os filtros rápidos são frequentemente limpos com água a contracorrente e é uma operação rápida (RICHTER, 2009). A **Tabela 3.3** apresenta as principais diferenças entre os filtros lentos e rápidos.

No que concerne ao tratamento da água, a filtração é o processo interveniente na remoção de partículas responsáveis pela turbidez na água, visto que a presença destas diminui a eficácia de desinfecção, cujo propósito é a inativação dos microrganismos patogênicos. Porém, a filtração deixa de ter relevância quando a qualidade da água bruta admite apenas a desinfecção, isto se verifica geralmente na água proveniente de mananciais subterrâneos (RICHTER, 2009; LIBÂNIO, 2010).

**Tabela 3.3** - Características dos filtros lentos e rápidos

Item	Filtros lentos	Filtros rápidos
Taxa de filtração	1-7,5 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	120-480 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>
Profundidade do leito	0,3 m de camada de pedregulho/1,0-1,5 m de areia	0,4 m de pedregulho/0,5-0,7 m de areia
Tamanho efetivo	0,15-0,35 mm	≥ 0,45 mm
Coefficiente de uniformidade	< 3	< 1,5
Distribuição dos grãos	Não estratificado	Estratificado
Duração da carreira de filtração entre limpezas	20-60 dias	1-3 dias
Penetração da matéria em suspensão	Superficial	Profunda
Método de limpeza	Raspagem da camada superficial e lavagem da areia removida	Lavagem a contracorrente com ar e água ou somente água
Quantidade de água usada para lavar o filtro (% da água processada)	0,2-0,6%	1-6%
Pré-tratamento	Geralmente nenhum	Coagulação + Flocculação + Decantação ou Flotação

Fonte: Adaptado de RICHTER (2009)

### 3.4.1 Mecanismos intervenientes na filtração

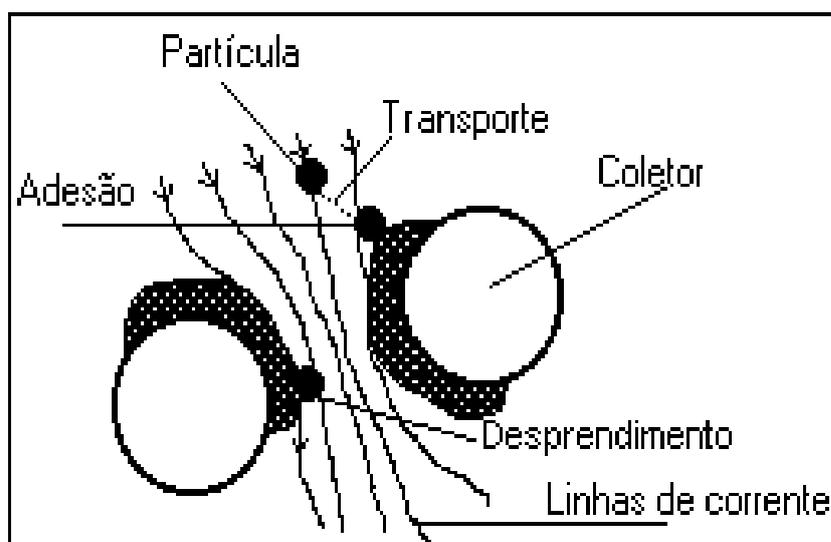
No processo de filtração, partículas consideravelmente pequenas quando comparadas ao tamanho dos poros, são removidas, justificando desta forma a predominância de outros mecanismos na remoção de partículas além da simples ação de coar.

Nos filtros rápidos há conjugação de mecanismos de transporte e de aderência que são ilustrados esquematicamente na **Figura 3.1** e, por outro lado, nos filtros lentos além desses mecanismos a atuação de microrganismos é relevante na melhoria da qualidade de água (LIBÂNIO, 2010).

Os mecanismos de transporte encarregam-se da condução das partículas suspensas no líquido para as proximidades da superfície dos grãos do meio granular (coletores), uma vez próximas, atuam forças de ação superficial aderindo-as à superfície dos coletores ou de partículas previamente coladas, removendo-as da água. Assim, as partículas removidas vão se acumulando na superfície dos coletores, conseqüentemente diminuem o espaço entre os grãos, resultando no aumento das forças de cisalhamento que atuam sobre o material depositado. Quando estas forças atingem valores que superam as forças adesivas, as partículas acumuladas são desprendidas e arrastadas para outras camadas do filtro, onde há repetição do

fenômeno (PÁDUA, 2012).

**Figura 3.1** - Mecanismos de filtração



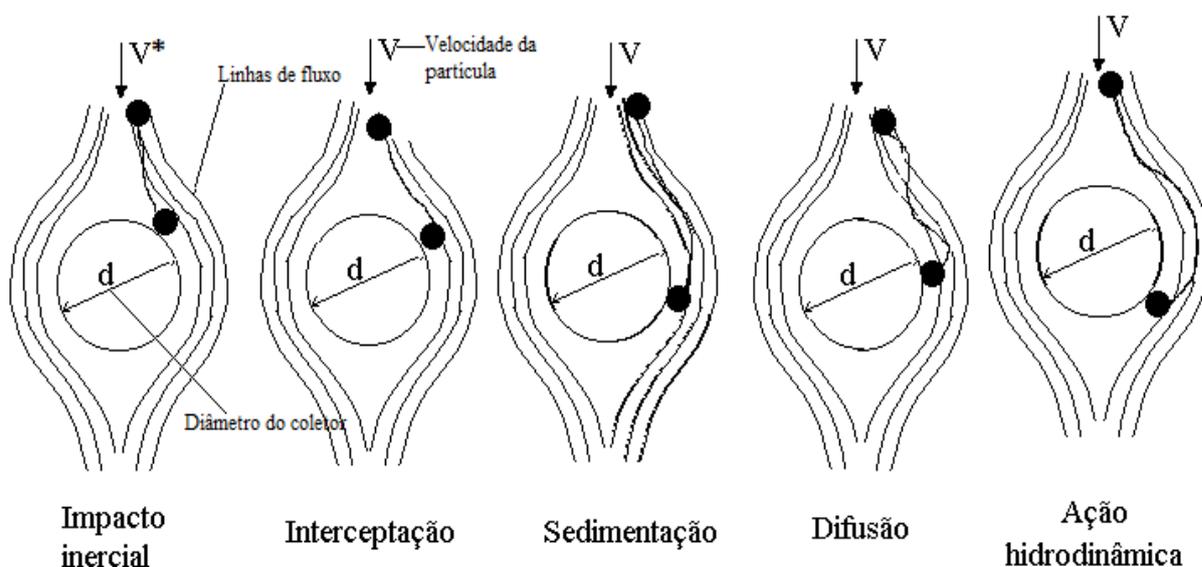
Fonte: Adaptado de AMIRTHARAJAH, 1988

#### 3.4.1.1 Mecanismos de transporte

Geralmente o transporte de partículas é designado como sendo um fenômeno físico, por ser governado principalmente por parâmetros característicos de transferência de massa, tais como: tamanho dos grãos de meio filtrante, taxa de filtração, temperatura da água, densidade e tamanho das partículas suspensas no afluente.

Diversos mecanismos de transporte (**Figura 3.2**) podem atuar sobre as partículas durante a filtração, a saber: impacto inercial, interceptação, sedimentação, difusão e ação hidrodinâmica.

**Figura 3.2 – Mecanismos de transporte de uma partícula em filtração**



Fonte: Adaptado de AMIRTHARJAH (1988)

### *Impacto inercial*

Quando a taxa de filtração é baixa, a partícula viaja seguindo as linhas de fluxo. Porém, quando a taxa de filtração é alta e a partícula é grande, deve-se ter em conta os efeitos de inércia, os quais fazem com que ela possa seguir uma trajetória distinta a das linhas de fluxo, pois adquire quantidade de movimento suficiente para isso. Quanto maiores a velocidade de aproximação,  $V$ , o tamanho e a massa específica das partículas, e menores a viscosidade da água e o tamanho dos grãos, mais eficiente é esse mecanismo de transporte, que é importante para a filtração de ar, mas pouco significativo na filtração de água, quando se consideram as velocidades de aproximação, o tamanho efetivo da areia e o tamanho e a massa específica das partículas geralmente presentes na água a ser filtrada (VALENCIA, 1973; PÁDUA, 1997).

### *Intercepção*

Refere-se à retenção de partículas maiores que os poros formados entre os grãos de areia. Geralmente, isto acontece na superfície do filtro e é independente da taxa de filtração. Os poros entre os grãos esféricos de areia de tamanho uniforme são suficientemente pequenos para impedir a passagem de partículas com um terço do diâmetro dos grãos de areia.

Assim, tendo grãos de  $150 \mu\text{m}$  de diâmetro, os menores poros apresentam pouco mais de  $20 \mu\text{m}$  de diâmetro e são incapazes de interceptar partículas coloidais ( $1 \mu\text{m}$  de diâmetro ou menor) ou microrganismos de comprimentos até  $15 \mu\text{m}$ . Durante o movimento de torção de fluxo através de espaço granular, partículas pequenas contidas na água são postas em contatos entre elas e aglomeram-se sobre o grão de areia (HUISMAN & WOOD, 1974).

### *Sedimentação*

O mecanismo de sedimentação está associado à velocidade de sedimentação das partículas, que as leva a cruzar a linha de corrente e atingir o coletor. Para esse mecanismo, a massa específica da partícula e a temperatura da água desempenham papel importante. O mecanismo de sedimentação pode ser compreendido pela visualização dos vazios intersticiais como pequenas células de sedimentação, ou os caminhos porosos como pequenos tubos de sedimentação. Esse mecanismo é mais importante para partículas maiores que 1  $\mu\text{m}$ .

Como o fluxo no meio filtrante é laminar, de acordo com Stocks, a velocidade de sedimentação neste tipo de escoamento é dada pela **Equação 3.1**.

$$u = \frac{1}{18} \frac{g \Delta \rho}{\vartheta \rho} d_p^2 \quad (3.1)$$

Na qual:

$d_p$  – diâmetro da partícula (m)

$\rho$  – densidade da água ( $\text{g.cm}^{-3}$ )

$\rho + \Delta \rho$  – densidade de partícula suspensa ( $\text{g.cm}^{-3}$ )

$g$  – aceleração de gravidade ( $\text{m.s}^{-2}$ )

$\vartheta$  – viscosidade cinemática do fluido ( $\text{m}^2.\text{s}^{-2}$ )

### *Difusão*

Devido ao movimento browniano, partículas relativamente pequenas apresentam movimento errático quando suspensas em meio líquido. A difusão é um mecanismo de transporte que resulta deste movimento provocado pelo bombardeio das partículas pelas moléculas de água. A intensidade do fenômeno é proporcional ao aumento da energia termodinâmica da água e à diminuição da sua viscosidade, e inversamente proporcional ao tamanho das partículas. O mecanismo da difusão é mais importante para partículas menores que 1  $\mu\text{m}$ .

### *Ação hidrodinâmica*

As forças hidrodinâmicas resultantes da diferença das velocidades tangenciais à superfície da partícula, assegurada pelo escoamento laminar nos filtros, influem na remoção de partículas maiores. O conseqüente gradiente de velocidade produz diferença de pressão na direção perpendicular ao escoamento, impelindo a partícula para a região de velocidades mais baixas, favorecendo a deposição na superfície dos grãos. A remoção de partículas de maiores dimensões, com densidade próxima à da água que minimiza o efeito da sedimentação nos

grãos e cujas dimensões são superiores os da difusão (LIBÂNIO, 2010).

#### 3.4.1.2 Mecanismos de aderência

A retenção de partículas no meio filtrante não está apenas ligada à ação de mecanismos de transporte. Diversas pesquisas confirmam o aumento da eficiência na remoção de turbidez para a água filtrada depois de coagulação com sais de ferro ou alumínio e a consequente desestabilização das partículas equiparada à mesma água sem coagulação, elucidando a relevância dos mecanismos de aderência.

A ação destes mecanismos promove a retenção das partículas suspensas afluentes às unidades filtrantes na superfície dos grãos ou a agregação às partículas anteriormente retidas. As principais forças que seguram partículas em contato com as superfícies dos grãos são: atração eletrostática, Van der Waals e pontes químicas (HUISMAN & WOOD, 1974; LIBÂNIO, 2010).

##### *Atração eletrostática*

Refere-se à atração entre cargas elétricas opostas. Como a força de Van der Waals, a atração eletrostática será complementar aos mecanismos de transporte quando esses tiverem trazido uma partícula para as proximidades dos grãos com carga elétrica oposta à das partículas. Certamente que um grão de areia com mesma carga da partícula a repelirá.

A natureza da estrutura cristalina da areia limpa de quartzo tem uma carga negativa e por isso é capaz de atrair partículas coloidais carregadas positivamente (cristais de carbonatos, flocos de ferro e hidróxidos de alumínio) bem como cátions de ferro, magnésio, alumínio e outros metais.

As partículas coloidais de origem orgânica, incluindo bactérias, comumente têm carga negativa e são consequentemente repelidas, sendo esta uma das razões que concorre para a não remoção de algumas impurezas quando o filtro com areia limpa é posto em operação pela primeira vez. Contudo, no início do processo de filtração, partículas carregadas positivamente serão acumuladas em alguns grãos de filtro até que ocorra a supersaturação com a consequente reversão de carga, tornando positivo o grão de areia.

A adsorção em tais grãos é capaz de remover impurezas carregadas negativamente incluindo material coloidal e ânions tais como nitratos e fosfatos, até uma nova supersaturação atingindo reversão de carga. Uma vez iniciada esta reversão de carga continua durante toda a vida do leito filtrante (HUISMAN & WOOD, 1974).

### *Forças de Van der Waals*

Considera-se muito efetiva em segurar partículas nas superfícies depois de acontecer o contato, desde que a distância entre os centros de massa seja pequena, mas tem menor efeito para o caso de partículas da água.

### *Pontes químicas*

A desestabilização dos coloides é efetuada pelos produtos da hidrólise que se polimerizam em determinado valor de pH. As cadeias poliméricas aderidas às partículas deixam seus segmentos prolongados na água, que podem ser adsorvidos por outras partículas ou espaços vazios nos grãos do filtro. Este fenômeno é independente de cargas eletrostáticas. A utilização de auxiliares de filtração ou polieletrólitos injetados no afluente ao filtro pode ser útil para aumentar a aderência do material em suspensão. As partículas com seus segmentos poliméricos aderidos, ao atravessar o meio filtrante se vinculam com os segmentos soltos adsorvidos pelos grãos ou pelas partículas já aderidas no leito filtrante e culminam por ficar retidas (VALENCIA, 1973; LIBÂNIO, 2010).

Com relação às características das partículas retidas nos filtros é pertinente ressaltar que a densidade dos flocos formados com sais de ferro ou alumínio aumenta com o emprego de polímeros como auxiliares de coagulação, podendo atingir o valor de 1,05. Em regra, os flocos formados quando da coagulação por sais de ferro, apresentam maior resistência ao cisalhamento em comparação aos do sal de alumínio, minimizando a perspectiva de transpasse. Por outro lado, os óxidos de ferro e carbonatos formados pelos processos de precipitação, aeração ou cloração para os primeiros e abrandamento para os segundos, oferecem flocos de densidade significativamente superior aos demais, concorrendo para reduzir a sua afluência às unidades filtrantes nas estações convencionais pela maior retenção nos decantadores (LIBÂNIO, 2010).

### **3.4.2 Filtração lenta**

A filtração lenta conhecida também como filtração biológica é um processo de tratamento de água que vem sendo usado desde muito tempo e tem provado ser eficaz em diferentes circunstâncias. A filtração biológica é governada pelos processos meramente biológicos, sendo que estes envolvem várias formas de vida animal e vegetal que desempenham um papel preponderante no tratamento de água.

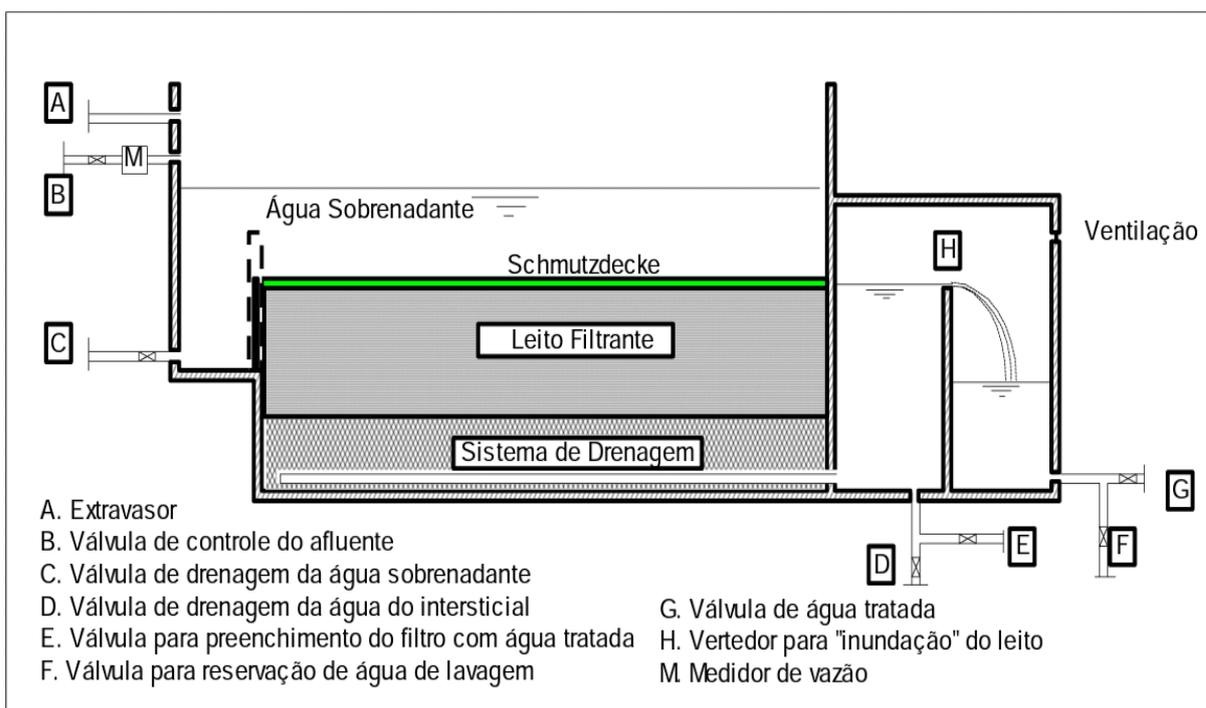
Na filtração lenta não há necessidade de utilizar coagulante químico, o que aliado à menor

frequência de limpeza dos filtros, torna a operação simples e de fácil emprego mesmo em regiões rurais. Porém, devido às menores taxas de filtração, a sua implantação requer áreas significativamente maiores quando equiparada às outras técnicas que também usam filtração em areia, o que pode dificultar a sua instalação em centros urbanos adensados.

No entanto, verifica-se que a maior carência de água potável, geralmente é registrada em regiões que apresentam menor densidade populacional, isto é, comunidades rurais. Neste contexto, a filtração lenta figura como alternativa de tratamento de água a ser empregada nas regiões rurais de Brasil, Moçambique e muitos países em desenvolvimento, quando a qualidade de água bruta apresentar condições favoráveis para o efeito.

No tratamento de água por filtração lenta registra-se um acúmulo de partículas de origem orgânica, bactérias e outros microrganismos que são carreadas e depositadas na superfície do filtro ou nos grãos na parte superior do leito. Este processo forma uma camada chamada *Schmutzdecke* (Figura 3.3). A maior eficiência registrada na filtração lenta tem sido atribuída a esta camada (VALENCIA, 1973).

**Figura 3.3** – Filtro lento convencional de escoamento descendente



Fonte: Adaptado de PYPER & LOGSDON (1991)

Os depósitos destas partículas resultantes deste processo, rapidamente tornam-se o terreno fértil de bactérias e outros microrganismos que produzem um material viscoso conhecido como *Zoogleia*, que consiste em bactérias ativas, seus resíduos, células mortas e matéria orgânica parcialmente assimilada. A *zoogleia* forma uma película gelatinosa nas superfícies

do *schmutzdecke* e grãos de areia que permitem que as partículas provenientes da água bruta fiquem nela retida quando elas são colocadas em contato por um dos mecanismos de aderência. As partículas que consistem em matéria orgânica são assimiladas e tornam-se parte do filme da zoogleia com o tempo, enquanto que a matéria inerte é mantida até ser eventualmente removida por operações de limpeza do leito de areia (HUISMAN & WOOD, 1974).

Dentro da camada de *schmutzdecke* e zoogleia, bactérias oriundas inicialmente da água bruta multiplicam-se seletivamente e usam a matéria orgânica como alimento. A bactéria oxida parte desse alimento como fonte de energia necessária para o seu metabolismo (desassimilação), e converte parte dela em material celular para o seu crescimento (assimilação). Assim, as substâncias orgânicas mortas são convertidas em matéria viva e os produtos de desassimilação são carreados pela água para serem posteriormente usados novamente pelos outros organismos ao longo da profundidade do meio filtrante. A população bacteriana é limitada pela quantidade de matéria orgânica fornecida pela água bruta afluyente e o crescimento (assimilação) é acompanhado pelas mortes equivalentes (HUISMAN & WOOD, 1974).

Esta atividade bacteriológica é muito pronunciada na parte superior do leito do filtro e diminui gradualmente com a profundidade na medida em que o alimento vai se tornando escasso. Quando a limpeza do filtro é feita pela raspagem da camada superior, as bactérias nessa camada são também removidas, havendo necessidade de outro período de amadurecimento para dar lugar à nova população requerida para o efeito.

A atividade biológica anteriormente descrita torna-se mais elevada quando a água bruta permite a penetração da radiação solar que induz também a um acentuado crescimento de algas que podem ser prejudiciais, pois concorrem para a obstrução do leito filtrante (VALENCIA, 1973). Em alguns casos, há necessidade de cobrir os filtros lentos para protegê-los da insolação direta, embora possa acarretar mais custos. Esta medida pode ser necessária para países tropicais dos quais a pesquisa faz alusão, onde há maior perspectiva de floração de algas.

Para satisfazer a demanda do oxigênio bioquímico da matéria orgânica, deve-se permitir um tempo de contato suficiente entre a água e o leito filtrante pela redução da taxa de filtração para permitir a disponibilidade de oxigênio necessário, pois se esta reduzir até o valor zero durante a filtração, ocorrerá decomposição anaeróbica com conseqüente produção de sulfeto de hidrogênio, amônia, gostos e odores que concomitantemente com o ferro dissolvido e

manganês geram outras substâncias que tornam a água tratada inviável para lavar a roupa e outros usos; e a temperatura da água não deve reduzir até valores muito significativamente baixos uma vez que ela contribui para as reações químicas, metabolismo das bactérias e outros microrganismos (HUISMAN & WOOD, 1974).

A camada biológica ou *schmutzdecke* que se forma com o amadurecimento do filtro, contribuindo para a eficiência na retenção de partículas, que é mais reforçada com o passar do tempo, devido aos depósitos na área dos grãos. Esses grãos, gradualmente reduzem a abertura dos poros, o que culmina no aumento da eficiência do filtro com o tempo de uso, porém esta eficiência é acompanhada pela redução da taxa de filtração pré-definida, exigindo a limpeza da camada.

DE BRITO *et al.* (2005) advogam que ainda não existe um consenso sobre um indicador que melhor traduz a maturidade biológica de filtros lentos de areia. Alguns autores optam pelas bactérias heterotróficas totais como medida de maturidade, porém afirmam que o melhor indicador é a qualidade do efluente, quando passa a ser constante a partir de certo momento da carreira, correspondente ao alcance do equilíbrio da comunidade microbiana.

#### *Limpeza de filtros lentos*

A limpeza deste tipo de filtros dá-se pela raspagem e extração de alguns centímetros da superfície do leito filtrante como pode ser vislumbrado na **Figura 3.4**, embora isto concorra para a redução da camada filtrante a cada raspagem. Contudo, após algumas raspagens há necessidade de voltar a colocar a areia no filtro.

**Figura 3.4** - Raspagem de *Schmutzdecke* ou camada biológica



Fonte: DE BRITO *et al.* (2005)

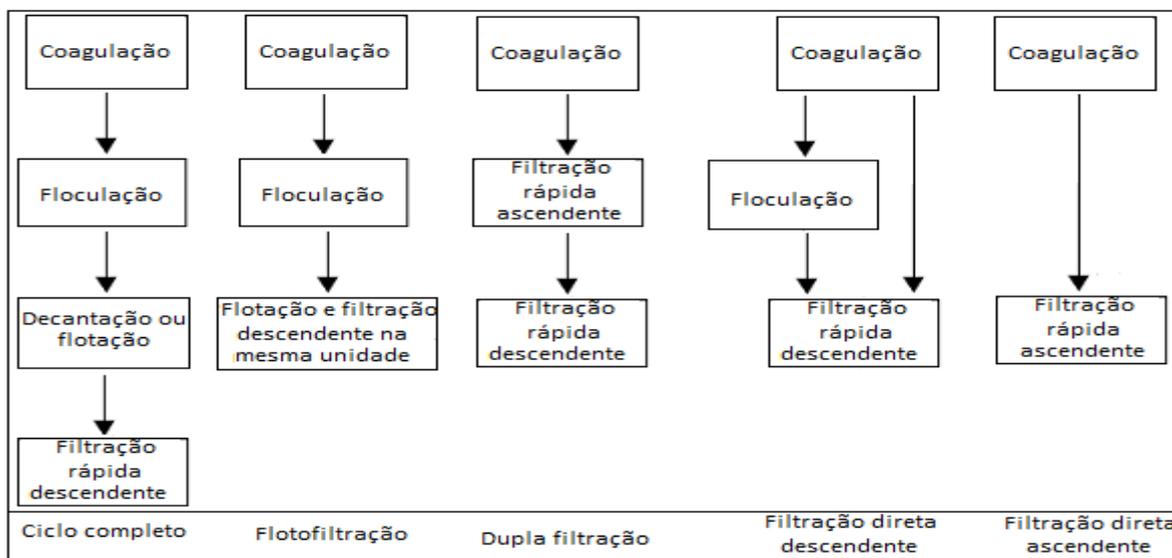
Em filtros de grande porte, usam-se sistemas mecânicos de limpeza que lavam a areia raspada e repõem automaticamente no filtro. Porém, em sistemas menores, os operadores preferem lavar e colocar de novo a areia retirada a cada três raspagens para evitar a reposição de uma quantidade maior de meio filtrante de uma só vez, o que resultaria em maior esforço (VALENCIA, 1973).

A frequência de limpeza depende da qualidade da água bruta, podendo variar em dias ou em meses, mas importa salientar que as limpezas frequentes podem tornar a filtração lenta onerosa e por outro lado, podem não permitir a maturação da camada biológica. No início de operação, quando se verifica uma incipiência na formação da camada biológica, a remoção de partículas na água bruta é governada pelo mecanismo de transporte e, nesta fase, há menor eficiência quanto à remoção microbiológica. Após a maturação do meio filtrante, verifica-se um incremento na eficiência da remoção microbiológica que geralmente supera à dos filtros rápidos. Assim, recomenda-se que a limpeza deste tipo de filtros seja feita quando necessário, isto é, cada vez que a perda de carga excede o nível pré-definido.

### 3.4.3 Filtração rápida

No tratamento de água por filtração rápida usualmente é feita a coagulação da água bruta. A **Figura 3.5** expõe as diversas tecnologias de tratamento de água por filtração rápida. A grande diferença entre a filtração direta e o tratamento de ciclo completo está no fato da última incluir a etapa de decantação ou flotação e de modo geral, a filtração ocorre no sentido descendente. A escolha de uma tecnologia em detrimento da outra está intimamente relacionada à qualidade da água bruta em causa.

**Figura 3.5** - Tecnologias de tratamento de água por filtração rápida



Fonte: Adaptado de DI BERNARDO *et al* (2003)

A coagulação objetiva desestabilizar as partículas, tanto suspensas quanto dissolvidas que se encontram na água bruta para facilitar a etapa de floculação, para que possam ser removidas por sedimentação ou flotação e filtração. A coagulação desempenha um papel muito importante para a produção de água filtrada com qualidade satisfatória, principalmente quando o tratamento é realizado por uma estação de filtração direta (DI BERNARDO *et al.*, 2003).

Contudo, quando a coagulação não é realizada de forma adequada, comprometem-se as eficiências de todas as unidades de tratamento posteriores. A **Tabela 3.4** ilustra, por exemplo, intervalos de pH ideais para cada coagulante com vista a assegurar a eficiência do processo.

**Tabela 3.4** – Faixas de pH de alguns coagulantes

<b>Coagulantes</b>	<b>Faixa de pH</b>
Sulfato de alumínio	5,0 a 8,0
Sulfato ferroso	8,5 a 11,0
Sulfato férrico	5,0 a 11,0
Cloreto férrico	5,0 a 11,0
Sulfato ferroso clorado	acima de 4,0
Aluminato de sódio e sulfato de alumínio	6,0 a 8,5

Fonte: VIANA, 1997

Após a adição do coagulante na água, ele é disperso na massa líquida através da agitação (mistura rápida). Em seguida, a dispersão dá origem às espécies hidrolisadas que reagem quimicamente com as impurezas ou atuam sobre as suas superfícies resultando na redução da força repulsiva que as mantêm estáveis na massa líquida. Este fenômeno conduz a neutralização das partículas presentes na água.

No tratamento de água para consumo humano, são empregados sais de metais inorgânicos normalmente utilizados de forma isolada (coagulantes primários) ou em combinação com polímeros sintéticos (coagulantes auxiliares). Os coagulantes primários utilizados no processo de tratamento de água são à base de alumínio ou de ferro na sua maioria. Quando adicionados à água, ocorre a dissociação das soluções dos sais de Al (III) e Fe (III) para os seus respectivos íons trivalentes, isto é,  $Al^{3+}$  e  $Fe^{3+}$ . Posteriormente, as espécies não adsorvidas pelas impurezas presentes na água, são hidrolisadas e formam vários complexos solúveis possuindo elevadas cargas positivas, o que concorre para a sua adsorção pelas impurezas e por fim os flocos são formados (MATILAINEN *et al.*, 2010).

Água com turbidez elevada, por exemplo, é tratada eficazmente em ETA de ciclo completo, enquanto que a filtração direta tem se mostrado eficiente para água com turbidez moderada ou

baixa.

Na filtração direta a remoção de impurezas na água é feita somente pelo filtro, onde o seu desempenho está intimamente ligado às variáveis hidráulicas inerentes a este processo e à coagulação. Destacam-se como características do meio filtrante, a porosidade e a relação entre a espessura do meio filtrante e o tamanho médio dos grãos. O aumento da espessura e dos grãos do meio filtrante possibilitam carreiras de filtração mais longa.

A filtração direta também depende da qualidade da água bruta, destacando-se a turbidez, cor verdadeira, sólidos em suspensão, densidade e espécie de algas, coliformes. Assim, a natureza e a distribuição do tamanho das partículas mostram-se muito relevantes, pois caso predominem partículas com diâmetro médio de 1 a 3  $\mu\text{m}$ , recomenda-se a floculação após a coagulação, para possibilitar a produção de água com maior qualidade e reduzir os custos operacionais da ETA (DI BERNARDO *et al.*, 2003).

As partículas de tamanho inferior a 1,0  $\mu\text{m}$  são facilmente transportadas por difusão browniana até a superfície dos grãos. Em contrapartida, as partículas maiores que 10  $\mu\text{m}$ , se forem sujeitas a gradientes de velocidade diferentes de zero, são transportadas pela ação hidrodinâmica, fenômeno influenciado pela taxa de filtração e característica do meio filtrante. Ressalta-se que quanto maior for o tamanho das partículas que chegam à superfície do meio filtrante, menor será a perda de carga verificada no filtro, para o mesmo volume de sólidos retidos (DALSASSO & SENS, 2006).

Em geral, promove-se a prévia floculação que favorece a formação de partículas maiores objetivando aumentar a eficiência de filtração e podendo permitir o incremento da granulometria do meio filtrante sem comprometer a eficiência do processo. Contudo, este aumento de granulometria deve ser acompanhado pelo aumento de espessura para garantir a mesma eficiência.

Para consubstanciar as assertivas anteriores, destaca-se a pesquisa de DALSASSO & SENS (2006), que inferiram que com a adoção de um leito filtrante de maior granulometria, coagulação com hidróxido de alumínio e pré-floculação, produziram água filtrada com melhor qualidade no que tange a cor verdadeira, turbidez e alumínio residual e reduziu-se o consumo de água de lavagem de 23,8% para 5,5%, quando comparado ao sistema de filtração outrora em uso. Esta medida surgiu para aperfeiçoar o desempenho de sistema de filtração então em vigor, em virtude da alteração na qualidade de água do manancial em questão, com ocorrência de picos acentuados de *fitoplâncton*, na ordem de  $1,5 \times 10^5$  que foi considerada

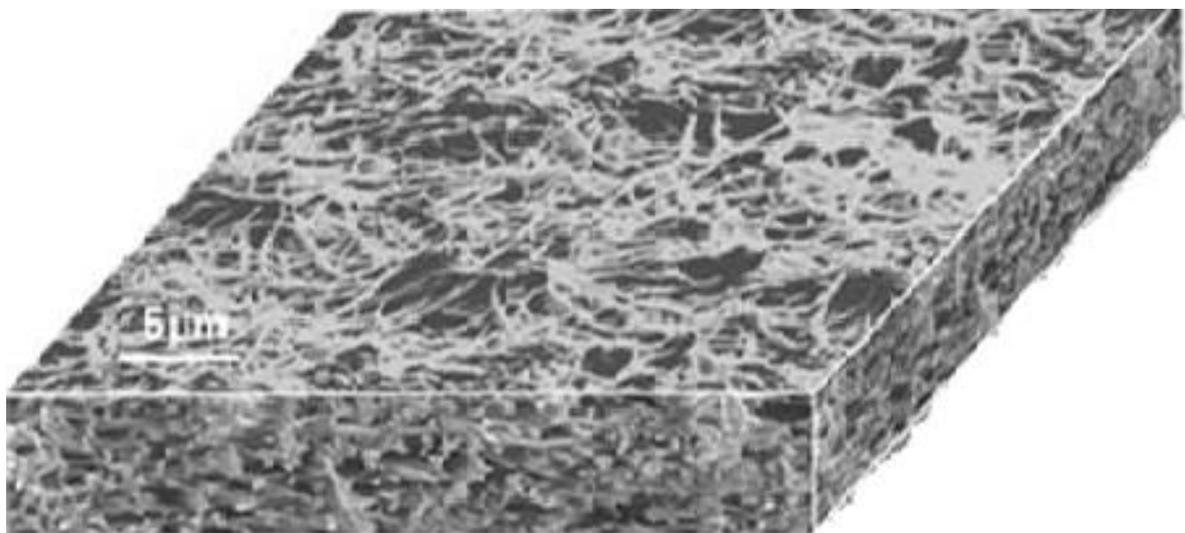
adversa para o emprego da filtração lenta.

### 3.5 Manta Sintética Não Tecida

As mantas sintéticas não tecidas (MSNT) são estruturas compostas por fibras cortadas ou filamentos contínuos distribuídos aleatoriamente e consolidadas por processo mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão) e combinação destes (COSTA *et al.*, 2008). A **Figura 3.6** ilustra uma MSTN com características similares das utilizadas para filtração de água.

As mantas são constituídas por fibras poliéster, poliamida, propileno, polietileno e polivenil, sendo as com predominância de fibras de polipropileno, as que apresentam mais resistência à abrasão, ao calor, à radiação ultravioleta, ao ataque de ácidos, aos alcalinizantes e aos agentes oxidantes. Elas são de fácil mistura com outras fibras no processo de fabricação e são livres de grupos polares - o que facilita a sua limpeza e apresentam no geral menor preço (DI BERNARDO & DANTAS, 2005; PÁDUA *et al.*, 2006). A **Tabela 3.3** apresenta as principais propriedades das MSNT.

**Figura 3.6** - Manta sintética não tecida utilizada para filtração de água



Fonte: SATO *et al.* (2011)

**Tabela 3.3** - Principais propriedades das mantas sintéticas não tecidas

Propriedade	Valor usual
Espessura (mm)	0,4 a 20,0
Porosidade	0,55 a 0,99
Diâmetro médio das fibras ( $\mu\text{m}$ )	25 a 100
Massa específica da manta ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0,02 a 0,04
Superfície específica ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )	1100 a 36000
Condutividade hidráulica (mm/s)	0,25 a 47,0

Fonte: DI BERNARDO & DANTAS (2005)

### 3.5.1 Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas das MSNT influem na capacidade de filtração, permeabilidade e aptidão à embebição. A filtração requer que a MSNT tenha um tamanho de poro suficientemente pequeno para poder reter as partículas e, por outro lado, uma permeabilidade adequada para permitir a passagem da água filtrada.

Estas propriedades de filtração são controladas pelo tamanho dos poros, distribuição do tamanho do poro e porosidade, concorrendo para o desempenho do filtro da MSNT e serão descritas a seguir.

#### 3.5.1.1 Porosidade

De acordo com Happel (1959) *apud* DI BERNARDO & DANTAS (2005), a porosidade de meios fibrosos não pode ser relacionada ao coeficiente de permeabilidade, como se verifica na equação de Darcy, havendo necessidade de ser determinada experimentalmente. Partindo do pressuposto que as fibras do material que constitui a MSNT têm uma secção transversal circular, a porosidade da manta limpa relaciona-se com o diâmetro médio das fibras e com a superfície específica, conforme pode ser vislumbrado na **Equação 3.2**.

$$\varepsilon = 1 - \frac{d_{mf} S_{0m}}{4} \quad (3.2)$$

Na qual:

$\varepsilon$  - porosidade da manta limpa (adimensional)

$d_{mf}$  - diâmetro médio das fibras (m)

$S_{0m}$  - superfície específica da manta ( $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ )

A superfície específica para os meios granulares é dada pela **Equação 3.3**:

$$S_{0mg} = \frac{6(1-\varepsilon_{0mg})}{C_e D_g} \quad (3.3)$$

Na qual:

$S_{0mg}$  – superfície específica do meio granular ( $m^2 \cdot m^{-3}$ )

$\varepsilon_{0mg}$  – porosidade do meio granular limpo

$C_e$  – coeficiente de esfericidade

$D_g$  – tamanho dos grãos (m)

### 3.5.1.2 Tamanho do poro

O tamanho do poro, ou tamanho de abertura de filtração, é a abertura da MSNT equivalente ao maior diâmetro da partícula que consegue passar através do mesmo, e é o índice mais utilizado para definir o potencial de filtração (HUTTEN, 2007).

O tamanho da abertura e permeabilidade aparentes cumprem os critérios convencionais para a seleção de meios filtrantes. Entretanto, essas propriedades não se relacionam diretamente a colmatação aparente de uma MSNT. Os tecidos e não tecidos são multifilamentos, sendo diferentes de tela de malha e as suas estruturas de poros estão aparentemente bem definidas.

Segundo FLUET *et al.* (1985), Calhoun desenvolveu um teste para o tamanho de abertura equivalente para caracterizar a capacidade de retenção de partículas do solo de vários e não tecidos. O teste de peneiramento envolvia partículas de areia arredondadas de um tamanho especificado para determinar a fração de tamanhos de partículas para o qual 5% ou menos, em peso, passavam através do não tecido.

Assumindo que os tecidos e malhas de tela têm capacidade de retenção comparáveis, o tamanho de abertura equivalente (TAE) era um meio racional de correlacionar a estrutura de poros com o tamanho de tela de malha equivalente, sugerindo-se o uso de tamanho de abertura equivalente para indicar a capacidade de retenção de uma MSNT. É importante observar que os valores TAE não definem com precisão os tamanhos de poros de tecido, a estrutura de poros, ou a capacidade de filtração. Portanto, o TAE não indica a eficiência de retenção absoluta da MSNT, isto é, um tecido de monofilamento e um não tecido, ambos com igual TAE (0,210 mm), não terão a mesma estrutura de poro e, conseqüentemente, não irá proporcionar a eficiência de filtração de partículas igual para todos tamanhos (FLUET *et al.*, 1985). Durante décadas, os fabricantes de meios de filtragem têm adotado diversas técnicas semelhantes ao ensaio TAE para medir a eficiência de retenção ou filtração dos seus produtos.

### 3.5.1.3 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica, ou coeficiente de permeabilidade, é definido como a taxa de fluxo de água que atravessa uma área da seção transversal por unidade de gradiente hidráulico a

uma determinada temperatura. A sua unidade de medida é m/dia e segundo a Lei de Darcy chega-se a **Equação 3.4**.

$$Q = K \cdot i \cdot A \quad (3.4)$$

Na qual:

Q - taxa de fluxo através do material

K - condutividade hidráulica (m. s<sup>-1</sup>)

i - gradiente hidráulico (s<sup>-1</sup>)

A - área da secção transversal do material (m<sup>2</sup>)

#### 3.5.1.4 Permeabilidade

A permeabilidade é uma propriedade que permite avaliar a facilidade com a qual o fluído passa através de um meio poroso e, no sistema internacional é dado por m<sup>2</sup> para um fluxo saturado. Permeabilidade intrínseca é a permeabilidade do meio filtrante independentemente das propriedades do fluído. A permeabilidade intrínseca relaciona-se com condutividade hidráulica pela **Equação 3.5**.

$$k = K \cdot \rho \cdot g / \mu \quad (3.5)$$

Na qual:

k - condutividade hidráulica (m.s<sup>-1</sup>)

K - permeabilidade intrínseca (m.s<sup>-1</sup>)

ρ - densidade do líquido (kg.m<sup>-3</sup>)

μ - viscosidade dinâmica do líquido (N.s.m<sup>-2</sup>)

#### 3.5.1.5 Permissividade

Como o plano da MSNT é normal à direção do fluxo de água esperada define-se como permissividade. A permissividade é calculada através da teoria de Darcy para encabeçar um teste do fluxo constante de acordo com a **Equação 3.6**.

$$\Psi = \frac{q}{A \Delta h} = \frac{k}{t} \quad (3.6)$$

Na qual:

Ψ – permissividade (s<sup>-1</sup>)

q – taxa de escoamento (cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)

A – área da secção transversal do tubo (cm<sup>2</sup>)

$\Delta h$  – mudança na cabeça total (cm)

k – coeficiente de permeabilidade (cm. s<sup>-1</sup>)

t – espessura da manta (cm).

### 3.5.1.6 Superfície específica

A superfície específica do meio granular que corresponde a área superficial dos grãos por unidade de volume do meio pode ser determinada pela **Equação 3.7**.

$$S_0 = \frac{6(1-\varepsilon)}{\phi \cdot d_c} \quad (3.7)$$

Na qual:

$\phi$  - índice de esfericidade (adimensional)

$d_c$  - diâmetro do coletor (m)

Para meios com elevada porosidade ( $\varepsilon > 0,7$ ), fato que acontece na totalidade dos meios fibrosos, a **Equação 3.8** não é aplicável, Graham *et al.* (1994) *apud* PÁDUA (1997) relatam que valores teóricos da permeabilidade de meios fibrosos podem ser determinados por meio do modelo de Happel (1959). Esse modelo fornece uma expressão explícita para o cálculo da permeabilidade em função do diâmetro da fibra e da porosidade do meio, supondo-se que as fibras sejam orientadas aleatoriamente em um plano transversal ao escoamento do fluido.

$$F_k = \frac{d_f^2 \left[ -\ln \gamma - \left( \frac{1-\gamma^2}{1+\gamma^2} \right) \right]}{32\gamma} \quad (3.8)$$

Na qual:

$F_k$  - fator de permeabilidade

$\gamma$  - fração em volume das fibras (adimensional)

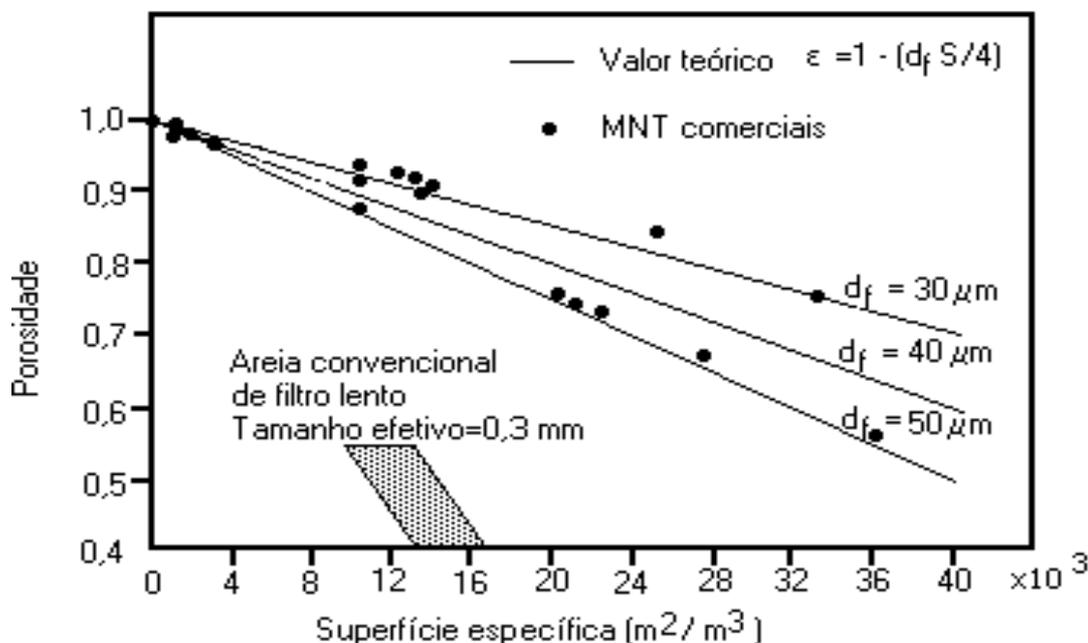
$\varepsilon$  - porosidade do meio fibroso (adimensional)

$d_f$  - diâmetro da fibra (m)

A **Figura 3.8** ilustra a relação entre porosidade e superfície específica de areia convencional utilizada na filtração lenta (tamanho efetivo igual a 0,3 mm) e de mantas não tecidas. Deve-se ressaltar que, embora nessa Figura seja levado em consideração apenas o diâmetro da fibra que compõe a manta, muitos outros fatores podem influir nas propriedades deste material, tais como o tipo de fibra e a técnica de fabricação (PÁDUA, 1997).

GRAHAM *et al.* (1994) advogam que as mantas são meios de filtração mais eficientes que a areia devido às suas propriedades estruturais, tais como maior porosidade e maior superfície específica.

**Figura 3.8** – Propriedades estruturais da manta que influenciam a filtração

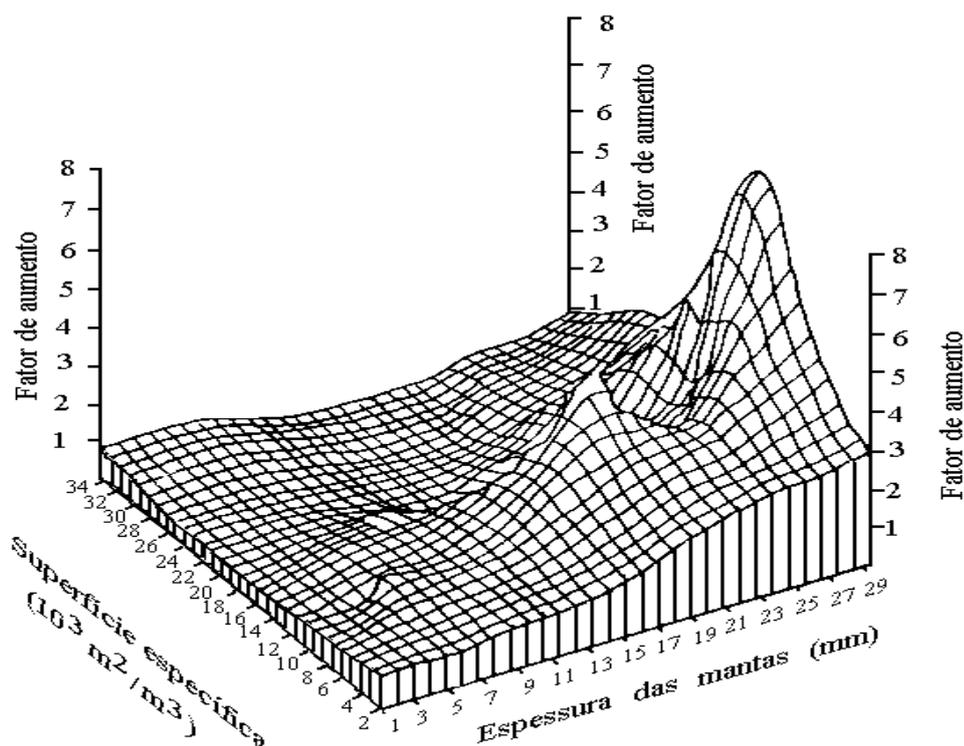


Fonte: Graham *et al.* (1994) apud PÁDUA (1997)

GRAHAM *et al.* (1990) observaram que existe uma relação entre superfície específica e a espessura da manta, diante do propósito de otimizar o desempenho dos filtros lentos. Pela **Figura 3.9**, pode ser verificada que a região ótima de aumento da carreira de filtração corresponde às MSNT com superfície específica que varia de 13.000 a 14.000 m<sup>2</sup>/m.

Em contrapartida, as mantas muito porosas e com baixa superfície específica possibilitam o aumento da duração da carreira de filtração (sendo que o fator de aumento cresce com a espessura da manta). Contudo, a baixa taxa de retenção das impurezas destas mantas, concorre para menor eficiência (DI BERNARDO & DANTAS, 2005).

**Figura 3.9** - Alteração na duração da carreira de filtros lentos em função da espessura e da superfície específica das mantas.



Fonte: Graham *et al.* (1994) *apud* PÀDUA (1997)

### 3.5.2 Matéria-prima das mantas sintéticas não tecidas

Na maioria dos casos, as fibras/filamentos representam a principal matéria-prima na fabricação das mantas sintéticas não tecidas, como já foi referenciado. Sua proporção nos produtos finais varia de 30 a 100%. É sempre indispensável a indicação nominal e a percentual da composição de suas matérias-primas constituintes.

A fibra têxtil é um termo genérico para vários tipos de material, naturais ou não, que formam os elementos básicos para fins têxteis. Ela é um material que se caracteriza por apresentar um comprimento pelo menos 100 vezes superior ao diâmetro ou espessura. Além do comprimento e da espessura ou diâmetro, as demais características concludentes seriam: a resistência à tensão, a absorção, o alongamento e a elasticidade (KUASNE, 2008).

As propriedades das fibras/filamentos somadas às fornecidas pelo processo de fabricação/consolidação/transformação definem as características finais das MSNT e o seu desempenho.

#### *Propriedades das fibras ou filamentos*

As propriedades das fibras ou filamentos representam um dos principais fatores na

determinação das características das MSNT. Podem se destacar algumas propriedades tais como: comprimento, tipo de seção transversal (circular, triangular, oca, trilobal), título (decitex ou denier = massa em gramas por 10.000 m ou 9.000 m de comprimento), matéria-prima, ponto de amolecimento e fusão, afinidade tintorial, frisagem e acabamento.

#### *Classificação das fibras*

As fibras têxteis possuem várias fontes e esse critério é vulgarmente utilizado para sua classificação. As fibras podem ser de origem natural (**Tabela 3.4**) quando extraídas na natureza sob uma forma que as torna aptas para o processamento têxtil, ou de origem não natural quando produzidas por processos industriais conforme a **Tabela 3.5**.

**Tabela 3.6** – Exemplo de algumas fibras naturais utilizadas na produção das mantas

<b>Origem</b>	<b>Tipo</b>	<b>Produto</b>
Animal	Angorá, Cashemira, Coelho, Ovelha, Mohair	Lã e pêlos finos Pêlos grossos
	Cabra Silvestre e cultivada	Seda
	Mineral	Amianto (asbesto)
Vegetal	Caules Folhas Frutos e sementes	Caroá, sisal e tacum Algodão e coco

**Fonte:** Adaptado de KUASNE (2008).

**Tabela 3.7** – Exemplo de algumas fibras não naturais utilizadas na produção das mantas

<b>Origem</b>	<b>Produto</b>
Animal	Caseína
Vegetal	Cupro, liocel, viscose, acetato e triacetato
Polímeros	Acrílica, elastana, elastodieno, modacrílica, poliamida, policarbamida, policloreto de venila, policloreto de vinilideno, policlorofluoretileno, poliéster, poliestireno, politetrafluoretileno, poliuretano, vinal e vinilal
Outras	Fibras de carbono, metálica, vidro, escória e rocha

**Fonte:** Adaptado de KUASNE (2008).

A classificação a seguir foi proposta por PEREIRA (2011):

As fibras naturais são as encontradas na natureza, destacando-se:

- a) Fibras de algodão: são de alta absorção de umidade, originárias de sementes e possuem grande capacidade de tingimento;
- b) Fibras de linho: originam do caule da planta e oferecem toque frio e agradável. É uma fibra muito nobre pelo seu brilho e resistência;
- c) Rami é uma fibra que se origina do caule da planta e possui alta resistência como o linho, alta durabilidade e também oferece frescor;
- d) Juta é fibra do caule da planta que nasce em solos encharcados. Oferece alta resistência e aspecto rústico;
- e) Fibras de lã são fibras obtidas pela tosquia das ovelhas de diversas raças. Oferecem toque suave e quente, muito agradável;
- f) Seda é originada pelas mariposas do bicho da seda. Filamento finíssimo de alta resistência, brilhante e de alta nobreza.

As fibras manufaturados ou químicas ou não naturais são as obtidas por processos industriais de natureza química, estas por sua vez subdividem-se em artificiais e sintéticas:

- a) Artificiais que derivam de polímeros naturais, tais como:

*Viscose de linter* que são fibras derivadas de celulose de fibras de algodão pequenas (linter), de alta absorção de umidade, com toque muito suave e boa afinidade com corantes.

*Viscose de bambu* que são fibras derivadas da celulose do bambu por processo que permite o toque suave e boa absorção de corante.

- b) Fibras sintéticas que são produzidas a partir de polímeros sintéticos, tais como:

*Poliéster*: fibras sintéticas de alta resistência, toque agradável e rápida secagem, que podem oferecer aspecto opaco ou brilhante. A resistência das cores do poliéster também dá grande durabilidade ao material.

*Acrílicas*: fibras sintéticas de alto brilho e toque quente. Possuem alta resistência à luz do sol, o que lhes confere alta durabilidade ao tecido e às suas cores, mesmo em uso externo.

*Poliamida (nylon)*: fibras sintéticas de alto conforto, boa resistência à tração e ao rasgo, e boa elasticidade. Oferecem muitas cores e possuem a melhor absorção de umidade entre as fibras sintéticas.

*Polipropileno*: fibras sintéticas de grande brilho e variedade de cores. Apresentam grande durabilidade e facilidade de secagem.

### 3.5.3 Classificação e/ou processo de fabricação das mantas sintéticas não tecidas

Existem várias tecnologias para se fabricar uma MSNT. De modo geral, a indústria papelreira, a têxtil (fição e acabamento) e a do plástico, influenciaram muito nas tecnologias existentes. Na prática, as MSNT podem ser classificadas pelo processo de fabricação, matérias-primas, características das fibras/filamentos, processo de consolidação, gramatura, processo de transformação e/ou conversão, ou associação desses elementos, que é apresentada a seguir (ABINT, 2013):

#### 3.5.3.1 Gramatura

- Leve: menor que  $25 \text{ g.m}^{-2}$ ;
- Médio: entre 26 e  $70 \text{ g.m}^{-2}$ ;
- Pesado: entre 71 e  $150 \text{ g.m}^{-2}$ ;
- Muito pesado: acima de  $150 \text{ g.m}^{-2}$ .

#### 3.5.3.2 Formação da manta

A manta, estrutura ainda não consolidada, é formada por uma ou mais camadas de véus de fibras ou filamentos obtidos por três processos distintos conhecidos como vias seca, úmida e fundida.

##### *Via seca*

No processo Via Seca pode-se incluir os MSNT produzidos via carda e via aérea/fluxo de ar. Na via carda, as fibras são paralelizadas por cilindros recobertos de “dentes penteadores” que formam mantas anisotrópicas que às vezes podem ser cruzadas em camadas. Enquanto que no processo via aérea/fluxo de ar, as fibras são suspensas em fluxo de ar e depois são coletadas numa tela formando a manta.

##### *Via úmida*

No processo via úmida, as fibras são suspensas em meio aquoso e depois são coletadas através de filtração por um anteparo em forma de manta.

##### *Via fundida*

Neste processo incluem-se as MSNT produzidas via extrusão, que são os de fição contínua (*Spunweb /Spunbonded*) e por via sopro (*Meltblown*). Esses processos trabalham com matéria-prima na forma de polímeros (materiais plásticos).

Na via extrusão, um polímero termoplástico é fundido através de uma “fieira”, resfriado e

estirado, e posteriormente é depositado sobre uma esteira em forma de véu ou manta. Por outro lado, no processo via sopro, um polímero termoplástico é fundido através de uma “feira” com orifícios muito pequenos, e de imediato um fluxo de ar quente solidifica a massa em fibras muito finas, que são sopradas em alta velocidade para uma tela coletora formando a manta.

Apesar dos processos acima citados representarem o grande volume das MSNT, existem outros processos particulares de fabricação/formação da manta.

### 3.5.3.3 Consolidação da manta

Após a formação do véu ou da manta é necessário realizar a consolidação (união das fibras ou filamentos), que em grande parte das MSNT também dão o acabamento necessário para o produto final. Existem três métodos básicos para consolidação ou acabamento das mantas que podem ser também combinados entre si, que são: mecânico (fricção), químico (adesão) e térmico (coesão).

- a) Método mecânico – subdivide-se em hidroentrelaçamento e costura que a seguir são descritos. As fibras ou filamentos são entrelaçados através da penetração alternada de muitas agulhas que possuem saliências / barbelas.

#### *Mecânico – Hidro entrelaçamento*

O entrelaçamento das fibras ou filamentos é feito pela penetração na manta de jatos d’água a altas pressões.

#### *Mecânico – Costura*

Processo de consolidação ou acabamento através da inserção de fios de costura na manta ou processo sem fios, que trabalha com as próprias fibras da MSNT para realizar a costura.

- b) Químico

Os ligantes químicos (resinas) realizam a união das fibras ou filamentos da MSNT, a diversidade de resinas concorre para a existência de vários tipos de processo de resinagem.

- c) Térmico – termo ligado

As ligações das fibras ou filamentos da MSNT são realizadas pela ação de calor, através da fusão das próprias fibras ou filamentos.

#### 3.5.3.4 Transformação, acabamento e conversão da manta

As MSNT já fabricadas são fornecidas em grandes rolos que são chamados internacionalmente de “*Roll Good*”, podendo sofrer processo posterior de transformação ou conversão. Existem vários tipos de transformação, acabamento e/ou conversão para as mantas tais como - corte em menores larguras e peças, confecção, dublagem, impregnação, cobertura, adesivagem, tingimento, estampagem, impressão, chamuscagem, laminação, dentre outras; inclusive alguns processos de consolidação que foram mencionados anteriormente (agulhagem, calandragem, resinação e costura).

#### 3.5.4 **Aplicações das mantas sintéticas não tecidas**

As MSNT são utilizadas em diferentes áreas, tais como: médico-hospitalar, doméstica, filtração, automobilística, de calçados, de confecção, de enchimento, de geotêxtil, de construção civil, de móveis e estofados e de higiene pessoal (PALMEIRA, 2012; ABINT, 2013).

As mantas são usadas como meio filtrante numa grande variedade de aplicações. Nas obras civis, destaca-se o emprego de MSNT na construção de estradas, barragens, canalizações, controle de erosão, proteção ambiental, captação de água subterrânea, impermeabilização, canais de irrigação, isolamento térmica e acústica de tetos e paredes.

A gramatura destes filtros situa-se entre 200 e 600 g/m<sup>2</sup>, sendo a fibra de poliéster a mais utilizada. Na filtração de óleos e líquidos de refrigeração nas indústrias mecânicas são empregados os não tecidos cardados ou aerodinamicamente formados e resinados com gramatura entre 30 e 130 g/m<sup>2</sup>, sendo utilizadas fibras sintéticas em geral, enquanto que a filtração de produtos químicos é feita por não tecidos agulhados de fibra sintética com gramatura variando entre 350 e 600 g/m<sup>2</sup> (PÁDUA, 1999).

#### 3.5.5 **Emprego de mantas no tratamento de água**

Na aplicação da MSNT na filtração, geralmente ela é colocada em contato com o filtro lento em muitos casos, o plano de geotêxtil é normal à direção do fluxo de água. Nesta situação, o fluído contém partículas em suspensão e de tamanho inferior ao do fluxo dado através da MSNT, porém as partículas maiores são retidas e as menores que passam são removidas no filtro lento.

Porém, o emprego singular das MSNT na filtração de água, sendo estas mantas de diferentes porosidades (de maior a menor) espera-se que as partículas pequenas que não forem removidas na superfície duma, possam ser retidas na manta a posterior, e dependendo das

espessuras das mantas pode-se registrar alguma deposição nos poros das mantas em causa.

A MSNT é empregada como elemento de filtração, pois muitos autores advogam que os materiais sintéticos não se diferem dos materiais granulares, uma vez que, tanto os granulares quanto as mantas sintéticas têm poros (vazios) e filamentos ou fibras (partículas) e, em ambos os casos, eles devem atender a duas necessidades básicas:

1ª - Manter uma capacidade drenante eficiente de forma a permitir uma adequada capacidade de fluxo e sem elevar significativamente a carga hidráulica;

2ª - Proporcionar uma retenção das partículas contidas na água que se objetiva remover.

Quando a partícula carregada encontra o filtro, ela tende a se depositar em sua superfície, acarretando uma perda de carga no sistema. Contudo, essa perda de carga é mais frequente na filtração lenta quando a água bruta apresentar turbidez elevada. A areia de menor granulometria confere ao filtro maior capacidade de retenção de partículas suspensas. Porém, concorre para a rápida colmatação do filtro e/ou redução das carreiras de filtração. Assim, a integração de MSNT, atuando como pré-filtro visa aumentar a duração da carreira dos filtros lentos.

PÁDUA (1997) faz alusão ao uso das mantas no tratamento de água quimicamente coagulada, onde nos ensaios com a água estudada, observou-se que o emprego de manta possibilitou reduzir o tempo de floculação e aumentar a velocidade de sedimentação. Todavia, a etapa de floculação exerceu grande influência na eficiência da manta em remover partículas suspensas da água. É de se prever que as mantas possuem menor capacidade de atenuar problemas de sobrecarga na unidade de floculação do que na unidade de decantação.

FERRAZ & PATERNIANI (2000) desenvolveram um estudo experimental onde concluíram que não havia diferença considerável na eficiência da remoção dos parâmetros de qualidade de água monitorados em três unidades de filtração lenta com mantas de diferentes porosidades (**Tabela 3.8**), figurando como alternativa o emprego de MSNT em substituição ao pedregulho na camada suporte, representando uma economia de material, proporcionando uma maior carga hidráulica disponível para filtração e, portanto, maior duração na carreira de filtração.

**Tabela 3.8** - Propriedades e composição de mantas sintéticas não tecidas

Propriedade	Manta 1	Manta 2	Manta 3
Porosidade (%)	93,81	95,81	62,84
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	0,1464	0,1291	0,1328
Superfície Específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	3,645	2,530	26,936
Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	300	380	450
Diâmetro médio das Fibras (µm)	67,950	67,950	55,179
Composição (100%)	Polipropileno	Polipropileno	Poliéster

Fonte: FERRAZ & PATERNIANI (2000)

DI BERNARDO e BOJORGE (2000) no seu estudo sobre a disposição das mantas no topo do filtro lento constataram que elas apresentam melhor desempenho quando comparado a sua colocação no topo do meio granular do pré-filtro, provavelmente influenciado pela camada biológica que se forma nas mantas quando instaladas diretamente no filtro lento. Apesar disso, os autores sugerem outros trabalhos experimentais envolvendo as duas situações em paralelo com vista a aferir a vantagem de uma e de outra.

PEREIRA (2005) inferiu num trabalho experimental que o uso de mantas como pré-filtro no tratamento de água pela filtração lenta, no que tange a redução de turbidez e/ou cor aparente, respondeu positivamente a inviabilidade que a mesma água apresentara sobre o filtro lento sem manta (colmatação em menos de 24 horas), onde a manta em questão alcançou remoção aproximada que 38% e 41% de turbidez e cor aparente, respectivamente.

SATO *et al.* (2011) enfatizaram o aprimoramento de filtros com MSNT para a remoção de bactérias e vírus. Nessa pesquisa eles combinaram a MSNT com uma membrana composta por fibras de celulose ultrafinas (5 – 10 nm de diâmetro) derivada de material seguro, barato e sustentável como polpa de madeira. Eles controlaram o material e os ingredientes no processamento de parâmetros para criar uma estrutura de membrana fibrosa composta com tamanho de poros adequado para a remoção de bactérias e uma carga estática adequada à adsorção de vírus. Essa pesquisa testemunhou que a membrana incrementou a remoção de bactérias (*E. Coli*) e vírus na água tratada, devido ao controle do tamanho do poro na camada e os vírus (carregadas negativamente) foram adsorvidas na camada superficial positivamente carregada.

### 3.5.6 Limpeza da manta sintética não tecida

As mantas podem ser utilizadas até que atinjam uma perda de carga máxima predefinida, e serem posteriormente descartadas; ou serem reutilizadas após passarem por um processo de recuperação da permeabilidade.

Embora as mantas possam ser empregadas para filtrar água relativamente límpida, como em diversos casos que têm sido citados, há situações em que o afluente apresenta elevada concentração de sólidos em suspensão, podendo concorrer para rápidas perdas de carga e, por conseguinte a necessidade de limpeza das mesmas.

Importa referir que existem poucas pesquisas que abordam o uso de técnicas de recuperação da permeabilidade das mantas, porém tantas apenas relatam que a sua limpeza é bem mais simples.

Segundo PÁDUA (1999), a limpeza de MSNT usados na filtração lenta é feita na maioria dos casos por meio de jatos de água conforme evidenciado na **Figura 3.7**. A limpeza manual mostra-se eficaz no caso de filtração em pequena escala principalmente quando a espessura da MSNT é menor. Porém, existem outras técnicas de limpeza que são já empregadas e mostrando-se eficientes, como são os casos dos fluxos reversos com água, lixiviado e nitrogênio gasoso, mas não serão aqui desenvolvidas.

**Figura 3.7** – Limpeza da manta utilizada na filtração lenta por meio de jatos de água



**Fonte:** PATERNIANI (1991)

Contudo, é possível que para uma manta particular, haja uma espessura limite que corresponda ao aumento máximo da duração da carreira de filtração. Entretanto, os pesquisadores recomendam que a espessura das mantas não ultrapasse três cm, a fim de não dificultar a remoção das mesmas para a limpeza (PÁDUA, 1999).

### 3.5.7 3.5.6 Propriedades dos meios fibrosos versus meios granulares

Segundo CHOW *et al.* (1988), meio poroso é uma estrutura de conduto pequeno interligado de várias formas e tamanhos. Para se obter um fluxo uniformemente estável num tubo circular de diâmetro D, permanece válida a **Equação 3.9**.

$$\tau_0 = \gamma R S_f \quad (3.9)$$

Na qual:

$\tau_0$  - tensão de cisalhamento (N.m<sup>-2</sup>)

$S_f$ - declividade (m.m<sup>-1</sup>)

$\gamma$  - peso específico (N.m<sup>-3</sup>)

R - raio hidráulico (m)

Com o raio hidráulico  $R = D/4$  e fluxo laminar de um conduto circular, a tensão de cisalhamento da parede é dada pela **Equação 3.10**.

$$\tau_0 = \frac{8\mu v}{D} \quad (3.10)$$

Na qual:

$\mu$ - viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s)

$v$  – velocidade (m.s<sup>-1</sup>)

Combinando as duas equações, 3.9 e 3.10, obtém-se a **Equação 3.11** de *Hagen-Poiseulle* para escoamento laminar em condutos circulares.

$$v = \left(\frac{\gamma D^2}{32\mu}\right) S_f \quad (3.11)$$

Para fluxo em meios porosos, uma parte da área de seção transversal A é ocupada por partículas carregadas pela água, assim a razão Q/A não é igual à velocidade do fluido real, mas define um fluxo volumétrico chamado fluxo de Darcy. A Lei de Darcy para fluxo num meio poroso é obtido a partir da **Equação 3.12**.

$$\frac{Q}{A} = q = K S_f \quad (3.12)$$

A **Tabela 3.8** apresenta valores de condutividade hidráulica ( $K = \gamma D^2/32\mu$ ) para vários materiais e valores de porosidade  $\eta$ , a razão entre o volume dos vazios e volume total do meio. Assim, tem-se a **Equação 3.13** representando a velocidade média do fluido real no meio.

$$v_a = \frac{q}{\eta} \quad (3.13)$$

**Tabela 3.8** - Condutividade hidráulica e porosidade de meios porosos

Material	Condutividade hidráulica - K (cm/s)	Porosidade $\eta$ (%)
Cascalho	$10^{-1} - 10^2$	25 - 40
Areia	$10^{-5} - 1$	25 - 50
Silte	$10^{-7} - 10^{-3}$	35 - 50
Argila	$10^{-9} - 10^{-5}$	40 - 70

Fonte: FREEZE & CHERRY (1979)

A Lei de Darcy só é válida em fluxo laminar e, em um conduto circular isto se verifica quando o número de Reynolds (**Equação 3.14**) é menor que 2000. Esta condição é satisfeita por quase todos os fluxos que ocorrem naturalmente em meios porosos (CHOW, 1988).

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (3.14)$$

A permeabilidade que é representada pela **Equação 3.15**, como definida na Lei de Darcy, é uma medida da resistência do meio ao escoamento, podendo, para meio granular, ser expressa pela combinação das equações de Carman-Kozeny e de Darcy.

$$K = \frac{g}{k_1 \nu} \frac{\varepsilon^3}{S_0^2} \quad (3.15)$$

Na qual:

K - permeabilidade ( $m \cdot s^{-1}$ )

g - aceleração devida à gravidade ( $m \cdot s^{-2}$ )

$k_1$  - constante de Carman-Kozeny  $\cong 4,5$  (adimensional)

$\nu$  - viscosidade cinemática da água ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

$\varepsilon$  - porosidade (adimensional)

$S_0$  - superfície específica do meio granular ( $m^2 \cdot m^{-3}$ )

Embora os modelos descritivos dos mecanismos da filtração em meio granular e em meio fibroso sejam parecidos, estes dois meios podem apresentar diferenças no que concerne às propriedades tais como: porosidade, permeabilidade, superfície específica, espessura e tamanho dos poros.

A assertiva anterior é corroborada por GIROUD (2010), quando num estudo sobre desenvolvimento de critérios para filtros não tecido e granular concluiu que para o critério de permeabilidade adequada para filtro não tecido é incorreto simplesmente seguir critério de

permeabilidade para filtros granulares. Pois, neste tipo de filtros é necessário compreender cuidadosamente os requisitos relacionados ao fluxo de água através de um filtro. No entanto, é verdade que o critério de permeabilidade dos meios granulares proporcionou um ponto de partida para a derivação de um critério de permeabilidade para filtros não tecidos.

A partir destas constatações pode se inferir que assumindo que as fibras, que são o principal material que compõem a MSNT, tenham uma seção transversal circular, enquanto que os grãos de areia não são necessariamente desta configuração, algumas propriedades hidráulicas dos meios filtrantes não devem ser relacionadas diretamente entre os meios fibrosos e os meios granulares.

### **3.6 Considerações finais**

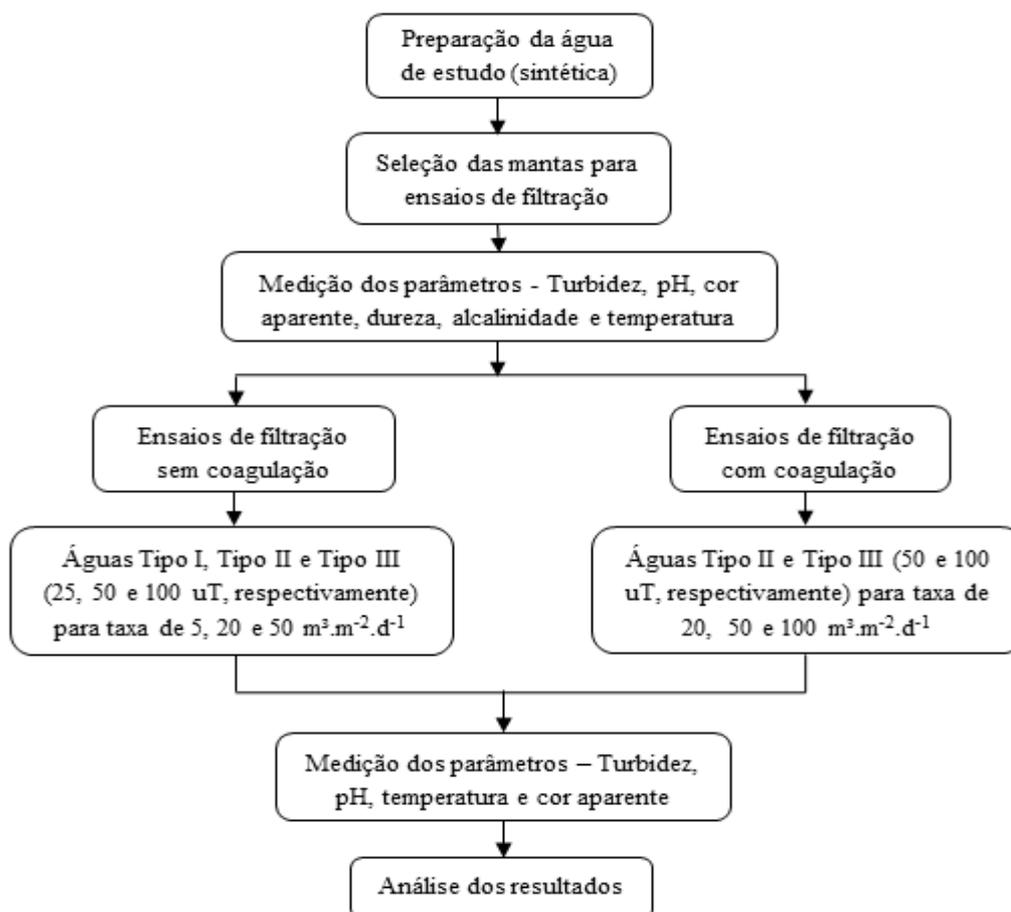
A partir das diversas posições levantadas neste capítulo, pode-se inferir que as tecnologias de tratamento de água não convencionais figuram como alternativas dignas de realce para as comunidades rurais dos países em desenvolvimento. Por outro lado, verificou-se que existe potencialidade do emprego das mantas sintéticas não tecidas no tratamento de água, visto que elas têm contribuído para a melhoria da qualidade da água afluyente nos filtros lentos, quando elas são utilizadas como pré-filtros.

Ao longo do texto, percebe-se que as técnicas de produção e o tipo de fibra utilizado na fabricação da MNST influem em suas propriedades hidráulicas. Portanto, as suas características não estão inteiramente definidas para ser utilizado para fins de potabilização da água em ETA. Assim, o conhecimento das técnicas que possibilitam alterar suas propriedades pode ser útil a trabalhos futuros que visem o desenvolvimento de uma MSNT específica para ser utilizada no tratamento de água para o consumo humano.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O fluxograma da **Figura 4.1** ilustra o arranjo experimental planejado para estes experimentos e, com vista a alcançar os objetivos preconizados para este trabalho, a partir do desenho ilustrado na **Figura 4.2** foi construída uma ETA piloto de escoamento descendente mostrada na **Figura 4.3**. As águas com distintos valores de turbidez (10,0; 50,0 e 100,0 uT) designadas de Tipo I, Tipo II e Tipo III, respectivamente, foram submetidas a filtração descendente na manta em taxas de 5, 20, 50  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  para ensaios sem coagulação. Sendo os menores valores tanto de turbidez quanto de taxa de filtração os recomendados para filtração e os demais foram testados com o intuito de inferir o desempenho da manta no tratamento de água nessas condições. Nos ensaios de filtração com coagulação prévia da água bruta, os experimentos com a água Tipo I e taxa de filtração de 5  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  não foram realizados devido aos resultados satisfatórios encontrados nos ensaios sem coagulação e se incluiu a taxa de filtração de 100  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ .

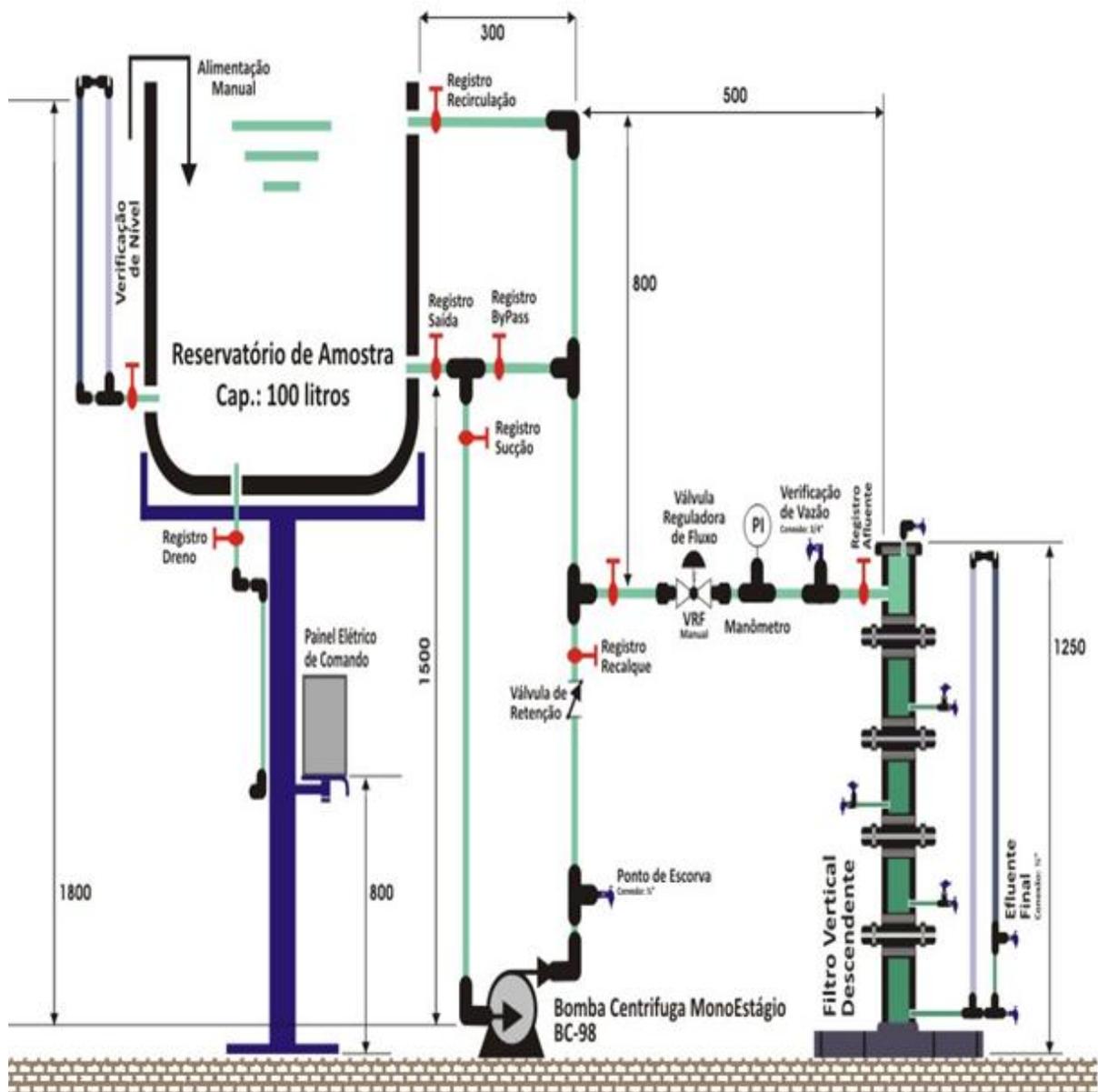
**Figura 4.1** – Arranjo do procedimento experimental para a pesquisa



## 4.1 Estação piloto

Na **Figura 4.2** é mostrado o desenho esquemático que foi utilizado para construção da estação piloto que pode ser vislumbrado na **Figura 4.3**. Na estação visualizam-se o reservatório para a água bruta, a eletrobomba, válvula reguladora do fluxo, piezômetros e flanges que perfazem o filtro.

**Figura 4.2-** Desenho esquemático da estação piloto



**Figura 4.3 - Estação piloto utilizada nesta pesquisa**



Foi utilizado um recipiente de PVC com capacidade para 100 litros, elevado a 1,2 m para fornecer água durante os ensaios de filtração. A alimentação deste recipiente e a agitação durante os ensaios sem coagulação foram feitas manualmente e a posterior utilizou-se a eletrobomba para o preparo da solução e recirculação da água nos ensaios de filtração com coagulação.

A eletrobomba foi utilizada para a sucção, adução e recirculação da água durante a filtração. Ela era centrífuga, mono estágio (rotor fechado em PES), monofásica, de  $\frac{3}{4}$  polegadas de entrada e saída, e com valores máximos de pressão e vazão de 17 m.c.a,  $4,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , respectivamente. A sua integração no processo visava o controle das vazões para a fixação das taxas de filtração pré-definidas para os ensaios e garantir a mistura da água bruta pela recirculação para evitar a sedimentação dos flocos formados. No que concerne às taxas de filtração, a de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  foi a taxa mínima testada por se enquadrar nos valores da filtração

lenta. Porém, foram também testadas taxas de filtração (10, 20, 50 e 100 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>) para se inferir a influência deste parâmetro na qualidade água filtrada e a evolução de carga resultante da retenção de impurezas na manta.

Como a remoção da turbidez pelas mantas no filtro está associada à perda de carga, sendo maior onde há maior acúmulo de impurezas (quando se tem mantas com características iguais) foi instalado um piezômetro para se monitorar a evolução de perda de carga da cada manta. Importa citar que a perda de carga máxima preconizada no filtro para estes ensaios foi de 80,0 cm.

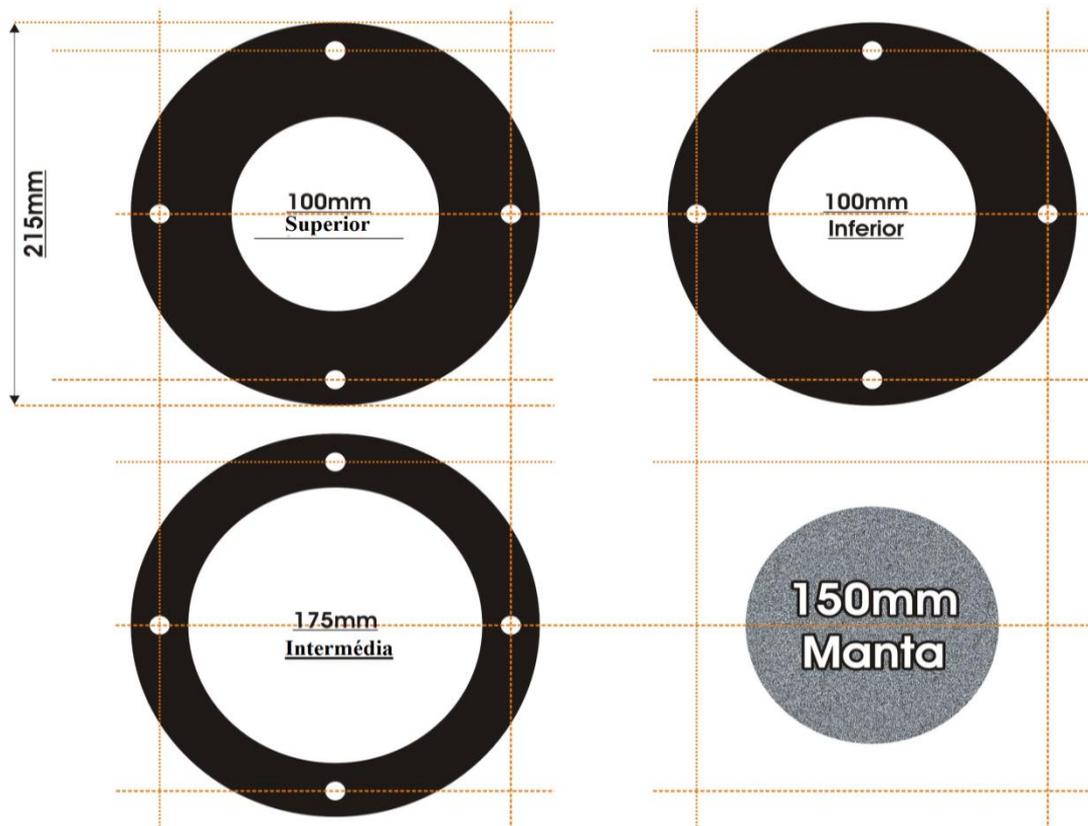
Diante da necessidade de testar mantas de diferentes características com vista a responder o objetivo do trabalho, houve necessidade de incorporar os flanges para permitir as frequentes trocas das mantas de acordo com a demanda dos ensaios. A **Figura 4.4** mostra os flanges incorporados no filtro e onde as mantas são fixadas através dos flanges que permitem a flexibilidade operacional no que concerne à substituição e/ou remoção para a lavagem das mantas.

**Figura 4.4** – Flanges utilizados para a fixação das mantas durante a filtração



A **Figura 4.5** mostra as juntas de borracha utilizadas nos flanges como vedantes para evitar o vazamento. Nesta figura são ilustrados os detalhes de sua colocação em torno da manta, na qual as partes inferior e superior são colocadas às juntas que apresentam um diâmetro interno de 100 mm igual ao da superfície de filtração do sistema. E a junta intermédia com 175 mm de diâmetro interno fazia a cobertura lateral da manta.

**Figura 4.5** – Desenho esquemático das juntas usadas nos flanges para evitar vazamentos



## 4.2 *Água de estudo*

Foi usada água com as características físicas que se adequassem aos objetivos preconizados para o experimento, sendo: águas tipo I, tipo II e tipo III, correspondentes a valores de turbidez de 10, 50 e 100 uT, respectivamente. As águas de estudo foram preparadas por meio da adição de caulim micronizado na água da rede pública (água tratada para abastecimento público, proveniente da concessionária COPASA) coletada nas torneiras do Laboratório das Aulas Práticas do DESA na UFMG.

Foi usado um recipiente de material plástico, com capacidade de 20 litros, transparente e graduado para facilitar as leituras do volume contido no recipiente durante as misturas. Neste contexto, foram medidas com o auxílio de uma balança de precisão, diferentes massas de caulim que posteriormente seriam diluídas com água no recipiente, e posteriormente a suspensão era colocada no reservatório de água bruta, onde acontecia a mistura até se obter o valor corresponde a cada experimento. A homogeneização no recipiente de preparo da água bruta foi feita manualmente com o auxílio de um bastão de vidro durante os ensaios filtração sem coagulação, enquanto que os ensaios com coagulação foi utilizada a eletrobomba para recirculação.

Foram feitos ensaios para a definição das doses de caulim para os três tipos de água. Os ensaios foram feitos em triplicatas para sete concentrações de caulim (21 valores amostrados) conforme a **Tabela 4.1**. A partir destes ensaios de dosagem objetivava-se a equação que foi posteriormente utilizada durante a preparação da água com valores de turbidez inerentes a pesquisa.

**Tabela 4.1** – Valores de turbidez resultantes da adição de caulim na água

Ensaio	Caulim (g/L)						
	0,03	0,05	0,08	0,1	0,12	0,15	0,2
	Turbidez resultante (uT)						
1	17,8	30	47,2	59,5	75,6	93,7	128
2	19,5	28,2	53,6	60	75,5	99,7	125
3	19,4	29,4	49	61,4	76,2	95,9	125
Média	18,9	29,2	49,93	60,3	75,77	96,43	126

Apesar da agitação que era feita manualmente na caixa de água bruta, destaca-se a decantação que acontecia na caixa e ao longo da tubulação por causa da baixa velocidade da água, que influenciou na turbidez que afluía ao filtro quando se tratava da taxa de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . Em virtude disso, houve necessidade de se preparar água com elevada turbidez na caixa maior do que os valores pré-definidos para a pesquisa, com vista a garantir a entrada no filtro da água com valor de turbidez correspondente ao valor preestabelecido. A **Tabela 4.2** apresenta as dosagens usadas para o preparo dos três tipos de águas para a taxa de filtração de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , e este modelo foi adaptado para as outras taxas que apresentam menor taxa de sedimentação das partículas durante o seu percurso.

**Tabela 4.2** – Doses de caulim para as águas Tipo I, Tipo II e Tipo III para a taxa de filtração de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$

Dose de Caulim (g/L)	Turbidez na Caixa (uT)	Turbidez afluente ao filtro (uT)
0,026	$15 \pm 1,0$	$10 \pm 1,0$
0,112	$70 \pm 5,0$	$50 \pm 2,0$
0,50	$260 \pm 10,0$	$100 \pm 5,0$

### 4.3 Análises físico-químicas

Houve monitoramento dos parâmetros de qualidade de água, tanto no afluente (turbidez, pH, alcalinidade, temperatura, cor aparente e dureza) quanto no efluente (turbidez, temperatura e cor aparente), utilizando-se os métodos analíticos indicados na **Tabela 4.3** e a **Figura 4.6** apresenta os instrumentos usados.

Esses parâmetros foram monitorados em intervalos horários e diários durante os experimentos de acordo com a demanda de cada ensaio, mas consideraram-se as fases inicial, intermediária e final da carreira de filtração, com vista a verificar o desempenho do filtro nestas fases que, geralmente, apresentam diferenças significativas na qualidade da água filtrada.

**Tabela 4.3** – Instrumentos e métodos analíticos usados no monitoramento dos parâmetros da qualidade da água durante a filtração

Parâmetro	Instrumento de medição	Método analítico	Frequência
Turbidez	Turbidímetro de bancada HACH 2100P	Nefelométrico - APHA 2130 B*	Horária
pH e temperatura	pH-metro PG1400	Potenciometro - APHA 4500 H+B*	Três horas
Cor aparente	Espectrofotômetro HACH DR/2010	Espectrofotométrico - APHA 2120*	Três horas
Alcalinidade	-	Titulométrico 2320 B*	Diária
Dureza	-	Titulométrico 2340 C*	Diária
Vazão	Pipeta graduada e cronômetro	Volumétrico	Horária
Perda de carga	Piezômetro e régua	-	Horária

\*- Standard methods (AWWA, 2005)

#### 4.4 Ensaio para a seleção da manta

Para selecionar a manta que foi utilizada nos experimentos em escala piloto fez-se um estudo preliminar envolvendo oito mantas (M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7 e M8). As mantas M5 e M6 do mesmo material mas com diferente acabamento do que as demais mantas, não são comumente utilizadas para a filtração de água, mas foram testadas uma vez que elas apresentam espessura aparente menor que 1,0 mm. As restantes são do mesmo material (100% poliéster), mesmo processo de fabricação e são MSNT agulhadas de filamentos contínuos, cumprem os padrões internacionais de qualidade e possuem certificação da ISO 9001.

Na **Tabela 4.4** estão presentes as propriedades dessas mantas que foram utilizadas nos ensaios de seleção e as normas utilizadas para a classificação de cada propriedade estão na **Tabela 4.5**.

**Tabela 4.4** – Propriedades das mantas utilizadas nos ensaios de seleção

Propriedade	Manta							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	300	500	700	800	*	*	900	1200
Espessura média (mm)	3,6	4,2	5,8	6,6	*	*	6,8	8,0
Permissividade (s)	1,5	1,3	1,1	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5
Permeabilidade normal (cm/s)	0,38	0,38	0,37	0,37	0,37	0,36	0,35	0,35
Abertura aparente 095 (mm)	0,17	0,18	0,15	0,15	0,125	0,11	0,10	0,9
Resistência à tração (KN/m)	14	16	21	26	31	42,0	48,00	52
Valor de ruptura (%)	29	29	36	40	*	*	46	50
Diâmetro médio de Fibras (µm)	75	67,95	67,95	55,18	*	*	5,5	50
Alongamento na ruptura (%)	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
Massa específica (g/cm <sup>2</sup> )	0,75	0,71	1,0	1,33	*	*	1,38	1,5

\* valor não fornecido

**Tabela 4.5** – Normas utilizadas para as especificações das propriedades das mantas segundo os fabricantes

Propriedade	Norma
	RT e RT -P
Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	NBR 12568
Espessura média (mm)	NBR 12569
Permissividade (s)	ASTM D 4491
Permeabilidade normal (cm/s)	ABNT NBR 15223
Abertura aparente 095 (mm)	ASTM D 4751
Resistência à tração (KN/m)	ABNT NBR 12824
Valor de ruptura (%)	ABNT NBR 12824
Alongamento na ruptura (%)	ABNT NBR 12824

A seleção da manta dependia do desempenho da manta na remoção de impurezas a partir da determinação dos valores da percentagem de remoção de turbidez na água que representa a capacidade de remoção de partículas da MSNT.

Para a determinação da capacidade de retenção de impurezas das mantas, baseou-se na filtração da água com turbidez conhecida em cada manta fixada no flange. Durante um determinado período de filtração eram coletadas amostras em intervalos de tempos iguais para a medição da turbidez efluente. Este processo era repetido para todas as mantas.

A capacidade de retenção de impurezas foi definida como o valor percentual resultante da expressão  $\left(\frac{\text{turbidez da água removida}}{\text{turbidez da água afluente}} * 100\right)$ . Assim, quanto maior o valor resultante da

expressão, maior a capacidade de retenção de impurezas. O resultado zero (0) indica a não retenção de impurezas, ou seja, o mesmo valor de turbidez do afluente verifica-se no efluente da manta.

Em primeira instância os ensaios para a seleção da MSNT foram realizados usando água bruta com 50 uT de turbidez, visto que este valor se encontra na faixa intermediária dos valores escolhidos para a pesquisa, e a taxa de filtração de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . A manta era colocada em filtração durante o tempo de 70 minutos, as amostras eram coletadas em intervalos de 10 minutos para medição da turbidez e totalizaram 7 amostras para cada manta.

Posteriormente, as mantas, M7 (menor espessura) e M8 (maior espessura), foram submetidas à filtração da água com turbidez afluente de  $10 \pm 1,0 \text{ uT}$  em taxa de filtração de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  e por um período de 12 horas. O objetivo foi de comparar a capacidade de remoção de turbidez em condições similares com algumas da pesquisa, com vista inferir a diferença significativa entre elas, uma vez que na situação anterior não tinha se testado essa situação.

#### **4.5 Ensaios de filtração sem coagulação em escala piloto**

Foram realizados ensaios de filtração na manta M8, onde os três tipos de água bruta foram submetidos às taxas de filtração de 5, 20 e  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  durante 12 horas. As amostras foram coletadas no intervalo de uma hora resultando em 72 no total para turbidez da água filtrada nesta situação.

#### **4.6 Ensaios de filtração com coagulação em escala piloto**

Nesta etapa, a água bruta foi submetida à coagulação/floculação e em seguida filtrada pela M8. Com vista a definir o tipo de coagulante e as respectivas doses ótimas de coagulação para a filtração direta, realizaram-se previamente os ensaios de *Jartest* (**Figura 4.7**). Nestes ensaios foram testadas diferentes condições de coagulação para se selecionar a melhor dose que se adequasse para os ensaios na ETA piloto.

**Figura 4.7** – *Jartest* utilizado nos ensaios de coagulação em bancada



Após a colocação da amostra de água bruta com turbidez conhecida nos jarros, adicionava-se coagulante  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(14-18)\text{H}_2\text{O}$  (Sulfato de Alumínio) objetivando-se a neutralização de cargas das impurezas. A partir do painel de controle do *Jartest* fazia-se o ajuste para 415 rpm correspondentes ao gradiente de velocidade de  $800 \text{ s}^{-1}$ . Após se atingir a rotação pré-definida, correspondente à mistura rápida, adicionava-se o coagulante. A mistura rápida durava 30s e em seguida a amostra era submetida à filtração direta na manta, onde se media a turbidez da água filtrada para se inferir a melhor eficiência na remoção deste parâmetro. Estes ensaios foram feitos em triplicatas.

A partir das doses ótimas de coagulantes selecionadas obtidos através dos testes em bancada, os três tipos de água foram submetidos à coagulação seguida de filtração em taxas de 20, 50 e  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  por 12 horas que foi o tempo correspondente à duração da carreira de filtração, a qual era limitada pela perda de carga máxima pela retenção de impurezas na instalação piloto.

#### **4.7 Tratamento de dados**

Para análise e o tratamento de dados foram utilizados os programas *Microsoft Office Excel* e *STATISTICA 8.0*. A primeira ferramenta foi empregada para a organização, tabulação e descrição dos dados por meio de tabelas e gráficos. As análises de regressão e gráficos box-whisker foram realizados no *STATISTICA 8.0*.

Assim, utilizou-se inferência estatística para se escolher a manta que seria submetida aos diversos ensaios de filtração. Nesta ótica, para a comparação de capacidade de remoção de

impurezas durante a seleção das mantas, foi utilizado o teste não paramétrico de **Kruskal-Wallis**, que quando significativo era seguido pelo **teste de comparações múltiplas**. Por outro lado, o teste de **Mann Whitney U** foi empregado na comparação dos desempenhos das mantas M7 e M8, e na comparação das eficiências de remoção de turbidez entre as taxas de 5 e 20 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, pois este teste se presta a comparar dois grupos independentes.

Todos os testes utilizados nesta pesquisa foram não paramétricos, visto que em alguns casos se trabalhou com menor quantidades de dados e pela características destes dados que assemelha ao dados ambientais, apesar de em alguns casos terem apresentado dados simétricos. A estatística dos testes realizados foi para o intervalo de confiança de 95% em todas as circunstâncias.

Na última instância, os resultados gerados foram interpretados, comparados e criticamente analisados, baseando-se na literatura disponível para cada situação com vista a descortinar os pontos de consenso e discórdia.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados assuntos correspondentes à preparação da água sintética, seleção das mantas e por fim a filtração em mantas sintéticas não tecidas. Diante destes assuntos serão apresentados e discutidos os resultados dos diversos ensaios inerentes a cada experimento buscando-se para os primeiros dois assuntos a construção de uma base para posteriores pesquisas do gênero, porém, o último assunto (filtração em MSNT) figura como o escopo deste trabalho, onde se procurou responder os objetivos traçados para esta pesquisa.

### 5.1 Preparo da água de estudo

Partindo do pressuposto que a pesquisa demandaria água com diferentes valores de turbidez (25, 50 e 100 uT), houve necessidade de se fixar doses correspondentes ao caulim para obtenção dos valores de turbidez desejados. Estas doses aparecem ilustradas na **Tabela 5.1**, onde estão presentes os valores de turbidez resultantes da adição do caulim durante os ensaios. A partir desses valores foram gerados o gráfico e a equação de regressão linear, correspondentes à relação entre dose de caulim e turbidez resultante, que posteriormente foram utilizados na preparação das águas - Tipo I, Tipo II e Tipo III.

**Tabela 5.1** – Valores médios da turbidez resultante da adição de caulim na água

Dose de caulim (g/L)	Turbidez (uT)
0,03	18,9
0,05	29,2
0,08	49,9
0,1	60,3
0,12	75,8
0,15	96,4
0,2	126,0

Os valores dos ensaios resultaram na **Equação 5.1** de regressão linear e que encontra sua representação gráfica na **Figura 5.1**, onde há evidência da existência de uma correlação positiva entre as doses de caulim e os valores de turbidez resultantes. Segundo CALEGARI-JACQUES (2003), considera-se correlação muito forte quando o coeficiente de correlação é maior que 0,95 e nesta situação foi testificada essa assertiva de acordo com os valores apresentados na **Tabela 5.2** gerada através de análise de regressão pelo software *STATISTICA 8.0*, onde está ilustrado o valor de R aproximadamente igual a 0,999, sustentando deste modo a correlação entre estas variáveis (caulim e turbidez).

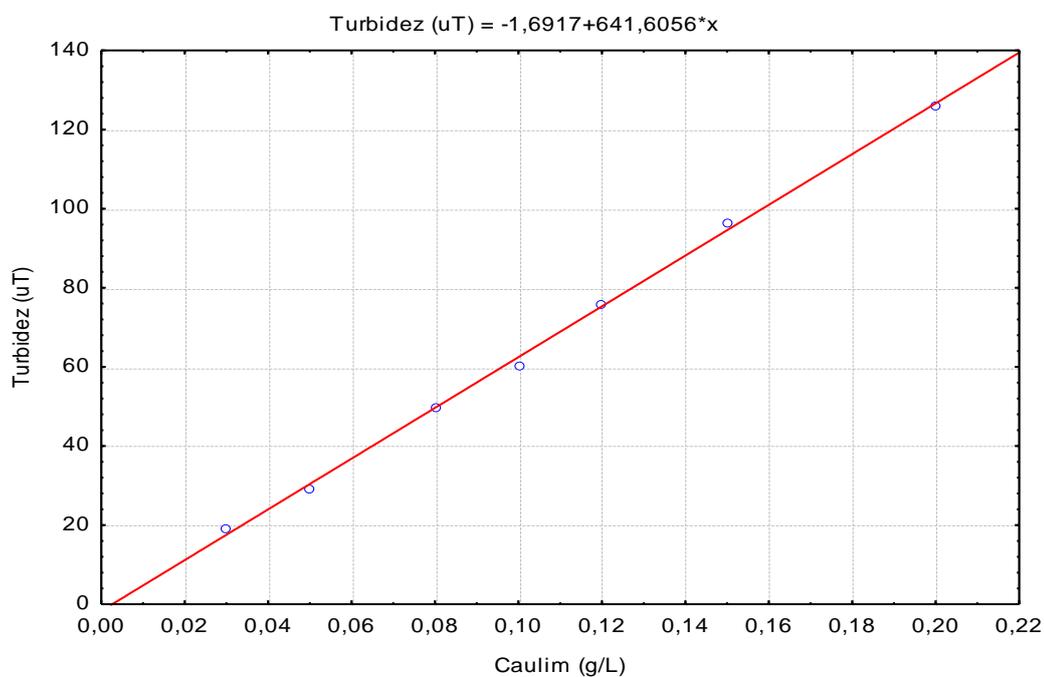
$$Y = 641,6X - 1,7 \quad (5.1)$$

Na qual:

Y – Turbidez (uT)

X – dose de caulim (g/L)

**Figura 5.1**– Resultados que relacionam as doses de caulim e turbidez resultante



**Tabela 5.2** – Resultados de regressão linear para a análise de correlação entre caulim e turbidez da água

Regression Summary for Dependent Variable: Turbidez (uT) (Spreadsheet)						
R= ,99928272 R²= ,99856595 Adjusted R²= ,99827914						
F(1,5)=3481,6 p<,00000 Std.Error of estimate: 1,5596						
N=7	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(5)	p-level
Intercept			-1,6917	1,2780	-1,3236	0,24289
Caulim (g/L)	0,99928	0,01693	641,6056	10,8736	59,0053	0,00000

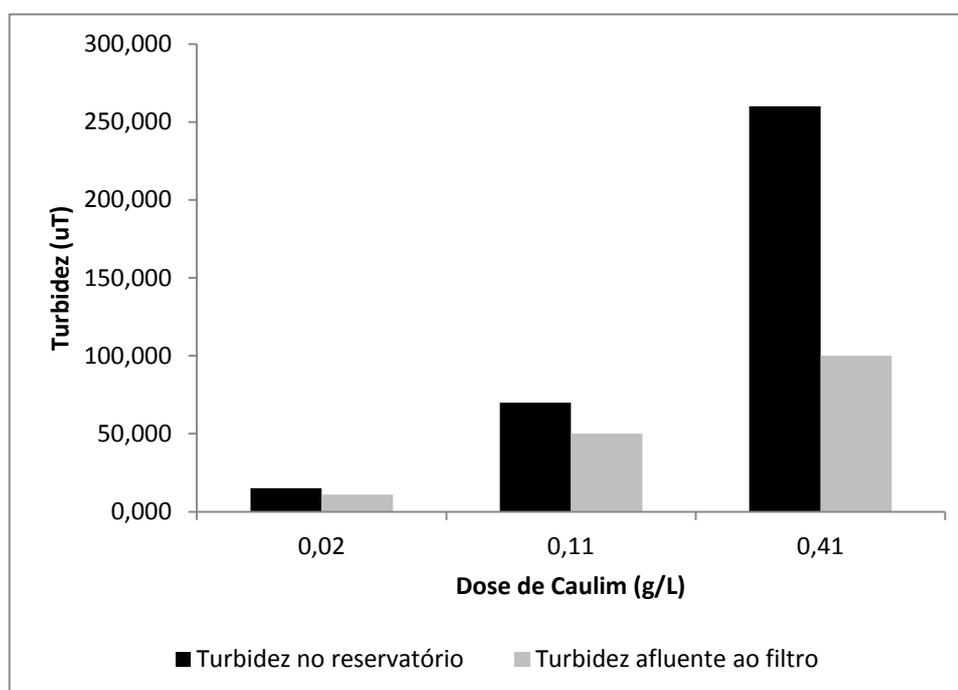
A partir da **Equação 5.1** foram determinados os valores de turbidez pela respectiva dosagem de caulim para a preparação da água sintética com as características e as quantidades necessárias para os ensaios.

Na **Figura 5.2** são apresentadas as doses utilizadas no preparo das águas de estudo para taxa de filtração de 5 m³.m⁻².d⁻¹. Entretanto, vislumbram-se valores para a preparação de água bruta na caixa e os verificados na entrada do filtro, pois em virtude da decantação ocorrida durante o percurso da água na tubulação da instalação piloto, sendo mais acentuada para a água afluyente Tipo III e para a menor taxa de filtração, preparava-se água bruta no

reservatório com turbidez maior que os valores desejados para permitir o afluente não inferior ao necessário. Esta medida prestava-se a assegurar o valor de turbidez inerente a cada tipo de água pré-definida na entrada dos filtros.

Contudo, ressalta-se que a taxa de decantação na tubulação mostra-se menos acentuada à medida que diminui o valor da turbidez afluente demandado e em concomitância com elevadas taxas de filtração. Diante disto, para as taxas de filtração de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  em diante, a taxa de sedimentação se reduz até valores desprezíveis. Neste contexto, de acordo com diferentes situações que caracterizaram a pesquisa, no que concerne aos parâmetros referenciados, foi preparada água considerando-se esses pressupostos, de modo a responder os objetivos em causa.

**Figura 5.2** – Relação entre dosagem de caulim e turbidez da água para a taxa de filtração de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$



## 5.2 Características da água de estudo

As características da água de estudo usada nos ensaios de filtração são apresentadas na **Tabela 5.3**, e em seguida é feita descrição de cada parâmetro. De forma geral, a água Tipo I apresenta valor de turbidez que é relatado como sendo favorável para o tratamento por filtração lenta, enquanto que as outras apresentam turbidez relativamente elevada, o que dificultaria o emprego desta tecnologia se ela não for antecedida por pré-tratamento.

**Tabela 5.3** – Faixa de variação das características da água bruta utilizada nesta pesquisa

Parâmetro	Tipo de água		
	I	II	III
Turbidez (uT)	10 ± 1,0	50 ± 2,0	100 ± 5,0
Cor aparente (uH)	42 ± 1,0	136 ± 34	301 ± 26
pH	8,1 ± 0,1	7,8 ± 0,6	8 ± 0,3
Temperatura (°C)	25,7 ± 0,2	24,1 ± 2,2	24,8 ± 1,5
Dureza Ca <sup>+2</sup> (mg/L)	19 ± 4,0	26 ± 8,0	27 ± 9,0
Alcalinidade (mg/L)	32 ± 3,0	36 ± 5,0	46 ± 5,0

Fonte: Apêndice A

### *Turbidez*

Na água bruta, a turbidez é causada pela presença de partículas em suspensão e coloides, que derivam de argila, lama, matéria orgânica e inorgânica, plâncton e demais partículas microscópicas (OLIVEIRA *et al.*, 2008; LIBÂNIO, 2010). A área específica de material em suspensão e partículas podem acomodar enormes quantidades de microrganismos patogênicos e poluentes, tornando-se relevante fazer o monitoramento deste parâmetro. Apesar, da água em questão nesta pesquisa não abrir perspectiva direta para esta situação por se tratar de água sintética, resultante da mistura entre água tratada para o consumo humano e caulim, julgou-se importante o monitoramento deste parâmetro espelhando-se na realidade da água bruta encontrada nos mananciais usados para o abastecimento público neste tipo de situação.

### *pH*

Na realidade, os ecossistemas são expostos aos impactos decorrentes das variações dos valores de pH da água bruta, fazendo se sentir no processo de filtração lenta. Diversas bactérias apresentam dificuldades de reprodução em pH inferior a 4,0 ou superior a 9,5, sendo o pH ótimo para esta atividade microbiológica entre 6,5 e 9,5 (OLIVEIRA *et al.*, 2008). Em caso de filtração lenta há necessidade de monitoramento acurado de pH em mananciais a serem submetidos a esta tecnologia, uma vez que este parâmetro é preponderante para a atividade microbiológica. A faixa de variação recomendada pela Portaria MS 2914 de 2011 no que concerne a potabilidade da água é de 6,0 a 9,5. Como o pH é relevante na filtração rápida para a coagulação, ressalta-se que na água bruta utilizada para estes experimentos manteve-se dentro da faixa recomendada.

### *Temperatura*

A temperatura está intimamente ligada à velocidade das reações química, solubilidade das substâncias, concentração de oxigênio dissolvido, metabolismo dos organismos presentes no ambiente aquático, formação de subprodutos e recrudescimento biológico. Na remoção de

organismos microscópicos, o efeito da temperatura é significativo para aqueles menores que 1 µm, enquanto que nos maiores ela quase se torna desprezível. Isto se deve em parte, a remoção de partículas por difusão que é fortemente dependente da temperatura, pois o aumento da temperatura diminui a viscosidade da água e conseqüentemente aumento da difusão. Isto pode ser sustentada pelos resultados de uma pesquisa onde a temperatura modelada foi reduzida de 20 para 5 °C, tendo se constado que a eficiência de remoção de *Bacteriófago* MS2 diminuiu de 6,38 para 4,66 logs e a remoção oocistos de *Cryptosporidium* foi reduzida de 1,44 para 1,31 logs. Contudo, as partículas maiores que são removidas principalmente por intercepção, a temperatura deixa de ser relevante (WHO, 2004).

No que diz respeito ao tratamento de água em países tropicais, os valores de temperatura registrados, em regra, são favoráveis para a coagulação bem como para filtração lenta, pois elas têm sido mais eficientes em temperaturas relativamente altas.

#### *Alcalinidade*

A alcalinidade da água representa a capacidade de neutralizar ácidos e a capacidade tampão da água, por minimizar variações significativas de pH resultantes de adição de ácidos. Apesar de muitos elementos contribuírem para a alcalinidade da água, destacam-se os hidróxidos (OH<sup>-</sup>), carbonatos (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>) e bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Para águas com pH entre 4,4 e 8,3 a alcalinidade está associada apenas aos bicarbonatos, pH entre 8,3 e 9,4 à carbonatos e bicarbonatos, e pH maior que 9,4 a hidróxidos e carbonatos.

Os menores valores de alcalinidade nos mananciais superficiais brasileiros, concorrem para a aplicação de alcalinizantes na maioria das estações, com intuito de evitar a redução expressiva do pH na coagulação. Em contrapartida, quando aplicada no fim do tratamento, isto é, após a desinfecção com designação de cal secundária, visa adequar o pH aos níveis recomendados para evitar a corrosão nas adutoras (LIBÂNIO, 2010). No entanto, o pH manteve-se dentro dos níveis aceitáveis para a potabilização da água, o que contribuiu para a exclusão do monitoramento da alcalinidade na água filtrada.

#### *Dureza*

A dureza tem origem natural pela dissolução de rochas calcárias ricas em cálcio e magnésio, e em alguns casos, resultante de lançamento de efluentes industriais. O padrão brasileiro e o da OMS estabelecem o limite de 500 mg/L CaCO<sub>3</sub>, que é superior aos valores comumente registrados na maioria dos mananciais superficiais. Porém, devido à maior subjetividade no

que tange a aceitabilidade e a perceptibilidade sobre este parâmetro, diversas pesquisas defendem que a dureza de até 200 mg/L não tem sido rejeitada pela população abastecida.

A dureza não apresenta significado sanitário, estando associado à economia pelo consumo elevado de sabões e xampus devido ao seu impacto na redução de formação de espuma. Por outro lado, a dureza pode provocar incrustações nas tubulações de água quente, caldeiras e aquecedores, resultantes da precipitação de carbonato a altas temperaturas (LIBÂNIO, 2010).

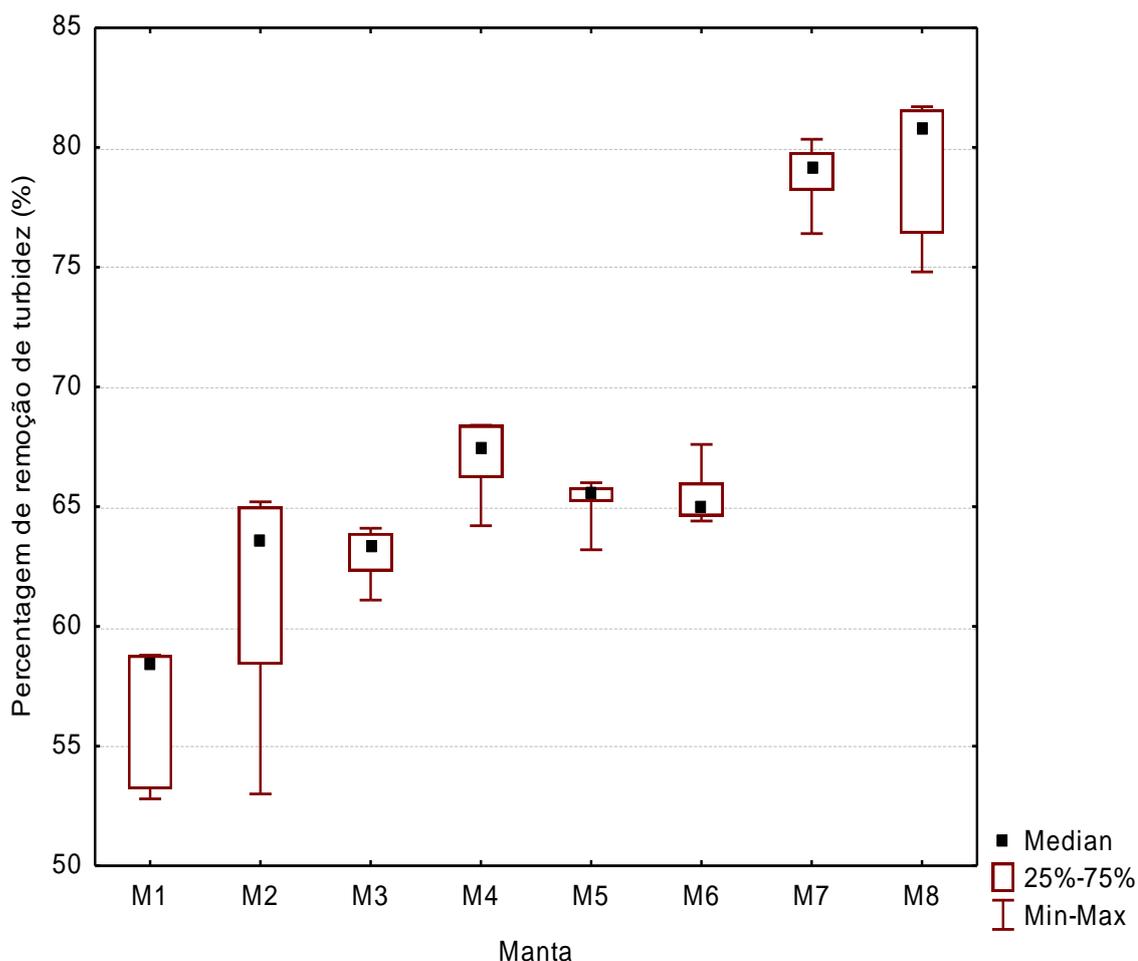
Todavia, de acordo com os dados da **Tabela 5.3**, nos três tipos de água bruta, a dureza esteve abaixo dos limites máximos relatados anteriormente, dispensando deste modo o seu monitoramento na água filtrada.

### **5.3 Ensaios para a seleção da manta**

Os ensaios de filtração prestavam-se à verificação do desempenho das mantas na remoção da turbidez com base na diferença entre a turbidez afluente e efluente da água, e por outro lado, avaliar a influência na remoção de impurezas na perda de carga.

A **Figura 5.3** mostra o gráfico *Box - Whisker* relativo à capacidade de retenção de impurezas, onde se evidenciam os melhores desempenhos das mantas M7 e M8 com valores medianos de 79 e 81,5%, respectivamente. Estas capacidades de remoção de impurezas são visualmente isoladas das correspondentes às demais mantas, porém, não se pode afirmar que elas apresentaram o melhor desempenho com base desta informação apenas. Todavia, outras análises foram necessárias para justificar para se apurar a veracidade desse fato. Assim, os valores obtidos nestes ensaios foram submetidos aos testes estatísticos com intuito de verificar a manta que apresentou melhor capacidade de remoção significativa.

**Figura 5.3** – Percentagem da remoção de turbidez na água Tipo II pelas mantas



Fonte: Apêndice B

Através do teste de *Kruskal-Wallis* seguido do teste de comparações múltiplas, cujos resultados estão presentes na **Tabela 5.4**, concluiu-se que as mantas M4, M7 e M8 não obtiveram capacidades de remoção de impurezas diferente significativamente entre elas para o nível de significância de 5%, mas as suas capacidades de remoção de turbidez foram expressivamente diferentes quando comparadas às mantas M1, M2, M3 e M5.

Contudo, em quase todas as mantas verificou-se uma percentagem de remoção de turbidez maior que 50%, enquadrando-se na faixa dos valores comumente encontrados quando as mantas são utilizadas como pré-filtros na filtração lenta. Por conseguinte, aferiu-se que todas as mantas utilizadas nestes ensaios podem ser empregadas para como pré-filtros na filtração lenta, visto que neste caso foi usada a taxa de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . Esta colocação pode ser sustentada a partir da pesquisa de PATERNIANI & CONCEIÇÃO (2002) que observaram a redução de turbidez pelo pré-filtro de MSNT numa média de 54 e 62% para taxas de 2 e  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , respectivamente. Todavia, ressalta-se que a qualidade da água bruta, avaliada pela turbidez, foi ligeiramente inferior no ensaio com a taxa de filtração maior.

As mantas M7 e M8 mostraram-se adequadas para os ensaios inerentes a esta pesquisa, pois os resultados apresentados são correspondentes à filtração de água com valor médio de turbidez num grupo de três valores de turbidez que foram definidos para a pesquisa (10,0; 50,0 e 100,0 uT). Ademais, destaca-se o menor tempo de filtração no qual foram submetidos estes ensaios, o que pode não ter permitido o amadurecimento do leite filtrante. Essa situação pode ter sido adversa para o monitoramento da evolução da perda de carga, visto que não foi verificada uma evolução expressiva deste parâmetro.

Como o teste de *Kruskal-Wallis* confirmou superioridade em termos de remoção de turbidez das mantas M4, M7 e M8, apesar do menor tempo de filtração que pode ter influenciado no resultado encontrado nesta análise comparativa entre as mantas, foram escolhidas as mantas que evidenciaram melhor resultados de remoção de turbidez. No entanto, as mantas M7 e M8 que apresentam capacidades de remoção de impurezas superiores que as demais, foram submetidas aos novos ensaios de filtração para um tempo de 12 horas.

**Tabela 5.4** - Comparação múltipla de capacidade de remoção de impurezas das mantas

		Multiple Comparisons z' values; Porcentagem de remoção de turbidez (%) (Spreadsh Independent (grouping) variable: Manta Kruskal-Wallis test: H ( 7, N= 56) =48,33716 p =,0000							
Depend.:		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Porcentagem de remoção de turbidez (%)		R:5,357	R:15,500	R:14,857	R:36,214	R:28,214	R:28,857	R:48,214	R:50,786
M1			1,16346	1,08972	3,53955	2,62189	2,69563	4,91805	5,21101
M2		1,16346		0,07374	2,37609	1,45842	1,53216	3,75258	4,04754
M3		1,08972	0,07374		2,44983	1,53216	1,60591	3,82632	4,12129
M4		3,53955	2,37609	2,44983		0,91766	0,84392	1,37649	1,67145
M5		2,62189	1,45842	1,53216	0,91766		0,07374	2,29415	2,58912
M6		2,69563	1,53216	1,60591	0,84392	0,07374		2,22041	2,51538
M7		4,91805	3,75258	3,82632	1,37649	2,29415	2,22041		0,29496
M8		5,21101	4,04754	4,12129	1,67145	2,58912	2,51538	0,29496	

Fonte: Apêndice B

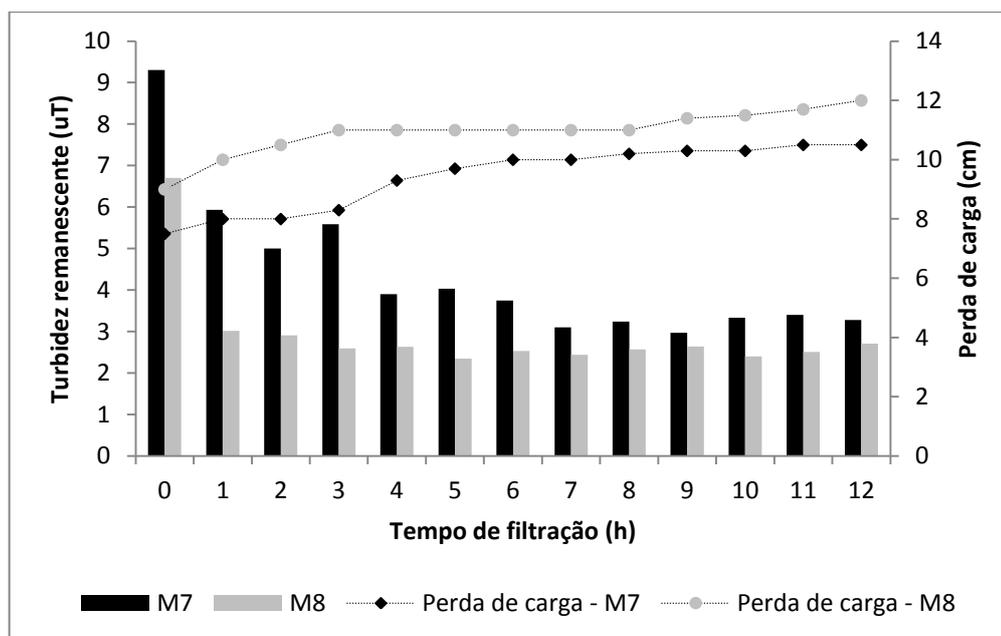
#### 5.4 Comparação da capacidade de remoção de impurezas entre M7 e M8

Diante do panorama de se produzir água potável que cumpra as exigências da norma vigente para a potabilidade com a tecnologia localmente acessível técnica e economicamente, foram testadas as mantas como o único meio de remoção de turbidez. Esta ideia emergiu na expectativa de evitar utilizar muitas mantas para alcançar um objetivo que talvez se pudesse concretizar com menor número de mantas, isto é, menor espessura necessária. Desta forma, pode-se contribuir para a flexibilidade na construção e na limpeza do sistema pela menor quantidade destes meios filtrantes.

A **Figura 5.4** apresenta os valores de turbidez efluente das mantas estudadas, onde se evidencia o melhor desempenho para a manta M8 quando comparada à M7. Constatou-se que ambas as mantas apresentaram valores estabilizados a partir de, aproximadamente, a terceira

hora de filtração, porém todos foram superiores a 1,0 uT. Esta fase pode ser entendida como a intermediária ou pós-amadurecimento, onde se espera a produção da melhor qualidade de água no concernente ao meio filtrante usado. Apesar de ambas as mantas terem apresentado valores da turbidez remanescente acima do recomendado para o consumo humano no Brasil, destaca-se que a M7 apresentou perdas de cargas menores em relação à outra.

**Figura 5.4** – Resultados de turbidez remanescente dos ensaios de filtração da água Tipo I em taxa de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  nas mantas M7 e M8



Fonte: Apêndice C

No entanto, o menor tempo de filtração de 12 horas adotado nestes ensaios que seria o mesmo para os demais experimentos foi testado para as duas mantas, pois o período de 70 minutos que tinha sido adotado inicialmente nos ensaios de seleção da manta, pode não ter sido suficiente para a formação da camada superficial que concorre para maior eficiência deste tipo de filtração.

A despeito disso, o teste de **Mann – Whitney U** para comparações de dois grupos independentes testemunhou o melhor desempenho em termos de retenção de impurezas da manta com maior espessura, conforme apresentado na **Tabela 5.5**, onde foi encontrado o valor de  $p < 0,05$  que sustenta a existência de diferença significativa na remoção de turbidez entre M7 e M8, sendo melhor a M8. A **Figura 5.5**, sustenta o melhor desempenho da M8, visto que apresento mediana de percentagem de remoção de turbidez superior que as demais mantas, porém os valores extremos menores de ambas as mantas são correspondentes à fase inicial de filtração, isto é, fase antes de maturação do filtro. Contudo, a diferença significativa nas perdas de carga verificadas nas mantas M7 e M8 de acordo com a **Tabela 5.6**, sendo a

menor para a manta de menor espessura, pode ser sustentada pela maior eficiência de retenção de impurezas apresentada pela manta M8.

A menor perda de carga da manta M7 pode concorrer para carreiras de filtração mais longas em comparação com a manta de maior eficiência, embora o fator de aumento da carreira de filtração esteja intimamente ligado à espessura da manta. Assim, a maior espessura da manta M8 pode compensar o fator do aumento de carreira e simultaneamente produzir água de melhor qualidade equiparada à manta M7. DI BERNARDO & DANTAS (2005) fazem alusão à maior eficiência de filtração apresentada pelas mantas pouco porosas e com maior superfície específica devido a sua maior capacidade na remoção de impurezas. Portanto, a manta M8 foi escolhida para os experimentos desta pesquisa, pois ela apresentou melhores resultados e propriedades em comparação com a outra.

**Tabela 5.5** Teste Mann-whitney U para a comparação das percentagens de remoção de turbidez entre a M7 e a M8

Mann-Whitney U Test (Spreadsheet8)										
By variable Manta										
Marked tests are significant at p <.05000										
variable	Rank Sum M7	Rank Sum M8	U	Z	p-level	Z adjusted	p-level	Valid N M7	Valid N M8	2*1sided exact p
Percentagem de remoção de turbidez (%)	104,000	247,000	13,0000	-3,8688	0,00024	-3,8688	0,00024	13	13	0,00007

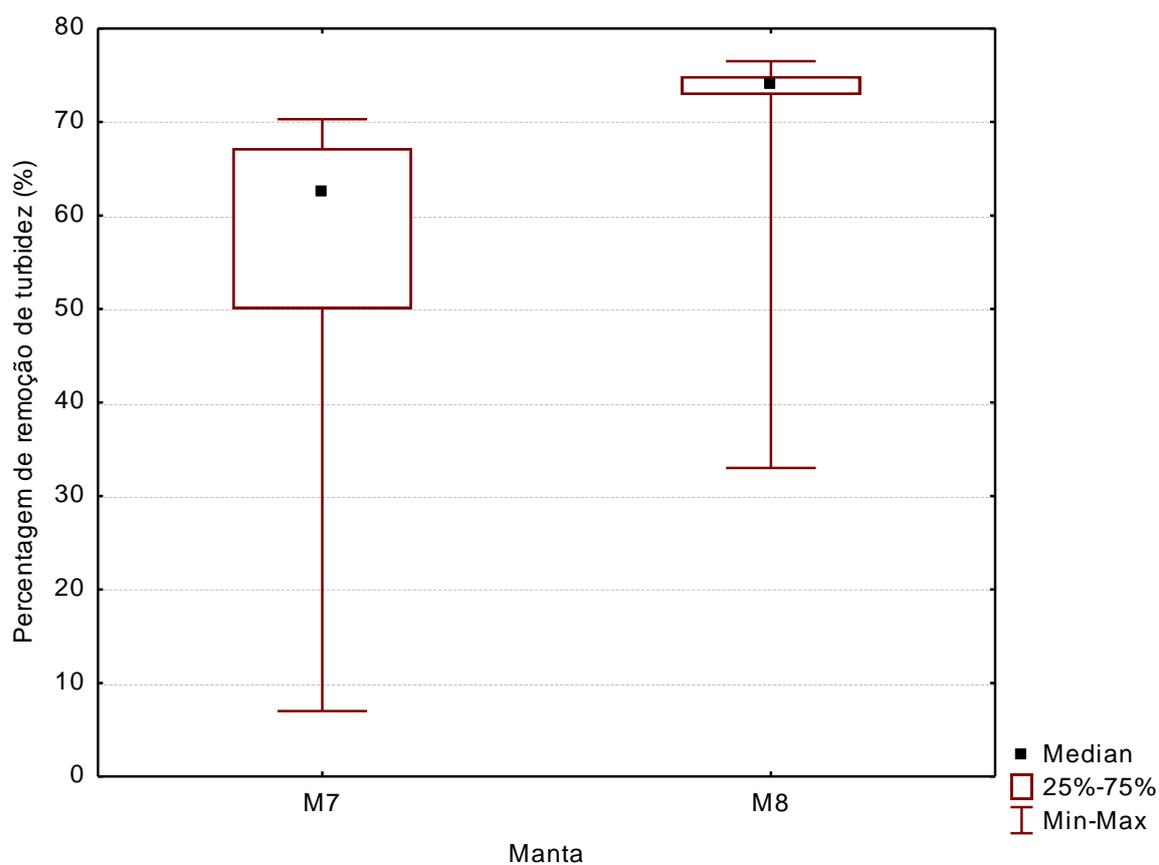
Fonte: Apêndice C

**Tabela 5.6** Teste Mann-whitney U para a comparação das perdas de cargas de M7 e M8

Mann-Whitney U Test (Spreadsheet1)										
By variable Manta										
Marked tests are significant at p <.05000										
variable	Rank Sum M7	Rank Sum M8	U	Z	p-level	Z adjusted	p-level	Valid N M7	Valid N M8	2*1sided exact p
Perda de carga (cm)	107,000	244,000	16,0000	-3,5128	0,00044	-3,5401	0,00040	13	13	0,00017

Fonte: Apêndice C

**Figura 5.5** – Resultados da percentagem de remoção de turbidez na água Tipo I pelas mantas M7 e M8 com taxa de filtração de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$



Fonte: Apêndice C

#### **5.4 Ensaios de filtração em manta da água sem coagulação**

Os ensaios de filtração sem coagulação prestavam-se a inferir o desempenho da manta na remoção de impurezas e consequente evolução da perda de carga para distintos valores de turbidez da água bruta (5,0; 50,0 e 100,0 uT) e diferentes taxas de filtração (5, 20 e  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ). Nesses experimentos, verificou-se que a turbidez da água efluente tende a decrescer quando se tem como referência o tempo inicial do processo, e próximo da quarta hora os valores tendiam a se manter estáveis na maioria dos ensaios. Este comportamento é similar ao que se verifica nos meios filtrantes granulares.

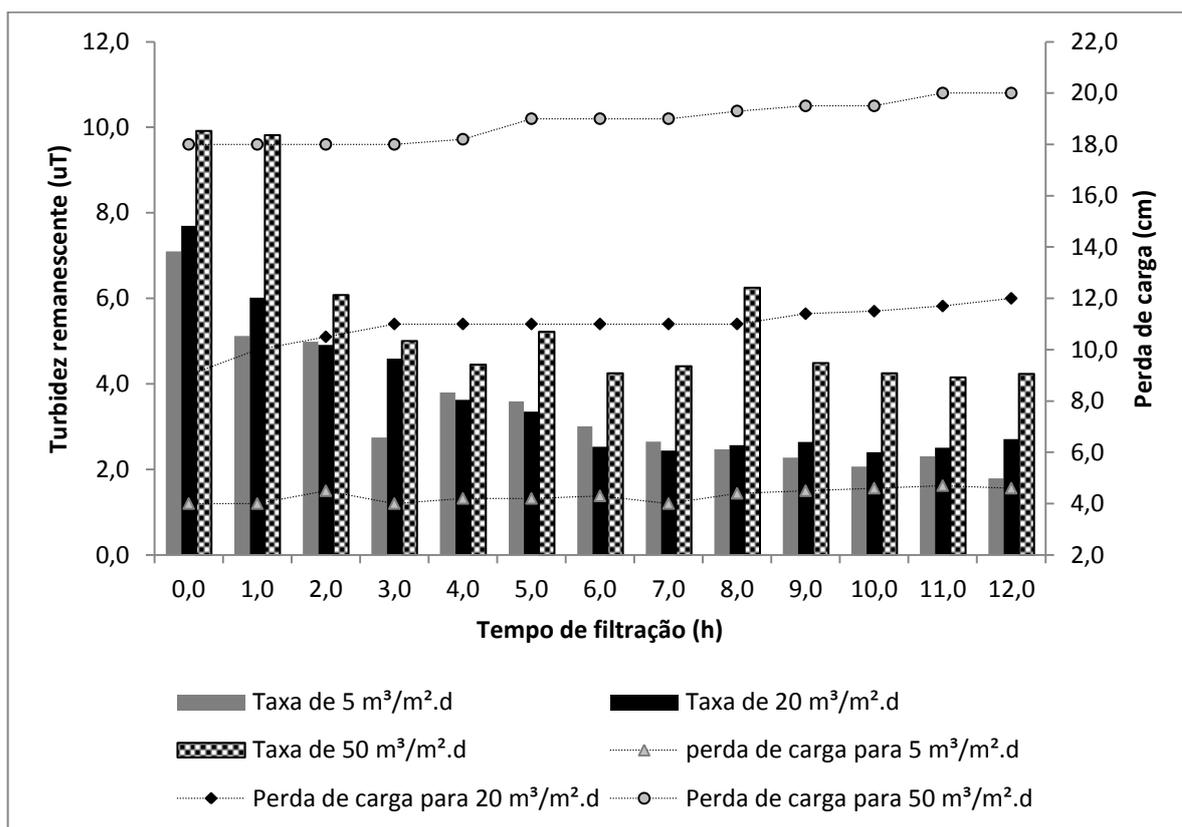
##### **5.4.1 Ensaios de filtração para distintas taxas de filtração com a mesma água bruta**

Na **Figura 5.6** que representa a água com menor turbidez dos ensaios, vislumbra-se a maior eficiência em termos de remoção de turbidez quando a água foi submetida à menor taxa de filtração ( $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), algo que esperado em teoria, mas se destaca que a taxa de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  não apresentaram eficiência de remoção significativamente diferente para o nível de significância de 5% (**Tabela 5.7**). Diante desta colocação, as duas taxas de filtração (5 e 20

$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ) podem ser empregados no tratamento de água com as mesmas condições e atender o padrão de potabilidade recomendado pela OMS. Em contra partida, na taxa de  $50 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  registraram-se valores acima de 4,5 uT em todos os ensaios, tendo-se mostrado menos favorável para remoção do parâmetro em questão sob a premissa de atendimento a legislações vigentes no Brasil e em alguns países em desenvolvimento.

As oscilações dos valores de perda de carga verificadas na taxa de  $5 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  estão associadas a problemas operacionais na válvula reguladora usada para a fixação das vazões, pois as partículas contidas na água contribuía para estrangulamento no ponto de controle, causando alteração na vazão afluyente ao filtro. Ressalta-se também que a diferença nas carreiras de filtração foi influenciada pela taxa de filtração e não pela capacidade de retenção de impurezas, visto que se observou a mesma ordem de diferença durante as carreiras de filtração.

**Figura 5.6** – Filtração da água Tipo I (10 uT) em diferentes taxas de filtração



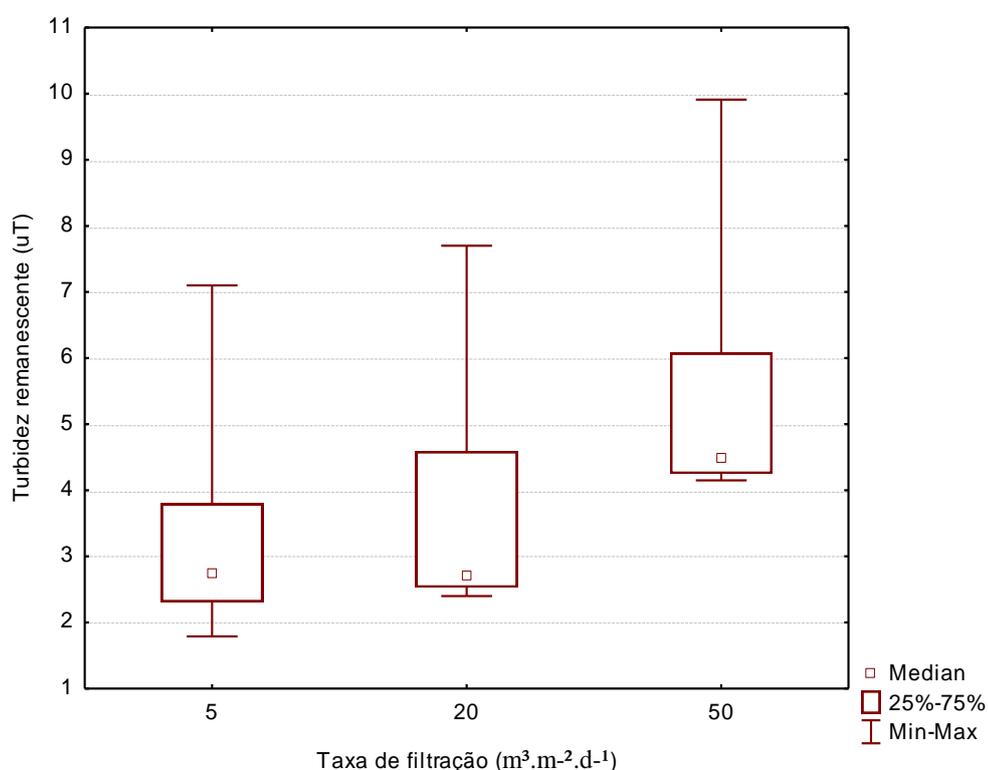
Fonte: Apêndice D

**Tabela 5.7** – Resultados de comparação da remoção de turbidez entre as taxas de 5, 20 e 50 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>

Multiple Comparisons p values (2-tailed); Turbidez remanescente (uT) (Spreadsh			
Independent (grouping) variable: Taxa de filtração (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> )			
Kruskal-Wallis test: H ( 2, N= 39) =10,83068 p =,0044			
Depend.:	5	20	50
Turbidez remanescente (u	R:14,615	R:17,000	R:28,385
5		1,00000	0,00623
20	1,00000		0,03272
50	0,00623	0,03272	

Fonte: Apêndice D

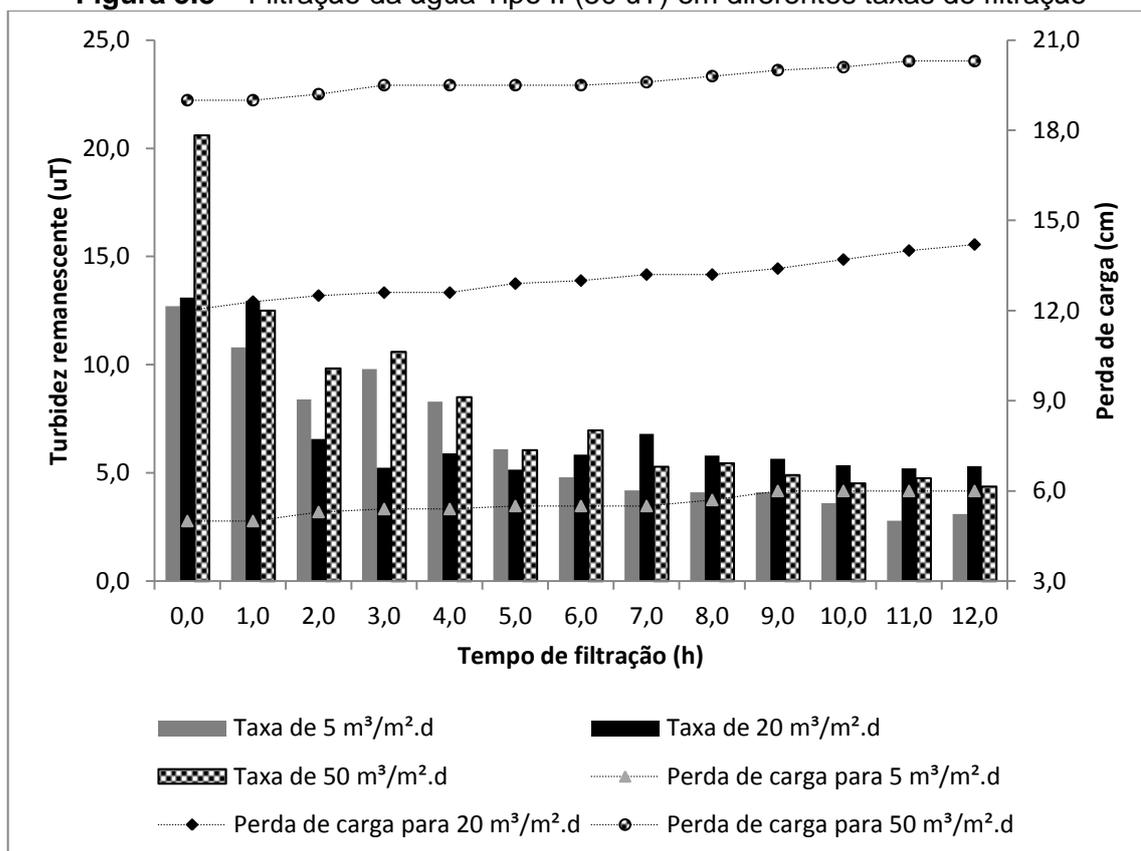
**Figura 5.7** - Resultados de comparação da remoção de turbidez entre as taxas de 5, 20 e 50 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>



Fonte: Apêndice D

Quando a turbidez da água bruta foi de 50 uT (Tipo II), a maioria dos valores de turbidez efluente foram superiores a 5,0 uT nas duas maiores taxas de filtração, conforme pode ser visto na **Figura 5.8**. Diante desta colocação, as duas taxas de filtração (20 e 50 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>) não foram permitiram o tratamento de água que atendesse o padrão de potabilidade vigente no Brasil, enquanto que a taxa de 5 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> permitiu a produção de água que atende o padrão da OMS adotado por alguns países em desenvolvimento.

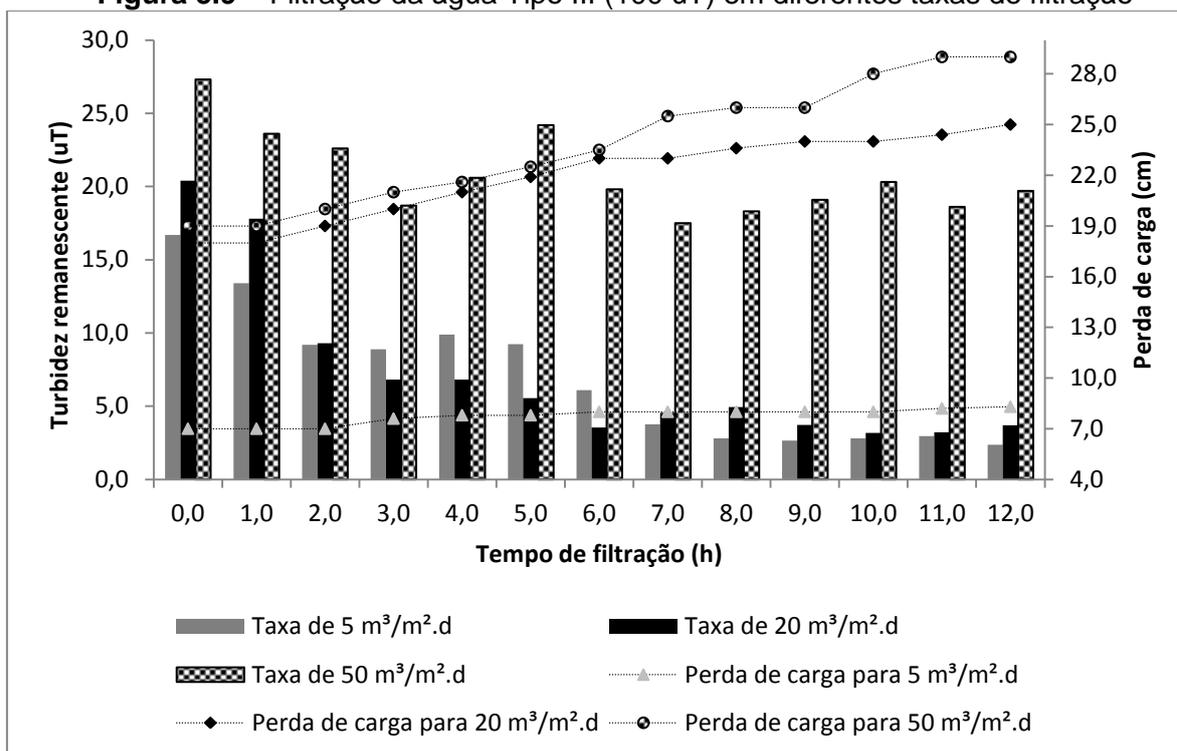
**Figura 5.8 – Filtração da água Tipo II (50 uT) em diferentes taxas de filtração**



Fonte: Apêndice D

Na **Figura 5.9** onde foi filtrada a água Tipo III por taxas de 5, 20 e 50 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, observa-se comportamento similar ao da água Tipo II, onde as menores taxas de filtração apresentaram maior eficiência de remoção de turbidez pela MSNT, o que permitiu a produção de água com 5 uT de turbidez. Constatou-se também que as taxas de filtração de 5 e 20 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> apresentaram eficiência de remoção significativamente iguais. A partir desta observação, pode-se inferir que em mesma água bruta com as mesmas características da Tipo III, pode ser tratada no intervalo de variação da taxa de filtração acima referenciado sem comprometer a qualidade da água efluente, porém a duração das carreiras de filtração deve ser considerada.

**Figura 5.9** – Filtração da água Tipo III (100 uT) em diferentes taxas de filtração



Fonte: Apêndice D

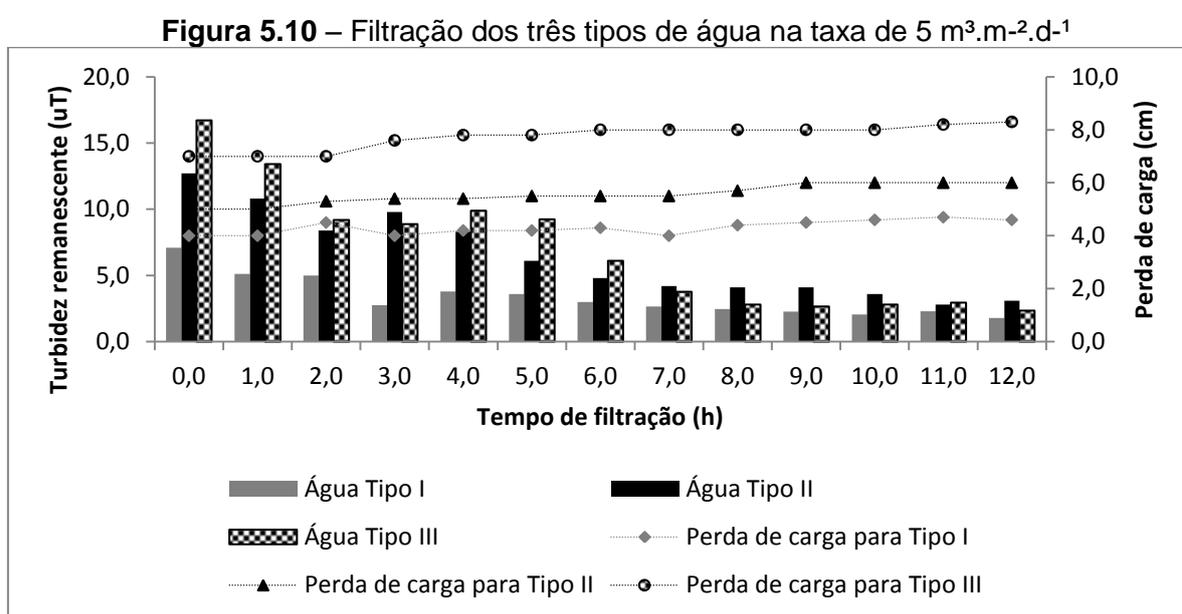
Em geral, as mudanças na qualidade da água bruta pode afetar a eficiência dos processos de tratamento. Pois, dependendo das condições locais e sazonais, cada estação de tratamento de água enfrenta diferentes variações na qualidade da água bruta e, uma alteração de qualquer parâmetro de qualidade da água em a fonte de água podem afectar a eficácia do tratamento aparente. Para consubstanciar esta colocação, ARORA *et al.* (1998 ) quando levaram a cabo um estudo envolvendo 67 estações de tratamento de água superficial nos EUA, descobriram que a eficiência de remoção com base na diferença das concentrações de partículas entre água bruta e filtrada foi maior com o aumento da concentração de partículas na água bruta. Onde partículas com concentrações de  $10^3$ - $25 \times 10^3$ /mL na água bruta alcançaram a eficiência de remoção mediana de 2,08 logs, enquanto que, quando as concentrações foram acrescidas para  $10^6$ - $10^7$ /mL, a mediana da eficiência de remoção aumentou para 3,2 logs.

Segundo WHO (2004) a constatação anterior era esperado, porque a remoção das partículas através de clarificação depende significativamente da eficiência de agregação, visto que é um processo de segunda ordem no que concerne à concentração de partículas (uma maior concentração de partículas vai favorecer a maior taxa de colisão entre elas e, portanto, serem mais propensas à agregação).

### 5.4.2 Ensaios de filtração para água com turbidez diferente e mesma taxa de filtração

Os ensaios mantendo-se constante as taxas de filtração e variando a turbidez afluyente não trouxeram alterações observáveis na eficiência de remoção de turbidez, quando comparados aos ensaios de filtração de água com turbidez constante e taxas variáveis.

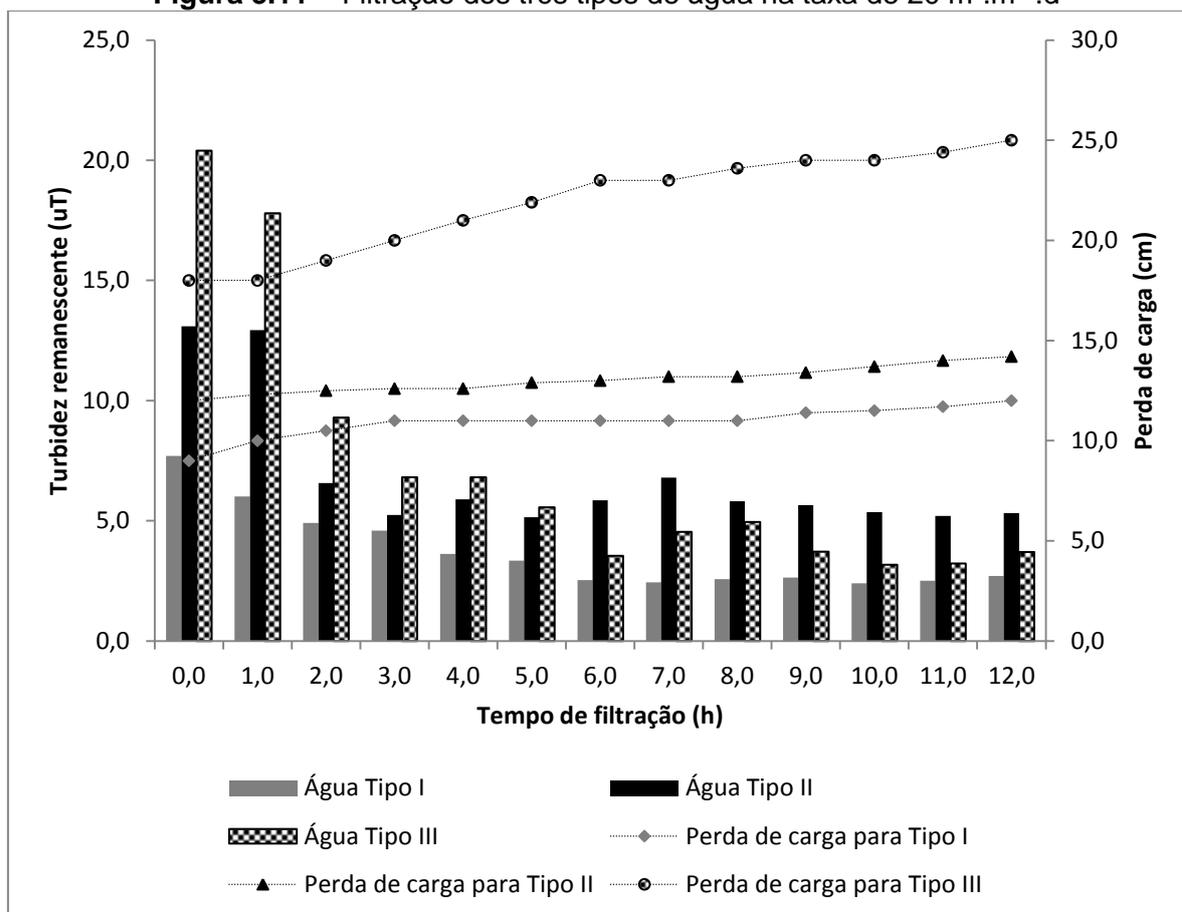
Os valores presentes na **Figura 5.10** vêm corroborar com a assertiva de que o maior desempenho na filtração verifica-se quanto menor for a taxa de filtração, combinada à baixa turbidez da água bruta. Na mesma figura, percebe-se que a turbidez efluente da água Tipo I esteve abaixo de 5,0 uT e na última hora monitorada já apresentou valor menor que 2,0 uT, enquanto que os efluentes das águas Tipo II e Tipo III permaneceram abaixo do valor 5,0 uT .



Fonte: Apêndice D

Na **Figura 5.11**, para a taxa de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , os valores de turbidez efluente da águas Tipo II foram maiores que os da água Tipo III, que apresentou menores valores de turbidez remanescente a partir da sexta hora de filtração. Provavelmente esse cenário deveu-se a elevada carga de impurezas que afluía na manta, favorecendo a formação da camada superficial que é adjuvante ao processo de filtração.

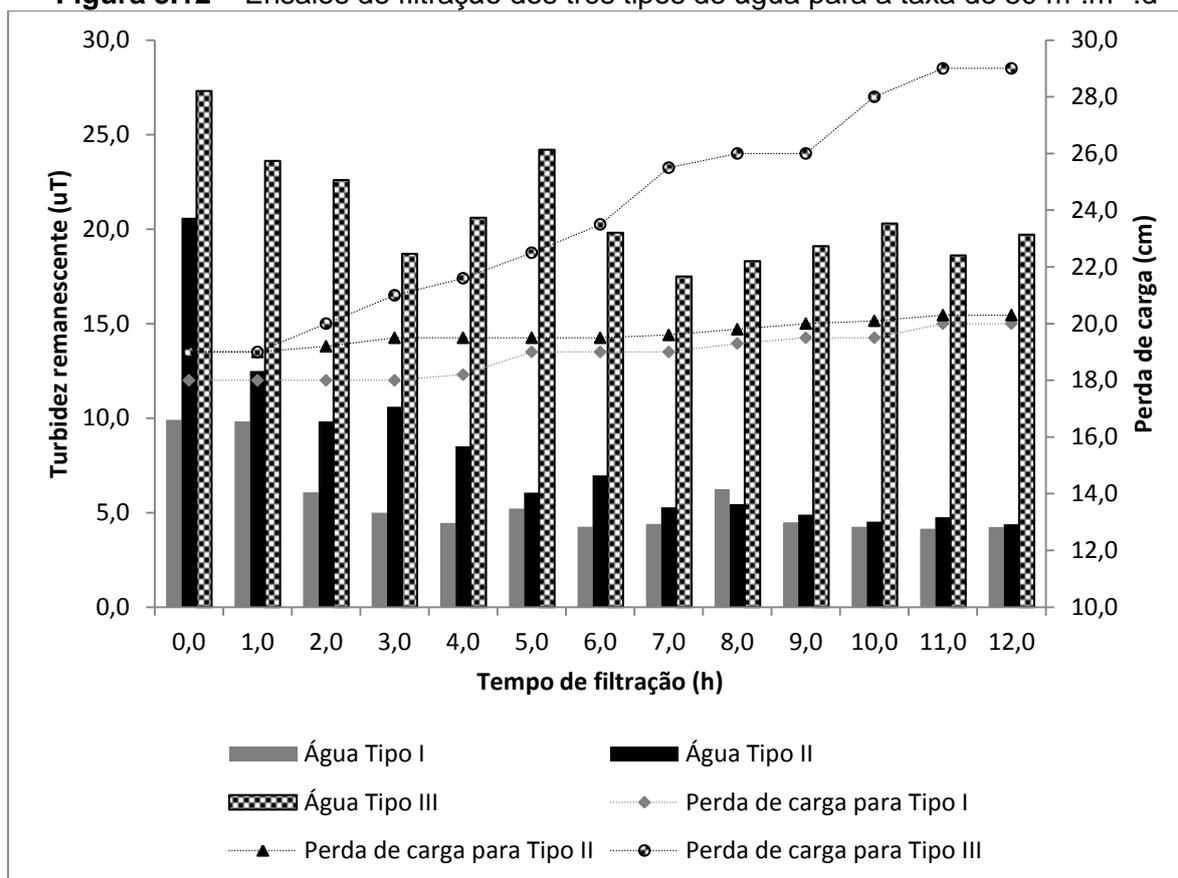
**Figura 5.11** – Filtração dos três tipos de água na taxa de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$



Fonte: Apêndice D

O aumento da taxa de filtração de 20 para  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  na filtração da água Tipo III (**Figura 5.12**), não se mostrou favorável à remoção das impurezas na água baseando-se nos valores para a adequação da potabilidade conforme os padrões legislados nas portarias vigentes nos países em menção. Entretanto, valores elevados de taxa de filtração influenciaram de modo expressivo na perda de carga.

**Figura 5.12** – Ensaio de filtração dos três tipos de água para a taxa de  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$



Fonte: Apêndice D

Em todos os testes de filtração sem coagulação, a água Tipo I, cujo valor de turbidez tem sido associado ao limite máximo para o tratamento por filtração lenta, apresentou melhores resultados quando comparado aos demais. Por outro lado, verificou-se que nos diferentes ensaios, a água Tipo II mostrou-se menos favorável. No entanto, a água Tipo III estabilizou rapidamente os valores do seu efluente com a taxa de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  e foi possível produzir água com turbidez menor que  $5,0 \text{ uT}$  durante o tempo monitorado.

### 5.5 Ensaio de filtração da água previamente coagulada na M8

Os ensaios de filtração direta com coagulação visavam alterar as características da água bruta, com a perspectiva de aumentar a eficiência da manta na remoção de turbidez. Em virtude disso, foram realizados ensaios de coagulação e filtração em bancada com o intuito de definir as doses de sulfato de alumínio que seriam utilizadas na estação piloto. Importa referir que nas três situações o pH variou no intervalo entre 5,0 e 9,0.

WAGNER & HUDSON JR (1982) advogam que uma dosagem baixa de coagulante aumenta a chance de sucesso do tratamento da água por filtração direta, ao contrário da maior a dosagem de coagulante, que favorece a formação de maior volume dos flocos que, ao se depositarem sobre os filtros, provocam a sua rápida colmatação. Portanto, quando a dosagem

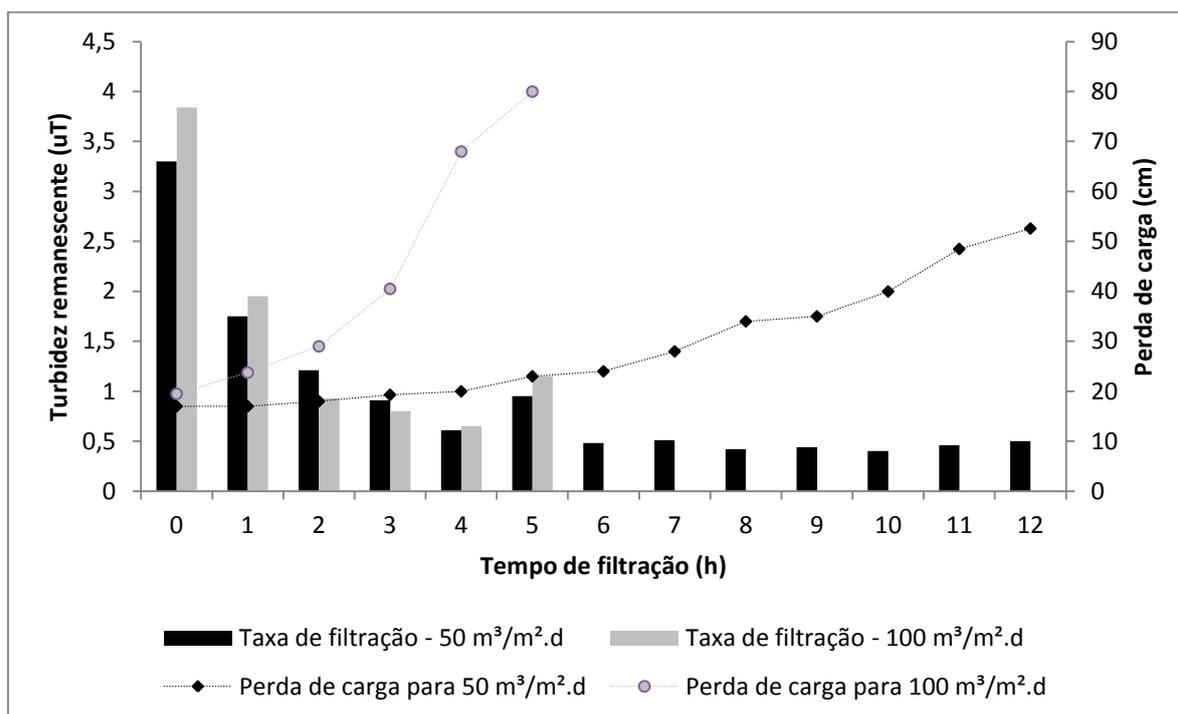
requerida é menor que 6 mg/L, em geral a água se adequa para a filtração direta, dosagens de coagulante entre 6 mg/L e 15 mg/L, estão numa faixa intermediária e se a dosagem de coagulante utilizada superar 20 mg/L, o uso da filtração direta é questionável, a menos que se preveja o emprego da dupla filtração. Diante disso, todas as doses usadas neste experimento foram menores que 15 mg/L, justificando o uso desta tecnologia, embora a melhoria das outras condições operacionais, por exemplo, pH pudessem ter contribuído para doses ainda menores, porém não foi feito tal ajuste devido a dificuldades inerentes a isso olhando para a aplicabilidade em comunidades rurais.

A partir dos dados do **Apêndice E** pode-se inferir que a melhor dose de sulfato de alumínio para a coagulação da água Tipo I foi a de 10 mg/L, que permitiu a produção de efluente com aproximadamente 0,76 uT. Entretanto, verificou-se que com a dose de 5 mg/L de sulfato de alumínio pode-se produzir água com turbidez abaixo de 1,5 uT em bancada, que se mostrou favorável para a produção de água filtrada com turbidez < 1,0 uT na estação piloto, uma vez que foi considerada a maturação do filtro resultante da retenção de impurezas durante o processo. Ressalta-se que devido a menor turbidez da água Tipo I não foram realizados experimentos com coagulação em escala piloto, visto que nos ensaios sem coagulação já foram encontrados valores de turbidez remanescentes baixos.

Para os ensaios de filtração direta da água Tipo II foi escolhida a dose de 5 mg/L, que apresentou turbidez efluente < 2,5 uT em bancada conforme pode ser observado no **Apêndice F**. Os experimentos na escala piloto foram conduzidos nas taxas de filtração de 50 e 100 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> para a água bruta de 50 uT. Na **Figura 5.13** constata-se que ambas as taxas de filtração conseguiram produzir água com turbidez remanescente < 1,0 na maior do tempo monitorado.

A taxa de filtração de 100 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> favoreceu a rápida maturação do filtro sustentada pela turbidez efluente menor que 1,0 uT na segunda hora de filtração, enquanto que a taxa de 50 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> apresentou valores similares de turbidez efluente a partir da terceira hora. Em compensação, a menor taxa de filtração concorreu para menor perda de carga, maior carreira de filtração (> 12 horas) e maior produção efetiva de água com turbidez remanescente menor que 1,0 uT, enquanto que a taxa de 100 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> registrou a carreira de 5 horas e só produziu água com valor de turbidez em referência durante duas horas. Uma situação diferente foi verificada na pesquisa de TEXEIRA *et al.* (2004) em que o incremento de taxa de filtração de 180 para 240 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> na filtração direta descendente, permitiu a produção de maior percentual de água com turbidez menor que 0,5 uT.

**Figura 5.13** - Filtração da água Tipo II com 5 mg/L de sulfato de alumínio

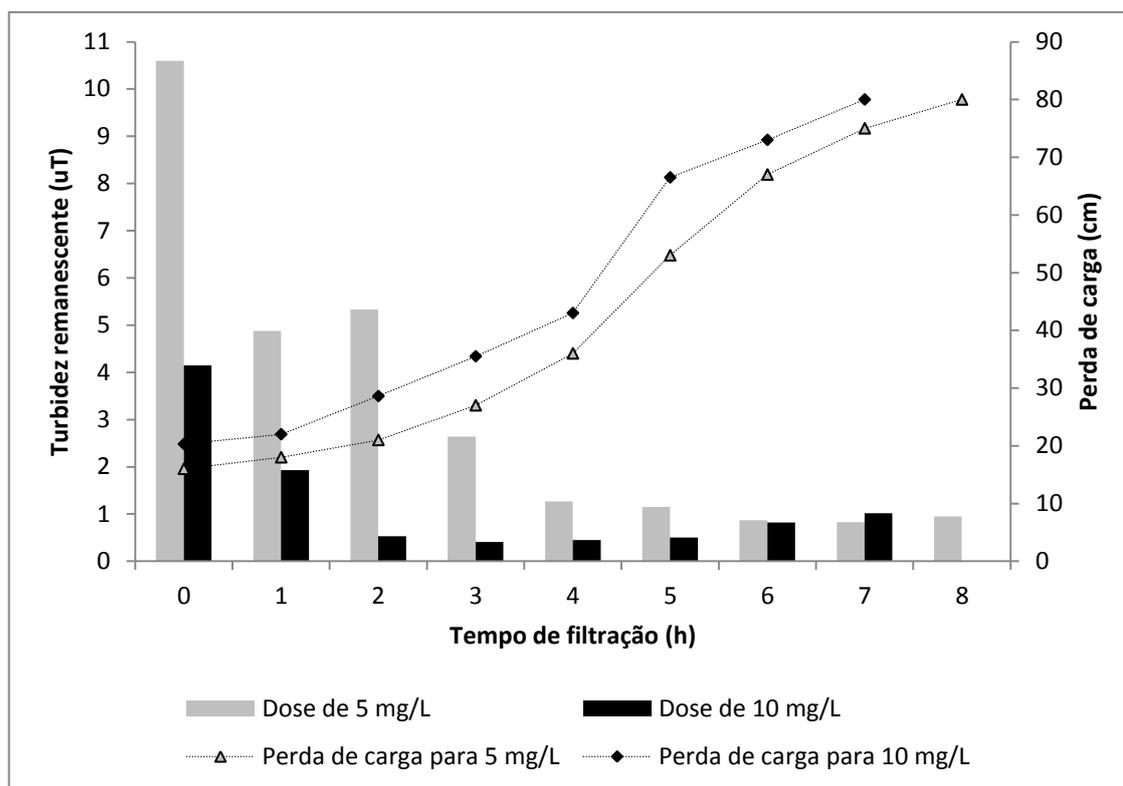


Fonte: Apêndice H

Para a água Tipo III foram escolhidas duas doses de sulfato de alumínio (5 e 10 mg/L) como pode ser visto no **Apêndice G**. Para ambas as doses realizaram-se experimentos com mesma taxa de filtração ( $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) para verificar se a adoção da dose ligeiramente inferior a ótima encontrada nos ensaios de bancada pode favorecer a redução da quantidade de coagulante em escala piloto sem prejudicar a qualidade do efluente.

A esse respeito, concluiu-se que a dose definida nos ensaios de coagulação em bancada favorece a produção de água com valor inferior a 1,0 uT em menor tempo de operação (2 horas), enquanto que a outra dose não se mostrou adequada para a produção de água com turbidez inferior que 1,0 uT, pois os valores nesta ordem de grandeza foram registrado seis horas depois. embora na dose de 10 mg/L a carreira de filtração tenha sido menor, a perda carga teve o mesmo comportamento nos dois casos, pois essa diferença foi observada no início de filtração conforme ilustrado na **Figura 5.14**. Contudo, uma análise profunda e caso a caso deve ser feita para aferir a aplicabilidade da teoria de (WAGNER & HUDSON JR, 1982) que relaciona as doses menores estarem associadas ao melhor desempenho da filtração direta. Pois este argumento deve considerar as condições de coagulação ótimas verificadas nos ensaios em bancada, pois dose de coagulantes abaixo ou acima do ótimo contribuem para a menor eficiência da filtração direta em MSNT bem como em outros meios filtrantes.

**Figura 5.14** – Filtração da água Tipo III em distintas doses de coagulante ( $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )



Fonte: Apêndice I

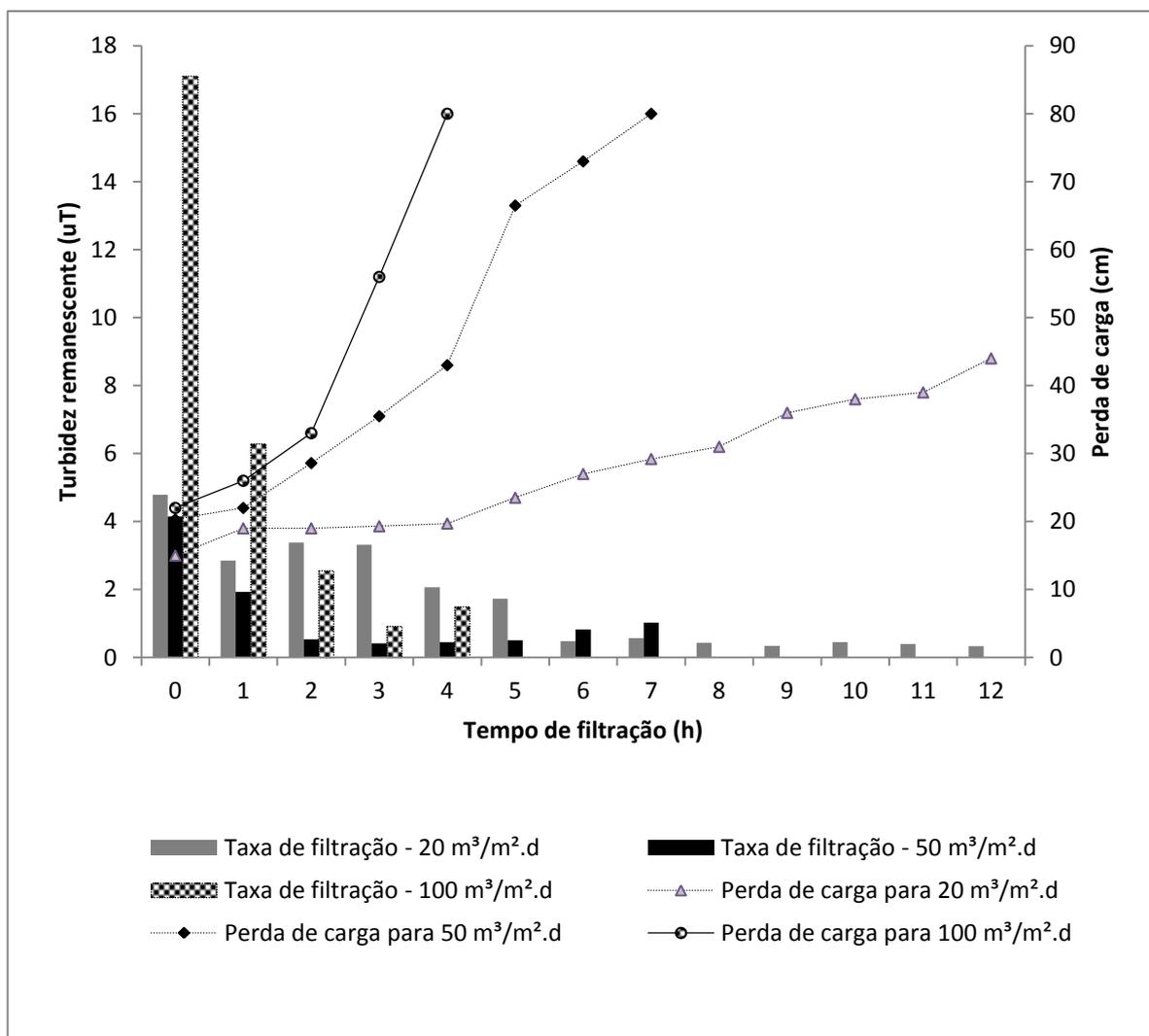
Finalmente, adotou-se a dose de sulfato de alumínio 10 mg/L que permitira a produção de água filtrada com turbidez menor que 1,6 uT nos ensaios em bancada. A água coagulada com esta dose foi submetida às taxas de 20, 50 e  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , com vista a aferir se o aumento da taxa de filtração influencia a qualidade da água filtrada pela manta ou se as taxas de filtração baixas concorrem para longas carreiras de filtração que, por sua vez, podem favorecer a produção de maior volume de água.

Constatou-se a partir da **Figura 5.15** que as três taxas lograram a produção de água com valores de turbidez inferior que 1,0 uT, mas a maior taxa de filtração mostrou-se menos eficiente que as demais, porque ela só apresentou desempenho satisfatório em curto intervalo de tempo (na terceira hora de filtração) e sua carreira de filtração foi muito curta (4 horas). No que concerne à qualidade da água filtrada apresentou um comportamento quase similar com os resultados observados por PÁDUA (2001), numa investigação experimental com coagulação, floculação e filtração em instalação piloto, onde se constatou que a qualidade da água produzida em unidades de filtração de alta taxa, não é afetada substancialmente quando se adotam taxas de até  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , desde que a água seja adequadamente pré-condicionada. A maior carga de impurezas que aflui ao meio filtrante em menor tempo de

operação para taxas de filtração elevadas pode favorecer a rápida maturação do filtro, contudo essas taxas podem concorrer para a ocorrência de transpasse no leito filtrante, que deprecia a qualidade da água filtrada.

Na taxa de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  verificou-se uma demora na maturação do filtro, concorrendo para a produção tardia do efluente com turbidez inferior que  $1,0 \text{ uT}$ , isto foi acompanhado pela menor perda de carga que culminou em carreira de filtração mais longa que as demais taxas. Enquanto que a taxa de  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  mostrou-se mais eficiente que as demais no que tange ao tempo de maturação do meio filtrante, uma vez que a partir da segunda hora de filtração observou-se turbidez menor que  $1,0$  e esta manteve-se estável até o fim da carreira de filtração e isso contribuiu para a maior produção efetiva da água com esta taxa de filtração do que com a de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .

**Figura 5.15** - Filtração da água Tipo III com a dose de  $10 \text{ mg/L}$  de sulfato de alumínio



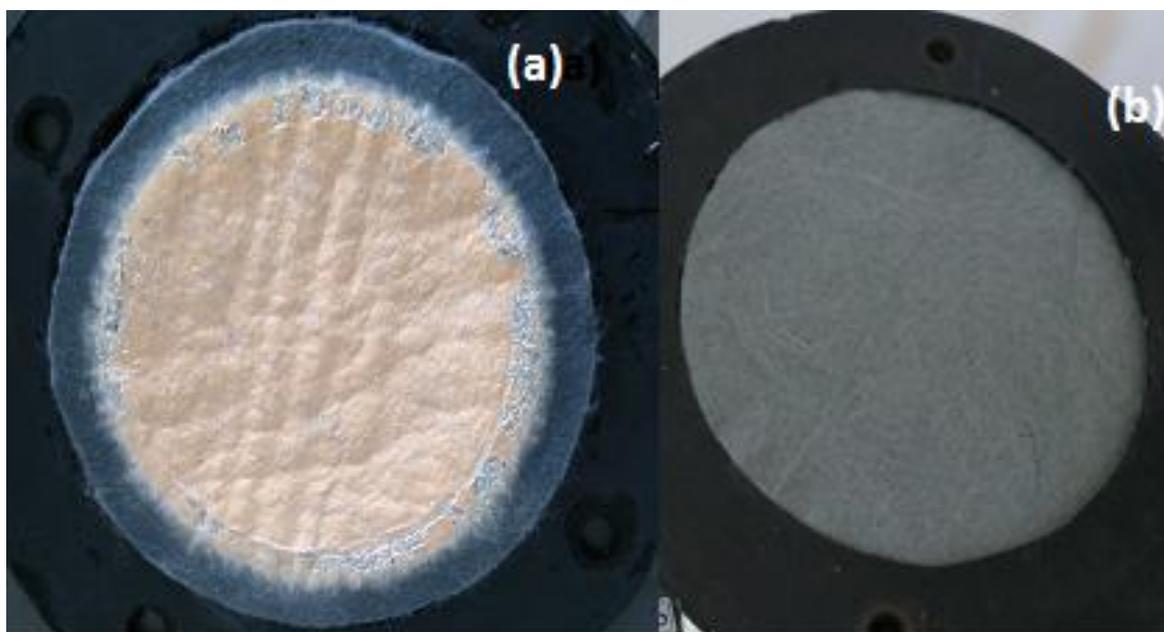
Fonte: Apêndice J

## 5.6 Evolução das perdas de carga e carreiras de filtração na manta

A remoção de impurezas pelo meio filtrante resulta na perda de carga, podendo ser mais pronunciada ou não de acordo com as características da água bruta ou de meio filtrante. Em geral, a perda de carga registrada em todas as situações testadas sem coagulação não foi superior a 30 cm, isto é, houve menor remoção de turbidez da água. Todavia, este parâmetro passou a ser considerável nos testes com água previamente coagulada.

A **Figura 5.16** exhibe a capacidade de remoção de impurezas da manta quando submetida à filtração direta com coagulação na taxa de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . No lado esquerdo (a), onde afluía a água bruta, visualiza-se a maior concentração de impurezas ou camada de impurezas, que concorre para maior eficiência de remoção de partículas na água e, por outro lado, concorre para maior perda de carga de acordo com a taxa de filtração e espessura da manta. Porém no lado direito (b) da mesma figura, observa-se que mesmo após atingir a perda de carga máxima, isto é, fim da carreira de filtração, não se vislumbrou a presença de impurezas resultantes de possível transpasse.

**Figura 5.16** – Camada de impurezas formada na superfície da manta durante a filtração da água tipo III em  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$



Noutra vertente, verificou-se que as mantas oferecem uma boa perspectiva para a sua reutilização, para o efeito sugere-se o uso de lavagem por fluxo reverso, mas a lavagem manual mostrou-se eficaz para as mantas de pequenas dimensões como as usadas nesta pesquisa. Para as mantas em questão foi usada água da torneira para a sua limpeza e verificaram-se resultados satisfatórios de produção efetiva de água (**Tabela 5.8**). A taxa de  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  teve uma produção efetiva relativamente superior em relação as demais taxas de

filtração, porém deve se considerar que a taxa de  $20 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  possivelmente supere o valor observado durante estes ensaios, pois não se explorou todo o tempo de carreira de filtração.

**Tabela 5.8** – Produção efetiva da água Tipo III submetida à taxa de filtração de  $50 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$

Taxa de filtração ( $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ )	Volume da água total produzido (Litros)	Volume médio gasto na lavagem (Litros)	Produção efetiva (%)
20	78,5	6,0	92,37
50	98,13	6,0	93,89
100	163,0	8,0	91,85

Nos ensaios envolvendo água sem coagulação bem como a água previamente coagulada, quando submetidas a filtração em M8, foram constatadas as seguintes situações:

O menor tamanho de partículas que estão associadas à turbidez da água resultante da adição de caulim, dificultou a sua remoção pelo meio filtrante, concorrendo deste modo para as menores perdas de carga verificadas e conseqüentemente maiores carreiras de filtração.

A outra constatação está relacionada aos flocos resultantes da prévia coagulação da água, que aumentaram o tamanho das partículas da água bruta, melhorando por via disso o desempenho da manta na remoção de turbidez. Porém, esta maior eficiência deve estar associada à otimização dos parâmetros operacionais envolvidos, por exemplo:

A relação superfície específica e espessura da MSNT com vista à obtenção de carreiras de filtração mais longas. Pois, segundo GRAHAM *et al.* (1991) aferiram, existe uma relação entre essas duas propriedades quando se pretende otimizar o desempenho dos filtros lentos no que concerne ao aumento da carreira de filtração da MSNT, tendo observado esse ponto ótimo quando a superfície específica da MSNT variou de  $13.000$  a  $14.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

A diminuição do tamanho médio do meio filtrante e o aumentando da profundidade do filtro aumenta a eficiência de remoção, isto é, o aumento de número de coletores pode favorecer a taxa de captura de partículas. Por outro lado, a diminuição do tamanho médio do meio filtrante também aumenta a oportunidade de contato entre as partículas e grãos, devido à difusão e interceptação (WHO, 2004).

### 5.7 Qualidade da água filtrada pela manta

A Tabela 5.6 apresenta os valores mínimos, medianos e máximos dos parâmetros monitorados na água filtrada pela MSNT. Desses valores, os mínimos correspondem à fase de maior eficiência de filtração (filtro maduro), enquanto que os máximos e os medianos são concernentes às fases inicial e final, respectivamente. Em geral, os valores na fase de filtro maduro cumprem com as normas vigentes para a potabilização da água em alguns países em

desenvolvimento.

Neste contexto, o uso deste tipo de MSNT para filtração direta e filtração lenta de acordo algumas condições que foram testadas, pode figurar como sendo uma alternativa para as pequenas comunidades rurais desprovidas de água potável de vários países em desenvolvimento que se balizam em padrões de OMS. Ademais, países como Moçambique, que tem sido assolado ciclicamente por calamidades naturais e consequentes reassentamentos em locais que na sua maioria carecem de água potável, justifica-se o emprego de técnicas alternativas de potabilização de água que sejam de baixo custo e fáceis de operar.

**Tabela 5.9** – Valores mínimos, medianos e máximos das características da água filtrada

Parâmetro	Mínimo		Mediana		Máximo	
	SC <sup>4</sup>	CC <sup>5</sup>	SC	CC	SC	CC
Turbidez remanescente (uT)	1,79	0,33	5,81	0,675	27,3	17,1
Cor aparente (uH)	5,0	0,04	35	7,0	102,0	24
pH	6,71	7,32	8,11	7,89	8,56	8,02
Temperatura (°C)	20,3	24,4	24,2	27,1	27,2	28,7

Fonte: Apêndice K

### *Turbidez*

A turbidez nesta pesquisa figura como o principal parâmetro indicador da eficiência do tratamento de água por filtração em MSNT, corroborando com as diversas normas mundiais para água de consumo humano que relacionam a remoção desta característica física com a de cistos e oocistos de protozoários (LIBÂNIO, 2010). Por outro lado, turbidez efluente baixa tem sido correlacionada ao maior desempenho da estação visando à otimização da desinfecção. Uma vez que, a turbidez natural atua como escudo dos microrganismos patogênicos e diminuindo desse modo a ação do desinfetante (BRASIL, 2006). Na **Tabela 5.8** visualiza-se que para a filtração direta com coagulação, os valores de turbidez mínimo e mediano de turbidez são menores que 1,0 uT, enquadrando-se na norma brasileira vigente (Portaria 2914 MS de 2011), enquanto que na filtração sem coagulação, apenas valores mínimo da turbidez registrada cumprem com o padrão moçambicano (Diploma Ministerial 180/2004 do MS de Moçambique) cujo o limite máximo estabelecido é de 5,0 uT.

### *Cor aparente*

Diversas pesquisas advogam que a presença da cor em teores expressivos podem dificultar a

<sup>4</sup> Ensaios de filtração sem coagulação

<sup>5</sup> Ensaios de filtração com coagulação

manutenção de concentração residual do cloro nas redes de distribuição e favorecer a formação de subprodutos indesejados da desinfecção. Partindo desse pressuposto e por razão estética, a Portaria 2914 MS de 2011 recomenda o valor máximo de 15 uH deste parâmetro no que corresponde a água tratada para o consumo humano. Portanto, de acordo com os valores da **Tabela 5.9**, infere-se que a MSNT utilizada produziu água com valores de cor aparente que atendem o limite acima sugerido. Contudo, importa vincar que a cor da água utilizada para esta pesquisa não foi de origem orgânica que normalmente é de difícil remoção.

### *pH*

Este parâmetro tem sido correlacionado aos problemas de corrosão e incrustação para valores baixos e elevados, respectivamente, o que torna o monitoramento de pH relevante na ETA. Por isso, a Portaria MS 2914 de 2011 no que concerne a potabilidade da água recomenda o intervalo de variação de 6,0 a 9,5. Na **Tabela 5.9** percebe-se que o pH durante os experimentos manteve-se na margem permitida na norma acima citada.

Em suma, o uso deste tipo de MSNT para filtração de acordo com a turbidez da água bruta que foi testada nestes ensaios pode ser uma alternativa para as pequenas comunidades rurais de vários países em desenvolvimento desprovidas de água potável e que se balizam em padrões de OMS para a potabilização da água. Todavia, devem ser integradas algumas melhorias tanto pelos pesquisadores quanto pelos fabricantes para adequar estes meios fibrosos sintéticos para este fim, uma vez que as mantas testadas foram projetadas para a filtração de água para fins não potáveis.

De acordo com os fabricantes, existe disponibilidade e flexibilidade por parte da empresa no desenvolvimento das mantas que possam estar voltadas ao tratamento de água para o consumo humano, considerando as condições técnicas e operacionais nelas associadas.

## 6 CONCLUSÕES

Os ensaios para pré-seleção da manta mostraram-se como uma etapa importante para escolher a MSNT com base no seu desempenho em condições aproximadas às que ela posteriormente seria submetida. Na fase de pré-seleção, foi escolhida a manta M8, que apresentou diferença significativa para o nível de significância de 5% em relação às demais mantas no que concerne a capacidade de remoção de impurezas na água Tipo I (10,0 uT), sem coagulação e com filtração por 12 horas à taxa de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .

No que corresponde aos ensaios de filtração pela manta M8 sem coagulação prévia da água bruta, verificou-se que a taxa de filtração de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  permitiu a produção da água com melhor qualidade em termos de turbidez e cor aparente do que as demais taxas. No entanto, a taxa de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  não apresentaram eficiência de remoção significativamente diferente para o nível de significância de 5% para a água bruta Tipo III. Por outro lado, a água Tipo III em filtração na taxa de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , proporcionou a ocorrência de valores de turbidez efluente baixos em menor tempo de filtração do que as demais taxas. Ressalta-se que para todas as três taxas de filtração não se verificaram perdas de cargas expressivas durante o tempo monitorado, o que está relacionado com a menor remoção de impurezas que se registrou nesses experimentos.

De modo geral, os resultados encontrados na filtração sem coagulação não atendem o padrão de potabilidade do Brasil, porém em alguns casos foram obtidos valores de turbidez  $\leq 5,0$  uT, que atende a norma vigente em países em desenvolvimento que se baseiam nos padrões de OMS.

Nos ensaios de filtração direta com prévia coagulação da água, para a água Tipo II e dose de coagulante de 5 mg/L de sulfato de alumínio, a taxa de  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  foi mais eficiente no que concerne a produção efetiva de água com turbidez menor que 1,0 uT. Essa ocorrência foi verificada também nos ensaios com a água Tipo III, onde se empregou 10 mg/L de Sulfato de alumínio na coagulação para as três taxas de filtração (20, 50 e  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ). A taxa de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  apresentou carreira de filtração mais longa, mas foi caracterizada pela demorada na fase de maturação do meio filtrante.

Noutra vertente, a redução da dose de coagulante de 10 para 5 mg/L de sulfato de alumínio não incrementou a eficiência de filtração direta, visto que não possibilitou melhorar a qualidade do efluente, embora tenha apresentado uma ligeira vantagem pelo aumento na duração da carreira de filtração.

Em suma, todos os ensaios de filtração direta com coagulação permitiram a produção de água que satisfaz o padrão brasileiro de potabilidade da água para o consumo humano, no que tange aos parâmetros analisados (turbidez, cor aparente e pH), e conseqüentemente a água produzida cumpre com as exigências do padrão da OMS, que é menos exigente que o acima citado.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam a potencialidade do emprego de manta sintética não tecida no tratamento de água com turbidez elevada, justificando o desenvolvimento de outros trabalhos para aprimoramento desta técnica. Partindo da experiência adquirida nesta pesquisa, recomendam-se os seguintes estudos:

- Avaliar o desempenho das mantas em termos de qualidade do efluente e de evolução da perda de carga em função do aumento da espessura do meio filtrante pelo incremento de número de mantas dispostas em série;
- Estudar o emprego de outros tipos coagulantes com perspectiva de melhorar a qualidade da água e reduzir custos e a quantidade de lodo durante o tratamento;
- Estudar a influência do tipo de fibra e do processo de fabricação das mantas na qualidade do efluente e na evolução da perda de carga durante a filtração;
- Analisar a eficiência das mantas na remoção de outros parâmetros que norteiam a qualidade de água para o consumo humano.
- Estudar a possibilidade do uso da lavagem em contra fluxo e aplicação da manta em águas naturais ou escala real.

## REFERÊNCIAS

ABINT - Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos. Disponível em <http://www.abint.org.br/naotecidos.html>. Acessado em Abril de 2013.

AMIRTHARAJAH, A. Some theoretical and conceptual views of filtration. *Journal of American Water Works Association*, vol. 80, n. 12, p.35-46, Dec. 1988.

AWWA, WEF & APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21<sup>st</sup>. ed. Washigton, Dc. 2005.

ARORA, H *et al.* (1998). *Application of Particle Counting to Enhance Water Treatment Operations*. Voorhees, NJ, American Water Works Service Company, Inc.

BRASIL - Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para o consumo humano**. Brasília, 2006. 212p.

BRASIL - Ministério da Saúde Portaria N° 2914, de 12 de dezembro de 2011. **Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade e dá outras providências**. 2011.

BOLLMANN, H. A & EDWIGES, T. *Avaliação da qualidade das águas do rio Belém, Curitiba-PR, com emprego de indicadores quantitativos e perceptivos*. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental - Scielo. Vol. 13 – N° 4. 2008. p443 – 452

CALLEGARI-JACQUES, S. *Bioestatística: princípios e aplicações*. Porto Alegre: Artmed, 2003, 255 p.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L.W. *Applied Hydrology. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering*. 1988. p39-40.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA N° 357**. 2005.

COSTA, C. M. L. *et al.* *Uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, n° 2, p. 158-169, 2008.

DE BRITO, L. L. A., CARDOSO, A. B., SALVADOR, D. P & HELLER, L. *Amadurecimento de filtros lentos de areia e remoção de microrganismos indicadores de qualidade da água ao longo da profundidade do leito: uma avaliação em Instalação piloto*. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental-Scielo. Vol.10 - N° 4. 2005, p307-317

DEPARTMENTS OF THE ARMY AND THE AIR FORCE (DAAF). *Engineering use of geotextiles*. Technical Manual. NO. 32-1030 WASHINGTON, DC, 1995. p 1-3 a 3-2

DI BERNARDO, Luiz (coordenador). **Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas**. PROSAB. 1999

DI BERNARDO, Luiz; BOJORGE, C. R. *Uso de mantas sintéticas em pré-filtros de pedregulho para pré-tratamento de águas de abastecimento*. ABES- Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2000

DI BERNARDO, Luiz (coordenador). **Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta**. PROSAB 3. RIMA Editora. Rio de Janeiro, 2003, 498 p.

- DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Ângela Di Bernardo. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2ª edição São Carlos, SP: Rima, 2005. 1565 p.
- DI BERNARDO, Luiz. *Métodos e técnicas de Tratamento de Água*. Vol. II. Rio de Janeiro. ABES, 1993.
- DI BERNARDO, Luiz; BOJORGE, C. R. *Uso de mantas sintéticas em pré-filtros de pedregulho para pré-tratamento de águas de abastecimento*. ABES-Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2000
- FERRAZ, C. F. & PATERNIANI, J. E. S. *Eficiência da filtração lenta em areia e manta não tecida no tratamento de águas de abastecimento para pequenas comunidades*. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES/RS, 2000.
- FLUET, J. E. Jr. ASTM Committee D -35 on Geotextiles, Geomembranes, and Related Products, ASTM Symposium on Geotextile Testing and the Design Engineer and Series. Los Angeles, CA. 1985. p7-9
- FREEZE, R. A. & J. A. CHERRY, *Groundwater*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1979.
- GIROUD, J.P. *Development of criteria for geotextile and granular filters*. Proc. 9<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Guarujá, Brasil. 2010
- GRAHAM, N.J.D.; MBWETTE, T.S.A. Protected slow sand filtration: specification of non-woven synthetic fabric layers. *Water Supply*, v.8, Jönköping. 1990. p157-164;
- GRAHAM, N.J.D.; MBWETTE, T.S.A.; DI BERNARDO, Luiz. Fabric protected slow sand filtration: a review. In: *Slow Sand Filtration - an international compilation of recent scientific and operational developments*. American Water Works Association. 1994. p.95-105.
- HAPPEL J. *Viscous flow relative to arrays of cylinders*. J. AIChE 5: 1959. p174–177
- HUISMAN, L & WOOD, W.E. **Slow sand filtration**. World Health Organization (WHO), Geneva. 1974. 119 p
- HUTTEN, Irwin Marshall. **Handbook of nonwoven filter media**. 1ª edição Oxford, UK: Elsevier, 2007. 33p.
- LEWIS, M. A.; CHENEY, C. S. & ÓDOCHARTAIGH, B. É. *Guide to Permeability Indices*. British Geological Survey Open Report, CR/06/160N. United Kingdom. 2006. 29p.
- LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas, São Paulo. Editora Átomo, 3ª edição. 2010. 494 p.
- KUASNE, Angela. **Fibras Têxteis**. Curso têxtil em malharia e confecção. 2º Módulo. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Unidade de Araranguá. Araranguá. 2008
- MATILAINEN, Anu; VEPSÄLÄINEN, Mikko; SILLANPÄÄ, Mika. *Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review*. Advances in Colloid and Interface Science. **Science**, Finland, v. 159, n. 2, p.189-197, 2010.
- MOÇAMBIQUE – Diploma Ministerial 180/2004 do Ministério de Saúde de Moçambique. **Padrões de qualidade de água em Moçambique**. 2004

MURTHA, Ney Albert; Heller, Leo & LIBÂNIO, Marcelo. *A filtração lenta em areia como alternativa tecnológica para o tratamento de águas de abastecimento no Brasil*. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Foz de Iguaçu. 1997. 15p

NASCIMENTO, Ana Paula do; PELEGRINI, Ronaldo Teixeira; BRITO, Núbia Natália de. *Filtração lenta para o tratamento de água para pequenas comunidades rurais*. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Brasil, v. 2, n. 4, 2012, p54-58.

NDWC - National Drinking Water Clearinghouse. *Slow sand filtration*. Tech Brief. Fourteen. June 2000. 4p

OLIVEIRA, Vanessa de Menezes *et al*. *Avaliações físicas, químicas e biológicas da microbacia do Córrego Modeneis em Limeira - SP*. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 5, n. 1, p.1-11, 2008.

PÁDUA, Valter Lúcio. *Tratamento de água de abastecimento*. Apostila. Edição não publicada. Disponível em <http://pt.scribd.com/doc/59568371/27/Mecanismos-da-filtracao-em-meio-granular>. Acessado em 07 de Novembro 2012.

PÁDUA, Valter Lúcio & HELLER, Leo. **Abastecimento de água para consumo humano**. 2ª edição. Ver. 2 v. Ed. e atual. Editora UFMG. Belo Horizonte. 2010.

PÁDUA, Valter Lúcio (coordenador). **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e micros contaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para o consumo humano**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 504 p.

PÁDUA, Valter Lúcio. *Emprego de mantas sintéticas nos estudos de tratabilidade de água quimicamente coagulada*. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Foz de Iguaçu. 1997. 14p

PÁDUA, Valter Lúcio. **Filtração Direta Descendente – Investigação experimental da coagulação, floculação e filtração em instalação piloto**. Relatório de atividades– PROSAB 3. Universidade Federal do Ceará, 2001.

PALMEIRA, Ennio M.; TATTO, Janaina; ARAUJO, GregorioL.s..*Sagging and filtration behaviour of nonwoven geotextiles overlying different bedding materials*. **Science**: Elsevier, 70910-900 Brasilia, Df, Brazil, n. , p.1-14, 2012.

PATERNIANI, J. E. S & DA CONCEIÇÃO, C. H. Z. **Utilização da pré-filtração e filtração lenta no tratamento de água para piscicultura**. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Vitória-ES, 2002. 5p

PATERNIANI, J. E. S. & DA CONCEIÇÃO, C. H. Z. *Eficiência da pré-filtração e filtração lenta no tratamento de água para pequenas comunidades*. Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, 2004.

PATERNIANI, J.E.S. *Utilização de mantas sintéticas não tecidas na filtração lenta em areia de águas de abastecimento*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP,1991. 245p.

PEREIRA, S. P. *Tratamento de água com alta concentração de cianobactérias por meio da filtração lenta*. Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Saneamento Ambiental, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará, 2005. 104p.

PEREIRA, Maria Adelina. **Cartilha de Costurabilidade. Uso e Conservação de Tecidos para Decoração**. 2ª Edição, *Comitê de Tecidos para Decoração da ABIT (Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção, 2011*.

PYPER, R.G. & LOGSDON, G.S., **Slow sand filter design**, in LOGSDON, G. S. in: *Slow Sand Filtration*. American Society of Civil Engineers, New York. 1991. p 122-148

RICHTER, C. A: **Métodos e Tecnologia de Tratamento**. São Paulo. Editora Blucher, 2009. 99 p.

SATO, A., WANG, R., MA, H., HSIAO, B. S. & CHU, B. *Novel nanofibrous scaffolds for water filtration with bacteria and virus removal capability*. *Journal of Electron Microscopy*, Vol. 60, N° 3. Oxford University Press. 2011. 9 p

TEXEIRA, Ana Raquel *et al*. Tratabilidade de água com baixa turbidez por filtração direta ascendente e descendente. **Aidis. Forjando El Ambiente Que Compartimos**, Porto Rico, 2004. p.1-9

VALENCIA, J. A. **Teoria, diseño y control de los procesos de clarificación del agua**. Departamento de ingeniería y ciencias del ambiente. Cento Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Organización pan-americano de la salud. Washington. 1973

VIANA, M. R.. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 3ª Belo Horizonte: Imprimatur, 1997. 567 p.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3º ed., UFMG, Belo Horizonte, 2005.

WAGNER, E. G., HUDSON JR., H. E. Low-dosage high-rate direct filtration. *Journal of American Water Works Association*, May 1982, 256p.

WALDMAN, E. A. **Usos da vigilância e da monitorização em saúde pública**. Informe Epidemiológico do SUS, ano VII, n. 3, 1998, p7-20

World Health Organization (WHO). *Guidelines for Drinking-water Quality. Recommendations*. . Vol. 1. 3<sup>rd</sup> ed. Geneve. 2004. 494p.

## APÊNDICES

**Apêndice A – Características da água bruta usada na pesquisa**

Água	Turbidez (uT)	pH	Temperatura (°C)	Cor aparente (uH)	Dureza Ca <sup>+2</sup> (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
Tipo I	10 ± 1	8,1	27,0	43,0	19,0	35,0
	10 ± 1	8,2	25,5	41,0	15,0	21,0
	10 ± 1	8,1	25,7	42,0	20,0	32,0
<b>Mediana</b>	<b>10 ± 1</b>	<b>8,1</b>	<b>25,7</b>	<b>42,0</b>	<b>19,0</b>	<b>32,0</b>
Tipo II	50 ± 2	7,4	23,3	136,0	34,0	36,0
	50 ± 2	7,2	24,1	127,0	25,0	31,0
	50 ± 2	8,3	22,3	123,0	33,0	36,0
	50 ± 2	8,2	27,5	170,0	26,0	37,0
	50 ± 2	7,8	25,3	146,0	26,0	35,0
<b>Mediana</b>	<b>50 ± 2</b>	<b>7,8</b>	<b>24,1</b>	<b>136,0</b>	<b>26,0</b>	<b>36,0</b>
Tipo III	100 ± 5	8,2	24,1	327,0	26,0	51,0
	100 ± 5	7,8	24,4	281,0	24,0	46,0
	100 ± 5	8,0	24,2	301,0	27,0	49,0
	100 ± 5	7,8	24,8	281,0	24,0	39,0
	100 ± 5	7,98	25,3	306,0	34,0	45,0
	100 ± 5	7,9	25,8	285,0	30,0	4,8
	100 ± 5	8,3	26,3	319,0	36,0	46,0
<b>Mediana</b>	<b>100 ± 5</b>	<b>8,0</b>	<b>24,8</b>	<b>301,0</b>	<b>27,0</b>	<b>46,0</b>

**Apêndice B – Percentagem de remoção de turbidez na água Tipo II pelas mantas em taxa de filtração de 20 m<sup>3</sup>m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>**

Tempo de filtração (min)	Percentagem de remoção de turbidez (%)							
	Manta Sintética Não Tecida							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
10	52,80	53,00	63,30	63,20	63,20	63,30	76,40	74,80
20	53,20	58,40	63,50	65,60	65,60	63,50	78,20	76,40
30	55,80	60,80	64,10	65,80	65,80	64,10	79,20	79,40
40	58,40	63,60	61,10	65,20	65,20	61,10	79,00	80,78
50	58,80	65,00	63,90	66,00	66,00	63,90	80,34	81,12
60	58,60	64,40	62,30	65,60	65,60	62,30	79,20	81,58
70	58,80	65,20	63,10	65,40	65,40	63,10	79,80	81,70

**Apêndice C: Remoção de turbidez da água Tipo I pelas mantas M7 e M8**

<b>Tempo (h)</b>	<b>M7</b>	<b>Perda de carga (cm)</b>	<b>M8</b>	<b>Perda de Carga (cm)</b>
0	9,3	7,5	6,7	12,0
1	5,93	8,0	3,02	12,3
2	5,0	8,0	2,91	12,5
3	5,59	8,3	2,59	12,6
4	3,9	9,3	2,63	12,6
5	4,03	9,7	2,35	12,9
6	3,75	10,0	2,53	13,0
7	3,1	10,0	2,44	13,2
8	3,24	10,2	2,57	13,2
9	2,97	10,3	2,64	13,4
10	3,33	10,3	2,4	13,7
11	3,4	10,5	2,51	14,0
12	3,28	10,5	2,71	14,2

**Apêndice D – Resultados dos ensaios de filtração sem coagulação na manta M8**

Tempo de filtração (h)	Efluente Tipo I		Efluente Tipo II		Efluente Tipo III	
	(uT)	Perda de carga (cm)	(uT)	Perda de carga (cm)	(uT)	Perda de carga (cm)
<b>Taxa de filtração de 5 m<sup>3</sup>.m<sup>2</sup>.d<sup>-1</sup></b>						
0	7,1	4,0	12,7	5,0	16,7	7,0
1	5,1	4,0	10,8	5,0	13,4	7,0
2	5,0	4,5	8,4	5,3	9,2	7,0
3	2,8	4,0	9,8	5,4	8,9	7,6
4	3,8	4,2	8,3	5,4	9,9	7,8
5	3,6	4,2	6,1	5,5	9,2	7,8
6	3,0	4,3	4,8	5,5	6,1	8,0
7	2,7	4,0	4,2	5,5	3,8	8,0
8	2,5	4,4	4,1	5,7	2,8	8,0
9	2,3	4,5	4,1	6,0	2,7	8,0
10	2,1	4,6	3,6	6,0	2,8	8,0
11	2,3	4,7	2,8	6,0	3,0	8,2
12	1,8	4,6	3,1	6,0	2,4	8,3
<b>Taxa de filtração de 20 m<sup>3</sup>.m<sup>2</sup>.d<sup>-1</sup></b>						
0	7,7	9,0	13,1	12,0	20,4	18,0
1	6,0	10,0	12,9	12,3	17,8	18,0
2	4,9	10,5	6,6	12,5	9,3	19,0
3	4,6	11,0	5,3	12,6	6,8	20,0
4	3,6	11,0	5,9	12,6	6,8	21,0
5	3,4	11,0	5,2	12,9	5,6	21,9
6	2,5	11,0	5,9	13,0	3,5	23,0
7	2,4	11,0	6,8	13,2	4,5	23,0
8	2,6	11,0	5,8	13,2	5,0	23,6
9	2,6	11,4	5,7	13,4	3,7	24,0
10	2,4	11,5	5,4	13,7	3,2	24,0
11	2,5	11,7	5,2	14,0	3,2	24,4
12	2,7	12,0	5,3	14,2	3,7	25,0
<b>Taxa de filtração de 50 m<sup>3</sup>.m<sup>2</sup>.d<sup>-1</sup></b>						
0	9,9	18,0	20,6	19,0	27,3	19,0
1	9,8	18,0	12,5	19,0	23,6	19,0
2	6,1	18,0	9,8	19,2	22,6	20,0
3	5,0	18,0	10,6	19,5	18,7	21,0
4	4,5	18,2	8,5	19,5	20,6	21,6
5	5,2	19,0	6,1	19,5	24,2	22,5
6	4,3	19,0	7,0	19,5	19,8	23,5
7	4,4	19,0	5,3	19,6	17,5	25,5
8	6,3	19,3	5,5	19,8	18,3	26,0
9	4,5	19,5	4,9	20,0	19,1	26,0
10	4,3	19,5	4,5	20,1	20,3	28,0
11	4,2	20,0	4,8	20,3	18,6	29,0
12	4,2	20,0	4,4	20,3	19,7	29,0

**Apêndice E - Determinação de doses coagulação em bancada para a água Tipo I**

<b>Sulfato de alumínio (mg/L)</b>	<b>Turbidez remanescente (uT)</b>	<b>pH</b>
5	1,3	7,49
5	1,4	7,55
5	1,3	7,57
7,5	1,2	7,41
7,5	1,2	7,39
7,5	1,2	7,33
10	0,7	7,22
10	0,7	7,19
10	0,8	7,20
15	1,0	7,12
15	1,0	7,08
15	1,1	7,06
20	1,0	6,83
20	1,2	6,89
20	0,9	6,94
30	1,2	6,69
30	1,0	6,73
30	1,1	6,71

**Apêndice F – Determinação de doses coagulação em bancada para água Tipo II**

<b>Sulfato de alumínio (mg/L)</b>	<b>Turbidez remanescente (uT)</b>	<b>pH</b>
5,0	2,5	7,46
5,0	2,5	7,54
5,0	2,4	7,52
7,5	1,7	7,50
7,5	1,8	7,40
7,5	1,8	7,30
10	1,9	7,25
10	2,0	7,22
10	2,0	7,24
15	2,5	7,12
15	2,9	7,11
15	2,5	7,11
20	2,0	6,99
20	2,1	6,95
20	2,1	6,94
30	3,3	6,71
30	3,6	6,73
30	3,6	6,77

**Apêndice G - Determinação de doses de coagulação em bancada para água Tipo III**

<b>Sulfato de alumínio (mg/L)</b>	<b>Turbidez remanescente (uT)</b>	<b>pH</b>
5	5,1	7,50
5	5,9	7,54
5	5,2	7,49
7,5	2,0	7,40
7,5	2,0	7,35
7,5	2,1	7,40
10	1,6	7,19
10	1,6	7,22
10	1,7	7,20
15	1,1	7,11
15	1,1	7,90
15	1,3	7,14
20	1,4	6,96
20	1,2	6,90
20	1,3	6,85
30	3,9	6,70
30	3,8	6,65
30	3,8	6,73

**Apêndice H - Ensaios de filtração da água Tipo II com 5 mg/L de sulfato de alumínio**

<b>Tempo de filtração (h)</b>	<b>50 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup></b>		<b>100 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup></b>	
	<b>Turbidez rema. (uT)</b>	<b>Perda de carga (cm)</b>	<b>Turbidez rema. (uT)</b>	<b>Perda de carga (cm)</b>
0	3,3	17,0	3,85	19,5
1	1,75	17,0	1,95	23,75
2	1,21	18,0	0,93	29,0
3	0,91	19,3	0,80	40,5
4	0,61	20,0	0,65	68,0
5	0,95	23,0	1,15	80,0
6	0,48	24,0		
7	0,51	28		
8	0,42	34		
9	0,44	35		
10	0,4	40		
11	0,46	48,5		
12	0,5	52,6		

**Apêndice I - Ensaio de filtração da água Tipo III com 10 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$** 

Tempo de filtração (h)	20 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>		50 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>		100 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d	
	Turbidez rema. (uT)	Perda de carga (cm)	Turbidez rema. (uT)	Perda de carga (cm)	Turbidez rema. (uT)	Perda de carga (cm)
0	4,79	15,0	4,15	20,3	17,1	22,0
1	2,85	19,0	1,93	22,0	6,28	26,0
2	3,38	19,0	0,53	28,6	2,55	33,0
3	3,32	19,3	0,41	35,5	0,91	56,0
4	2,06	19,7	0,45	43,0	1,49	80,0
5	1,73	23,5	0,5	66,5		
6	0,48	27,0	0,82	73,0		
7	0,57	29,2	1,02	80,0		
8	0,43	31,0				
9	0,34	36,0				
10	0,45	38,0				
11	0,39	39,0				
12	0,33	44,0				

**Apêndice J - Ensaio de filtração da água Tipo III com a taxa de 50 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>**

Tempo de filtração (h)	5 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$		10 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$	
	Turbidez remanescente (uT)	Perda de carga (cm)	Turbidez remanescente (uT)	Perda de carga (cm)
0	10,6	16	4,15	20,3
1	4,88	18	1,93	22
2	5,33	21	0,53	28,6
3	2,64	27	0,41	35,5
4	1,27	36	0,45	43
5	1,15	53	0,5	66,5
6	0,87	67	0,82	73
7	0,83	75	1,02	80
8	0,95	80		

**Apêndice K – Características da água filtrada pela MSNT**

Água	Sem coagulação			Com coagulação		
	pH	Temperatura (°C)	Cor aparente (uH)	pH	Temperatura (°C)	Cor aparente (uH)
<b>Tipo I</b>	8,12	27,1	27,0			
	8,11	27,2	11,0			
	8,18	27,1	9,0			
	8,20	26,4	30,0			
	8,41	26,7	17,0		Sem ensaios	
	8,56	26,6	18,0			
	8,39	20,8	12,0			
	8,19	20,7	7,0			
	8,08	20,5	5,0			
<b>Tipo II</b>	7,60	24,1	33,0	7,89	27,1	0,04
	7,53	23,3	36,0	7,76	27,2	0,07
	7,82	22,1	35,0	7,77	26,9	0,08
	7,14	24,8	74,0	7,50	27,4	19,0
	7,13	24,6	56,0	7,50	27,4	7,0
	7,60	24,7	41,0	7,32	27,2	23,0
	8,19	23,6	57,0			
	8,20	25,1	40,0			
	8,39	23,7	29,0			
<b>Tipo III</b>	7,6	24,7	38,0	7,59	24,6	24,0
	6,71	25,4	14,0	7,98	26,5	2,0
	7,12	24,2	16,0	7,89	27,6	3,0
	8,13	23,4	91,0	7,94	24,4	13,0
	8,09	24,3	98,0	7,89	25,9	7,0
	8,0	23,9	102,0	7,95	26,9	9,0
	8,11	20,4	87,0	7,90	28,7	15,0
	8,22	20,6	70,0	7,98	26,2	6,0
	7,95	20,3	56,0	7,94	27,1	17,0
				8,02	27,6	0,08
			7,94	26,9	0,1	
<b>Mediana</b>	<b>8,11</b>	<b>24,2</b>	<b>35,0</b>	<b>7,89</b>	<b>27,1</b>	<b>7,0</b>
<b>Mínimo</b>	<b>6,71</b>	<b>20,3</b>	<b>5,0</b>	<b>7,32</b>	<b>24,4</b>	<b>0,04</b>
<b>Máximo</b>	<b>8,56</b>	<b>27,2</b>	<b>102,0</b>	<b>8,02</b>	<b>28,7</b>	<b>24,0</b>