

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**USO DE COAGULANTE EXTRAÍDO DE SEMENTES DE
Moringa oleifera COMO AUXILIAR NO TRATAMENTO DE
ÁGUA POR FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS**

MONALISA FRANCO

CAMPINAS

AGOSTO DE 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**USO DE COAGULANTE EXTRAÍDO DE SEMENTES DE
Moringa oleifera COMO AUXILIAR NO TRATAMENTO DE
ÁGUA POR FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS**

Dissertação submetida à banca
examinadora para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia
Agrícola, na Área de Concentração
em Água e Solo.

MONALISA FRANCO

Orientador: Prof. Dr. Jose Euclides Stipp Paterniani

CAMPINAS

AGOSTO DE 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

F848u Franco, Monalisa
Uso de coagulante extraído de sementes de moringa
oleífera como auxiliar no tratamento de água por
filtração em múltiplas etapas / Monalisa Franco. --
Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: José Euclides Stipp Paterniani.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Água - Purificação. 2. Filtração. 3. Coagulantes.
4. Saneamento rural. I. Paterniani, José Euclides Stipp.
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Use of coagulant extracted from moringa oleífera seed as
auxiliary in water treatment by multistage filtration system

Palavras-chave em Inglês: Water - Purification, Filtration, Coagulants, Rural
sanitation

Área de concentração: Água e solo

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Ricardo de Lima Isaac, Denis Miguel Roston

Data da defesa: 19/08/2010

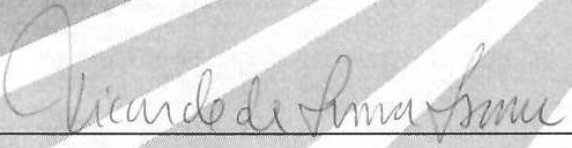
Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Monalisa Franco**, aprovado pela Comissão Julgadora em 19 de agosto de 2010, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

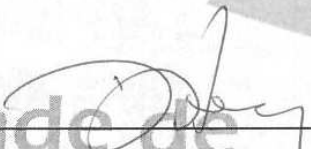
FEAGRI



Prof. Dr. José Euclides Stipp Paterniani – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



Prof. Dr. Ricardo de Lima Isaac – Membro Titular
FEC/Unicamp



Prof. Dr. Denis Miguel Roston - Membro Titular
Feagri/Unicamp

Faculdade de Engenharia Agrícola
Unicamp

*O despertamento da ciência é oportunidade
para avivamento de vidas*

PASTOR AGUIAR.

*À minha amada família,
fonte de amor incondicional.*

DEDICO

*A Deus, pela sua graça, amor e
perdão. Razão de estar aqui.*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Deus, por realizar um sonho meu e se valer dele para transmitir esperança para este mundo;

À toda a minha família, que tanto amo, pela paciência e incentivo dados a mim. Nesta etapa nós vencemos e superamos juntos a distância e o tempo. Esta vitória então é nossa!

À Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, pela oportunidade oferecida;

Ao meu Orientador, Professor Dr. José Euclides Stipp Paterniani, por dar mais que orientação, pelos conselhos e ajudas. Agradeço pela segurança transmitida, pela responsabilidade compartilhada e pela confiança depositada em mim durante estes anos;

Aos professores da Pós-Graduação da FEAGRI.

Aos técnicos laboratoriais, Gelson, Túlio, Agmon e Domitila, pela doação e amizade adquirida ao longo desses anos, e em especial ao Giovanni, pela amizade fortalecida durante este tempo;

Aos funcionários da FEAGRI, José Maria, Rosangela, Dona Terezinha, pelo apoio e dedicação ao trabalho;

Aos queridos amigos da pós-graduação: Conan, Marcio Mesquita, Karol, Camila, Adriana, Samuel, Danny, Gabi, Rívia, Franciana, Douglas, Camilo, Rojane, Laura, Michelle Rodrigues, Mara, Franciane, Vania e todos os outros que convivi intensamente por todo esse tempo. Responsáveis por grandes alegrias em minha vida!

Aos amigos da graduação da FEAGRI, Jamile, Marina, e toda a turma da disciplina FA 015 – Desenvolvimento Rural Sustentado, do primeiro semestre de 2009, pelo respeito e confiança

Às minhas amigas de república, Dani, Isa, Nani, Dri, Simoni, Laura, Jéssica e Gi. Tornaram meu tempo em Campinas mais alegre e cheio de companheirismo.

Aos amigos da Juventude Nazarena de Morungaba, sem dúvida, minha alegria e conforto nos finais de semana. Pessoas que Deus utilizou para cuidar de mim.

Aos professores, Ronaldo Pelegrini e Núbia Natalia pela orientação e iniciação na vida acadêmica;

À Fapesp (Processo2007/57675-9) e ao CNPq (Processo551388/2007-2) pela concessão de bolsa e financiamento do projeto de pesquisa, que possibilitaram melhores condições para a realização deste trabalho;

Ao Santander pela concessão de bolsa de mobilidade estudantil, favorecendo a realização de intercâmbio.

À Universidade Politécnica de Valência, em especial ao professor Doutor Jose Miguel Arnal Arnal, Beatriz Fayos, Rosa e Adrià, que favoreceram minha estada durante o intercâmbio e me auxiliaram neste tempo de aprendizado.

À Josefina, Dicle e Dilan que foram como irmãs no tempo de estada em Valencia, à Bea, Maria e Rodri, amigos para toda vida, ao senhor Julio por ser tão cuidadoso e prestativo no trato comigo.

A Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola, pela acolhida, profissionalismo, apoio e amizade.

*A todos,
Muito Obrigada!*

SUMÁRIO

RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2.1. Objetivo geral	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Qualidade de água	4
3.2 Poluição	4
3.3 Necessidade de tratamento	4
3.4. Tecnologias apropriadas para tratamento de água no meio rural	5
3.4.1 Filtração em Múltiplas Etapas	5
3.4.2 Coagulação e floculação.....	10
3.4.3 Floculação granular	11
3.4.4 Coagulantes naturais.....	13
3.4.5 Moringa oleifera	14
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
4.1 Local da realização do experimento	16
4.2 Água Bruta.....	16
4.3 Instalação Piloto do Sistema de Filtração em Múltiplas Etapas	17
4.3.1 Reservatório Externo	17
4.3.2 Pré-Filtro Dinâmico.....	18
4.3.3 Pré-Filtro.....	19
4.3.4 Filtro Lento	20
4.3.5 Floculador granular	23
4.3.6 Reservatórios internos: R1 e R2	23
4.3.7 Painel de controle	24
4.4 Solução Coagulante	24
4.4.1 Preparo da solução coagulante a partir de sementes de <i>Moringa oleifera</i>	25
4.4.2 Dosagem da solução coagulante.....	26
4.4.3 Pontos de aplicação da solução coagulante	30

4.5 Pontos de coleta de amostras	30
4.6 Monitoramento do sistema experimental	30
4.7 Forma de análise dos resultados	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 Ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – Ausência de solução coagulante.....	34
5.1.1 Filtros lentos 1, 2, 3 e 4 com 3 camadas de mantas não tecidas de 400g.m ⁻² de gramatura (3 M2).....	34
5.1.2 Filtros lentos 1, 2 e 3 com três camadas de manta não tecida de 400g.m ⁻² gramatura (3 M2) e filtro lento 4 com uma camada de manta não tecida de 150g.m ⁻² de gramatura (1 M1).....	39
5.2 Ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – Presença de solução coagulante, ausência de floculação	44
5.2.1 Filtros lentos 1, 2, 3 e 4 com três camadas de manta não tecida de 400g.m ⁻²	45
5.2.2 Filtros lentos 1, 2 e 3 com três camadas de manta não tecida de 400g.m ⁻² e Filtro lento 4 com uma camada de manta não tecida de 150g.m ⁻²	51
5.3 Ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – Presença de solução coagulante, presença de floculação	57
5.3.1 Filtros lentos 1, 2, 3 e 4 com três camadas de manta não tecida de 400g.m ⁻² de gramatura (3 M2).....	57
5.3.2 Filtros lentos 1, 2, 3 três camadas de manta não tecida de 400g.m ⁻² de gramatura (3 M2) e filtro lento com uma camada de manta não tecida de 150g.m ⁻² de gramatura (1 M1).....	63
5.3.3 Filtro lento 4 com uma camada de manta não tecida de 150g.m ⁻² e 53,0mg.L ⁻¹ de <i>Moringa oleifera</i>	69
5.4 Considerações sobre perda de carga.....	73
5.5 Considerações sobre pH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica.....	74
5.6 Resultados gerais de turbidez e cor aparente.....	75
6. CONCLUSÕES	78
7. RECOMENDAÇÕES.....	80
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

ANEXO 1	84
---------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características das mantas não tecidas utilizadas no topo da camada do meio filtrante dos filtros lentos.....	21
Tabela 2. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – ausência de solução coagulante – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.....	36
Tabela 3. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – ausência de solução coagulante – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.....	37
Tabela 4. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – ausência de solução coagulante – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.....	41
Tabela 5. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – ausência de solução coagulante – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.....	42
Tabela 6. Valores médios de pH, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica (CE) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.	43
Tabela 7. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.	47
Tabela 8. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.	49
Tabela 9. Valores médios de pH, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica (CE) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.	50
Tabela 10. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética - presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ - filtros lentos 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.....	52
Tabela 11. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.	54

Tabela 12. Valores médios de pH, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica (CE) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – FL 1, 2 e 3 com 1 M1. **.54**

Tabela 13. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2.**59**

Tabela 14. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2.**60**

Tabela 15. Valores médios de pH, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica (CE) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2.**61**

Tabela 16. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.**64**

Tabela 17. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.**66**

Tabela 18. Valores médios de pH, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica (CE) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1**67**

Tabela 19. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 53mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.....**70**

Tabela 20. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 53mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.....**71**

Tabela 21. Valores médios de pH, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica (CE) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 53mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.**72**

Tabela 22. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo das etapas do sistema FIME em cada ensaio realizado.**76**

Tabela 23. Valores médios de cor aparente (mg.L^{-1} PtCo) ao longo das etapas do sistema FIME em cada ensaio realizado.....	77
Tabela 24. Variações do pedregulho utilizado na definição de floculador granular	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Reservatório externo	17
Figura 2. Esquema de funcionamento do sistema FIME.....	18
Figura 3. Pré-Filtro Dinâmico	19
Figura 4. Pré-filtros de fluxo ascendente.....	20
Figura 5. Filtros lentos.....	22
Figura 6. Parte externa (a) e interna (b) do painel de controle	24
Figura 7. Máquina de moer	26
Figura 8. Agitador magnético da solução coagulante e bombas dosadoras	26
Figura 9. Relação entre diferentes valores de turbidez de água bruta para diferentes valores de concentração de solução coagulante a partir de sementes de Moringa oleifera	27
Figura 10. Esquema de aplicação de solução coagulante no sistema FIME	32
Figura 11. Pontos de coleta de amostra e pontos de aplicação de solução coagulante no sistema FIME.....	33
Figura 12. Turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.....	35
Figura 13. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.	36
Figura 14. Valores médios de cor aparente (m.L^{-1} PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.....	37
Figura 15. Perda de carga nos filtros lentos ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME, ausência de solução coagulante – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.	39
Figura 16. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.....	40
Figura 17. Valores médios de cor aparente (mg.L^{-1} PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	42

Figura 18. Perda de carga dos filtros lentos longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	44
Figura 19. Camada formada a partir da solução coagulante a base de <i>Moringa oleifera</i>	45
Figura 20. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2	46
Figura 21. Valores médios de cor aparente (mg.L ⁻¹ PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.....	48
Figura 22. Valores médios de sólidos suspensos e dissolvidos (mg.L ⁻¹) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.	49
Figura 23. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – FL 1, 2, 3 com 3 M2, FL 4 com 1 M1	52
Figura 24. Valores médios de cor aparente (mg.L ⁻¹ PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.....	53
Figura 25. Valores médios de sólidos suspensos e dissolvidos (mg.L ⁻¹) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – FL 1, 2 e 3 com 1 M1.....	55
Figura 26. Perda de carga dos filtros lentos longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – 1º dia FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2 – 2º e 3º dia FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.....	56
Figura 27. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2	58
Figura 28. Valores médios de cor aparente (mg.L ⁻¹ PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2	60
Figura 29. Valores médios de sólidos suspensos e dissolvidos (mg.L ⁻¹) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME –presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3M2 ..	61

Figura 30. Perda de carga dos filtros lentos ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2	63
Figura 31. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	64
Figura 32. Valores médios de cor aparente (mg.L ⁻¹ PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1	66
Figura 33. Valores médios de sólidos suspensos e dissolvidos (mg.L ⁻¹) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	67
Figura 34. Perda de carga nos filtros lentos ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 106mg.L ⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	68
Figura 35. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 53mg.L ⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	69
Figura 36. Valores médios de cor aparente (m.L ⁻¹ PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 53mg.L ⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1 ..	71
Figura 37. Perda de carga ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L ⁻¹ , FL4: 53mg.L ⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	73
Figura 38. Ensaio realizado com floculador de meio granular, com pedregulho de granulometria variando de 20 a 38mm e altura da camada de 0,45m	87
Figura 39. Número de Camp medido experimentalmente para 11 testes* de floculação granular	88
Figura 40. Número de Camp calculado, com valores de vazão extrapolados de 0,001 à 0,1L.s ⁻¹ , para 11 testes* de floculação granular	88
Figura 41. Número de Camp medido experimentalmente para 3 testes com mesma granulometria do pré-filtro	90
Figura 42. Número de Camp calculado, com valores de vazão extrapolados de 0,001 à 0,1L.s ⁻¹ , para 3 testes com mesma granulometria do pré-filtro	90

RESUMO

A água é recurso indispensável para a sobrevivência do ser humano. Em comunidades onde os sistemas convencionais de tratamento de água enfrentam difícil implantação é necessária a busca por tecnologias adequadas. Os filtros lentos apesar da simples manutenção e baixo custo se tornaram limitados devido à degradação da qualidade dos mananciais, sendo necessário o uso de pré-tratamentos para melhoria da qualidade de água para o seu emprego. Coagulantes naturais, dentre eles aquele produzido a partir de sementes de *Moringa oleifera* são alternativas para o tratamento de água para regiões desprovidas de tecnologias convencionais. Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência de diferentes dosagens do coagulante natural de *Moringa oleifera* na eficiência das etapas do sistema de filtração em múltiplas etapas no tratamento de água. O sistema foi constituído por pré-filtro dinâmico, pré-filtros de fluxo ascendente e filtros lentos, e em alguns ensaios por floculador granular. Em seguida, foram definidas as dosagens de 131mg.L^{-1} de solução coagulante de *Moringa oleifera* a ser aplicada na etapa da pré-filtração e 106mg.L^{-1} e 53mg.L^{-1} a serem aplicadas nas etapas de filtração lenta, que poderiam passar pelo floculador ou não. No filtro lento em que houve a introdução da solução coagulante foram testados primeiramente três camadas de mantas não tecidas de gramatura de 400g.m^{-2} e em seguida uma camada de 150g.m^{-2} no topo da camada de areia. A aplicação da solução coagulante proporcionou na etapa da pré-filtração, média de turbidez de 11NTU e cor aparente de $73\text{mg.L}^{-1}\text{PtCo}$. Na etapa da filtração lenta esses valores foram 1,15NTU e $11\text{mg.L}^{-1}\text{PtCo}$, para dosagem de 106mg.L^{-1} de *Moringa oleifera* e de 5NTU e $42\text{mg.L}^{-1}\text{PtCo}$ para a dosagem de 53mg.L^{-1} da solução coagulante. A aplicação de apenas uma camada de manta não tecida no topo do meio filtrante do filtro lento demonstrou ser benéfica para o sistema, pois manteve o alto índice de eficiência de remoção de turbidez e cor aparente. Deste modo conclui-se que o uso do coagulante extraído das sementes de *Moringa oleifera* melhorou a eficiência do tratamento de água pelo sistema de filtração em múltiplas etapas, principalmente quando o coagulante foi aplicado na etapa de pré-filtração. Entretanto, a aplicação direta da solução coagulante no filtro lento causou rápida colmatção da manta e menor tempo de duração da carreira, além disso a passagem da solução coagulante pelo floculador granular não apresentou resultados satisfatórios.

Palavras - chave: coagulantes naturais, filtração lenta, tratamento de água.

ABSTRACT

Water is the most important resource for human survival. In communities where the conventional water treatment faces difficult deployment is necessary to search for simple technologies. Simple maintenance and low cost are presented for slow sand filter, however the water degradation has limited this operation system and now pre treatments are necessary for using this technology. Natural coagulants and among them those produced from *Moringa oleifera* seeds are alternatives for water treatment in regions where there is not conventional technologies. Therefore, this study aims is evaluate the influence of different dosages of natural coagulant extracted from *Moringa oleifera* seeds on multistage filtration system. The system was composed with dynamic roughing filter, upflow roughing filters, slow sand filters and some tests by granular flocculator. The dosage of 131mg.L^{-1} of *Moringa oleifera* solution was defined to be applied on upflow roughing filter and the dosages of 106mg.L^{-1} and 53mg.L^{-1} on slow sand filter, which could pass through flocculator or not. The slow sand filter that received the coagulant solution was tested with three layers of nonwoven blankets with 400g/m^2 and afterward with one layer of nonwoven blanket with 150g/m^2 at the top of the sand. After the application of natural coagulant solution in upflow roughing filter, the mediums values of turbidity and apparent color were 11NTU and 73mg.L^{-1} PtCo, respectively. In slow sand filtration stage these values were 1,15NTU and 11mg.L^{-1} PtCo for the dosage of 106mg.L^{-1} of *Moringa oleifera*, and 5NTU and 42mg.L^{-1} PtCo for the dosage of 53mg.L^{-1} of the coagulant solution. The application of a single layer of nonwoven blanket on top of slow sand filter proved to be beneficial to the system because it maintained a high rate of removal efficiency of turbidity and apparent color. Thus it is concluded that the use of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seeds improved the efficiency of water treatment by multistage filtration system. However, the direct application of the coagulant solution into the slow sand filter caused rapid clogging of the blanket and shorter career length. Furthermore, unsatisfying results was showed from the passage of the coagulant solution by granular flocculator.

Keywords: natural coagulant, slow sand filtration, water treatment.

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso indispensável para a sobrevivência dos animais, dos vegetais e dos seres humanos, porém o homem tem se apropriado dos recursos sem a preocupação de preservar seus ciclos naturais. Por isso a disponibilidade da água tornou-se limitada pelo comprometimento de sua qualidade.

A contaminação da água pode ocorrer através da falta de saneamento básico, que lança esgoto sem tratamento nos corpos d'água; do lixo que muitas vezes é depositado no fundo dos rios; de agrotóxicos, adubos e fertilizantes, inseticidas usados na lavoura, que são fonte de poluição difusa, outros materiais como poluentes não-degradáveis e resíduos de indústrias em geral. O recebimento de matéria orgânica nos corpos d'água provoca a redução de oxigênio disponível, que conseqüentemente causa a morte de peixes, plantas aquáticas, animais das margens e do próprio rio ou lago, além de provocar doenças direta ou indiretamente em homens e animais. Devido à poluição e degradação dos recursos hídricos disponíveis, a possibilidade concreta de escassez da água doce está se tornando a grande ameaça ao desenvolvimento econômico e à estabilidade política do mundo.

A preocupação com a disponibilidade da água vem exigindo de todos uma nova consciência em relação a esse recurso, ou seja, a otimização dos processos de utilização e busca por tratamento de qualidade com baixo custo, que possam estar disponíveis para os vários segmentos da sociedade. Em pequenas comunidades onde não existem políticas delimitadas para o tratamento de água destinada ao consumo humano, de acordo com a qualidade da água a ser tratada deve ocorrer a busca por tecnologias adequadas que possibilitem a inserção da população nas etapas de busca, implantação, realização e manutenção do tratamento, além de priorizar o baixo custo e facilidades posteriores para a sociedade em questão.

Dentre as opções de tratamento de água para este segmento da sociedade estão: filtração lenta, uso de desinfecção solar, cloração, uso de coagulantes naturais, além de uso de vasos de cerâmicas e fervura da água. A filtração lenta é uma opção bastante viável para ser implantada em pequenas comunidades, quando comparada aos tratamentos convencionais apresenta facilidade de manutenção, principalmente pela possibilidade do uso de mantas sintéticas não tecidas no topo da camada do meio filtrante. Entretanto, pela degradação dos

mananciais sua empregabilidade tem sido dificultada. Na busca de reduzir os impactos da má qualidade de água nos filtros lentos, pré-tratamentos têm sido empregados na forma de filtros de pedregulho que reduzem a concentração de partículas presentes na água de maneira gradativa até a etapa da filtração lenta, esta tecnologia que une o pré-tratamento à filtração lenta é nomeada de sistema de filtração em múltiplas etapas (sistema FIME).

Outra opção no tratamento de água para pequenas comunidades é o uso de coagulantes naturais, que podem ser artesanalmente preparados e proporcionam redução dos riscos trazidos pela água contaminada. As sementes da árvore da espécie *Moringa oleifera* têm se demonstrado eficiente nesta operação, pois elas apresentam ação coagulante, responsável pela agregação de partículas e microorganismos que podem ser mais facilmente removidos numa etapa posterior; benefícios para a alimentação humana, com propriedades no combate à anemia; rápido crescimento e propriedades para produção de sabão e cosméticos.

Na busca da ampliação da empregabilidade do processo de filtração em múltiplas etapas o uso de coagulantes naturais pode auxiliar na agregação de partículas coloidais e microorganismos se aliado às etapas de pré-tratamento e filtração lenta do sistema. Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar o uso do coagulante natural extraído das sementes de *Moringa oleifera*, em conjunto com a Filtração em Múltiplas Etapas no processo de tratamento de água em termos de qualidade de água produzida.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

- Avaliar a viabilidade e a influência de diferentes dosagens do coagulante natural extraído das sementes de *Moringa oleifera*, na eficiência das etapas do processo de Filtração em Múltiplas Etapas no tratamento de água.

2.2. Objetivos específicos

- Testar diferentes dosagens do coagulante extraído das sementes de *Moringa oleifera* nos afluentes do pré-filtro e do filtro lento;
- Avaliar a eficiência do floculador granular como auxiliar no tratamento de água nas etapas do pré-filtro e filtro lento;
- Comparar a eficiência do pré-filtro com e sem aplicação do coagulante;
- Comparar a eficiência do filtro lento com e sem aplicação do coagulante.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Qualidade de água

A água é um recurso indispensável à vida, fundamental para a população, agricultura, indústria, recreação, dessedentação de animais, suporte para a vida aquática, etc. Sua importância e dos mananciais depende da abundância em determinada região, desejos e necessidades da sua utilização e seu gerenciamento. Porém, muitas aplicações são restritas a uma faixa de qualidade de água, indicada através de análises físicas, químicas e biológicas, através da presença de elementos, substâncias e organismos. Assim, se define se a água está poluída e se estabelece a necessidade ou não de submeter determinada água a algum processo ou técnica de tratamento (FERRAZ e PATERNIANI, 2002; DI BERNARDO, et al. 1999).

3.2 Poluição

O termo poluição é normalmente utilizado quando o homem introduz alguma substância tóxica no meio ambiente, e uma das consequências é a contaminação da água tornando-a inaceitável para o uso para o qual ela se destina.

A poluição do meio aquático pode causar alterações das características físicas (turbidez, cor, número e tamanho de partículas, temperatura, condutividade, viscosidade, tensão superficial), químicas (DBO, DQO, pH, toxicidade) ou biológicas (microorganismos em geral e espécies de fitoplâncton e do zooplâncton). Essas alterações na água, além de não serem adequadas dependendo do fim para qual o recurso se destina, proporcionam o meio para servirem direta ou indiretamente na causa de doenças em animais, plantas e seres humanos.

As principais doenças associadas à contaminação biológica dos recursos hídricos são cólera, febre tifóide, salmoneloses, desintéria bacilar, amebíase, giardíase, criptosporidíase, viroses, etc. (DI BERNARDO, et al. 1999).

3.3 Necessidade de tratamento

Como a poluição dos recursos hídricos traz efeitos, principalmente na saúde pública, a água para atividades humanas necessita ser submetida a alguma tecnologia de tratamento antes de ser utilizada.

O tratamento da água para torná-la adequada ao consumo humano promove a remoção de impurezas e contaminantes por meio da utilização de fenômenos físicos, químicos ou biológicos. E o seu tratamento pode ser feito para atender várias finalidades: remoção de microorganismos, de substâncias nocivas, redução do excesso de impurezas, teores elevados de compostos orgânicos, correção de cor, odor e sabor, redução de corrosividade, da dureza, turbidez, ferro e manganês, atendendo dessa maneira os aspectos higiênicos e estéticos necessários.

A preocupação com a poluição e necessidade de tratamento da água não abrange somente grandes centros urbanos, que na maioria das vezes contam sistemas convencionais de tratamento, mas também pequenas comunidades. Locais como comunidades rurais e aldeias indígenas por muitas vezes utilizam a água para fins potáveis sem nenhuma forma de tratamento (DI BERNARDO e DANTAS, 2005; FERRAZ e PATERNIANI, 2002).

3.4. Tecnologias apropriadas para tratamento de água no meio rural

Na busca de minimizar os riscos e efeitos provocados pela contaminação da água se faz necessária a utilização de tecnologias concebidas de forma adequada às condições ambientais, sociais e culturais dos locais onde serão implantadas, respeitando as deficiências e carências de cada região.

Em se tratando de países em desenvolvimento, onde a disponibilidade de recursos financeiros é restrita, essas tecnologias devem ser de simples concepção, operação e manutenção, sem necessidade de mão de obra especializada para que possam ser mantidas pela própria população e atingirem o objetivo para o qual foram desenvolvidas (GLEICK, 2002; VERAS e DI BERNARDO, 2008).

3.4.1 Filtração em Múltiplas Etapas

A Filtração em Múltiplas Etapas (FIME) é uma tecnologia adequada às zonas rurais, pequenos e médios municípios por ser um sistema de simples construção, com instalações de baixo custo, nas quais a instrumentação pode ser praticamente eliminada.

Essa tecnologia proporciona água filtrada com baixa turbidez, sem a presença de impurezas e organismos patogênicos devido ao seu funcionamento, dividido em etapas com remoção gradativa das impurezas e atenuação de picos de concentração de sólidos suspensos.

Para águas superficiais, o processo deve conter pelo menos duas partes, na primeira, conhecida como pré-tratamento, dá-se a separação de sólidos grosseiros por meio de filtros de areia grossa ou pedregulho, com a função de melhorar a qualidade de água para a etapa posterior. Em seguida têm-se a remoção de partículas finas e microorganismos remanescentes, onde a filtração lenta e a cloração são os processos comumente utilizados. Uma instalação FIME completa é composta por: Pré Filtro Dinâmico, Pré Filtro de Pedregulho e Filtro Lento (DI BERNARDO et al. 1999; VERAS e DI BERNARDO, 2008).

3.4.1.1 Pré-Filtro Dinâmico

O pré-filtro dinâmico tem a função de remover materiais mais grosseiros, suportando picos de sólidos em suspensão e receberam esse nome devido à capacidade de reagir frente à crescente descarga de sólido. Consiste de uma unidade de fluxo descendente com taxa de filtração entre 18 e 60m.d⁻¹ onde parte do afluente é filtrada e o restante é escoado sobre a camada superior de pedregulho como água de limpeza.

Tem eficiência de remoção de coliformes fecais entre 50-80%, 10-25% para cor, 30-50% para turbidez e 70-80% para sólidos em suspensão (DI BERNARDO et al., 1999; VERAS e DI BERNARDO, 2008).

3.4.1.2 Pré-Filtro

Nesta etapa, o pré-tratamento não possui escoamento superficial, ou seja, todo o volume de entrada é filtrado.

Existem três tipos de configurações para os pré-filtros: horizontal, descendente ou ascendente (vertical).

Os pré-filtros de pedregulho com fluxo vertical (descendente ou ascendente) podem ter configuração em camadas ou em série:

- Em série: o pré-filtro possui dois, três ou quatro compartimentos em seqüência, com granulometrias diferentes. A água filtrada no primeiro compartimento é encaminhada para o segundo, de menor granulometria e assim sucessivamente;
- Em camadas: o pedregulho é disposto em sub-camadas de granulometria decrescente no sentido do escoamento.

Ao se comparar a pré-filtração horizontal e vertical, esta se demonstra melhor que a primeira, não somente pela eficiência na remoção, mas na facilidade de manutenção e limpeza (DI BERNARDO et al., 1999).

Segundo DI BERNARDO et al. (1999) os pré-filtros de pedregulho, têm sua eficiência praticamente inalterada em função do sentido de fluxo de água (ascendente ou descendente) e das taxa de filtração (entre 12 e 36md⁻¹).

Apresentam eficiência de remoção de coliformes fecais de 99,4%, turbidez de 80%, e de sólidos suspensos de 97% (GALVIS et al, 1996), tornando então o efluente do pré-filtro de pedregulho adequado para a filtração lenta.

3.4.1.3 Filtração-Lenta

A Filtração Lenta é uma tecnologia bastante adequada para pequenas comunidades, estruturas populacionais em áreas rurais e assentamento de porte reduzido, principalmente de países em desenvolvimento e pode ser associada a sistemas de pré-tratamento, bem como a sedimentação simples com o uso de coagulantes naturais (FUNASA, 2007; STACCIARINI, 2002).

Solução apropriada para muitos países como o Brasil, que possui regiões de acentuadas diferenças sócio-econômicas, pois as tecnologias de tratamento de coagulação química e filtração rápida requerem pessoal técnico qualificado para operação e muitas vezes o material para construção, os equipamentos e os produtos químicos têm de ser adquiridos em locais distantes.

a) Histórico

As primeiras instalações de tratamento, com passagem de água através de meio granulares foram construídas no início do século XIX por John Gicc, em Paisley, Escócia, e por James Simpson, em Londres, Inglaterra. O primeiro construiu um filtro de areia para servir sua indústria de branqueamento de tecido e o segundo projetou e construiu uma estação de filtração lenta para a Chelsea Water Company, destinada ao abastecimento da cidade de Londres, visando principalmente a remoção de sólidos suspensos da água bruta. Em meados do século XIX, Londres contava com oito estações de tratamento que empregavam a filtração lenta na água captada no rio Tamisa.

A prova concreta da eficiência da filtração lenta em remover microorganismos, além de sólidos suspensos e outras impurezas, ocorreu em 1892, pela experiência vivenciada por duas comunidades vizinhas, Hamburgo e Altona, situadas na Alemanha, as quais utilizavam o rio Elba como fonte de abastecimento. O tratamento em Hamburgo consistia em sedimentação simples, enquanto em Altona havia filtros lentos de areia. Com a contaminação do rio Elba, houve uma epidemia de cólera que causou a morte de 7500 pessoas em Hamburgo, o que não aconteceu em Altona. Epidemias subsequentes em várias partes do mundo confirmaram a importância da filtração antes do consumo de água. (DI BERNARDO, 1993).

Em 1885, surgiu a primeira unidade mecânica de filtração nos E.U.A. e em 1899 os filtros automáticos de pressão na Inglaterra. Desde então os filtros foram classificados em lentos e rápidos, e de forma extensa os rápidos passaram a ser usados em grande escala. A filtração lenta, porém continua a ser utilizada devido à sua simplicidade, eficiência e segurança no tratamento de água para abastecimento, principalmente em pequenas cidades do interior do Brasil (CAMPOS, 1994 apud STACCIARINI, 2002; DI BERNARDO, 2005).

b) Teoria da filtração lenta

O resultado final da filtração lenta é resultado de uma série de fenômenos simultâneos: ações físicas, químicas, bioquímicas e biológicas.

As ações biológicas têm papel de destaque nos filtros lentos de areia, pois são provocadas devido ao desenvolvimento de uma certa variedade de bactérias aeróbias na camada superficial do leito filtrante. E abaixo dessa camada de bactérias partículas finas de areia ficam envolvidas por uma “geléia”, conhecida com o nome de “schmutzdecke” que é uma palavra composta de “schmutz”, palavra alemã que significa sujeira e “decke”, termo de

origem escandinava que por ser traduzida por “película”, “camada”. Onde partículas que passariam pelos interstícios dos grãos são retidas e a matéria orgânica é degradada, através do processo digestivo das bactérias.

Quando se observa a colmatção do meio, através do aumento da perda de carga é necessário remover essa camada biológica e recomeçar o processo, tendo o cuidado de não consumir a água nos primeiros dias de operação, pois a pausa no processo causa a redução da eficiência microbiológica e o filtro poderá não operar de maneira eficiente (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

c) Vantagens e desvantagens da Filtração Lenta

A Filtração Lenta é uma tecnologia de estrutura bastante simples que apresenta facilidade de implantação e construção do sistema, por permitir a utilização de materiais e mão-de-obra tradicionais, grande simplicidade no processo de operação e manutenção dos filtros. Além disso, as tubulações e equipamentos necessários, bem como os trabalhos de montagem são de pequeno valor, a instrumentação pode ser completamente eliminada, pelo menos em pequenas instalações, e o material filtrante, pode ser encontrado em praticamente todo o Brasil. Apenas quando o custo da área é significativo, o que ocorre geralmente junto aos centros urbanos médios e grandes, os filtros lentos passam a ter custos mais elevados. A função mais pesada consiste na remoção periódica da camada superficial de areia, por isso os custos de energia elétrica (com exceção de eventual recalque) e de produtos químicos (exceto uma eventual cloração) são nulos. (FERRAZ e PATERNIANI, 2002; AZEVEDO NETO *et al*, 1987).

Apresentam, entretanto, alguns inconvenientes que dependendo das características do local podem ser compensados: exigem área relativamente grande para as instalações, são pouco eficientes para a redução da cor (reduzem-na apenas 20 a 50%), têm pouca flexibilidade para se adaptar às demandas de emergência e finalmente, apresentam resultados muito pobres quando a soma da cor mais turbidez a ser tratada apresenta um valor superior a 40 ppm. (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

d) Utilização de mantas sintéticas

Estudos foram realizados para simplificação da manutenção dos filtros lentos e mantas não tecida foram empregadas por apresentarem grande resistência e durabilidade. São empregadas para substituir a camada superficial do meio filtrante e diminuir a espessura da camada de areia sem prejudicar a qualidade do efluente, reter parte das impurezas encaminhadas ao meio granular, visando aumentar a duração da carreira da filtração em até três vezes. Mantas com menor superfície específica conduzem as carreiras de filtração mais longas, e as com maior superfície específica evitam a ocorrência e impurezas na areia.

Outro benefício do uso de mantas não tecidas é que o volume de água utilizado na limpeza das mantas é bem menor do que aquele gasto para a lavagem da areia (DI BERNARDO e DANTAS, 2005; FERRAZ e PATERNIANI, 2002; PROSAB, 1999).

3.4.2 Coagulação e floculação

Uma das etapas do processo de tratamento da água é a coagulação, que segundo AZEVEDO NETTO *et al.* (1976) tem como objetivo transformar impurezas que se encontram em suspensões finas, em estado coloidal e algumas em solução, em partículas maiores e mais pesadas que sejam removidas por sedimentação ou filtração.

O primeiro passo do processo consiste em dosar um ou mais compostos químicos à água para que as cargas negativas presentes na superfície das partículas sejam desestabilizadas por meio de hidróxidos que produzem na solução íons positivos (DI BERNARDO, 2005). Tal desestabilização permite a aglomeração de partículas e conseqüentemente formação de flocos.

A coagulação pode ocorrer por quatro mecanismos diferentes: compressão da camada difusa, adsorção e neutralização, varredura, e adsorção e formação de pontes:

- Compressão da Camada Difusa: a coagulação promove a desestabilização das partículas coloidais através da adição de íons de carga contrária à das partículas coloidais. Schulze e Hardy apresentaram que íons da mesma carga são repelidos e os de carga contrária, atraídos pelo colóide e que quanto maior a carga do íon positivo, menor a carga necessária para que ocorra coagulação (DI BERNARDO, 1993). A elevação do número de íons na água acarretará em um acréscimo do número de íons na camada difusa, que terá seu volume

reduzido para se manter eletricamente neutra, de modo que as forças de van der Waals sejam dominantes, eliminando a estabilização eletrostática (DI BERNARDO, 2005).

- Adsorção e Neutralização de Carga: as interações entre coagulante, colóide e solvente são responsáveis pela desestabilização do colóide. Tal desestabilização é promovida em uma faixa específica de pH, com a formação de espécies hidrolisadas de carga positiva que podem ser absorvidas na superfícies das partículas (LIBÂNIO, 2008). Este mecanismo não produz flocos e sim partículas desestabilizadas que podem ser retidas posteriormente no meio filtrante (DI BERNARDO, 2005).

- Varredura: dependendo da quantidade do coagulante adicionado, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água, poderá ocorrer a formação de precipitados (hidróxido de alumínio $\text{Al}(\text{OH})_3$, hidróxido de ferro $\text{Fe}(\text{OH})_3$) que são capazes de envolver as partículas coloidais. Os flocos resultantes deste mecanismo quando comparados ao mecanismo de adsorção-neutralização apresentam maior tamanho e alta velocidade de (DI BERNARDO, 2005).

- Adsorção e Formação de Pontes: atrações eletrostáticas entre as partículas das impurezas e os sítios desequilibrados eletricamente formam flocos, por meio de ligações químicas do tipo pontes de hidrogênio ou similar, provocando a estabilidade de todas as partículas que estão dispersas na água (RAMOS BORBA, 2001). Este tipo de mecanismo ocorre quando polímeros de cadeias longas e sítios ionizáveis, como os polímeros orgânicos ou naturais, são utilizados como auxiliares de floculação (LIBÂNIO, 2008; DI BERNARDO, 2005).

3.4.3 Floculação

Após a coagulação ocorre a floculação: agitação branda da água por um determinado período de tempo. Essa mistura lenta favorece a colisão das partículas e dos pequenos flocos com outros e também demais partículas suspensas na água. A partir dessa colisão são formados os grandes flocos ou massa grandes, de sedimentação mais rápida que são mais facilmente removidos nas etapas posteriores (HESPANHOL, 1971). Tais etapas podem ser: filtração direta, onde os flocos devem se aglutinar de maneira propícia a serem removidos nos materiais filtrantes, não havendo necessidade de obtenção de flocos grandes ou densos;

decantação, com ocorrência de sedimentação dos flocos; ou flotação ocorrendo aderência dos flocos às microbolhas de ar, ganhando empuxo, para posterior remoção na superfície por raspadores (RAMOS, 2005).

O processo de floculação pode ser classificado em função do mecanismo de transporte para a formação dos flocos: pericinético, ortocinético e sedimentação diferenciada. A floculação pericinética ocorre quando o movimento das partículas é causado pelo movimento browniano; a ortocinética ocorre devido à imposição de gradientes de velocidade a água por movimento através de agitadores hidráulicos ou mecanizados (RICHTER & AZEVEDO NETTO, 1991).

Os agitadores hidráulicos normalmente apresentam menor custo quando comparados aos mecanizados, além disso, não dependem de equipamentos de manutenção eletromecânica, nem de energia elétrica, e para pequenas variações de vazão sofrem um ajuste pela redução do gradiente de velocidade e aumento do tempo de floculação, o que dentro de certos limites não interfere na operação. Entretanto, apresenta como desvantagem a dificuldade de alterar o gradiente de velocidade sem alterar a vazão.

Os floculadores de meio granular são compostos, normalmente seixos rolados selecionados, como por exemplo, pedregulho. Quando ocorre a introdução da água neste sistema se inicia a agitação lenta do coagulante anteriormente distribuído, através da passagem do fluido pelo meio filtrante.

Por serem os parâmetros que definem a densidade e tamanho dos flocos, o gradiente de velocidade e o tempo de mistura (RAMOS, 2005). O gradiente de velocidade fornecido deve proporcionar o choque entre as partículas, no entanto não deve promover a ruptura dos flocos, que pode ocorrer se o tal gradiente for incorreto. O tempo de mistura deve ser suficiente e adequado ao gradiente de mistura utilizado durante o tratamento de água, para que ocorra a formação de flocos de maneira adequada e as fases posteriores sejam beneficiadas. Como auxiliar no desenvolvimento de unidades de dispersão de coagulantes e floculação o Número de Camp (Ca), produto do gradiente de velocidade pelo tempo de detenção foi proposto, no entanto, este parâmetro não deve ser exclusivo na categorização dos floculadores (DALSASSO, 2005).

3.4.4 Coagulantes naturais

Na maioria das águas submetidas a tratamento, quando se visa o consumo doméstico, é necessária a adição de substâncias para que se obtenha uma água segundo os padrões de potabilidade. Os produtos mais utilizados são os coagulantes químicos, como sulfato de alumínio, que às vezes não estão disponíveis a um preço razoável para as populações de baixa renda e até mesmo comunidades rurais. Para se minimizar essa dificuldade e para que se tenha um tratamento apropriado e produção de água de boa qualidade com custos mínimos os coagulantes naturais são empregados.

O uso de coagulantes de origem vegetal, para clarificação de águas turvas e coloridas, é de grande importância ecológica e ambiental, considerando que a presença das plantas, sempre contribui com a ecologia, o embelezamento e a melhoria do ambiente, tornando-o mais agradável.

Alguns trabalhos têm destacado a viabilidade do uso de coagulantes e/ou auxiliares de coagulação de origem orgânica, constituídos a base de polissacarídeos, proteínas e principalmente, os amidos, entre os quais têm se destacado: farinha de mandioca, araruta e fécula de batata, melhorando a eficiência de processos físicos de remoção de sólidos suspensos da água (DI BERNARDO, 1993).

Tem-se verificado também o uso de algumas plantas, tais como: o Quiabo (*Abelmoschus esculentus*), usado na forma de um fluido viscoso e extraído da vagem (baba de quiabo) ou na forma de chá feito a partir do pó seco da vagem pulverizada; a Mutamba (*Guazuma ulmifolia*) ou Chico Magro no Mato Grosso, usada também na forma de chá da casca e do caule e Cacau (*Theobroma cacao*), usado na forma do pó da casca, assim como o uso de argilas não ferrosas, formado de grandes agregados iônicos (moléculas complexas), como bentonita sódica e outras argilas alcalinas, como auxiliar de coagulação/floculação.

O mecanismo de coagulação desses compostos orgânicos e inorgânicos é semelhante ao mecanismo dos polieletrólitos, já que todos eles são dotados de sítios com pontos positivos ou negativos, podendo na presença da água se transformar em coagulantes catiônicos ou aniônicos, dependendo do saldo das cargas elétricas (RAMOS BORBA, 2001).

3.4.5 *Moringa oleifera*

A *Moringa oleifera* Lam, a espécie mais divulgada da família das *Moringaceae*, é uma planta originária da Índia, que já se espalhou por todo mundo, principalmente nos países tropicais, como o Brasil. Na região do Nordeste brasileiro a *Moringa oleifera* é conhecida como “Lírio Branco”. Outro nome popular dessa planta no Brasil é Quiabo de Quina.

Essa espécie de *Moringa oleifera* pode ser propagada através de sementes, mudas e estacas, cresce de rapidamente e pode frutificar no seu primeiro ano de vida. Seu desenvolvimento ocorre em clima quente e semi-árido tropicais em temperaturas na faixa de 25-35 °C, podendo suportar até 48 °C por períodos limitados. É tolerante a seca, preferindo solos arenosos bem drenados ou solos com terra vegetal. Pode se desenvolver em solos argilosos, mas não com excesso de água. Seu crescimento é extremamente rápido, podendo alcançar 4 metros em um ano, atingindo alturas de 6-15 metros (PRICE & DAVIS, 2000).

É uma planta de múltiplos usos: por ser fonte de vitamina A, B e C, cálcio, ferro e proteínas, é aproveitada na alimentação humana, as folhas como verduras cruas, as vagens verdes como verduras cozidas e as sementes maduras podem ser torradas para fabricação de farinha. As sementes também produzem um excelente óleo que pode ser usado na alimentação, para fazer sabão e cosméticos e na produção de biodiesel. Suas flores são muito procuradas pelas abelhas, além do mais, as flores e raízes possuem compostos de ação fungicida e antibiótica. A *Moringa oleifera* Lam ainda pode ser utilizada como cerca viva e quebra ventos (RAMOS BORBA, 2001; PRICE & DAVIS, 2000).

As sementes também são utilizadas na clarificação de águas turvas, estudos realizados mostraram uma eficiência na remoção da turbidez e cor aparente, de, respectivamente, 95% e 90% em média, nos processos de Filtração Lenta e Sedimentação, com a solução à base de *Moringa oleifera* (PATERNIANI *et al.*, 2006)

BEZERRA *et al.* (2004) e KATAYON *et al.*, (2006) estudaram as condições ambientais que interferem na qualidade das sementes durante seu armazenamento. Os estudos demonstraram que se armazenadas em baixa temperatura (≤ 10 °C) e baixa umidade relativa (50-60%) as sementes mantinham seu potencial de germinação por até doze meses, com decréscimo de 15% do potencial ao longo de 24 meses. Na avaliação do desempenho das sementes na redução de turbidez da água, as sementes refrigeradas mostraram maior eficiência

quando armazenadas por até cinco meses. Para o armazenamento sob condições não controladas as sementes sofreram redução de potencial de germinação de 78% em 12 meses e 100% em 24 meses, além disso, a eficiência de redução da turbidez foi inferior às sementes armazenadas sob refrigeração.

Além de poder ser preparada no local, ser de fácil manuseio e reduzir custos durante a operação de tratamento (PATERNIANI et al., 2006).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Buscando contribuir para o estudo do uso do coagulante natural extraído das sementes de *Moringa oleifera* nos sistema de Filtração em Múltiplas Etapas, dividiu-se o trabalho nas seguintes etapas:

- Montagem da instalação piloto do sistema de Filtração em Múltiplas Etapas;
- Realização de ensaios para definição e comprovação das características dos floculadores de meio granular a serem utilizados na etapa do pré-filtro de fluxo ascendente e no filtro lento;
- Definição das concentrações da solução coagulante a serem utilizadas nas etapas do pré-filtro de fluxo ascendente e do filtro lento;
- Ensaios do tratamento de água pelo sistema FIME sem uso de coagulante natural;
- Ensaios do tratamento de água pelo sistema FIME com adição de solução coagulante nas etapas do pré-filtro de fluxo ascendente e do filtro lento sem ou com floculação, com alterações nas camadas de mantas não tecidas no topo do meio filtrante do filtro lento que recebeu coagulante.

4.1 Local da realização do experimento

Os ensaios realizados no presente trabalho foram procedidos nos Laboratórios de Hidráulica e Irrigação e Saneamento, da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), localizada no município de Campinas, estado de São Paulo, latitude 22 30` S e longitude 47 30` W, altitude de 625 m acima do mar.

4.2 Água Bruta

A água bruta utilizada como afluente na realização do experimento foi preparada artificialmente de acordo com a metodologia apresentada por MENDES (1989), PATERNIANI e SANT'ANNA (2006), adaptada para a presente pesquisa para atingir uma turbidez de 100NTU. Diariamente, era realizada a leitura da turbidez da água do reservatório externo que abastecia o sistema de filtração em múltiplas etapas, e se houvesse necessidade era

adicionada Bentonita à água do reservatório até o momento que a turbidez estivesse em torno do valor desejado.

4.3 Instalação Piloto do Sistema de Filtração em Múltiplas Etapas

A instalação piloto do Sistema de Filtração em Múltiplas Etapas para a investigação experimental foi montada no Laboratório de Irrigação e Hidráulica da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP em Campinas, SP, e era composto pelos seguintes itens: Reservatório Externo, pré-filtro dinâmico (PFD), dois pré-filtros de fluxos ascendentes de pedregulho (PF 1 e 2), quatro filtros lentos (FL 1, 2, 3 e 4), dois floculadores granulares, dois reservatórios internos nomeados R1 e R2, e painel de controle do sistema.

O sistema funcionava em ritmo contínuo, a paralisação ocorria somente nos finais de semana ou ao final de alguma carreira de filtração. Também funcionava como circuito fechado para evitar o desperdício de água. Um esquema dos fluxos da água durante o tratamento no sistema FIME são apresentados na figura 2.

4.3.1 Reservatório Externo

Este reservatório armazenava a água bruta sintética que abastecia o sistema de Filtração em Múltiplas Etapas. Estava localizado na parte externa do Laboratório de Irrigação e Hidráulica e tinha capacidade de armazenamento de 1,0m³ de água. Internamente possuía hélice de agitação para manter a qualidade da água bruta homogênea. Sua parte externa pode ser visualizada na figura 1.



Figura 1. Reservatório externo

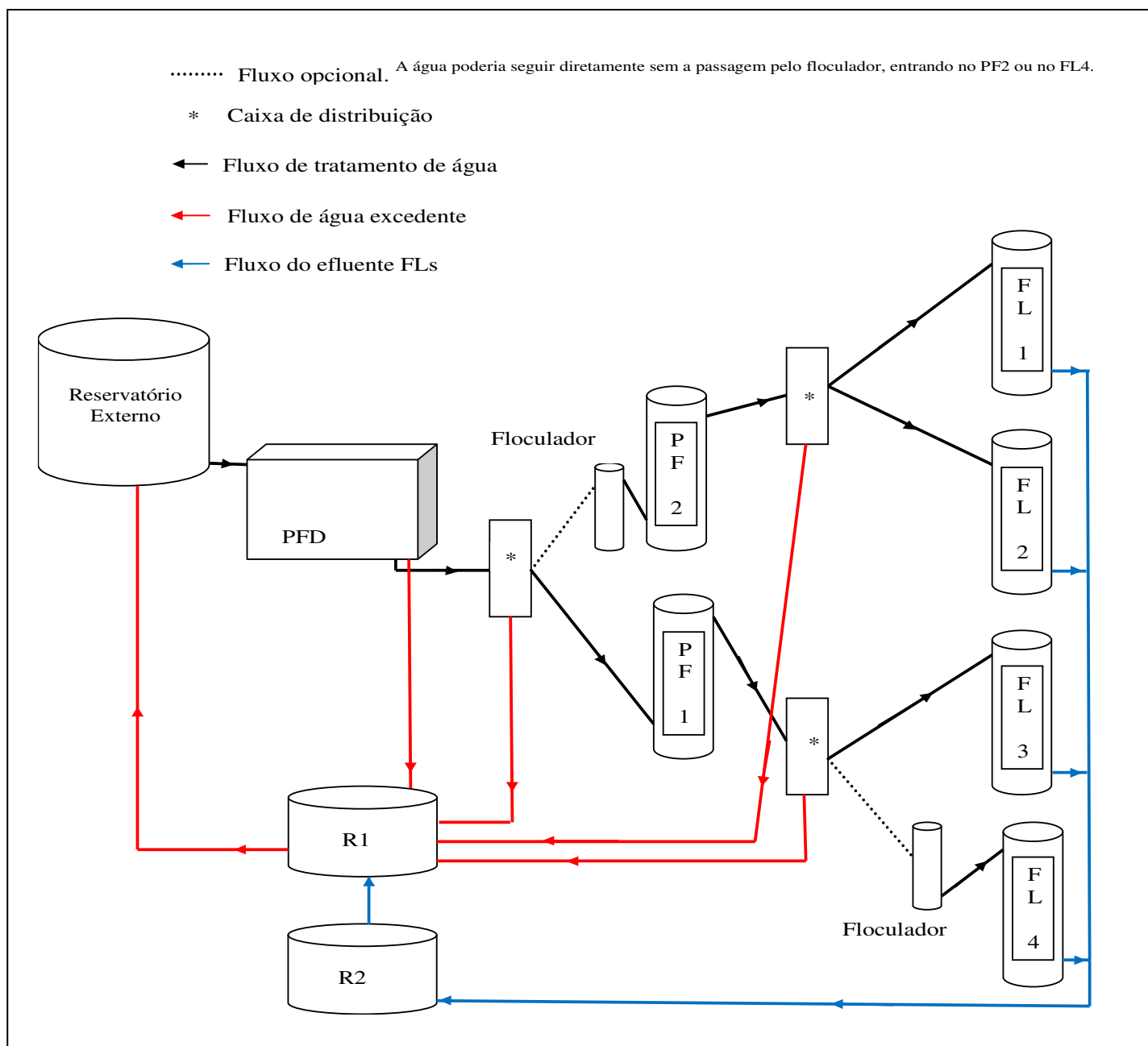


Figura 2. Esquema de funcionamento do sistema FIME

4.3.2 Pré-Filtro Dinâmico

Foi utilizado um pré-filtro dinâmico prismático, em acrílico, com área de $0,128\text{m}^2$ ($0,16\text{m} \times 0,80\text{m}$), com uma taxa de aplicação de $48\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, fluxo descendente e meio filtrante de pedregulho.

Segundo recomendações de DI BERNARDO *et al.* (1999) e adaptações para a presente pesquisa, o meio filtrante foi dividido em três camadas de 0,20m de espessura cada, com a granulometria do pedregulho variando entre 3,36 a 6,35mm, 9,52 a 12,7mm e 19,1 a 25,4mm, para a camada superior, camada intermediária e camada inferior, respectivamente, como pode ser visualizado na figura 3.

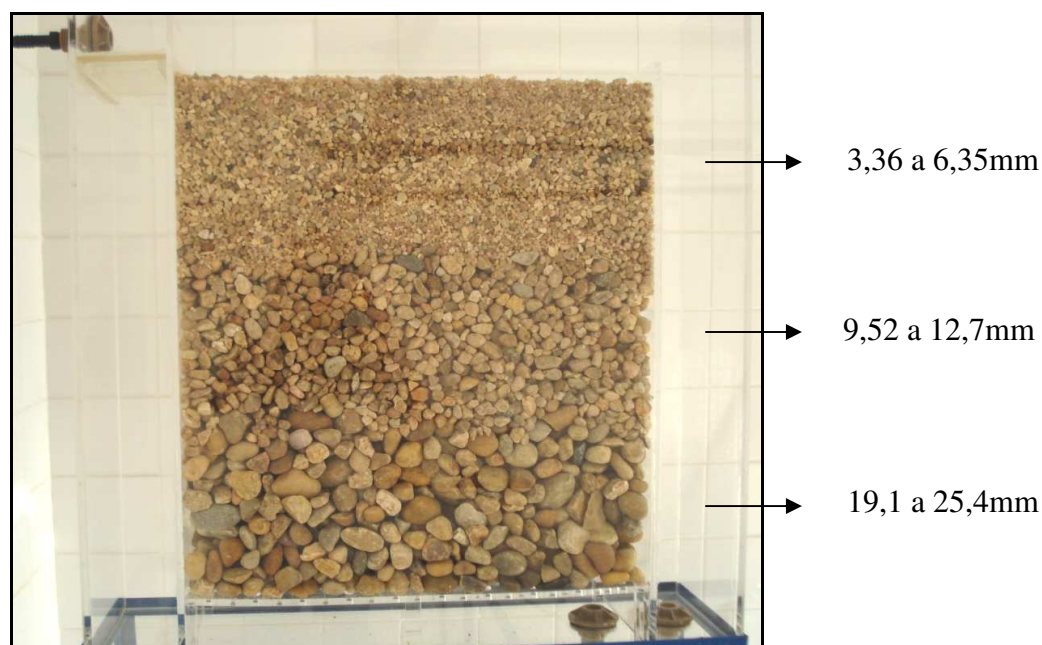


Figura 3. Pré-Filtro Dinâmico

Todo o pedregulho foi lavado em água corrente e separado por peneiras com as aberturas correspondentes à granulometria desejada em cada camada do pré-filtro dinâmico.

4.3.3 Pré-Filtro

Foram utilizadas duas unidades de pré-filtro de fluxo ascendente. Cada unidade era cilíndrica, em acrílico com 0,16m de diâmetro, 1,60m de altura e taxa de aplicação de $24\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e possuía meio filtrante de pedregulho, segundo recomendações de DI BERNARDO *et al* (1999). Pequenas bombas de aquário eram responsáveis pelo recalque de água para os tubos de entradas dos pré-filtros. Por meio da diferença de perda de carga era possível definir a taxa de aplicação.

Em cada unidade o meio filtrante era composto por quatro camadas de pedregulho de 0,20m de espessura cada. E cada camada possuía pedregulho de granulometria distinta: 1,68 a 2,4mm para a camada superior; 3,36 a 6,35mm para a camada intermediária superior; 9,52 a 12,7mm para a camada intermediária inferior; e 12,7 a 19,1mm para a camada inferior. A figura 4 apresenta as diferentes granulometrias de cada pré-filtro.

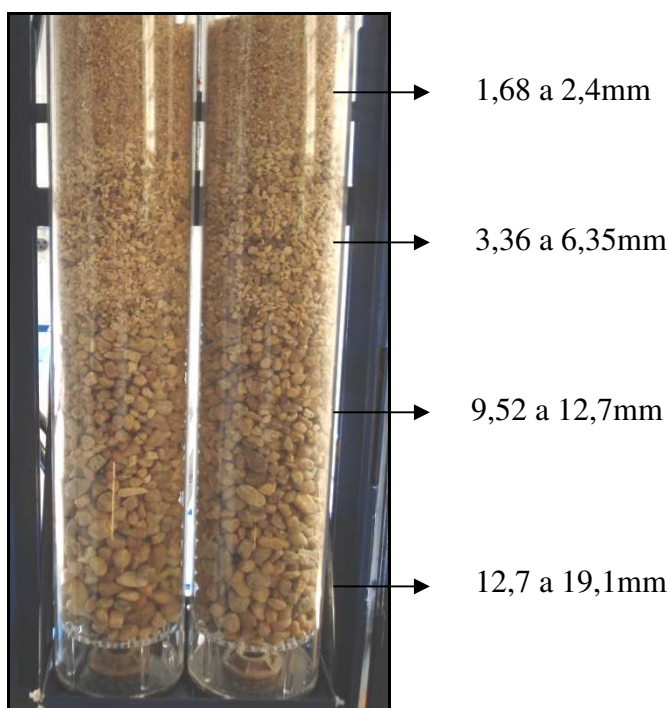


Figura 4. Pré-filtros de fluxo ascendente

Empregaram-se duas unidades de pré-filtro para a ampliação do uso do sistema FIME, como pode ser visualizado na figura 4, devido a possibilidade de aplicação da solução coagulante a partir de sementes de *Moringa oleifera* em um tendo o outro como controle.

Da mesma forma que foi realizada a lavagem do pedregulho do pré-filtro dinâmico, procedeu-se com o pedregulho dos pré-filtros, tudo foi lavado em água corrente e separado por peneiras com as aberturas correspondentes a granulometria desejada em cada camada do pré-filtro.

4.3.4 Filtro Lento

Foram utilizadas quatro unidades de filtro lento, cada uma com as seguintes características: cilíndrico, de acrílico, com dimensões de 0,16m de diâmetro e 1,60m de altura e taxa de aplicação de $6\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. Pequenas bombas de aquário eram responsáveis pelo recalque de água para os tubos de entradas dos pré-filtros. Por meio da diferença de perda de carga era possível definir a taxa de aplicação. A taxa de filtração era adquirida por meio de pequenas bombas conhecidas comercialmente como bombas de aquário. O meio filtrante era composto por manta não tecida como camada suporte, areia e manta não tecida como camada superior.

O motivo de se empregar quatro unidades de filtros lentos deve-se ao emprego de solução coagulante nesta etapa e a possibilidade de comparação com os demais filtros sem adição da solução. A figura 5 apresenta os filtros lentos.

Antes do início dos ensaios, foi feito o preenchimento dos filtros lentos com água no sentido ascendente numa pequena vazão, para a remoção de bolhas de ar.

Areia

Foi utilizada areia grossa de construção civil, lavada com água de rede pública e seca à temperatura ambiente. Após o período de secagem a areia foi passada por peneira de 1mm de abertura, segundo recomendações de FERRAZ e PATERNIANI (2002), atingindo as seguintes características granulométricas: Tamanho efetivo D_{10} de 0,24mm, coeficiente de desuniformidade igual a 3,04 e tamanho dos grãos de 0,15 e 1,2mm.

Mantas Sintéticas Não Tecidas

Foram utilizados dois tipos de mantas não tecidas durante o experimento, com características descritas na tabela 1. Durante o restante deste trabalho, as mantas utilizadas serão descritas conforme a nomenclatura apresentada – M1 e M2.

Tabela 1. Características das mantas não tecidas utilizadas no topo da camada do meio filtrante dos filtros lentos.

Nomenclatura	Marca	Gramatura
M1	Ober	150g.m^{-2}
M2	Ober	400g.m^{-2}

Na camada suporte do meio filtrante foi utilizada uma única camada de M1, como objetivo de impedir o escoamento da areia pela saída do filtro lento durante o tratamento de água.

Segundo recomendações de PATERNIANI (1991), FERRAZ e PATERNIANI (2002), e SILVA (2003) foram realizados inicialmente ensaios com três camadas M2 no topo da camada do meio filtrante dos filtros lentos. Posteriormente somente o filtro lento 4 sofreu alteração no número de camadas de mantas não tecidas, passando de três camadas de M2 para apenas uma camada de M1, para avaliação da qualidade do efluente.

Nos ensaios com presença de solução coagulante, quando o FL4 atingia o nível máximo de perda de carga, era realizado o seu esvaziamento, em seguida as mantas não tecidas eram removidas, lavadas e repostas para o início de uma nova carreira de filtração de perda de carga, enquanto os demais filtros lentos continuavam normalmente com suas carreiras. Quando os demais filtros lentos atingiam seu nível máximo de perda de carga, o mesmo procedimento de limpeza era efetuado.



Figura 5. Filtros lentos

4.3.5 Floculador granular

Durante os ensaios de tratamento de água foram utilizados dois floculadores de meio granular, responsáveis pela mistura lenta da solução coagulante a base de sementes de *Moringa oleifera* antes da etapa da pré-filtração e da filtração lenta.

Pela diferença de vazão do efluente nestas etapas do sistema, cada floculador deveria ter suas próprias características para atingir o valor de número de Camp proposto por VIANNA (1997) entre 14000 e 16000. Para encontrar essas características foram realizados ensaios através de dois floculadores de dimensões iguais (0,1m de diâmetro e 1,0m de altura), nos quais foram avaliados os diferentes valores de perda de carga do sistema para diferentes granulometrias de pedregulho e diferentes alturas de camada do meio filtrante. Determinaram-se os coeficientes de Forchheimer adequados para esse tipo de floculação e houve a comparação entre os valores medidos durante os ensaios os calculados posteriormente a partir das medições. A partir destes valores foi possível traçar uma curva de relação entre Vazão e Número de Camp para as diferentes características ensaiadas. Também foram realizados ensaios deste modo com a mesma granulometria do pedregulho do pré-filtro, para avaliar se o pré-filtro estaria desenvolvendo a função de floculador antes da etapa da filtração lenta.

O anexo 1 apresenta a metodologia dos ensaios realizados, os valores de granulometrias ensaiados, as variações das alturas das camadas do meio granular, os resultados medidos e calculados de cada ensaio, além da relação entre o Número de Camp e o diâmetro do floculador a ser utilizado. A partir dos resultados obtidos, determinou-se que para a etapa da pré-filtração seria utilizado um floculador de meio granular com 60mm de diâmetro (abertura comercialmente encontrada), com 0,80m de altura, contendo pedregulho de granulometria variando entre 20 e 38mm. Para a etapa da filtração lenta definiu-se um floculador de meio granular com 25mm de diâmetro (abertura comercialmente ensaiada), com 0,45m de altura, composto por pedregulho de granulometria variando entre 4 e 10mm. Ambos os floculadores foram construídos em PVC.

4.3.6 Reservatórios internos: R1 e R2

Os reservatório interno 1 tinha a função de receber excedentes das etapas do PFD, das caixas de distribuição dos PF e FL, descargas de fundo do PFD, água de limpeza dos FL e

água excedente do reservatório 2. O reservatório 1 possuía controlador de nível para que ao atingir um certo volume a água coletada fosse direcionada para o reservatório externo, de maneira que todo o sistema funcionasse como circuito fechado.

O reservatório interno 2 tinha a função de captar a água tratada proveniente dos filtros lentos e era utilizado no período e limpeza dos mesmo, pois a água utilizada era fornecida por este reservatório. Este reservatório também possuía controlador de nível, que em certo ponto enviava água para o reservatório 1, responsável pelo envio da água para o reservatório externo.

4.3.7 Painele de controle

O painel de controle foi implantado para facilitar e diminuir os riscos de operação do sistema de tratamento de água, sendo que cada bomba responsável pela vazão de cada etapa estava conectada ao painel, assim como as bombas dosadoras da solução coagulante, os controladores de nível das bombas dos reservatórios internos e externo e o agitador do reservatório externo.

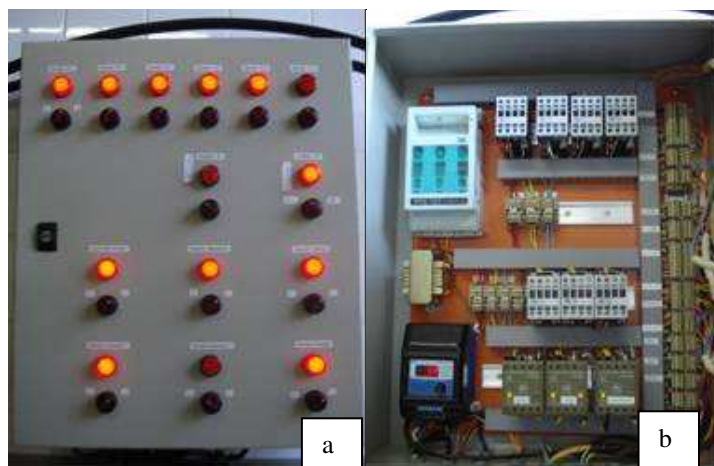


Figura 6. Parte externa (a) e interna (b) do painel de controle

4.4 Solução Coagulante

A solução coagulante responsável pela agregação de partículas no sistema de tratamento de água utilizada foi preparada a partir das sementes de *Moringa oleifera*.

4.4.1 Preparo da solução coagulante a partir de sementes de *Moringa oleifera*

Inicialmente foi pensado no preparo da solução coagulante através da trituração das sementes de *Moringa oleifera* com o pilão, entretanto, notou-se que o preparo precisaria ser mais rápido e prático para a aplicação diária da solução no sistema FIME. Para aperfeiçoar o preparo da solução coagulante decidiu-se utilizar a máquina de moer, apresentada na figura 7, segundo recomendações de ARANTES (2010). Os autores apresentam um estudo realizado no preparo de solução de *Moringa oleifera* a partir de diferentes equipamentos: pilão, liquidificador, mixer e máquina de moer; as soluções preparadas com esses equipamentos são testadas no tratamento de uma água turva sintética com turbidez inicial em torno de 100NTU. Os resultados apontam que a máquina moer apresenta as maiores eficiências na redução dos valores de turbidez com este tipo de água. As metodologias apresentadas por NDABIGENGESERE *et al* (1995), MUYIBI & EVISON (1995a, 1995b) também serviram como base no preparo da solução coagulante apesar de serem necessárias algumas adaptações.

Portanto, para esta pesquisa vagens secas foram colhidas do campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp, Campinas, em seguida ocorreu a remoção das sementes das vagens, as sementes foram postas em dessecador por 24h e armazenadas sob refrigeração segundo recomendações de BEZERRA *et al* (2004) e KATAYON *et al* (2005) por no máximo 4 meses.

As sementes foram descascadas, processadas na máquina de moer, em seguida o pó resultante do moedor doméstico foi passado por uma peneira de 0,8mm de abertura; misturou-se o pó moído com água destilada para concentração de 11,884g.L⁻¹ *Moringa oleifera*, agitou-se por 2 minutos em agitador magnético e peneirou-se a solução utilizando peneira de abertura 125µm. Após o preparo da solução, a mesma era mantida em frasco de vidro sob constante agitação para conservação de suas características.

Diariamente eram preparados 9L de solução para manter o abastecimento constante do sistema por 24h, a partir dessa solução inicial duas bombas dosadoras direcionavam a solução coagulante para a etapa do pré-filtro e para o filtro lento, passando pelos floculadores quando necessário. A figura 8 apresenta a solução coagulante sob agitação e as duas bombas dosadoras.



Figura 7. Máquina de moer



Figura 8. Agitador magnético da solução coagulante e bombas dosadoras

4.4.2 Dosagem da solução coagulante

Após a realização de um primeiro ensaio do tratamento de água bruta sem adição coagulante no sistema de filtração em múltiplas etapas, fez-se uma média dos resultados de turbidez obtidos em cada etapa do tratamento. A partir desses dados foi possível determinar a dosagem de solução coagulante a ser aplicada nas etapas de pré-filtração e filtração lenta.

Os valores médios de turbidez das etapas da pré-filtração (33,45NTU) e filtração lenta (26,71NTU) foram comparados com os valores obtidos por ARANTES (2010), conforme dados apresentados na figura 9, que estabelece a relação entre diferentes valores de turbidez de água bruta para diferentes valores de concentração de solução coagulante a partir de sementes

de *Moringa oleifera*. Definiu-se então, que na etapa da pré-filtração seria utilizado uma dosagem de 131mg.L^{-1} de solução coagulante a partir sementes de *Moringa oleifera* e na etapa da filtração de 106mg.L^{-1} .

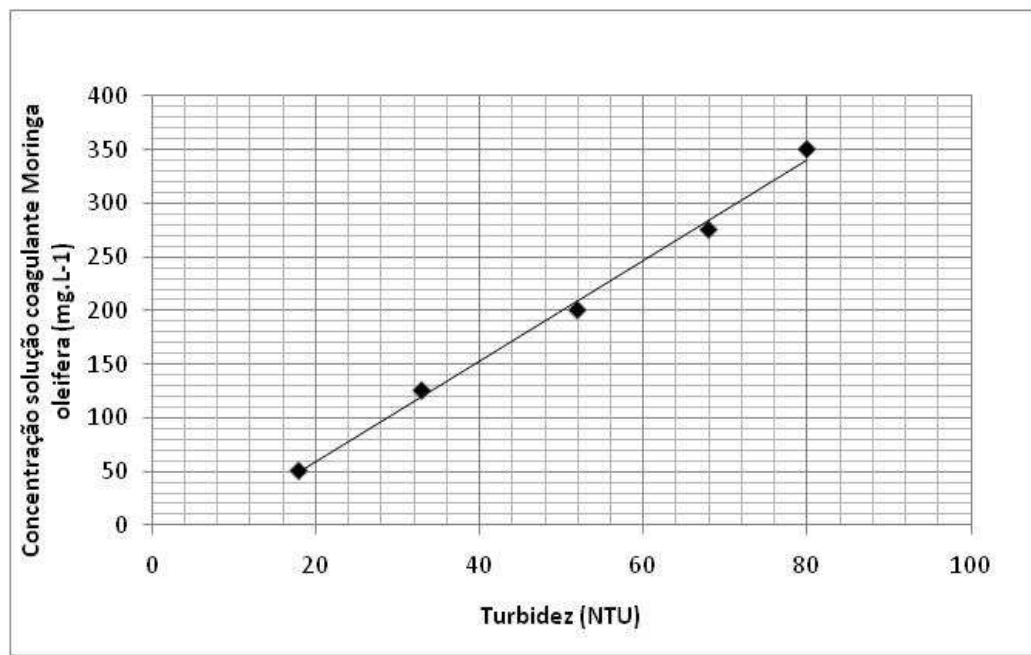


Figura 9. Relação entre diferentes valores de turbidez de água bruta para diferentes valores de concentração de solução coagulante a partir de sementes de *Moringa oleifera* (ARANTES, 2010).

Como a solução coagulante utilizada nos dois pontos de aplicação da solução coagulante era proveniente do mesmo reservatório, o controle da dosagem em cada ponto de aplicação era efetuado através do controle da vazão das bombas dosadoras e de pequenos registros nas saídas de suas respectivas mangueiras. A seguir são apresentados os cálculos efetuados para definição da concentração inicial da solução coagulante no reservatório que abastece as duas bombas dosadoras:

$$QT_{pf} = QPF + Qbd_{pf} \quad (\text{Equação 1})$$

$$QT_{fl} = QFL + Qbd_{fl} \quad (\text{Equação 2})$$

$$C_{cm\tilde{a}e} = \frac{QT \times Cc}{Qbd} \quad (\text{Equação 3})$$

$$Qbd = \frac{QT \times Cc}{C_{cm\tilde{a}e}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

QT_{pf} = Vazão total do pré-filtro ($L.h^{-1}$)

QPF = Vazão Pré-Filtro, vazão de projeto ($L.h^{-1}$)

Qbd_{pf} = Vazão da Bomba dosadora Pré – Filtro ($L.h^{-1}$)

QT_{fl} = Vazão total do filtro lento ($L.h^{-1}$)

QFL = Vazão Filtro Lento, vazão de projeto ($L.h^{-1}$)

Qbd_{fl} = Vazão da Bomba Dosadora Filtro Lento ($L.h^{-1}$)

$C_{cm\tilde{a}e}$: concentração da solução coagulante do reservatório que abastece as duas bombas dosadoras ($mg.L^{-1}$)

Cc : concentração da solução nas diferentes etapas.

Concentração de coagulante PF = $131mg.L^{-1}$

Concentração de coagulante FL = $106mg.L^{-1}$

Para definição da concentração coagulante inicial era possível escolher a equação 3 ou 4 para ser utilizada, sendo que QT e Qbd se referem tanto ao PF quanto ao FL.

Levando em consideração que as bombas dosadoras deveriam funcionar 24h e que a solução inicial deveria ser preparada num total de 9L (volume do reservatório disponível), então a vazão máxima das duas bombas dosadoras funcionando ao mesmo tempo deve ser:

$$Qbd_{pf} + Qbd_{fl} = 0,375L.h^{-1} \quad (\text{Equação 5})$$

Pois com essa vazão as bombas dosadoras consumiriam a solução total disponível no reservatório.

A partir das equações 2 e 3, tem-se para o PRÉ-FILTRO

$$C_{c_{m\tilde{a}e}} \times Qbd_{pf} = (QPF + Qbd_{pf}) \times C_{c_{pf}} \quad (\text{Equação 6})$$

Substituindo,

$$Cc_{m\tilde{a}s} \times Qbd_{pf} = (30 + Qbd_{pf}) \times 131 \quad (\text{Equação 7})$$

$$Qbd_{pf}(Cc_{m\tilde{a}s} - 131Q) = 3930 \quad (\text{Equação 8})$$

Para FILTRO LENTO

$$Cc_{m\tilde{a}s} \times Qbd_{fl} = (5 + Qbd_{fl}) \times 106 \quad (\text{Equação 9})$$

$$Qbd_{fl}(Cc_{m\tilde{a}s} - 106Q) = 530 \quad (\text{Equação 10})$$

Admitindo-se o valor de Qbd_{fl} como sendo $0,045L.h^{-1}$, menor vazão da bomba dosadora utilizada, temos:

$$0,045(Cc_{m\tilde{a}s} - 106) = 530 \quad (\text{Equação 11})$$

$$Cc_{m\tilde{a}s} = 11,884g.L^{-1} \quad (\text{Equação 12})$$

Substituindo a equação 11 em 7, temos:

$$Qbd_{pf} = 0,34L.h^{-1} \quad (\text{Equação 13})$$

E,

$$Qbd_{fl} = 0,045L.h^{-1} \quad (\text{Equação 14})$$

Portanto, temos que:

$$Qbd_{pf} + Qbd_{fl} = 0,3445L.h^{-1} \quad (\text{Equação 15})$$

Valor adequado e inferior ao estipulado na equação 5. Para 24h o consumo de solução coagulante foi de 8,268L.

Na fase final dos ensaios a dosagem da solução coagulante na etapa dos filtros lentos foi reduzida pela metade, ou seja, 53mg.L^{-1} , e esta concentração também foi controlada através do controle de vazão da saída das bombas dosadoras.

4.4.3 Pontos de aplicação da solução coagulante

A influência da solução coagulante foi estudada através da sua aplicação em duas etapas: antes de uma das unidades dos pré-filtros (PF2) e outra antes de uma das unidades dos filtros lentos (PF4). Sendo que nessas etapas houve a variação de presença ou ausência de floculador de meio granular para a passagem da solução coagulante. O esquema de aplicação da solução coagulante é apresentado na figura 10 e os pontos de aplicação são indicados na figura 11, através de flechas vermelhas.

4.5 Pontos de coleta de amostras

Foram definidos oito pontos de coletas de amostras para a realização das análises: água bruta (AB) , efluentes das etapas pré-filtro dinâmico (PFD), pré-filtros (PF) 1 e 2 e filtros lentos (FL) 1, 2, 3 e 4, representados na figura 11 pelos círculos amarelos.

A figura 11 apresenta um momento onde o sistema ainda não havia entrado em funcionamento.

4.6 Monitoramento do sistema experimental

Para auxiliar no monitoramento do sistema experimental o agitador externo possuía hélice de agitação para homogeneização da bentonita adicionada diariamente para manutenção da turbidez inicial. O controle de vazão de entrada no PFD foi realizado através de rotâmetro e a conferência do valor adequado, em torno de 630L.h^{-1} , era realizada três vezes ao dia. Ao longo do sistema, os controles de vazão necessários no efluente do PFD, afluente dos PF 1 e 2, e afluentes dos FL 1, 2, 3 e 4 eram realizados através do método volumétrico, por meio de proveta e cronômetro, também três vezes ao dia. Recordando que cada controlador de vazão

estava conectado a um sistema automático de controle, assim como os controladores de níveis dos agitadores internos e externo.

Para avaliação do sistema de Filtração em Múltiplas Etapas também foram analisados os seguintes parâmetros: pH, cor, turbidez, temperatura, sólidos totais, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica para o afluente e efluente de cada etapa do processo.

Diárias: pH, cor, turbidez, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica (além do controle da altura da coluna d'água nos filtros lentos).

Duas vezes semanais: Concentração de sólidos totais.

Todos os parâmetros foram analisados no laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, segundo padrões analíticos descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 20th Edition, 1998.

4.7 Forma de análise dos resultados

A interpretação dos resultados foi feita com análise de estatística simples, com o uso de médias, desvio padrão e variância.

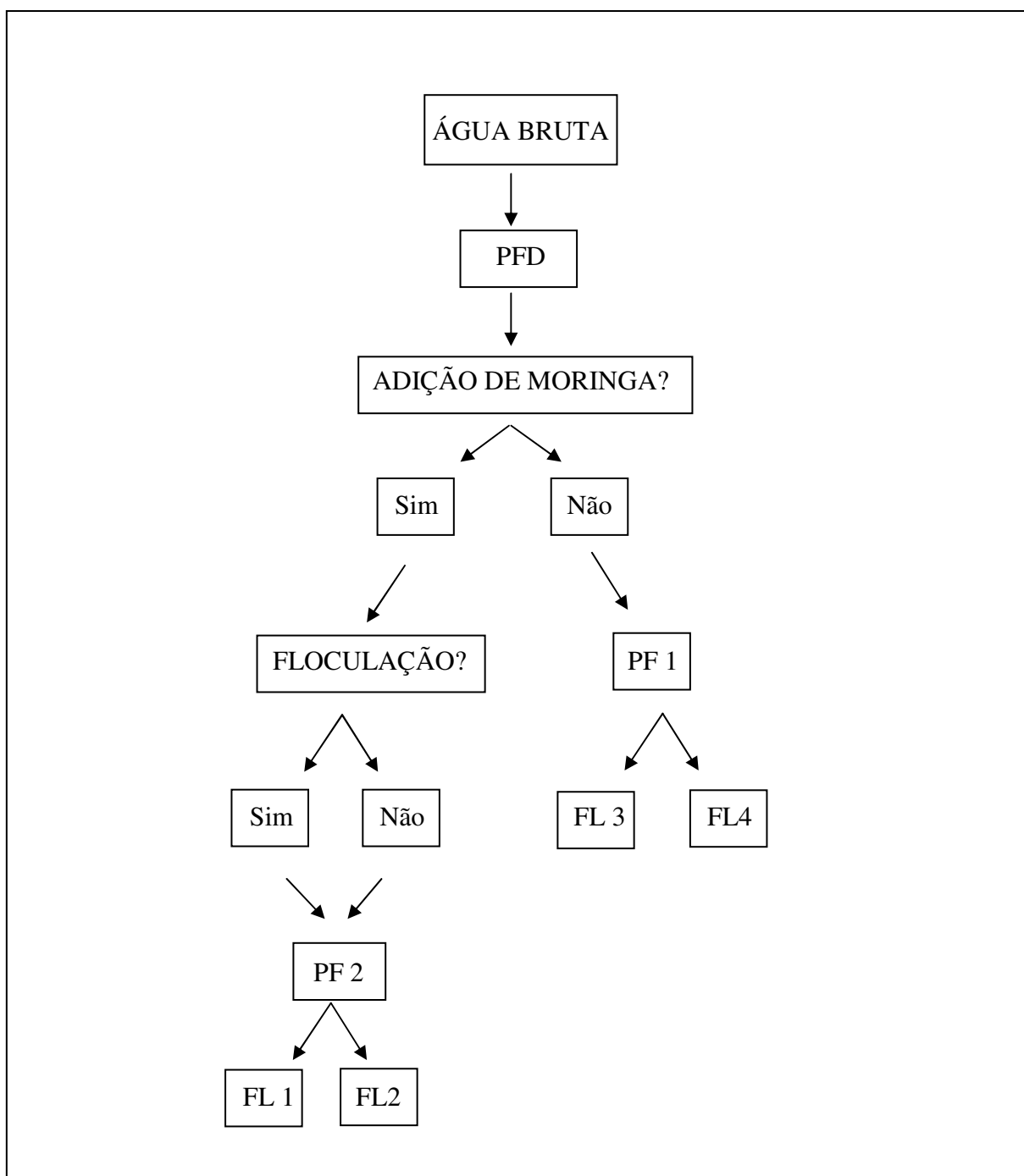


Figura 10. Esquema de aplicação de solução coagulante no sistema FIME

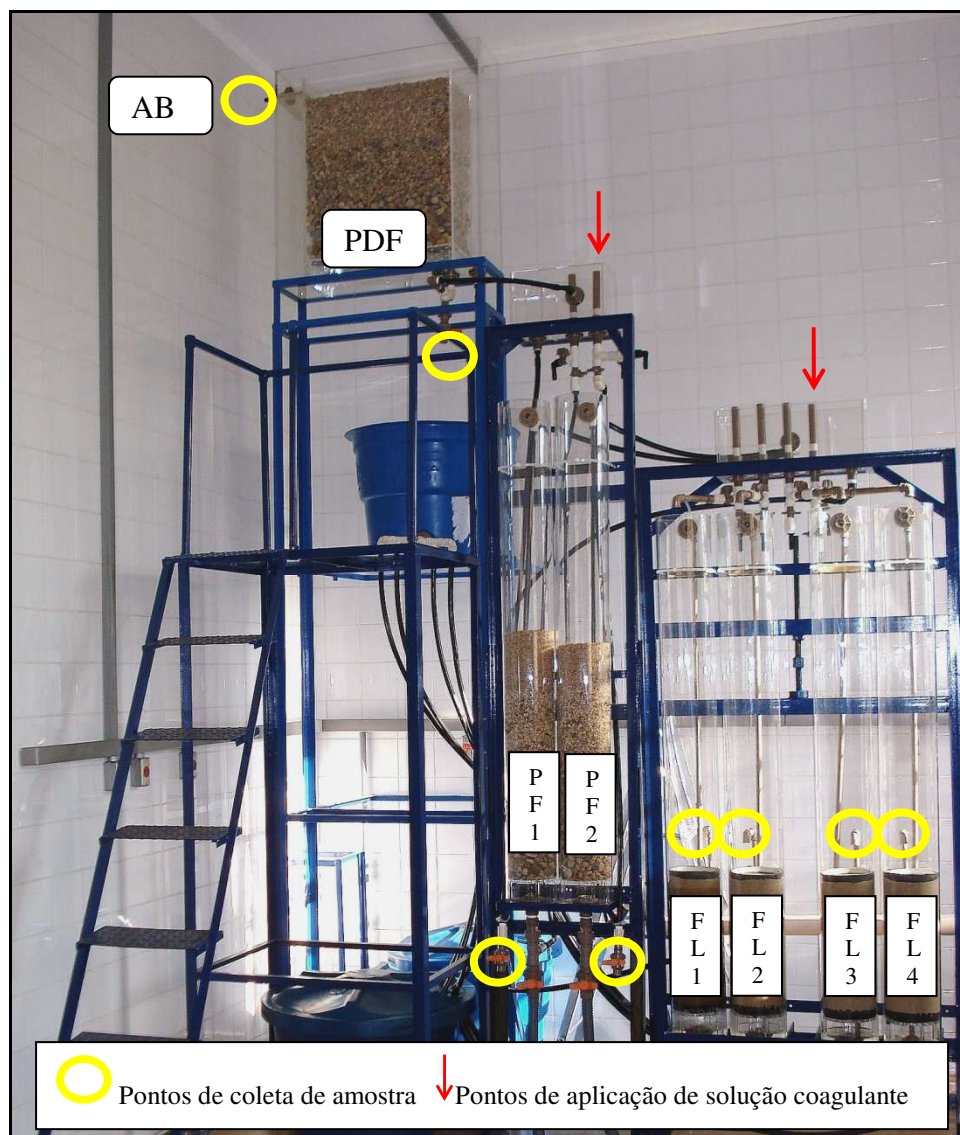


Figura 11. Pontos de coleta de amostra e pontos de aplicação de solução coagulante no sistema FIME

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos dados não segue a mesma ordem dos ensaios realizados durante o funcionamento da instalação piloto FIME. Os dados foram dispostos de maneira a agrupar os ensaios com características semelhantes, como ausência ou presença de solução coagulante e presença ou ausência de floculação. Além disso, dentro de cada grupo de ensaio são especificados em tópicos as alterações do número de camadas não tecidas no topo do meio filtrante do filtro lento.

5.1 Ensaios de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – Ausência de solução coagulante

Baseados na ausência da solução coagulante serão apresentados os resultados dos seguintes ensaios realizados:

- 1) Filtros lentos 1, 2, 3 e 4 com 3 camadas de mantas não tecidas de 400g.m^{-2} de gramatura (3 M2).
- 2) Filtros lentos 1, 2 e 3 com três camadas de manta não tecida de 400g.m^{-2} de gramatura (3 M2) e filtro lento 4 com uma camada de manta não tecida de 150g.m^{-2} de gramatura (1 M1).

5.1.1 Filtros lentos 1, 2, 3 e 4 com 3 camadas de mantas não tecidas de 400g.m^{-2} de gramatura (3 M2).

O primeiro ensaio na instalação piloto FIME foi realizado somente com água turva sintética com o intuito de averiguar as condições de funcionamento de cada etapa do sistema e conhecer suas respectivas eficiências sem a presença de solução coagulante. Neste ensaio foram avaliados somente os parâmetros de turbidez, cor aparente e perda de carga.

Este ensaio foi realizado seguindo as características da metodologia já descrita, todos os filtros lentos foram ensaiados com três camadas de M2.

Turbidez

Os valores de turbidez obtidos ao longo deste ensaio são apresentados na figura 12, onde é possível observar valores de pico que chegaram a 178 e 224 NTU. Entretanto, as etapas de pré-filtração e filtração lenta conseguiram atenuar de maneira eficiente esses picos, pois os valores finais de turbidez até mesmo nesses casos ficaram em média muito semelhantes, em torno de 9,6NTU.

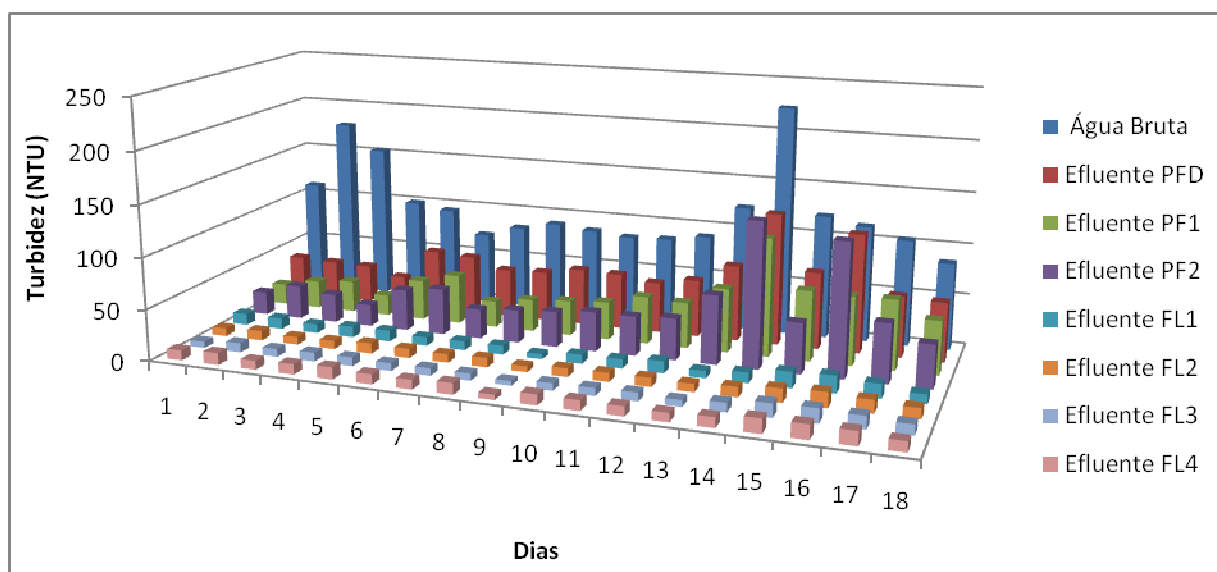


Figura 12. Turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2

É possível observar na figura 13 que durante este primeiro ensaio as unidades que funcionaram em paralelo tem seus valores de turbidez muito próximos, como pré-filtros e filtros lentos, o que demonstra a confiabilidade do sistema.

Num estudo realizado por PINTO & HERMES (2005) somente com filtração lenta, com água bruta inicial com turbidez de 66,8NTU (valor mais próximo ao afluente dos filtros lentos que foi em média de 47,5NTU neste ensaio), os autores obtiveram turbidez remanescente de 19,3NTU, valor superior à média de 9,6NTU do efluente final deste ensaio. Resultados semelhantes foram encontrados por DI BERNARDO *et al* (1999). Demonstrando dessa maneira que o sistema operou adequadamente e apresentou resultados semelhantes com aqueles dispostos na literatura.

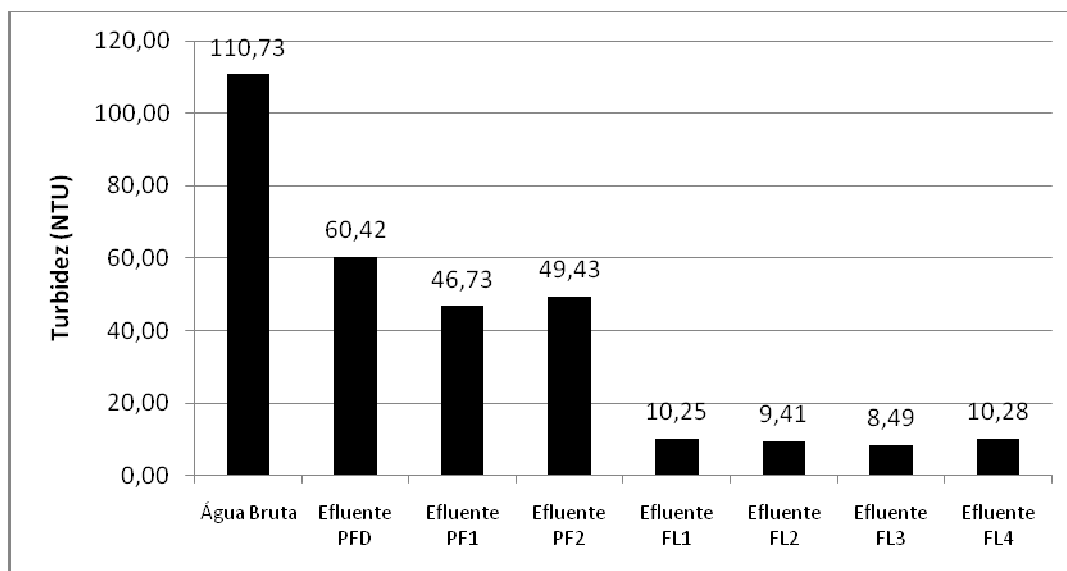


Figura 13. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.

A tabela 2 apresenta a eficiência de cada etapa do sistema em relação à etapa anterior, deste modo temos a eficiência do pré-filtro dinâmico em relação a água bruta; os pré-filtros em relação ao efluente do pré-filtro dinâmico, os filtros lentos 1 e 2 em relação ao efluente do pré-filtro 2 e os filtros lentos 3 e 4 em relação ao efluente do pré-filtro 1. E na segunda coluna é apresentada a eficiência cumulativa, ou seja, em relação à água bruta. Sendo que a eficiência geral média do sistema foi de 91,32%. Eficiência superior à apresentada por VERAS & DI BERNARDO (2008), que durante o tratamento de água pelo sistema FIME apresentou valores de remoção de até 80% para o parâmetro turbidez

Tabela 2. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – ausência de solução coagulante – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2

Etapa do sistema	Remoção de turbidez em relação ao afluente de cada etapa (%)	Remoção de turbidez em relação à AB
Pré filtro dinâmico	45,43	45,43
Pré-filtro 1	22,66	57,80
Pré-filtro 2	18,19	55,36
Filtro Lento 1	79,26	90,74
Filtro Lento 2	80,96	91,50
Filtro Lento 3	81,83	92,33

Cor Aparente

A remoção de cor aparente acompanhou a linha de remoção da turbidez, com redução gradativa ao longo das etapas. Os valores médios da cor aparente remanescente de cada etapa são apresentados na figura 14, e a tabela 3 apresenta a eficiência de cada etapa do sistema FIME. O sistema apresentou uma eficiência geral de 89,99% na remoção de cor aparente.

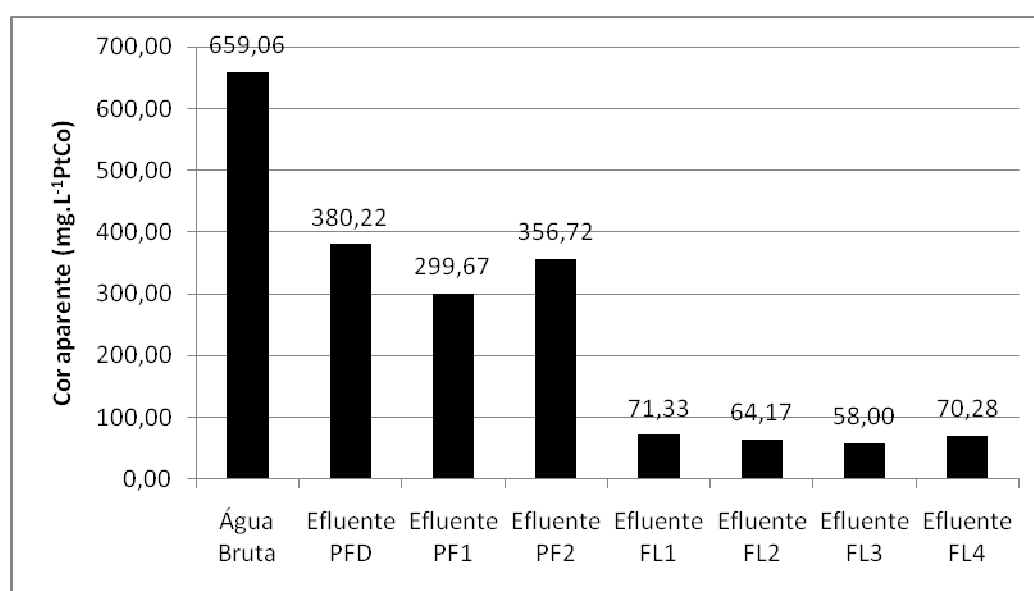


Figura 14. Valores médios de cor aparente (m.L⁻¹ PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.

Tabela 3. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – ausência de solução coagulante – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.

Etapa do sistema	Remoção de turbidez em relação ao afluente de cada etapa (%)	Remoção de turbidez em relação à AB
Pré filtro dinâmico	42,31	42,31
Pré-filtro 1	21,19	54,53
Pré-filtro 2	6,18	45,87
Filtro Lento 1	80,00	89,18
Filtro Lento 2	82,01	90,26
Filtro Lento 3	80,65	91,26

Analisando a figura 14 e a tabela 3, é possível notar que houve uma pequena diferença na eficiência de remoção da cor aparente na etapa de pré-filtração: o pré-filtro 2 apresenta desempenho inferior quando comparado ao pré-filtro 1, o mesmo ocorreu na remoção de turbidez, mas de maneira menos perceptível. Em alguns momentos dos ensaios não era possível controlar a vazão, e isso pode ter influenciado na capacidade de operação do sistema. A passagem pelos filtros lentos proporcionou a homogeneização dos valores de cor aparente remanescente que ficaram em média entre 58,00 e 71,33mg.L⁻¹ PtCo. Entretanto esses valores ficaram acima do padrão de aceitação para consumo humano estabelecidos pela PORTARIA 518 do Ministério da Saúde (2004), que é de 15,00mg.L⁻¹ PtCo, o que demonstra a necessidade de amadurecimento do sistema.

Perda de carga

Os filtros lentos 1 e 2 apresentaram comportamento diferente dos filtros lentos 3 e 4 em relação a perda de carga. Os primeiros (FL1 e 2), com afluente proveniente do PF2, tiveram menor tempo de duração de carreira de filtração, já que a água proveniente para estes filtros tinha uma qualidade levemente inferior se comparada à água destinada aos filtros lentos 3 e 4, que era proveniente do PF1, como pôde ser observado na figura 12 e 13. Essa diferença na qualidade de água e possíveis variações das vazões de entrada dos filtros lentos podem ter causado a colmatação um pouco mais rápida dos meios filtrantes dos FL 1 e 2. A altura máxima da coluna de água no filtro lento 1 foi atingido no 18º dia, com 0,95m, quando as atividades no sistema foram encerradas. As variações da altura da coluna de água nos filtros lentos podem ser observadas na figura 15.

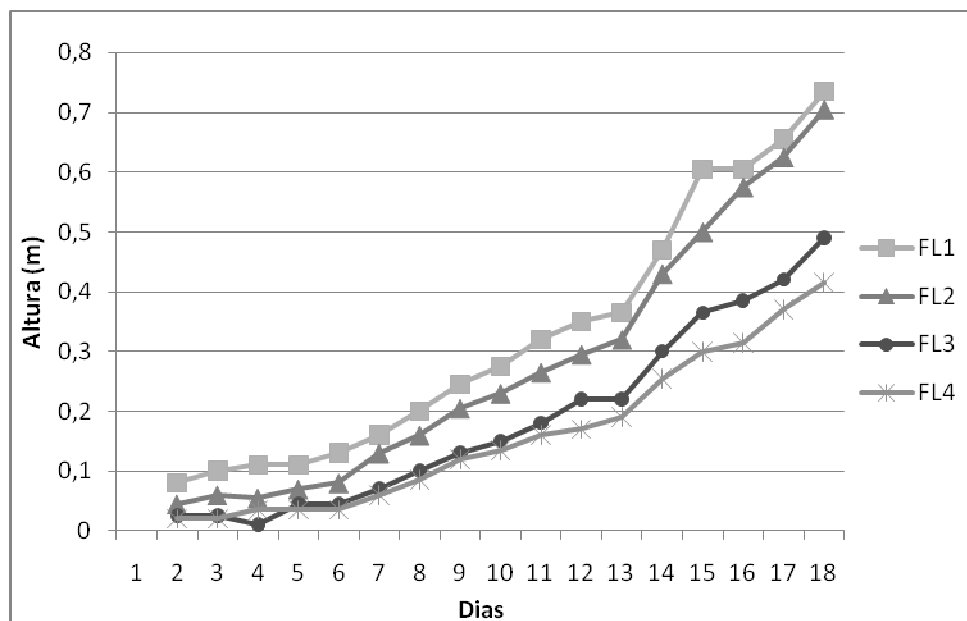


Figura 15. Perda de carga nos filtros lentos ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME, ausência de solução coagulante – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.

5.1.2 Filtros lentos 1, 2 e 3 com três camadas de manta não tecida de 400g.m⁻² gramatura (3 M2) e filtro lento 4 com uma camada de manta não tecida de 150g.m⁻² de gramatura (1 M1)

Este ensaio foi o último a ser realizado dentre todos, visto que a mudança da gramatura da manta não tecida do FL4 ocorreu quando se percebeu a necessidade de avaliação de outras características desta etapa de filtração durante os ensaios com recebimento de *Moringa oleifera*.

Diferentemente do primeiro ensaio realizado somente com água bruta, este ensaio durou 13 dias até que o FL3 atingisse primeiramente, o valor máximo da perda de carga. No entanto, neste ensaio as carreiras de filtração em cada filtro lento prosseguiram até que todos atingissem o nível máximo. O FL4 foi o último a atingir o valor máximo de altura de coluna d'água após 27 dias do início da carreira.

Neste ensaio foram avaliados os parâmetros de turbidez, cor aparente, temperatura, oxigênio dissolvido, pH, condutividade elétrica e acompanhamento da perda de carga diária.

Turbidez

Durante esta carreira de filtração os valores iniciais de turbidez ficaram entre 80,60 e 158NTU, e os valores médios de remoção de turbidez em cada etapa do sistema são apresentados na figura 16. Exceto pelo pré-dinâmico, todas as etapas apresentaram maiores reduções nos valores de turbidez quando comparados ao primeiro ensaio com água bruta, apresentado na figura 13. Os valores médios finais de turbidez remanescente nos filtros lentos 1, 2 e 3 foram de 4,63NTU e 5,09NTU para o filtro lento 4 com apenas 1M1, enquanto a média do primeiro ensaio para todos os filtros lentos foi de 9,3NTU.

A melhora da qualidade final do efluente destes ensaios deve-se a utilização contínua do sistema FIME, visto que no primeiro ensaio realizado a turbidez remanescente pode ser derivada da presença de compostos que não foram removidos durante a lavagem da areia utilizada nos filtros lentos.

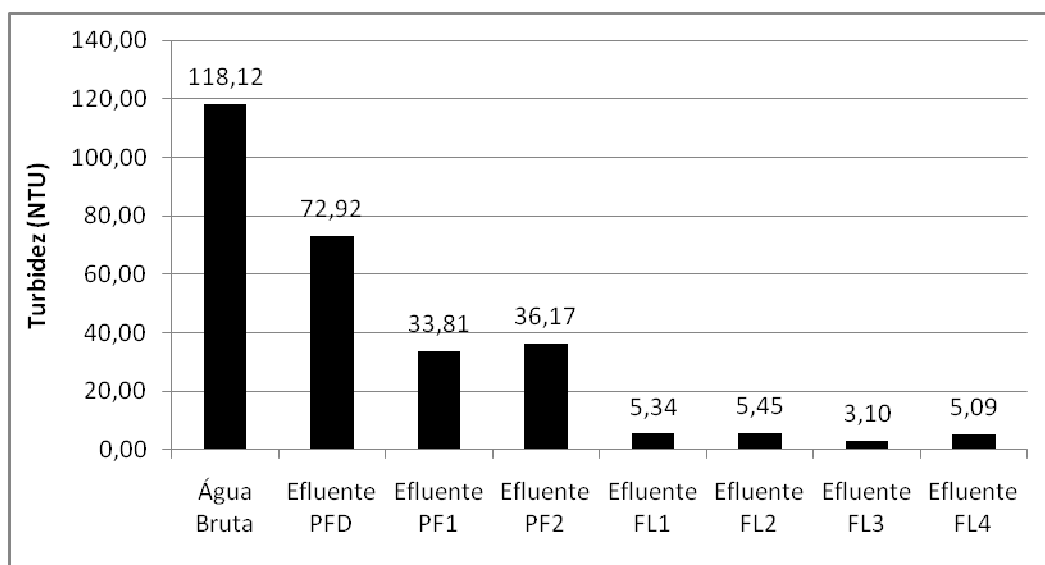


Figura 16. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1

A eficiência de remoção de turbidez em cada etapa do sistema FIME, em relação ao seu afluente, pode ser observada na tabela 4. Como consequência dos valores mais altos de turbidez remanescente das etapas iniciais (Água bruta e PFD) os valores de eficiência das etapas finais foram aumentados, se comparados ao ensaio anterior, com valores apresentados

na tabela 4. Os valores finais de eficiência do sistema atingiram 95,69% na saída do filtro lento 4 com apenas uma camada de manta não tecida com gramatura de 150g.m⁻² e 96,08% para os demais filtros. A presença de apenas uma camada de manta não tecida no topo da camada filtrante do filtro lento 4 influenciou de maneira pouco significativa no resultado final do tratamento do sistema.

Tabela 4. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – ausência de solução coagulante – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.

Etapas do sistema	Remoção de turbidez em relação ao afluente de cada etapa (%)	Remoção de turbidez em relação à AB (%)
Pré filtro dinâmico	38,27	38,27
Pré-filtro 1	53,64	71,38
Pré-filtro 2	50,40	69,38
Filtro Lento 1	85,22	95,48
Filtro Lento 2	84,93	95,39
Filtro Lento 3	90,82	97,37
Filtro Lento 4	84,95	95,69

Cor aparente

A redução de cor aparente durante este ensaio acompanhou a redução da turbidez, ou seja, a presença de apenas uma camada de manta não tecida com gramatura de 150g.m⁻² no FL4 não influenciou de maneira significativa no processo de tratamento, como é possível notar na figura 17. Neste caso o efluente final do FL3 apresentou o menor valor de cor aparente, 21,71mg.L⁻¹ PtCo e uma das explicações pode ser a persistência de resíduos de *Moringa oleifera* que favoreceram o aumento de turbidez nos demais filtros lentos (FL 1, 2 e 3) que a receberam nos ensaios anteriores, já que este foi o último realizado.

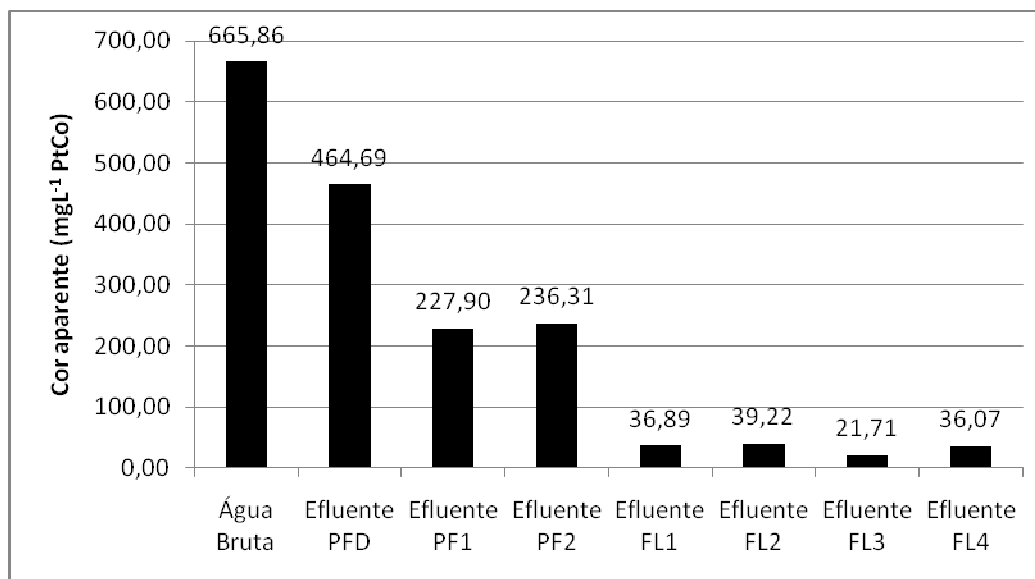


Figura 17. Valores médios de cor aparente (mg.L⁻¹ PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1

Os valores médios de 227,90 e 236,31mg.L⁻¹ PtCo na etapa de pré-filtração representam uma eficiência de remoção de 64%, valores superiores ao apresentados por VERAS & DI BERNARDO (2008), durante operação de sistema FIME que foi de 54% para esta mesma etapa.

Os pré-filtros apresentaram valores de eficiência muito próximos quando comparados entre si. Apesar da presença de apenas uma camada de manta não tecida M1 no FL4, este filtro atingiu eficiência semelhantes aos filtros lentos 1, 2, como pode ser visualizado na tabela 5. A eficiência geral do sistema foi de 94,58% no efluente do filtro lento 4 e 95,10% para os demais filtros lentos.

Tabela 5. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – ausência de solução coagulante – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.

Etapa do sistema	Remoção de turbidez em relação ao afluente de cada etapa (%)	Remoção de turbidez em relação à AB (%)
Pré filtro dinâmico	30,21	30,21
Pré-filtro 1	50,96	65,77
Pré-filtro 2	49,15	64,51
Filtro Lento 1	84,39	94,46

Filtro Lento 2	83,40	94,11
Filtro Lento 3	90,47	96,74
Filtro Lento 4	84,17	94,58

Outros parâmetros

Dentre os demais parâmetros analisados estão pH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica, cujos resultados médios obtidos durante este ensaio são apresentados na tabela 6. Uma explanação é dada ao final nas considerações sobre estes parâmetros.

Tabela 6. Valores médios de pH, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica (CE) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.

Parâmetro	Etapas do sistema FIME							
	AB	PFD	PF1	PF2	FL1	FL2	FL3	FL4
pH	8,2	8,2	8,1	7,9	7,8	7,7	7,8	7,8
T (°C)	24,5	24,3	24,0	24,3	23,9	23,9	23,5	23,8
OD (mg.L⁻¹)	6,26	6,04	6,03	5,70	5,55	5,60	5,88	5,84
CE (µS.cm²)	358,86	375,95	369,14	376,18	392,25	382,65	418,00	357,90

Perda de carga

A perda de carga deste ensaio, apresentada na figura 18, se diferenciou do primeiro ensaio realizado somente com água turva sintética, apresentado na figura 15. O FL3 atingiu o valor máximo de altura de coluna d'água 13 dias após o início do funcionamento do sistema, enquanto o FL4 operou 27 dias antes de atingir seu nível máximo. Este fato pode ser explicado pela diferença do número de camadas de mantas não tecidas utilizadas nos filtros lentos – FL 1, 2 e 3 com três camadas de M2 e FL4 com uma camada de M1. A diminuição de três para apenas uma camada de manta M1 no filtro lento 4 demonstrou ser benéfica para o funcionamento do sistema, uma vez que ampliou seu tempo de operação e a qualidade final da água tratada não se alterou significativamente quando comparado aos demais filtros lentos.

Além disso, variações de vazão durante o período de operação do sistema são responsáveis pelas alterações visualizadas na figura 18.

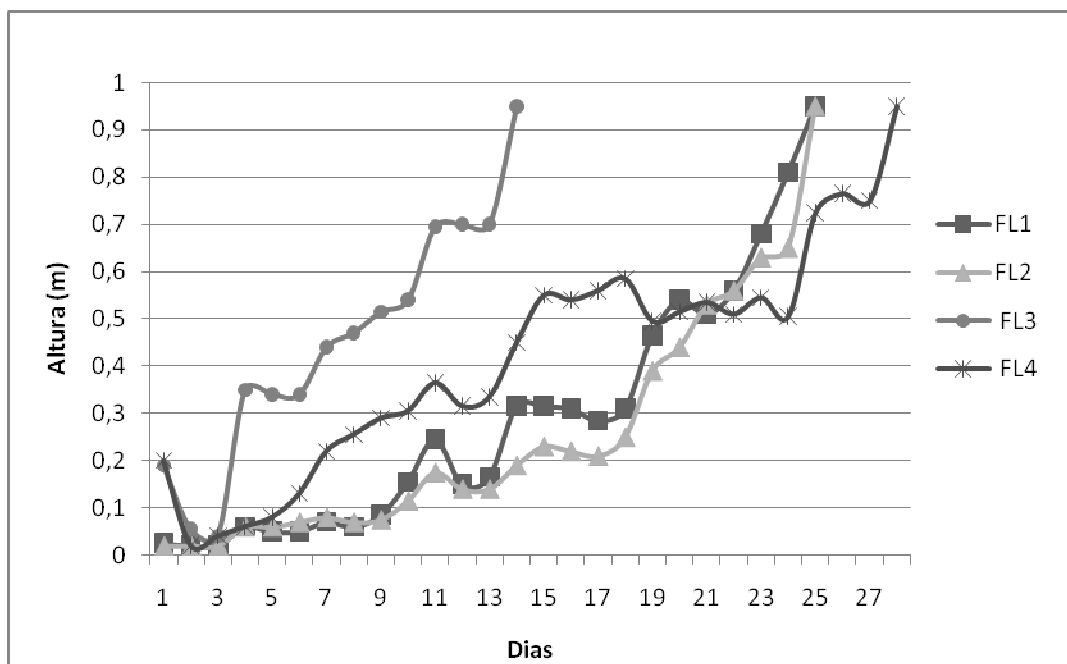


Figura 18. Perda de carga dos filtros lentos longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – ausência de solução coagulante – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1

5.2 Ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – Presença de solução coagulante, ausência de floculação

Baseados na adição de solução coagulante no PF2: 131mg.L^{-1} e FL4: 106mg.L^{-1} , ausência de floculação serão apresentados os resultados dos seguintes ensaios realizados:

- 1) Filtros lentos 1, 2, 3 e 4 com três camadas de manta não tecida de 400g.m^{-2} de gramatura (3 M2).
- 2) Filtros lentos 1, 2, 3 três camadas de manta não tecida de 400g.m^{-2} de gramatura (3 M2) e filtro lento com uma camada de manta não tecida de 150g.m^{-2} de gramatura (1 M1).

5.2.1 Filtros lentos 1, 2, 3 e 4 com três camadas de manta não tecida de 400g.m⁻²

Este ensaio foi o primeiro a ser realizado com a adição de solução coagulante a partir de sementes de *Moringa oleifera*. Os dados apresentam a influência significativa da solução coagulante no sistema, além de trazer a necessidade de lavagens mais freqüentes das mantas não tecidas e descargas de fundo dos pré-filtros mais freqüentes, pois havia a formação de uma camada de aspecto gelatinoso procedente da adição da moringa no topo do meio filtrante do PF2 e na manta superior do FL4 que recebiam o coagulante, como é possível visualizar na figura 19.

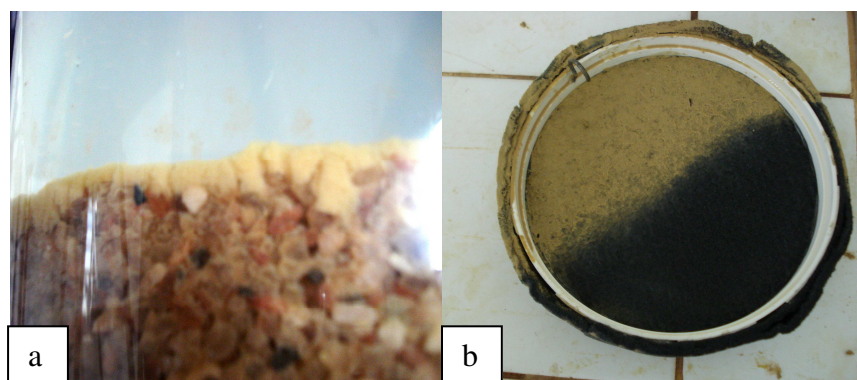


Figura 19. Camada formada a partir da solução coagulante a base de *Moringa oleifera*

a) Pré-filtro 2 - b) Manta não tecida filtro lento 4

A figura 20 apresenta os valores médios de turbidez obtidos durante este ensaio e demonstra que houve uma influência significativa da solução coagulante na etapa da pré-filtração. Ao se comparar o PF2 com o PF1, é possível notar que a adição de solução coagulante a partir de sementes de *Moringa oleifera* favorece maior redução de turbidez no PF2, e por isso oferece melhor qualidade de água para a filtração lenta – FL 1 e 2. Estes filtros lentos apresentam valores de turbidez remanescente de 0,0927 e 1,14NTU, respectivamente, menores que o FL3 que em nenhum momento entra em contato com a solução coagulante, que apresentou turbidez final de 2,71NTU. Estes resultados apresentam maiores reduções que os apresentados por PINTO & HERMES (2005) em estudo realizado também com coagulação a partir de sementes de *Moringa oleifera*. Os autores apontam redução de turbidez de 23,6 para 3,2NTU após coagulação e filtração lenta e 6,4NTU somente com a filtração lenta, sem adição de solução coagulante.

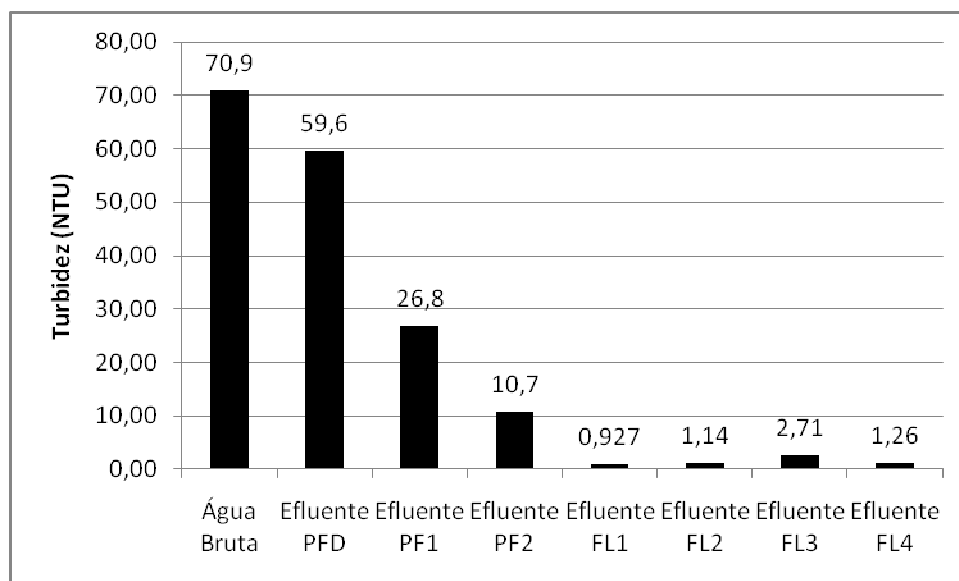


Figura 20. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2

O PF2 que recebeu *Moringa oleifera* apresenta redução de 82,05% em relação ao seu afluente, conforme apresentado na tabela 7, enquanto o PF1 teve eficiência de 55,03% comparada ao mesmo afluente.

Além disso, os valores médios de turbidez apresentam o FL4 como aquele que ofereceu maior capacidade de remoção de turbidez, pois o efluente do PF1 que abasteceu o FL4 era de 26,8NTU. Após a coagulação e filtração lenta o efluente final apresenta turbidez remanescente de 1,26NTU, uma eficiência de 95,30%. Os demais filtros lentos não atingiram mais que 91,34% de eficiência de remoção em relação à etapa anterior, apesar de os FL1 e 2 apresentarem valores médios de turbidez remanescente inferiores que o FL4, a eficiência de remoção é menor, visto que o afluente destes filtros tinha melhor qualidade.

Neste ensaio os valores de eficiência geral do sistema foram de 98,54% nos FL1 e 2, com afluente proveniente do PF2 com adição de solução coagulante, 96,18% no FL3, que passou por todo o sistema sem a adição de solução coagulante, e 98,22% no FL4 que nesta etapa recebeu adição de solução coagulante e tinha seu afluente proveniente do PF1, sem recebimento de coagulante.

Tabela 7. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.

Etapa do sistema	Remoção de turbidez em relação	Remoção de turbidez em
	ao afluente (%)	relação a AB (%)
Pré filtro dinâmico	15,94	15,94
Pré-filtro 1	55,03	62,20
Pré-filtro 2	82,05	84,90
Filtro Lento 1	91,34	98,69
Filtro Lento 2	89,35	98,39
Filtro Lento 3	89,89	96,18
Filtro Lento 4	95,30	98,22

Cor Aparente

A remoção de cor aparente neste primeiro ensaio com a adição de solução coagulante a partir de *Moringa oleifera*, também foi beneficiada pela presença do coagulante. Através de valores médios de cor aparente remanescente, a figura 21 apresenta as diferenças das etapas que receberam a solução coagulante das que não receberam.

O PF1 sem a presença de solução coagulante apresenta 172mg.L⁻¹ PtCo cor aparente remanescente e o PF2 com a adição de 131mg.L⁻¹ de *Moringa oleifera* apresenta 78mg.L⁻¹ PtCo, diferença de quase 30% entre estas etapas que funcionam em paralelo.

A adição da solução coagulante no PF2 favorece a remoção da cor aparente na etapa da filtração lenta nos FL1 e 2, pois estes filtros apresentaram valores finais de 8,0 e 9,0mg.L⁻¹ PtCo, consideravelmente menores que o valor de 18,0mg.L⁻¹ PtCo apresentado pelo FL3. Além disso, estes valores poderem ser enquadrados dentre dos limites aceitáveis para o consumo humano, de 15mg.L⁻¹ PtCo, segundo a PORTARIA 518 do MINISTÉRIO DA SAÚDE (2004). O FL4 que recebeu 106mg.L⁻¹ de *Moringa oleifera* durante o tratamento pelo sistema FIME, também apresenta redução da cor aparente, de 172,0mg.L⁻¹ PtCo (PF1) para 11,0mg.L⁻¹ PtCo, inferior ao valor final do FL3, de 18,0mg.L⁻¹ PtCo. Uma diferença de 4% de eficiência entre estes filtros lentos – 3 e 4.

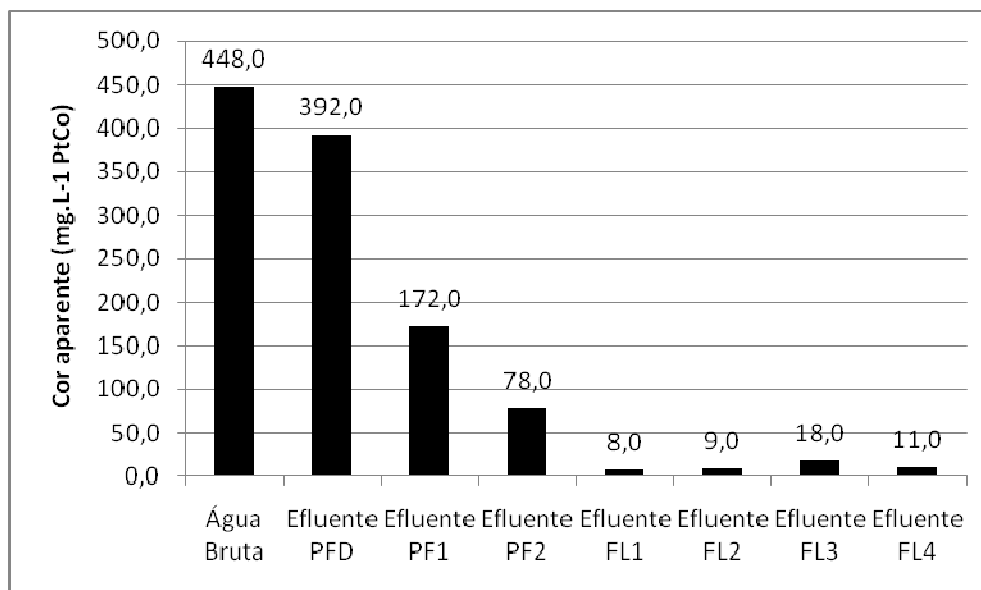


Figura 21. Valores médios de cor aparente (mg.L^{-1} PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2

Os valores de eficiência durante estes ensaios são apresentados na tabela 8, e demonstram a boa capacidade de tratamento do sistema FIME. O PFD apresenta baixa eficiência se comparado aos primeiro ensaios sem a adição de solução coagulante (tabelas 3 e 5), entretanto, naqueles ensaios a cor aparente inicial era em média mais alta ($660,0\text{mg.L}^{-1}$ PtCo) do que a apresentada neste ensaio, que foi de $448,0\text{mg.L}^{-1}$ PtCo. Este valor mais baixo do efluente inicial proporciona também uma eficiência mais baixa na etapa da pré-filtração dinâmica, uma diferença de cerca de 30% de eficiência de remoção entre os ensaios realizados.

Nas etapas subsequentes, o PF2 apresenta uma eficiência bem superior a do PF1, devido à adição de solução coagulante, o que ao final proporciona os valores mais altos de eficiência geral na remoção de cor aparente no sistema pelos filtros lentos 1 e 2. Os FL 1 e 2 apresentaram eficiência geral de 98,10%, enquanto o FL 3 apresentou eficiência de 95,98% e o FL4 97,54%.

Tabela 8. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.

Etapa do sistema	Remoção de turbidez em relação ao afluente de cada etapa (%)	Remoção de turbidez em relação à AB (%)
Pré filtro dinâmico	12,50	12,50
Pré-filtro 1	56,12	61,61
Pré-filtro 2	80,10	82,59
Filtro Lento 1	89,74	98,21
Filtro Lento 2	88,46	97,99
Filtro Lento 3	89,53	95,98
Filtro Lento 4	93,60	97,54

Sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos

A remoção de sólidos em suspensão ocorreu de modo gradativo ao longo do sistema de tratamento, com maiores reduções nas etapas de pré-filtração dinâmica e pré-filtração. A presença de sólidos dissolvidos apresentou aumento ao longo das etapas de tratamento, como pode ser visualizado na figura 22.

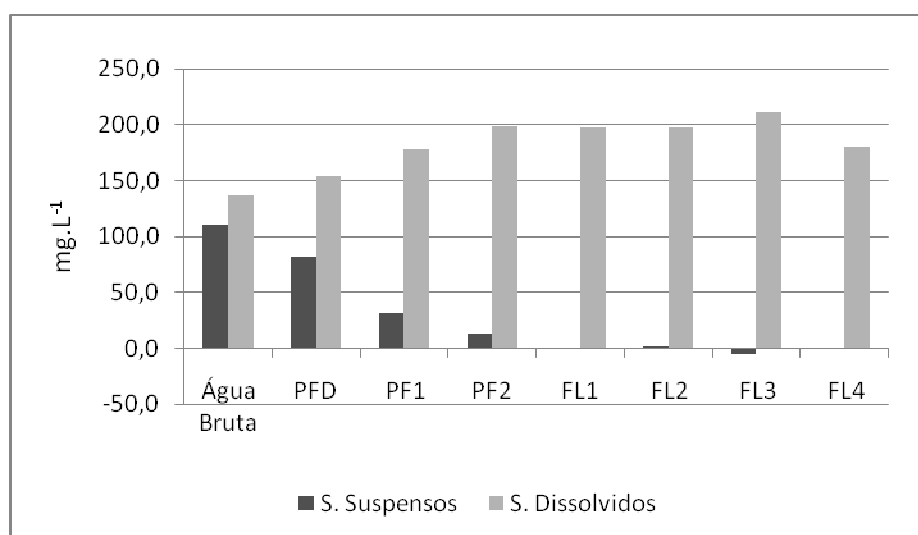


Figura 22. Valores médios de sólidos suspensos e dissolvidos (mg.L⁻¹) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.

Outros parâmetros

Dentre os demais parâmetros analisados estão pH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica, cujos resultados médios obtidos durante este ensaio são apresentados na tabela 9. Uma explanação é dada ao final nas considerações sobre estes parâmetros.

Tabela 9. Valores médios de pH, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica (CE) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2.

Parâmetro	Etapas do sistema FIME							
	AB	PFD	PF1	PF2	FL1	FL2	FL3	FL4
pH	8,25	8,15	7,94	7,56	7,43	7,6	7,9	7,52
T (°C)	20,3	20,4	20,3	20,3	20	20	20	19,9
OD (mg.L⁻¹)	3,51	3,84	3,55	3,09	2,79	3,59	4,13	3,2
CE (µS.cm²)	405	398	400	411	402	398	409	400

Perda de carga

Do início do funcionamento do sistema até o FL4 atingir o nível máximo de coluna d'água foram apenas 24 horas, um dia, como pode ser visualizado na figura 26. Por esse motivo, decidiu-se reduzir o número e a gramatura das camadas não tecidas no topo da camada do meio filtrante no FL4, na tentativa de ampliar a duração da carreira. Neste momento foram retiradas as três camadas de manta M2 e colocada apenas uma camada de M1, apenas neste filtro lento- FL4. Entretanto para não se perder os dados obtidos nos outros filtros lentos, optou-se pela continuação dos ensaios e a explanação da perda de carga na mesma figura. A duração de apenas um dia de filtração do FL4 apresenta a capacidade da solução coagulante na formação de flocos e a capacidade de retenção das mantas não tecidas.

Os FL 2 e 3 pela presença da solução coagulante proveniente do PF2 também apresentam maior perda de carga quando comparado ao FL4 que não recebeu solução coagulante em nenhuma etapa do tratamento.

5.2.2 Filtros lentos 1, 2 e 3 com três camadas de manta não tecida de 400g.m⁻² e Filtro lento 4 com uma camada de manta não tecida de 150g.m⁻²

A mudança de 3 camadas de mantas não tecidas (400g.m⁻²) no topo do meio filtrante do FL4 para apenas 1 camada de menor gramatura (150g.m⁻²) foi realizada na tentativa de ampliar a aplicabilidade do filtro lento com recebimento de solução coagulante a partir de sementes de *Moringa oleifera*.

Turbidez

Os valores de turbidez nesta fase de ensaios são interessantes, pois oferecem mais opções de análise e comparação. O valor de 59,53NTU apresentado pelo PFD na figura 23 demonstra a capacidade contínua de remoção desta etapa, visto que nas etapas anteriores esse valor foi mantido constante. No primeiro ensaio somente com água bruta esse valor foi de 60,0NTU e no primeiro ensaio com solução coagulante este valor foi de 59,6NTU, apenas no ultimo ensaio somente com água bruta, este valor foi superior e atingiu cerca de 70,0NTU.

Através dos valores médios de turbidez remanescente em cada etapa, a figura 23 reforça a ação coagulante da *Moringa oleifera*, pois neste ensaio novamente o PF2 com recebimento da solução coagulante apresenta eficiência superior de redução quando comparado ao PF1, cerca de 20% de diferença de eficiência entre as etapas.

Os valores da filtração lenta para turbidez remanescente são muito próximos, o que representa o benefício de aplicação de apenas 1 camada de manta M1 no FL4. Entretanto o FL3 também se apresenta eficiente mesmo sem recebimento de coagulante durante o tratamento de água.

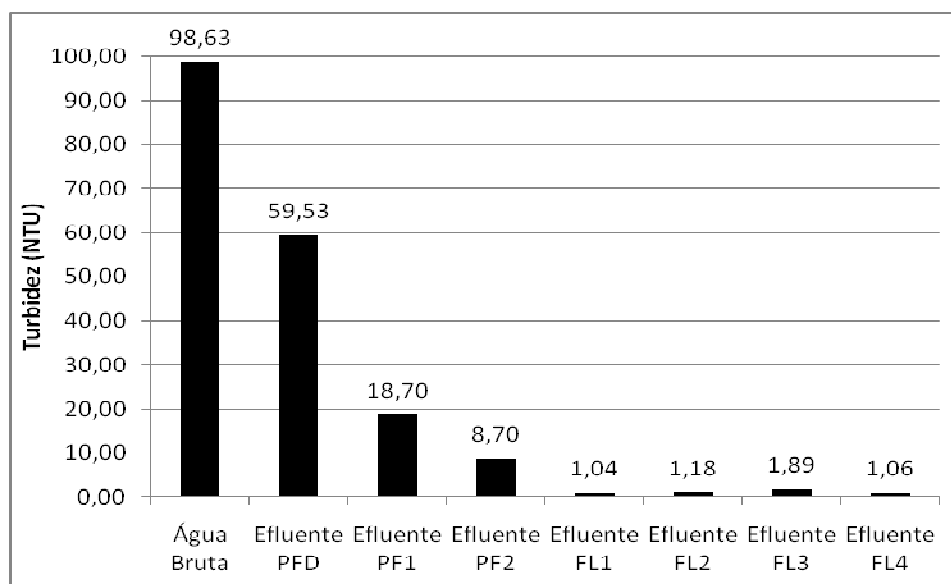


Figura 23. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – FL 1, 2, 3 com 3 M2, FL 4 com 1 M1

A tabela 10 apresenta os valores de eficiência de cada etapa em relação à etapa anterior, onde é possível notar as diferenças consideráveis na etapa do PF2, com 85,39% de remoção, e o PF1 com 68,59%. Os filtros lentos de maneira geral apresentam altos resultados de eficiência, superiores a 86%, com destaque para o FL4, que alcançou 94%. Os valores de eficiência geral do sistema foram de 98,88% FL1 e 2; 98,08% para o FL3 e 98,93% para o FL4.

Tabela 10. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética - presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ - filtros lentos 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.

Etapa do sistema	Remoção de turbidez em relação ao afluente de cada etapa (%)	Remoção de turbidez em relação à AB (%)
Pré filtro dinâmico	39,64	39,64
Pré-filtro 1	68,59	81,04
Pré-filtro 2	85,39	91,18
Filtro Lento 1	88,05	98,95
Filtro Lento 2	86,45	98,81
Filtro Lento 3	89,89	98,08
Filtro Lento 4	94,33	98,93

Cor Aparente

A redução de cor durante este ensaio acompanhou o desempenho do sistema em relação à redução de turbidez. A figura 24 mostra o valor de $62,0\text{mg.L}^{-1}$ PtCo para a unidade da pré-filtração que recebeu a adição de solução coagulante, inferior ao $121,7\text{mg.L}^{-1}$ PtCo do pré-filtro que funcionou em paralelo, mas sem a adição de *Moringa oleifera*.

A influência da solução coagulante também é perceptível através da análise dos dados da etapa da filtração lenta, o FL4 com recebimento direto de solução coagulante apresenta valor de cor aparente remanescente inferior ao FL3, e apesar de estar com apenas 1 manta M1, apresenta resultado semelhante ao adquirido durante o ensaio com três camadas de M2.

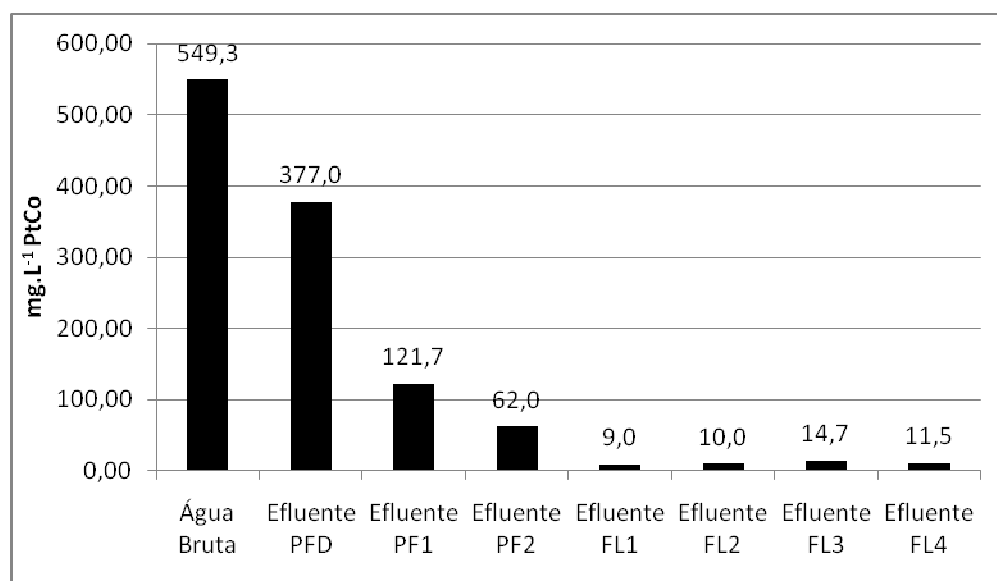


Figura 24. Valores médios de cor aparente (mg.L^{-1} PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1

O valor de eficiência geral do sistema para os FL 1 e 2 foi de 98,27%; 97,33% para o FL3 e 97,91% para o FL4. Os valores de eficiência de cada etapa podem ser visualizados na tabela 11 e se apresentam semelhantes aos adquiridos no ensaio com todos os filtros lentos com três camadas de M2, com eficiência de redução geral do sistema acima de 97%.

Tabela 11. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.

Etapas do sistema	Remoção de turbidez em relação ao afluente de cada etapa (%)	Remoção de turbidez em relação à AB (%)
Pré filtro dinâmico	31,37	31,37
Pré-filtro 1	67,73	77,85
Pré-filtro 2	83,55	88,71
Filtro Lento 1	85,48	98,36
Filtro Lento 2	83,87	98,18
Filtro Lento 3	87,95	97,33
Filtro Lento 4	90,55	97,91

Outros parâmetros

Dentre os demais parâmetros analisados estão pH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica, cujos resultados médios obtidos durante este ensaio são apresentados na tabela 12. Uma explanação é dada ao final nas considerações sobre estes parâmetros.

Tabela 12. Valores médios de pH, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica (CE) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – FL 1, 2 e 3, FL4 com 1 M1.

Parâmetro	Etapas do sistema FIME							
	AB	PFD	PF1	PF2	FL1	FL2	FL3	FL4
pH	8,37	8,11	8,01	7,57	7,47	7,55	7,95	7,54
T (°C)	20,93	21,03	21,03	21,03	20,93	20,93	20,90	21,40
OD (mg.L⁻¹)	4,17	4,10	3,81	3,27	3,34	3,52	4,08	3,67
CE (µS.cm²)	413,67	409,00	406,00	417,67	410,67	408,33	412,33	421,50

Sólidos suspensos e sólidos dissolvidos

Os valores médios de sólidos suspensos e dissolvidos são apresentados na figura 25. É possível notar que como no ensaio anterior houve uma remoção de sólidos em suspensão nas primeiras etapas de pré-filtração. No filtro lento 4 o aumento dos sólidos suspensos pode ser devido a redução de camadas de mantas não tecidas de 3M2 para 1M1. Entretanto, houve um aumento considerável de sólidos dissolvidos também no FL3 e isso pode ser proveniente de erro metodológico.

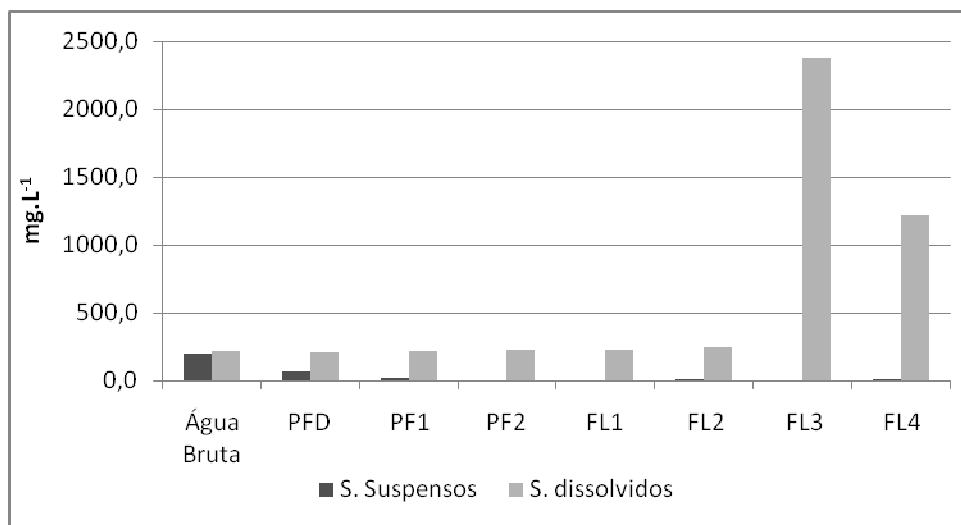


Figura 25. Valores médios de sólidos suspensos e dissolvidos (mg.L⁻¹) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – FL 1, 2 e 3 com 1 M1.

Perda de carga

A figura 26 apresenta a perda de carga, em metros, durante os ensaios com adição de coagulante. O 1º dia de ensaio representa o ensaio com adição de coagulante no PF2 e no FL4, que possuía três camadas de manta M2, o 2º e 3º dia se referem ao ensaio após a alteração das três camadas de manta M2 por uma camada de manta M1 no topo da camada filtrante do FL4. Portanto, o limite máximo da perda de carga atingido por esse filtro lento foi atingido em apenas um dia, em seguida, ocorreu o esvaziamento deste filtro lento, remoção das três camadas de M2 e substituição para apenas uma camada de M1.

É perceptível que a adição da solução coagulante a partir de sementes de *Moringa oleifera* influenciou diretamente na duração da carreira de filtração, que foi de apenas um dia

antes da colmatção da manta, enquanto as carreiras dos ensaios anteriores sem a aplicação de solução coagulante duraram no mínimo 18 dias. Isso demonstra capacidade de formação de flocos e sedimentação no topo da camada do meio filtrante do FL4. A mudança da manta não tecida no FL4, nestes ensaios com solução coagulante não influenciou no tempo de duração da carreira, visto que após a mudança da manta a carreira proporcionou apenas mais um dia de filtração.

Observando a figura 26, os FL 1 e 2, com *Moringa oleifera* proveniente do PF2 também apresentam rápido aumento da perda de carga quando comparado aos ensaios sem adição do coagulante. A pequena diferença entre estes filtros lentos, 1 e 2, pode ser devido a diferença de vazão que o sistema apresentava em certas circunstâncias. O FL3, sem recebimento de solução coagulante apresenta o tempo de duração mais longo, enquanto o FL4 já havia atingido o valor máximo da coluna d'água duas vezes, o filtro lento 3 ainda estava com a altura de 0,30m, um pouco mais alto que havia ocorrido nos ensaios anteriores, mas atendendo ao esperado, de ser o FL com maior tempo de duração de carreira.

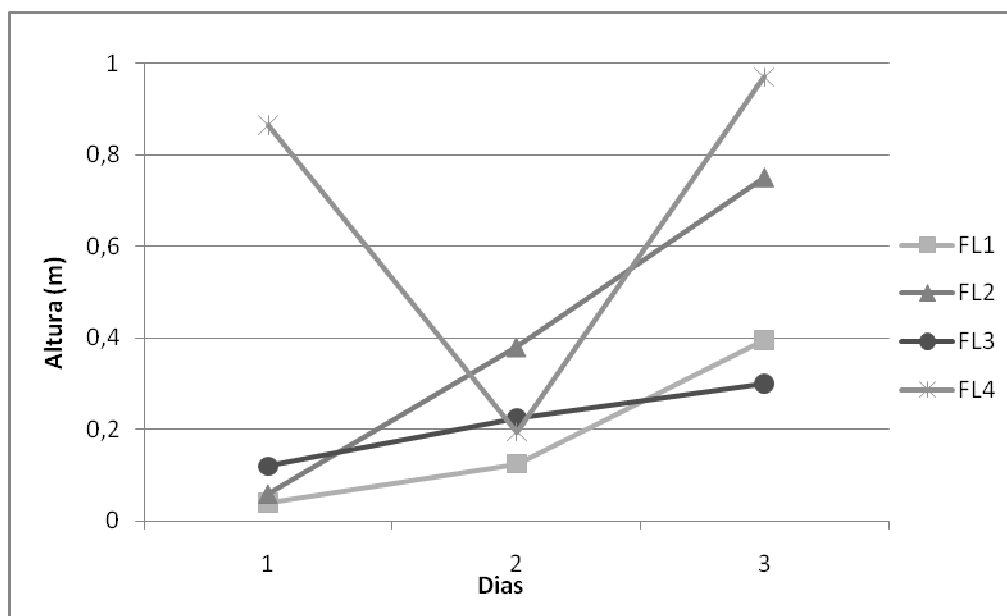


Figura 26. Perda de carga dos filtros lentos longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – 1º dia FL 1, 2, 3 e 4 com 3 M2 – 2º e 3º dia FL 1, 2 e 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.

5.3 Ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – Presença de solução coagulante, presença de floculação

Baseados na presença de solução coagulante e de floculação serão apresentados os resultados dos seguintes ensaios realizados:

- 1) Filtros lentos 1, 2, 3 e 4 com três camadas de manta não tecida de 400g.m^{-2} de gramatura (3 M2).
- 2) Filtros lentos 1, 2, 3 três camadas de manta não tecida de 400g.m^{-2} de gramatura (3 M2) e filtro lento com uma camada de manta não tecida de 150g.m^{-2} de gramatura (1 M1).
- 3) Filtros lentos 1, 2, 3 três camadas de manta não tecida de 400g.m^{-2} de gramatura (3 M2) e filtro lento com uma camada de manta não tecida de 150g.m^{-2} de gramatura (1 M1) e $\frac{1}{2}$ dosagem da solução coagulante inicial (53mg.L^{-1})

5.3.1 Filtros lentos 1, 2, 3 e 4 com três camadas de manta não tecida de 400g.m^{-2} de gramatura (3 M2).

Após a adição da solução coagulante nas etapas de pré-filtração e filtração lenta, decidiu-se proceder ensaios com a presença de floculadores de meio granular para passagem da solução coagulante. O que foi notado de modo visual durante o ensaio foi que as camadas de aspecto gelatinoso no topo das camadas do PF2 e do FL4 persistiram, entretanto com menor espessura. Outro fator notado foi que após o uso dos floculadores e das mantas não tecidas no filtro lento 4, quando ocorria a lavagem dos mesmos, havia um odor muito forte e desagradável característico da degradação da solução de *Moringa oleifera* após certo tempo de armazenamento.

Turbidez

Ao se observar os valores médios de turbidez das etapas do tratamento de água pelo sistema FIME, na figura 27, é possível notar que a adição de solução coagulante no PF2 oferece maior redução de turbidez quando comparado ao PF1, além de proporcionar menores valores de turbidez remanescente após a filtração lenta, nos FL1 e 2. Entretanto, a presença de floculação não influenciou nesta etapa quando comparada ao funcionamento do sistema FIME

somente com adição coagulante sem floculação, conforme apresentação na figura 20, naquele ensaio os valores médios de turbidez na etapa do PF2 foram de 10,7NTU e neste 9,12NTU. O mesmo ocorreu na etapa do FL4, no ensaio anterior o valor médio de turbidez foi de 1,26NTU e neste 1,17NTU.

De um modo geral o sistema operou de maneira eficiente, mantendo os valores finais de turbidez abaixo de 2,3NTU.

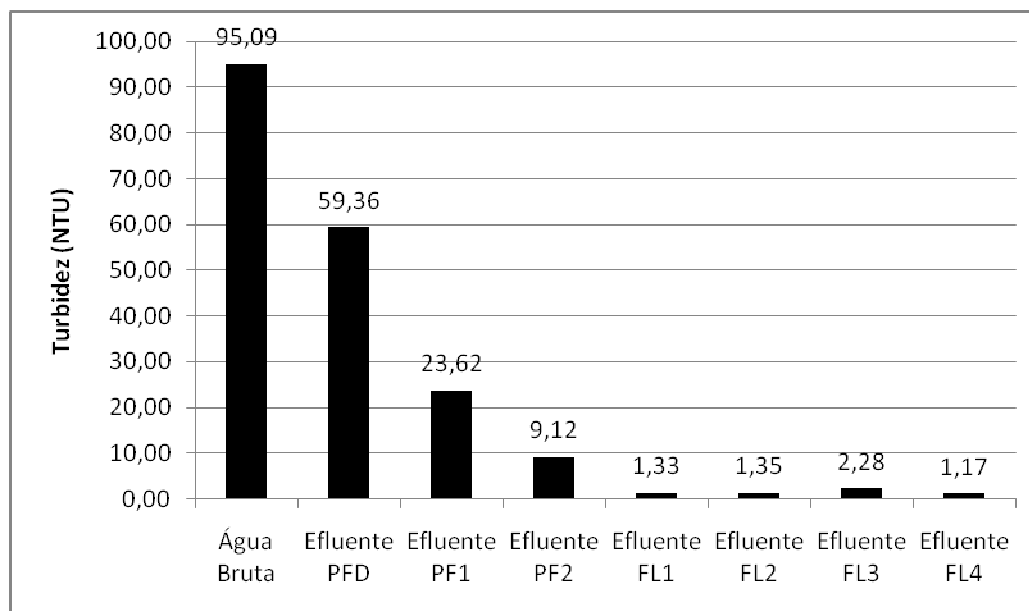


Figura 27. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2

As eficiências alcançadas em cada etapa continuam constantes quando comparadas aos demais ensaios, destacando a influência de solução coagulante na etapa do PF2, com quase 25% a mais de eficiência quando comparado ao PF1. Como pode ser conferido na tabela 13, que apresenta os valores de eficiência de remoção de cada etapa do sistema.

Os valores finais de eficiência de remoção do sistema foi de 98,59% para os FL 1 e 2, 97,60% para o FL3 e 98,77% para o FL4.

Tabela 13. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2.

Etapas do sistema	Remoção de turbidez em relação ao afluente de cada etapa (%)	Remoção de turbidez em relação à AB (%)
Pré filtro dinâmico	37,58	37,58
Pré-filtro 1	60,20	75,16
Pré-filtro 2	84,63	90,41
Filtro Lento 1	85,41	98,60
Filtro Lento 2	85,25	98,58
Filtro Lento 3	90,33	97,60
Filtro Lento 4	95,07	98,77

Cor Aparente

Os valores médios finais de cor aparente deste ensaio, apresentados na figura 28, são os menores obtidos dentre todos os ensaios realizados, apresentando valores abaixo de 10,0mg.L⁻¹ PtCo, demonstrando a eficiência de remoção do sistema. E assim como ocorreu com o parâmetro de turbidez, o FL3 que não recebeu adição de solução coagulante em nenhuma etapa do tratamento apresentou o valor médio mais alto de cor aparente remanescente, apesar de não ser uma diferença tão significativa comparada aos demais filtros lentos.

As eficiências gerais do sistema alcançadas na remoção de cor aparente, ao final de cada filtro lento são muito altas, acima de 98%: os FL 1 e 2 apresentam eficiência de 98,60% de eficiência de remoção, o FL3 98,25% e o FL4, que recebeu a adição de solução coagulante, atingiu 98,75% de eficiência de remoção em relação à água bruta.

Os valores de eficiência de cada etapa no sistema FIME em relação ao seu afluente são apresentados na tabela 14. Devido a adição de solução coagulante nestas etapas, os valores de 84,73% na etapa do PF2 e 95,57% do FL4 são os mais expressivos dentre as unidades que possuem outras em paralelo desenvolvendo a mesma função.

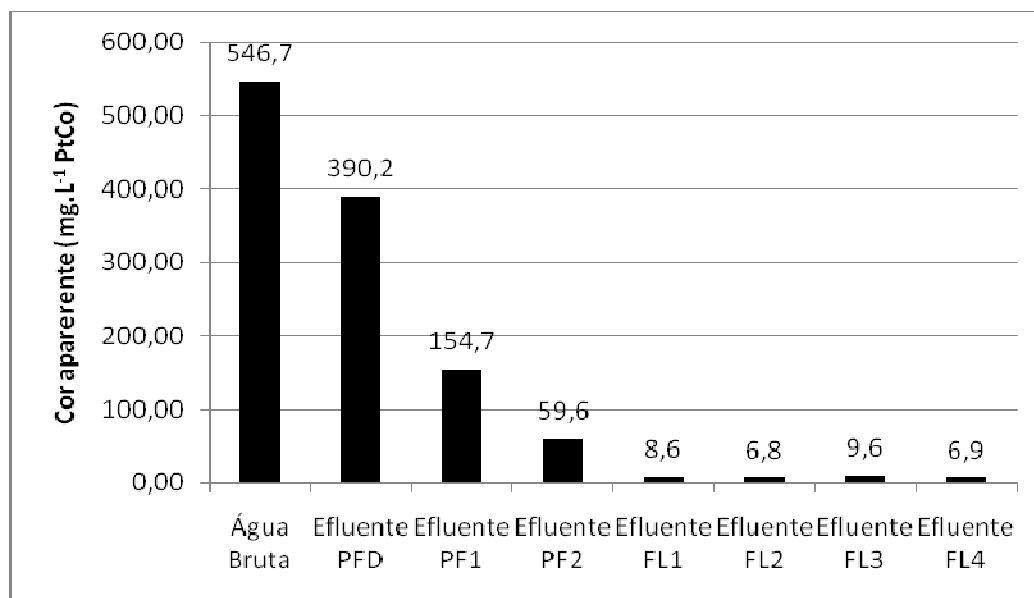


Figura 28. Valores médios de cor aparente (mg.L^{-1} PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2

Tabela 14. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2.

Etapa do sistema	Remoção de turbidez em relação ao afluente de cada etapa (%)	Remoção de turbidez em relação à AB (%)
Pré filtro dinâmico	28,63	28,63
Pré-filtro 1	60,36	71,71
Pré-filtro 2	84,73	89,11
Filtro Lento 1	85,63	98,44
Filtro Lento 2	88,62	98,76
Filtro Lento 3	93,82	98,25
Filtro Lento 4	95,57	98,75

Outros parâmetros

Dentre os demais parâmetros analisados estão pH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica, cujos resultados médios obtidos durante este ensaio são apresentados na tabela 15. Uma explanação é dada ao final nas considerações sobre estes parâmetros.

Tabela 15. Valores médios de pH, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica (CE) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2.

Parâmetro	Etapas do sistema FIME							
	AB	PFD	PF1	PF2	FL1	FL2	FL3	FL4
pH	7,96	8,07	7,96	7,35	7,51	7,54	7,93	7,27
T (°C)	22,74	22,68	22,62	22,60	22,49	22,17	22,21	22,34
OD (mg.L⁻¹)	3,72	3,50	3,49	2,42	2,97	3,18	3,44	2,84
CE (µS.cm²)	318,33	316,44	319,56	330,00	324,33	320,89	319,33	310,43

Sólidos suspensos e sólidos dissolvidos

Neste ensaio, em relação aos ensaios anteriores, manteve-se o grau de remoção de sólidos suspensos nas etapas de pré-filtração. Em relação aos sólidos dissolvidos os ensaios mostraram altos valores na água bruta e capacidade de remoção logo nas primeiras etapas, como pode ser visualizado na figura 29.

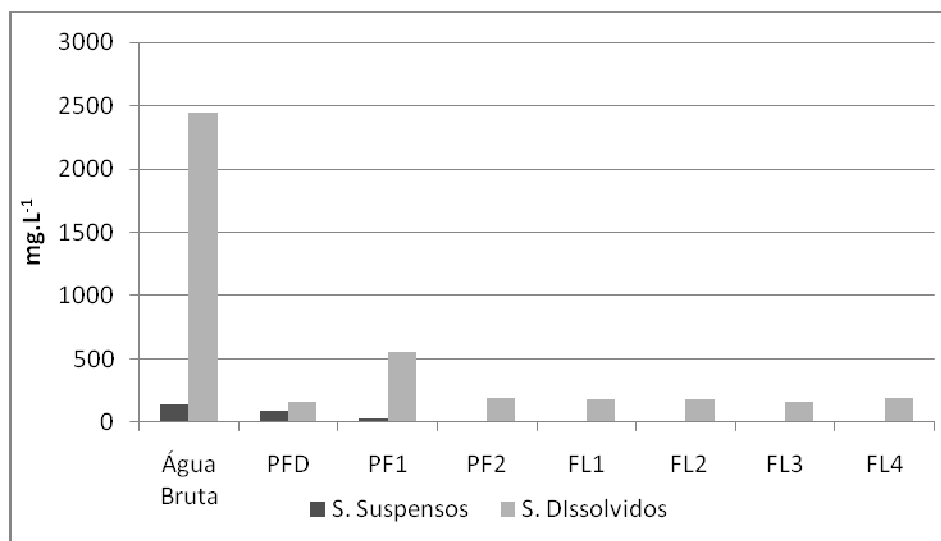


Figura 29. Valores médios de sólidos suspensos e dissolvidos (mg.L⁻¹) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME –presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3M2

Perda de carga

De acordo com os valores obtidos nos ensaios anteriores com a presença de solução coagulante, esperava-se que a presença da etapa de floculação antes do FL4 aumentasse um pouco o tempo de duração da carreira de filtração, entretanto isso não aconteceu, como pode ser visualizado na figura 29. O tempo de duração da carreira do FL4 durou em média um pouco mais de um dia. O FL4 permaneceu em funcionamento até completar três carreiras de filtração, ao término de cada carreira ocorria a remoção das mantas não tecidas que eram lavadas para serem repostas. Essa paralisação do filtro lento pode ser visualizada na figura 30, por meio do declínio da curva de operação. Após o término das carreiras de filtração do filtro lento 4 os demais filtros continuaram em funcionamento, até o momento em que o FL1 também atingiu o nível máximo de coluna d'água.

Os FL 1 e 2, que durante o tratamento receberam a adição de solução coagulante na etapa do PF2, tem um tempo de duração de carreira mais longa se comparada ao ensaio anterior. Aquele, tinha adição de solução coagulante sem a presença de floculação, e no terceiro dia de operação do sistema estes filtros lentos já haviam atingido em média 0,55m de perda de carga, conforme figura 26. Neste ensaio, esta altura foi atingida somente seis dias após o início da carreira de filtração, representando um benefício para o sistema com a presença do floculador na etapa da pré-filtração.

Houve um aumento no tempo de duração da carreira do FL3 em relação ao ensaio que operou somente com *Moringa oleifera* sem floculação, naquele ensaio, ao terceiro dia este filtro lento já havia atingido 0,30m de altura de coluna d'água, o que neste ensaio ocorreu somente no oitavo dia.

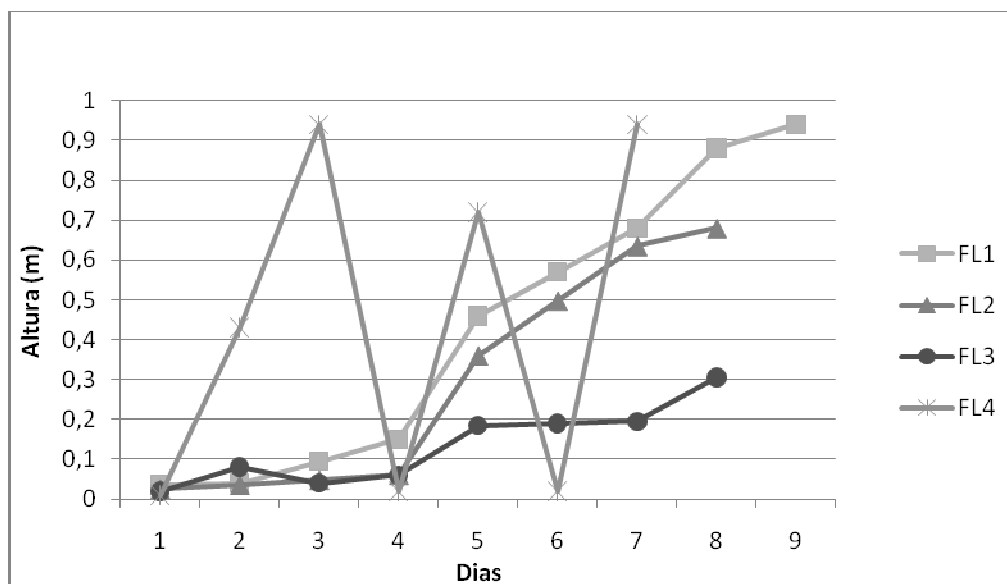


Figura 30. Perda de carga dos filtros lentos ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2

5.3.2 Filtros lentos 1, 2, 3 três camadas de manta não tecida de 400g.m^{-2} de gramatura (3 M2) e filtro lento com uma camada de manta não tecida de 150g.m^{-2} de gramatura (1 M1).

Turbidez

Neste ensaio é possível rever que a presença do floculador de meio granular não auxiliou de maneira significativa no funcionamento do sistema em relação ao parâmetro de turbidez. Os valores das etapas que receberam a adição de solução coagulante e floculação apresentam resultados muitos semelhantes aos obtidos nos demais ensaios somente com coagulação. Conforme visualização da figura 31, o valor médio de turbidez remanescente do PF2 foi de $12,0\text{NTU}$, enquanto no ensaio anterior, sob as mesmas características do sistema FIME, somente com coagulação, o valor médio de turbidez nesta mesma etapa foi de $8,70\text{NTU}$. No FL4, o ensaio anterior (somente com coagulação, nas mesmas características do sistema) apresentou valor médio de turbidez remanescente de $1,06\text{NTU}$ e neste de $1,01\text{NTU}$, ou seja, não houve influência da presença do floculador pelas variações ocorridas.

Neste ensaio foi possível visualizar um pouco melhor a influência da solução coagulante na etapa final do tratamento, visto que o valor mais alto de turbidez remanescente foi de 4,02NTU, no FL3 que não recebeu adição de solução coagulante.

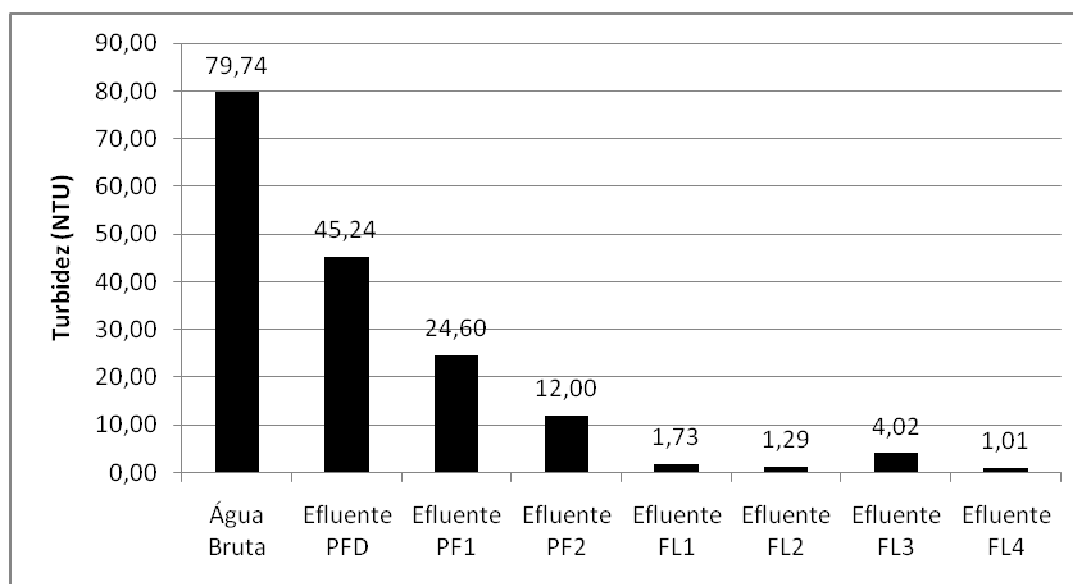


Figura 31. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1

O reflexo dos valores médios de turbidez pode ser visto na tabela 16, através dos valores de eficiência de cada etapa. A etapa de tratamento mais eficiente foi a que teve ao seu final o FL4, que atingiu 95,89%. Os demais filtros lentos não atingiram 90% de remoção de turbidez, o que comprova a influência da adição direta da solução coagulante.

A eficiência do sistema em relação à água bruta foi de 98,11% nos FL1 e 2, 94,96% no FL3 e 98,73% no FL4.

Tabela 16. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.

Etapa do sistema	Remoção de turbidez em relação ao afluente de cada etapa (%)	Remoção de turbidez em relação à AB (%)
Pré-filtro dinâmico	43,27	43,27

Pré-filtro 1	45,62	69,15
Pré-filtro 2	73,48	84,95
Filtro Lento 1	85,00	97,83
Filtro Lento 2	89,24	98,38
Filtro Lento 3	83,66	94,96
Filtro Lento 4	95,89	98,73

Cor Aparente

A figura 32 apresenta os valores médios de cor aparente remanescentes adquiridos neste ensaio. Na mesma linha que o parâmetro turbidez, a etapa de floculação não influenciou significativamente no funcionamento do sistema na redução de cor aparente. Neste ensaio, o valor médio do PF2 foi de 83,8mg.L⁻¹ PtCo e no FL4 de 11,2mg.L⁻¹ PtCo, enquanto no ensaio anterior sem a presença de floculação, as etapas apresentaram, respectivamente, 62,0mg.L⁻¹ PtCo e 11,5mg.L⁻¹ PtCo.

A figura 32 também demonstra que a introdução da solução coagulante favorece a redução de cor aparente, pois o FL3 não recebe solução coagulante e apresenta o valor mais alto de cor aparente remanescente, de 26,5mg.L⁻¹ PtCo, enquanto os demais filtros apresentaram valores menores que 11,2mg.L⁻¹ PtCo. Isso também se reflete nos valores de eficiência do sistema, que são apresentados na tabela 17. A etapa com eficiência mais alta é o filtração lenta no FL4, que recebeu a solução coagulante.

Os FL1 e 2 atingem 97,99% de eficiência de remoção de cor em relação à água bruta, o FL3 atinge 94,02%, como a eficiência mais baixa em relação às outras linhas de tratamento do sistema, e o FL4 atinge 97,47% de eficiência de remoção.

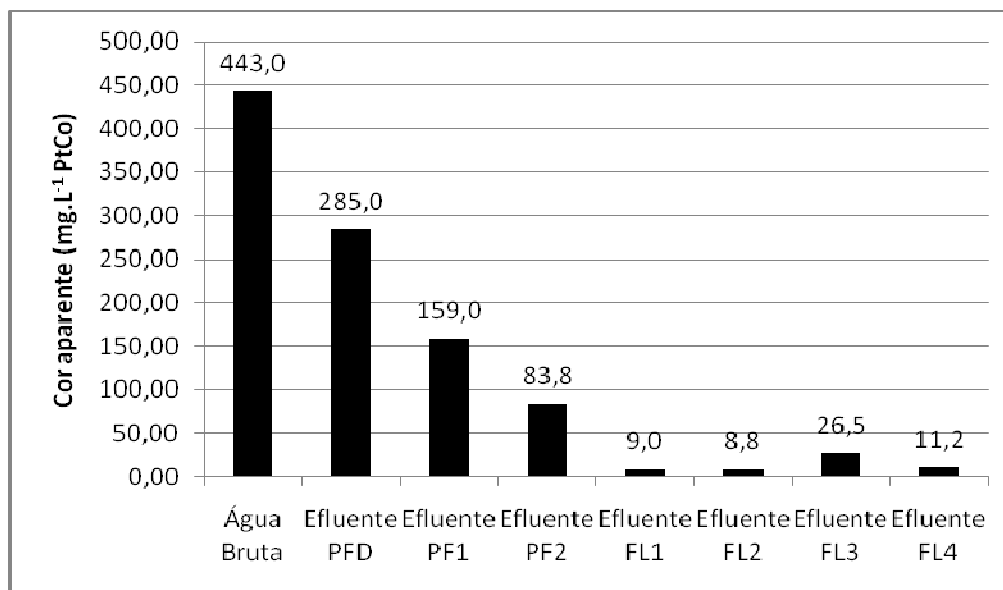


Figura 32. Valores médios de cor aparente (mg.L⁻¹ PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1

Tabela 17. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.

Etapa do sistema	Remoção de turbidez em relação ao afluente de cada etapa (%)	Remoção de turbidez em relação à AB (%)
Pré filtro dinâmico	35,67	35,67
Pré-filtro 1	44,21	64,11
Pré-filtro 2	70,60	81,08
Filtro Lento 1	89,26	97,97
Filtro Lento 2	89,50	98,01
Filtro Lento 3	83,33	94,02
Filtro Lento 4	92,96	97,47

Sólidos suspensos e sólidos dissolvidos

A figura 33 mostra os valores médios de sólidos suspensos e dissolvidos obtidos durante este ensaio. Em relação aos sólidos suspensos, a remoção foi efetuada logo nas primeiras etapas do sistema de tratamento. Mas a remoção de sólidos dissolvidos sofreu

alterações ao longo das etapas, com grandes elevações nas etapas de pré-filtração e filtração lenta.

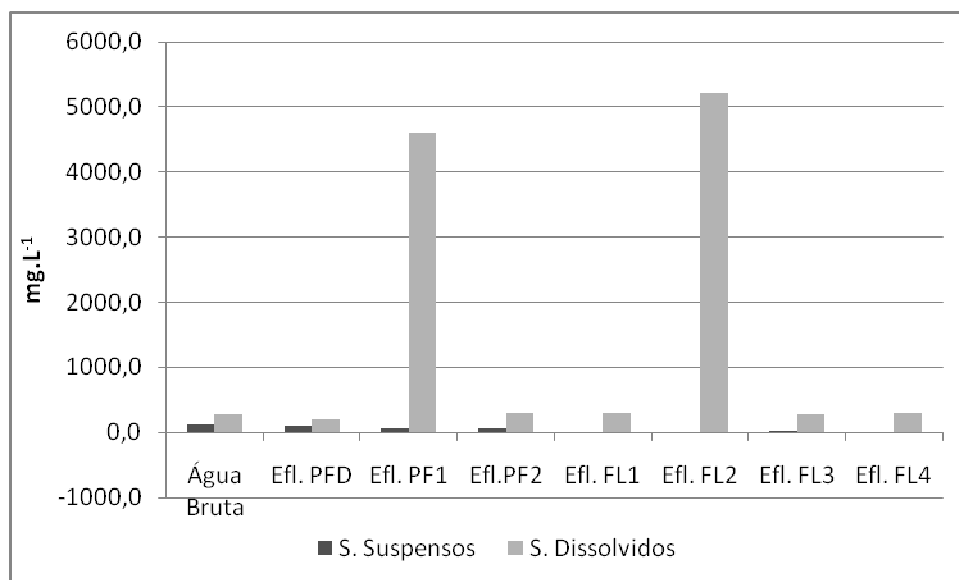


Figura 33. Valores médios de sólidos suspensos e dissolvidos (mg.L^{-1}) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.

Outros parâmetros

Dentre os demais parâmetros analisados estão pH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica, cujos resultados médios obtidos durante este ensaio são apresentados na tabela 18. Uma explanação é dada ao final nas considerações sobre estes parâmetros.

Tabela 18. Valores médios de pH, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica (CE) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1

Parâmetro	Etapas do sistema FIME							
	AB	PFD	PF1	PF2	FL1	FL2	FL3	FL4
pH	8,27	8,17	8,03	7,61	7,42	7,46	7,81	7,24
T ($^{\circ}\text{C}$)	24,24	24,68	24,24	24,04	23,62	23,62	23,23	23,10
OD (mg.L^{-1})	3,84	3,58	3,56	3,23	3,12	3,14	3,32	2,42
CE ($\mu\text{S.cm}^2$)	458,20	450,60	455,60	462,00	470,20	452,20	441,50	473,40

Perda de carga

Pela figura 34, fica evidente a interferência direta da introdução da solução coagulante na etapa do FL4 com o aumento de perda de carga muito rápido em relação aos outros filtros lentos que não receberam solução coagulante. Mesmo com a floculação e a presença de uma camada de manta M1 no FL4 a duração da carreira não foi prolongada, durando em média um dia depois do início do funcionamento de sua carreira. A figura 34 apresenta as três vezes em que este filtro lento atingiu seu nível máximo de coluna d'água. Da mesma forma que nos ensaios anteriores no início de cada carreira de filtração a manta era removida, lavada e recolocada no filtro lento para a nova carreira de filtração.

Os demais filtros lentos operaram de maneira um pouco distinta do ensaio anterior, onde havia a presença de coagulante e floculação, mas com todos os filtros lentos com três camadas de M2. Naquele ensaio houve uma perda de carga mais rápida dos FL 1 e 2 e um pouco mais lenta do FL3, e no presente ensaio a perda de carga foi muito parecida entre os filtros lentos 1, 2 e 3, mais lenta, depois de cinco dias quando o FL4 já havia atingido três vezes os demais filtros lentos não haviam atingido ainda os 0,20m de perda de carga.

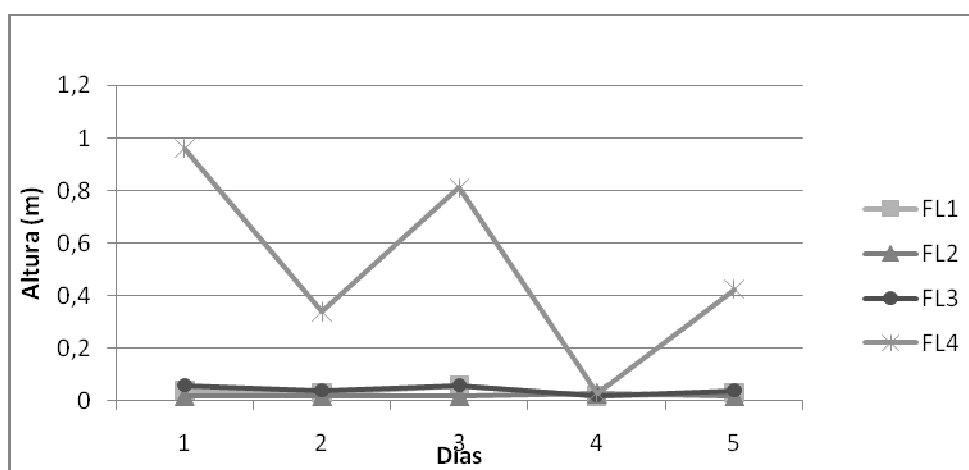


Figura 34. Perda de carga nos filtros lentos ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1

5.3.3 Filtro lento 4 com uma camada de manta não tecida de 150g.m² e 53,0mg.L⁻¹ de *Moringa oleifera*

A redução da dosagem da solução coagulante de 106,0 para 53,0mg.L⁻¹ de *Moringa oleifera* no filtro lento 4 foi realizada para averiguação do seu efeito na perda de carga e qualidade final do efluente, se com essa redução haveria aumento na duração da carreira e constância na qualidade final do efluente nesta linha de tratamento.

Turbidez

Neste ensaio os valores médios de turbidez remanescentes nas etapas do sistema FIME se apresentaram superiores em relação aos demais ensaios.

Conforme a figura 35, o FL4 apresentou 4,79NTU de turbidez remanescente enquanto FL1 e 2 apresentaram 3,14 e 3,65NTU, respectivamente. Nos ensaios anteriores, com presença de solução coagulante e floculação o valor médio de turbidez remanescente no FL4 foi mais baixo que os demais filtros lentos, o que não ocorreu neste ensaio, pois a redução da concentração da solução coagulante prejudicou a remoção de turbidez neste filtro lento.

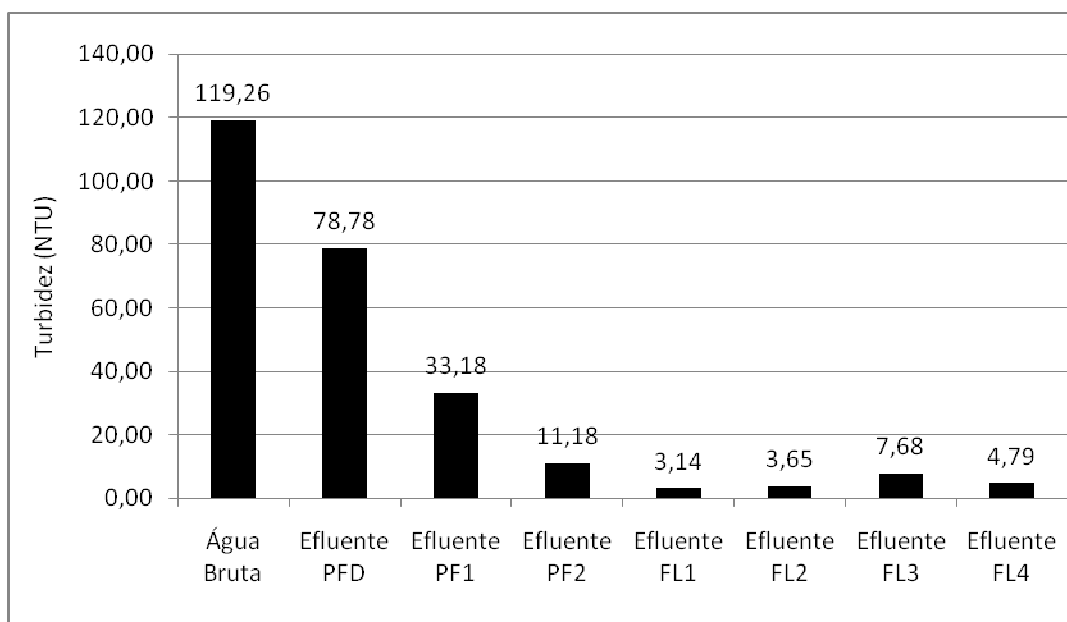


Figura 35. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 53mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1

Este ensaio apresentou valores de eficiência muito baixos quando comparados aos ensaios anteriores com a adição de solução coagulante. É possível notar na tabela 19 que os valores de eficiência de remoção dos filtros lentos ficaram entre 67,0 e 85,0%, o que não aconteceu em nenhum outro ensaio operado no sistema FIME, mesmo quando não houve adição de solução coagulante ou floculação.

Os FL 1 e 2 apresentaram eficiência geral de 97,15%; o FL3 de 93,56% e o FL4 de 95,99%

Tabela 19. Eficiência de remoção de turbidez (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 53mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.

Etapa do sistema	Remoção de turbidez em relação ao afluente de cada etapa (%)	Remoção de turbidez em relação à AB (%)
Pré filtro dinâmico	33,94	33,94
Pré-filtro 1	57,88	72,18
Pré-filtro 2	85,81	90,63
Filtro Lento 1	71,92	97,37
Filtro Lento 2	67,33	96,94
Filtro Lento 3	76,84	93,56
Filtro Lento 4	85,58	95,99

Cor Aparente

Os valores médios de cor aparente apresentados neste ensaio, através da figura 36, se demonstraram superiores aos demais ensaios realizados anteriormente com a adição de solução coagulante a partir de *Moringa oleifera*. O valor de destaque é para o valor médio do FL3 que foi de 77,44m.L⁻¹PtCo, muito superior aos outros valores obtidos em outros ensaios, que ficaram em sua maioria abaixo de 26,5m.L⁻¹PtCo. A presença de apenas 53,0mg.L⁻¹ de solução coagulante no FL4 diminuiu a eficiência desta etapa, que apresentou o valor médio de 42,0m.L⁻¹PtCo de cor aparente.

A etapa de pré-filtração manteve suas diferenças características entre o PF1 que não recebeu adição de solução coagulante e o PF2 que recebeu a solução com passagem por

floculador de meio granular. Este apresentou 25% mais capacidade de redução de cor aparente se comparado ao primeiro.

Os valores de eficiência dos filtros lentos para a redução da cor aparente são mais baixos dos que os apresentados na redução de turbidez. A tabela 20 mostra que estes valores não passaram de 79%, o que não aconteceu em nenhum ensaio anterior. Apesar destes baixos valores de eficiência em cada etapa, o sistema alcançou valores de eficiência geral acima de 85%. Os FL1 e 2 apresentaram remoção de 97,88%, semelhante ao ensaio anterior; FL3 apresentou remoção de 87,83%, um pouco inferior aos 94,02% de remoção do último ensaio; e o FL4 apresentou 93,40% de eficiência de remoção, inferior ao 97,47% do ensaio anterior, devido a redução da dosagem da solução coagulante.

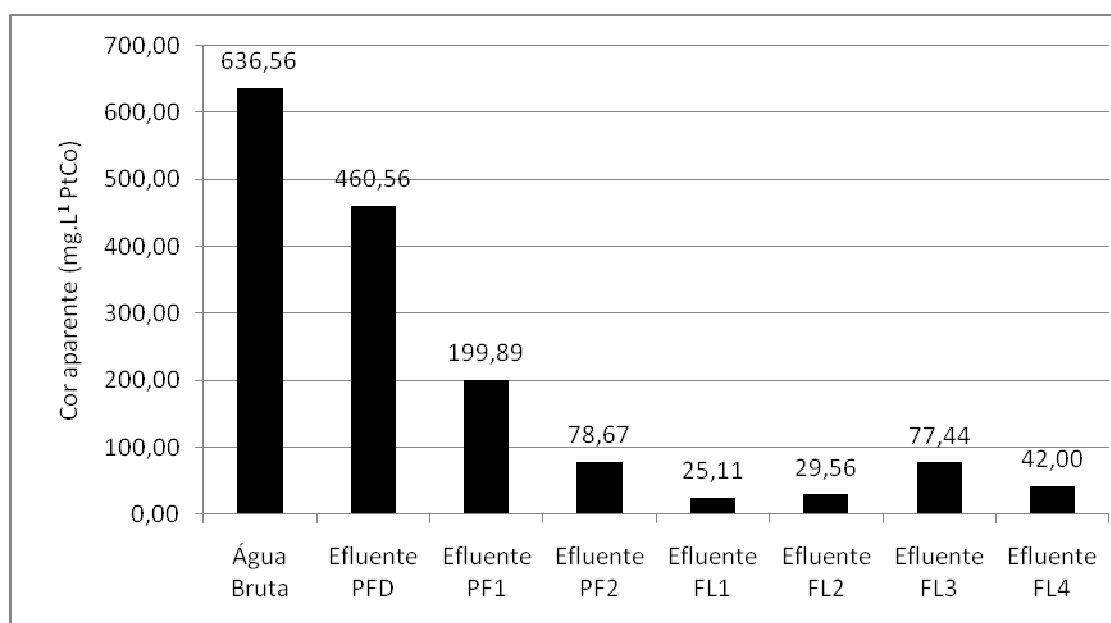


Figura 36. Valores médios de cor aparente (m.L⁻¹PtCo) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 53mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1

Tabela 20. Eficiência de remoção de cor aparente (%) das etapas do sistema FIME ao longo do ensaio de tratamento de água turva – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 53mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1

Etapa do sistema	Remoção de turbidez em relação	Remoção de turbidez em
	ao afluente de cada etapa (%)	relação à AB (%)
Pré filtro dinâmico	27,65	27,65
Pré-filtro 1	56,60	68,60

Pré-filtro 2	82,92	87,64
Filtro Lento 1	68,08	96,06
Filtro Lento 2	62,43	95,36
Filtro Lento 3	61,26	87,36
Filtro Lento 4	78,99	93,40

Outros parâmetros

Dentre os demais parâmetros analisados estão pH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica, cujos resultados médios obtidos durante este ensaio são apresentados na tabela 21. Uma explicação é dada ao final nas considerações sobre estes parâmetros.

Tabela 21. Valores médios de pH, temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica (CE) ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 53mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1.

Parâmetro	Etapas do sistema FIME							
	AB	PFD	PF1	PF2	FL1	FL2	FL3	FL4
pH	8,27	8,12	8,04	7,62	7,52	7,52	7,59	7,24
T (°C)	27,01	27,27	26,91	27,00	26,48	26,02	26,24	26,55
OD (mg.L⁻¹)	5,68	5,38	5,59	4,46	4,52	4,39	4,99	4,29
CE (µS.cm²)	361,11	353,67	355,67	330,11	366,22	363,56	362,13	437,25

Perda de carga

Neste ensaio a perda de carga, na figura 37, apresenta variações distintas da perda de carga do sistema. O FL4 que nos ensaios anteriores atingia o nível máximo de coluna d'água após apenas um dia de funcionamento, neste ensaio pela redução da dosagem de solução coagulante demorou quatro dias até que atingisse seu nível máximo e sua operação fosse interrompida. Os demais filtros lentos sofreram uma alteração incomum a partir do sexto dia de operação, o FL3 que sempre apresentava mais tempo de duração da carreira, neste ensaio atingiu o nível máximo em apenas um dia, até o sexto dia não havia atingido 0,10m de altura

de coluna d'água e no sétimo dia atingiu o nível máximo. Após a limpeza das mantas não tecidas utilizadas no topo do meio filtrante decidiu-se colocar este filtro lento em operação novamente, para averiguação de seu comportamento. Enquanto o FL3 atingiu novamente seu nível máximo, os FL1 e 2 depois de nove dias de funcionamento haviam alcançado apenas a metade do nível máximo admitido.

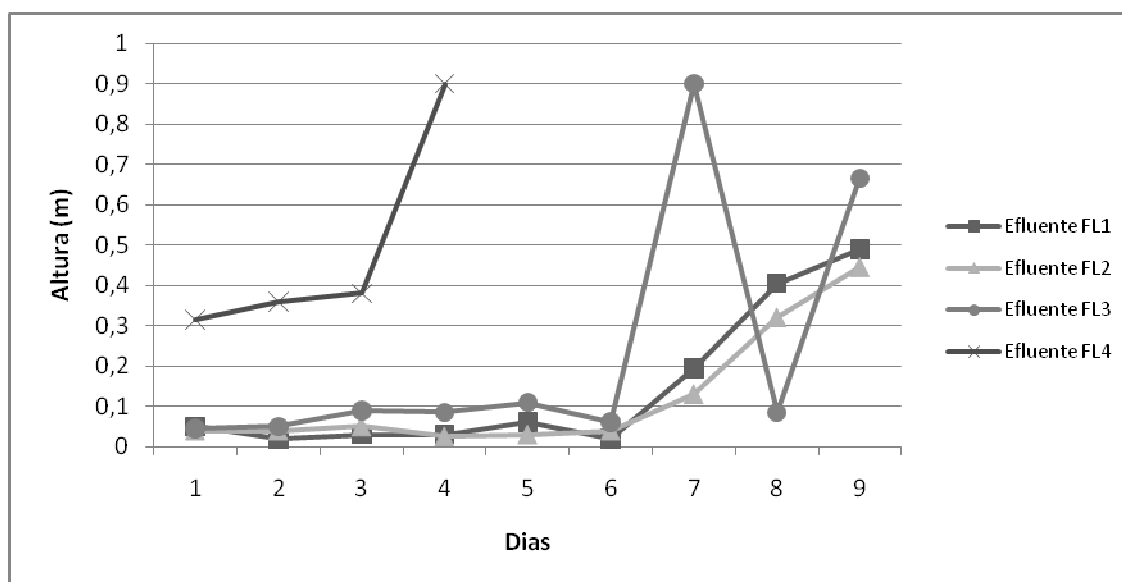


Figura 37. Perda de carga ao longo do ensaio de tratamento de água turva sintética pelo sistema FIME – presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 53mg.L^{-1} – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1

5.4 Considerações sobre perda de carga

Através da análise dos valores médios remanescentes de turbidez, cor aparente e perda de carga de todos os ensaios realizados, levando em consideração principalmente a perda de carga do FL3 que não recebeu a adição de solução coagulante, percebeu-se que o aumento da perda de carga estava ocorrendo de maneira muito irregular. Em alguns ensaios a perda de carga era mais lenta e em outro ensaio sob a mesma característica era mais rápida. Uma das razões pelas quais a perda de carga se estabeleceu fora do padrão estabelecido através do primeiro ensaio, somente com água bruta, pode ser a recirculação de resíduos da solução coagulante a partir de *Moringa oleifera* que interferiram no funcionamento do sistema, além

de possíveis alterações de vazão que em determinados momentos do funcionamento não puderam ser controladas.

5.5 Considerações sobre pH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica

Os parâmetros analisados além de turbidez, cor aparente e perda de carga foram pH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica. Ao observar as tabelas 6, 9, 12, 15 e 18 com os resultados obtidos em cada ensaio é possível destacar que:

- Para o pH, os valores de todos os ensaios de um modo geral foram muito semelhantes e se mantêm entre 7,24 e 8,37. Os valores mais baixos foram encontrados durante a fase de filtração lenta;
- A temperatura apresentada pelas etapas variou entre 19 e 24,5°C, tendo pouca variação ao longo do sistema;
- Os valores de oxigênio dissolvido durante os ensaios foram bastante variados, com valores entre 2,42 e 5,68mg.L⁻¹. O valor mais baixo foi anotado na etapa de pré-filtração com recebimento de *Moringa oleifera* e floculação (apresentado na tabela 15). Entretanto os valores mais baixos ao longo dos demais ensaios foram obtidos nas etapas de filtração lenta, em sua maioria no filtro lento 4, que recebia adição de solução coagulante. Uma das possíveis causas deste acontecimento pode ser o uso de oxigênio na degradação da *Moringa oleifera*. Os valores mais altos foram em sua maioria encontrados nas amostras de água bruta;
- Para a condutividade elétrica, os valores dos ensaios ficaram entre 310 e 473μS.cm², o valor mais baixo foi anotado no ensaio com presença de solução coagulante e floculação, expresso na tabela 15, na etapa de pré-filtração, e o mais alto foi anotado no filtro lento do ensaio com presença de solução coagulante e floculação, expresso na tabela 18. De modo geral, os maiores e menores valores encontrados se concentraram

nas etapas de filtração lenta, o que pode indicar a formação de sais devido à aplicação da solução coagulante.

5.6 Resultados gerais de turbidez e cor aparente

Para melhor visualização dos resultados obtidos durante todos os ensaios realizados, são apresentados na tabela 22 os valores médios de turbidez (NTU) obtidos em cada etapa do sistema FIME para cada ensaio realizado segundo as variações realizadas. Do mesmo modo a tabela 23 apresenta os valores médios obtidos de cor aparente (mg.L^{-1} PtCo), em cada etapa do sistema FIME para cada ensaio realizado.

A nomenclatura dos ensaios apresenta somente os elementos que sofreram variações ao longo dos ensaios como variação do número de camada e gramatura da manta não tecida do filtro lento 4, presença ou ausência de solução coagulante nas etapas do PF2 e FL4, com a descrição da concentração utilizada, além de presença e ausência de floculação no PF2 e FL4.

Tabela 22. Valores médios de turbidez (NTU) ao longo das etapas do sistema FIME em cada ensaio realizado.

Ensaio	Valores médios de turbidez (NTU)							
	AB	Efluente PFD	Efluente PF1	Efluente PF2	Efluente FL1	Efluente FL2	Efluente FL3	Efluente FL4
Ausência de solução coagulante – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2	110,73	60,42	46,73	49,43	10,25	9,41	8,49	10,28
Ausência de solução coagulante – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	118,12	72,92	33,81	36,17	5,34	5,45	3,10	5,09
Presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2,	70,9	59,6	26,8	10,7	0,927	1,14	2,71	1,26
Presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	98,63	59,53	18,70	8,70	1,04	1,18	1,89	1,06
Presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2,	95,09	59,36	23,62	9,12	1,33	1,35	2,28	1,17
Presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 106mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	79,74	45,24	24,60	12,00	1,73	1,29	4,02	1,01
Presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L⁻¹, FL4: 53mg.L⁻¹ – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	119,26	78,78	33,18	11,18	3,14	3,65	7,68	4,69

Tabela 23. Valores médios de cor aparente (mg.L^{-1} PtCo) ao longo das etapas do sistema FIME em cada ensaio realizado

Valores médios de cor aparente (mg.L^{-1} PtCo)								
Ensaio	AB	Efluente PFD	Efluente PF1	Efluente PF2	Efluente FL1	Efluente FL2	Efluente FL3	Efluente FL4
Ausência de solução coagulante – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2	659,06	380,22	299,67	356,72	71,33	64,17	58,00	70,28
Ausência de solução coagulante – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	665,86	464,69	227,90	236,31	36,89	39,22	21,71	36,07
Presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2,	448,00	392,00	172,00	78,00	8,00	9,00	18,00	11,00
Presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	549,30	377,00	121,70	62,00	9,00	10,00	14,70	11,50
Presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 e 4 com 3 M2,	546,70	390,20	154,70	59,60	8,60	6,80	9,60	6,90
Presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 106mg.L^{-1} – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	443,00	285,00	159,00	83,80	9,00	8,80	26,50	11,20
Presença de solução coagulante, PF2: 131mg.L^{-1} , FL4: 53mg.L^{-1} – presença de floculação: PF2 e FL4 – FL 1,2, 3 com 3 M2, FL4 com 1 M1	636,56	460,56	199,89	78,67	25,11	29,56	77,44	42,00

6. CONCLUSÕES

De acordo com os dados obtidos durante esta pesquisa é possível concluir que;

- O sistema FIME, com a presença de pré-filtração dinâmica, pré-filtração de fluxo ascendente e filtração lenta apresentou eficiência equivalente àquela encontrada na literatura quando empregado a solução coagulante extraída de sementes de *Moringa oleifera*, devendo o efluente final do sistema passar pelo processo de desinfecção, se o objetivo for o uso para consumo humano
- As dosagens da solução coagulante extraída de sementes de *Moringa oleifera*, empregadas antes das etapas do pré-filtro e filtro lento se demonstraram eficientes na remoção de turbidez e cor aparente no tratamento de água através do sistema FIME, como auxiliar de filtração;
- A etapa de pré-filtração sem aplicação da solução coagulante apresentou eficiência de remoção de turbidez de 62% e de cor aparente de 55%. A aplicação da dosagem de $131,0\text{mg.L}^{-1}$ de solução coagulante extraído das sementes de *Moringa oleifera* no afluente do pré-filtro proporcionou eficiência de remoção de turbidez e cor aparente em torno de 85%, o valor médio inicial da turbidez no tratamento era de 93NTU e após a etapa da pré-filtração atingiu 10,0NTU, para cor aparente o valor inicial médio era de $524,0\text{mg.L}^{-1}$ PtCo e foi para $72,0\text{mg.L}^{-1}$ PtCo.
- A etapa de filtração lenta sem aplicação da solução coagulante apresentou eficiência de remoção de turbidez de 93% e de cor aparente de 91%. A aplicação da dosagem de $106,0\text{mg.L}^{-1}$ de solução coagulante extraído das sementes de *Moringa oleifera* no afluente do filtro lento proporcionou eficiência de remoção de turbidez e cor aparente em torno de 98%, o valor médio inicial da turbidez no tratamento era de 93NTU e após a etapa da filtração lenta com coagulante atingiu 1,0NTU, para cor aparente o valor inicial médio era de 524mg.L^{-1} PtCo e foi para $10,0\text{mg.L}^{-1}$ PtCo. Entretanto a aplicação desta dosagem diminuiu o tempo de duração de filtração da carreira para apenas um dia;

- A aplicação da dosagem de $53,0\text{mg.L}^{-1}$ de solução coagulante extraído das sementes de *Moringa oleifera* no afluente do filtro lento proporcionou eficiência de remoção de turbidez de 95% e cor aparente em torno de 93%, o valor médio inicial da turbidez no tratamento era de 93NTU e após a aplicação da dosagem reduzida da solução coagulante na etapa da filtração lenta atingiu 4,0NTU, para cor aparente o valor inicial médio era de 524mg.L^{-1} PtCo e foi para $42,0\text{mg.L}^{-1}$ PtCo. A aplicação desta dosagem aumentou o tempo de duração de filtração da carreira para 4 dias;
- A presença de floculador de meio granular não apresentou resultados satisfatórios como auxiliar no tratamento de água nas etapas do pré-filtro e filtro lento. Na etapa da pré-filtração sem a presença do floculador granular os valores médios de turbidez e cor aparente foram, respectivamente, de 9,7NTU e $70,0\text{mg.L}^{-1}$ PtCo e com o floculador granular os valores obtidos foram de 10,0NTU e $74,0\text{mg.L}^{-1}$ PtCo. Na etapa da filtração lenta sem a presença do floculador granular os valores médios de turbidez e cor aparente foram, respectivamente, de 1,16NTU e $11,25\text{mg.L}^{-1}$ PtCo e com o floculador granular os valores obtidos foram de 1,09NTU e $9,05\text{mg.L}^{-1}$ PtCo. Entretanto, o a floculação da etapa da pré-filtração aumentou o tempo de duração da carreira dos filtros lentos subsequentes de sua linha de tratamento.
- O uso do coagulante extraído das sementes de *Moringa oleifera* melhorou significativamente a eficiência da filtração em múltiplas etapas, principalmente quando aplicado na etapa de pré-filtração. Contudo, o processo de obtenção do coagulante empregado demonstrou possuir partículas em suspensão que contribuíram para a redução da duração da carreira de filtração.

7. RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento desta pesquisa permitiu uma série de reflexões que, almejando-se a continuidade deste trabalho, devem ser deixadas como recomendações, dentre elas pode-se ressaltar:

- O uso de solução coagulante a partir de sementes de *Moringa oleifera* se demonstrou eficiente no sistema, entretanto deve se buscar um novo modo de aplicação e preparo na tentativa de redução de sólidos disponíveis nos sistema e assim prolongar o tempo de duração da carreira de filtração e a manutenção do sistema seja facilitada.
- Deve ser realizado também um estudo para identificar a concentração de solução coagulante remanescente no efluente final e quais são os seus efeitos sob armazenamento para posterior distribuição.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Waste water, 20th ed. Washington D.C., 1999.

ARANTES, C. C. **Utilização de coagulantes naturais à base de sementes de *Moringa oleifera* e tanino como auxiliares da filtração em mantas não tecidas**. 128p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2010.

AZEVEDO NETTO, J.M.; MANFRINI, C.; CAMPOS, JR.; POVINELLI, J., PARLATORE, AC.; HESPANHOL, I.; ROSSIN, AC.; YAGUINUMA, S., **Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água**, v.2. CETESB São Paulo, 1976.

AZEVEDO NETTO, J.M., et al, **Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água**, v.2. 3ªedição. CETESB/ASCETESB. São Paulo, 1987.

BEZERRA, A. M. E; MEDEIROS FILHO, S.; FREITAS, J. B. S.; TEÓFILO, E. M. **Avaliação da qualidade das sementes de *Moringa oleifera* Lam. durante o armazenamento**. Ciên. Agrotec., Lavras, v.28, n. 6, p. 1240 – 1246. 2004.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria n° 518** , de 25 de março de 2004. 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 referências. Disponível em: <http://www.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/portaria_518.pdf>. Acesso em: 20 de maio de 2010.

CAMPOS , J. R. **Alternativas para tratamento de esgotos – Pré-tratamento de águas de abastecimento**, ASSEMAE. Americana, 1994. 112 p. Apud STACCIARINI, Rogerio. **Análise do comportamento de filtração lenta com mantas sintéticas não tecidas**. 1998. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

DALSASSO, R. L. **Estudo de diferentes materiais para floculação em meio granular precedendo a filtração rápida descendente no tratamento de água para abastecimento**. 272p. Dissertação (Doutorado) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.

DI BERNARDO, L. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**, vols. 1 e 2. ABES, Rio de Janeiro. 1993.

DI BERNARDO, L.; BRANDÃO, C.C.S.; HELLER, L. **Tratamento de águas de Abastecimento por Filtração em Múltiplas Etapas**. ABES/ PROSAB. Rio de Janeiro, 1999.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos: Rima, 2005.

FERRAZ, F.C.; PATERNIANI, J.E.S., Redução da Espessura da Camada Suporte através da Substituição por Mantas Sintéticas Não Tecidas na Filtração Lenta de Água de Abastecimento **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental** – ABES, Vol 7, nº 6 e 7, pg 8 – 15, Jan/Jun 2002

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE - FUNASA. **Manual de Saneamento**. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2007.

GALVIS, G.; LATORRE, J.; OCHOA, A. E.; VISSHER, J. T. **Comparison os horizontal and upflow roughing filtration**, In: Graham, N. e Collins, R. (eds), *Advances in Slow Sand and Alternative Biological Filtration*, John & Wiley, Inglaterra, 1996.

GLEICK, P. H. Dirty water: Estimated Deaths from water – Related Disease 2000-2020. **Pacific Institute for studies in development, environment and security**. Disponível em <http://www.pacinst.org/reports/water_related_deaths/water_related_deaths_report.pdf> Acesso em: 13 de outubro de 2008.

HESPANHOL, I.; AMARAL E SILVA, C. C. tradutores. **Manual para operadores de Estações de Tratamento de Água**, 1971.

KATAYON, S.; MEGAT MOHD NOOR, M. J.; ASMA, M.; ABDUL GHANI, L. A.; THAMER, A. M.; AZNI, I.; AHMAD, J.; KHOR, B. C.; SULEYMAN, A. M. **Effects of storage conditions of *Moringa oleifera* seeds on its performance in coagulation**. Biosource Technology 97, p. 1455-1460. 2005

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 2. ed. Campinas: Editora Átomo, 2008. 444 p.

MENDES, C. G. N. **Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo, 1989.

MUYIBI, S.A.; EVISON, L.M. **Optimizing physical parameters affecting coagulation of turbid water with *Moringa oleifera* seeds**. Water Research, vol.29, nº 12, pp. 2689-2695 (1995)

MUYIBI, S.A. EVISON, L.M. ***Moringa oleifera* seeds for softening hardwater**. Water Research, vol.29, nº 12, pp. 1099-1104 (1995)

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K.S. & TALBOT, B.G. **Active agents and Mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera***. Water Research, vol.29, nº2, pp. 706-710, 1995.

PATERNIANI, J. E. S. **Utilização de Mantas Sintéticas não Tecidas na Filtração lenta em Areia de Águas de Abastecimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

PATERNIANI, J. E. S; MANTOVANI, M. C.; SANT'ANNA, M. R. **Uso de sementes de *Moringa oleifera* na eficiência da filtração lenta direta e da sedimentação para**

tratamento de águas superficiais. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA, 2006, João Pessoa – PB.

PATERNIANI, J. E. S.; SANT'ANNA, M. R. **Eficiência da Sedimentação com uso de coagulante obtido de semente de *Moringa oleifera*.** Relatório Final de Iniciação Científica. Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo, 2006.

PINTO, N. O.; HERMES, L.C.; **Sistema simplificado para a melhoria da qualidade da água consumida por comunidades rurais do semi-árido do Brasil.** V Simpósio brasileiro de captação de manejo de água de chuva. Teresina, Piauí. 2005.

PRICE, M. L., DAVIS, K. **The *moringa* tree.** Echo technical note. Publicado em 1985, revisado em 2000. Disponível em: < <http://www.echonet.org/>> Acesso em 25 de junho de 2009.

PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO (PROSAB). **Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999.

RAMOS BORBA, L. **Viabilidade do uso da *Moringa oleifera* Lam no tratamento simplificado do uso da água em pequenas comunidades,** João Pessoa, 2001.

RAMOS, R. O. **Clarificação de água com turbidez baixa e cor moderada utilizando sementes de *Moringa oleifera*.** 2005. 276 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J M. 1991. **Tratamento de água.** Edgard Blücher, São Paulo, Brasil

STACCIARINI, R. **Análise do comportamento de filtração lenta com mantas sintéticas não tecidas.** 118p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998

SILVA, M. J. M. **Filtração Lenta e Técnicas Alternativas de Desinfecção para Tratamento de Adequação de Efluentes Domésticos Visando Reuso.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

VERAS, L. R. V.; DI BERNARDO, L. **Tratamento de água de abastecimento por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas - FIME.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, São Carlos, v. 13, n. 1, p.109-116, 07 mar. 2008. Disponível em: <http://www.abes-dn.org.br/publicacoes/engenharia/resaonline/v13n01/_ArtigoTecnico-159_06.pdf>. Acesso em: 13 out. 2008.

VIANNA, M. R. **Hidráulica Aplicada às estações de tratamento de água.** 3ed. Belo Horizonte: Imprimatur, 1997. 576p.

ANEXO 1

Floculador

Para a definição das características dos floculadores a serem utilizados durante o tratamento de água pelo sistema FIME antes das etapas da pré-filtração e filtração lenta, foram realizados ensaios com dois cilindros com as seguintes dimensões: 0,10m de diâmetro e 1,0m de altura.

Os testes realizados compreenderam em variar a granulometria e a altura da camada do meio granular. Testes com a mesma composição granulométrica e altura das camadas do pré-filtro também foram realizados para que o coeficiente de mistura desta etapa fosse encontrado, e no futuro houvesse como comparar os resultados entre o floculador e o pré-filtro, e se os dois não estariam desempenhando a mesma função de mistura lenta durante o tratamento (o modelo de composição do pré-filtro não entrou na escolha da composição do floculador).

Metodologia dos ensaios

Primeiramente foram definidos três variações de granulometrias do pedregulho: entre 4 e 10mm, 20 e 38mm, e uma réplica das camadas de meio filtrante utilizada durante a etapa da pré-filtração do sistema FIME. Numa segunda etapa foram definidas as alturas da camada do meio granular que seriam ensaiadas, especificadas em 50, 75 e 90% da capacidade de armazenamento do floculador, definidas acima da camada suporte que era de 0,10m, essas camadas correspondiam respectivamente a 0,45m, 0,68m e 0,80m. Foram definidos também os valores de porosidade para cada variação de granulometria do pedregulho.

A Tabela 21 descreve as variações da granulometria do pedregulho, alturas da camada do meio granular, porosidade e os respectivos ensaios realizados

Tabela 24. Variações do pedregulho utilizado na definição de floculador granular

Porosidade	Granulometria do pedregulho (mm)	Altura da camada do meio granular		
		0,45m	0,68m	0,80m
0,68	20 a 38	Ensaio 1 e 2	Ensaio 3, 4 e 5	Ensaio 6, 7 e 8
0,59	4 a 10	Ensaio 9, 10 e 11	Ensaio 12, 13 e 14	
0,53	Pré-filtro			Ensaio 15, 16 e 17

Com o pedregulho de granulometria entre 4 e 10mm não foram realizados ensaios na altura de 0,80m, pois não havia pedregulho suficiente.

Os ensaios realizados seguiram o seguinte procedimento:

1. O primeiro cilindro foi colocado num patamar superior para ser preenchido com água;
2. O segundo cilindro, mais baixo, foi preenchido com o material granular, conforme a necessidade para os testes;
3. Eles foram interligados através de mangueira, como pode ser observado na figura 37;
4. Uma pequena bomba num reservatório foi responsável por recalcar água para o primeiro flocculador, então se abriu o registro para preenchimento dos flocculadores;
5. Aguardou-se a estabilização do sistema, até que o volume dos cilindros entrasse em equilíbrio;
6. Anotou-se o nível de estabilização do sistema sem abastecimento de água, tido com nível inicial;
7. Abriu-se o registro da bomba para uma baixa vazão;
8. Após a estabilização do sistema para esta baixa vazão, a variação da altura no nível d'água nos cilindros, ou seja, a perda de carga no sistema foi marcada;
9. Efetuava-se a leitura da vazão através do método volumétrico, através de proveta e cronômetro, para a perda de carga anotada;
10. Repetiu-se as etapas 7, 8 e 9, com aumento gradativo das vazões, até que onze valores fossem anotados, quando o flocculador com o material granular estava a ponto de transbordar.



Figura 38. Ensaio realizado com floculador de meio granular, com pedregulho de granulometria variando de 20 a 38mm e altura da camada de 0,45m

Os resultados obtidos nos ensaios foram separados em dois conjuntos, o primeiro com os valores de granulometria variando entre 4 e 10mm e 20 e 38mm, e o segundo com os valores obtidos através dos ensaios com a réplica da granulometria do pré-filtro.

No conjunto 1, com base na análise dos valores obtidos foi possível definir o Coeficientes de Forcheeimer e Gradiente de Mistura para definição do Número de Camp para os ensaios de 1 a 11 (valores medidos), apresentados na figura 39 e nomeados com C1, C2... e C11. A partir dos valores medidos e dos coeficientes identificados, extrapolou-se os dados para mil pontos de diferentes vazões (valores calculados) a partir de $0,001\text{L.s}^{-1}$, como pode ser observado na figura 40 e nomeados como Cc1, Cc2, ... e Cc11.

Percebeu-se que entre os valores medidos e calculados dos testes 12, 13 e 14, com pedregulho de granulometria menor e altura da camada em torno de 75% da capacidade do floculador havia uma discrepância muito grande, por isso estes testes foram excluídos da escolha da composição do floculador e não são apresentados nas figuras 39 e 40.

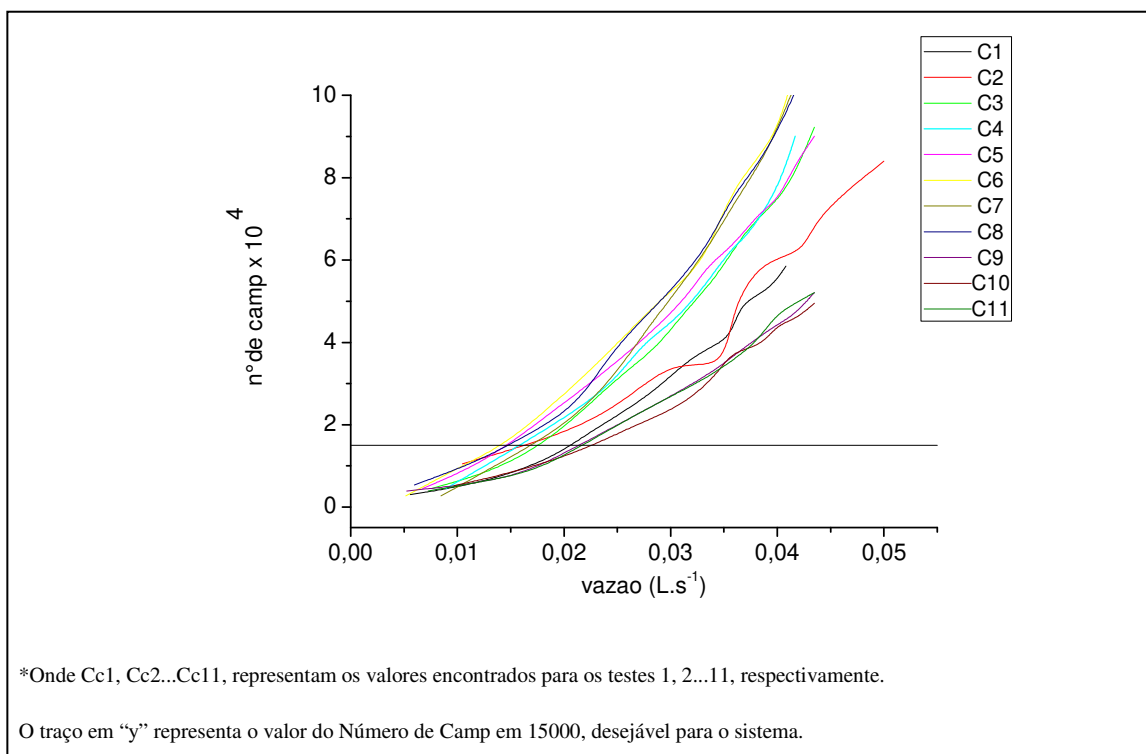


Figura 39. Número de Camp medido experimentalmente para 11 testes* de floculação granular

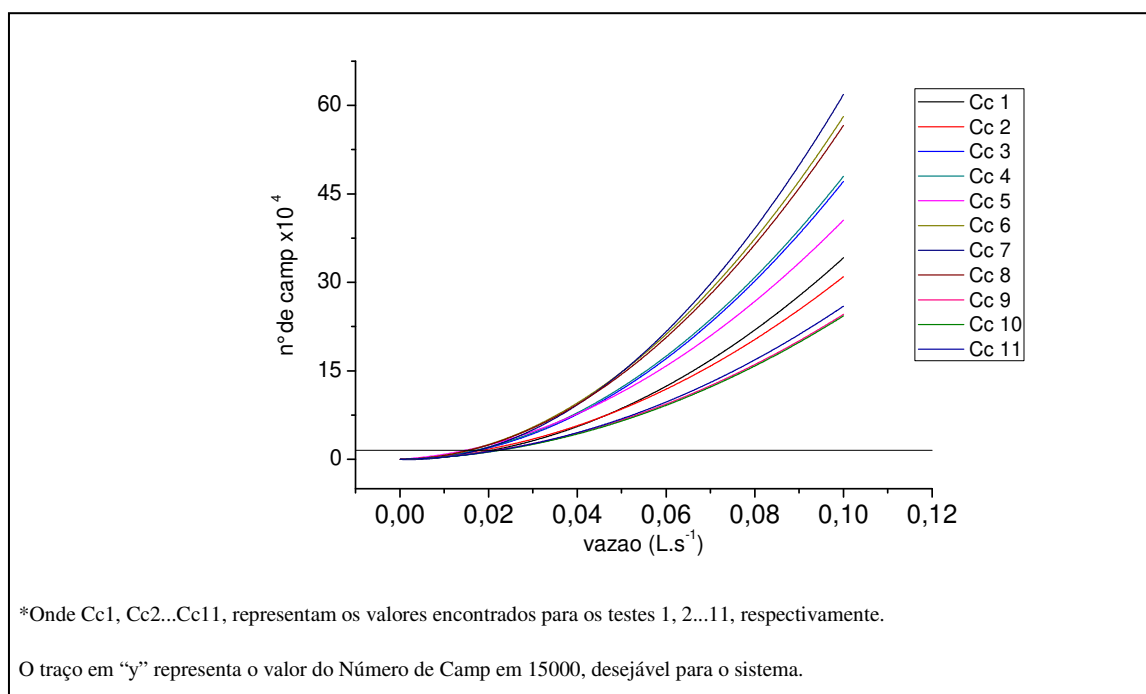


Figura 40. Número de Camp calculado, com valores de vazão extrapolados de 0,001 à 0,1L.s-1, para 11 testes* de floculação granular

Analisando os dados, os ensaios 6 e 8, com pedregulho de maior granulometria e maior altura da camada (ensaios 6 e 8) foram muito semelhantes principalmente para valores de vazões mais altos, além de os valores medidos serem muito próximos dos valores calculados. Entretanto, os valores recomendados do Número de Camp em torno de 15000 foram encontrados nestes ensaios para a vazão de $0,015\text{L.s}^{-1}$.

A partir dos dados iniciais obtidos no conjunto 1, buscou-se valores de Número de Camp que estivessem em torno de 14000 a 16000 conforme recomendações de RICHTER E AZEVEDO NETTO (1991), para a escolha do floculador adequado que abrangesse as características dos floculadores que abrangesse as vazões determinadas na etapa da pré-filtração e da filtração lenta, entretanto que esses valores de Camp não foram atingidos. Decidiu-se então observar a variação do Número de Camp a partir do aumento da velocidade de escoamento do fluido no floculador, obtido através da variação do diâmetro dos floculadores.

Na etapa da pré-filtração, com vazão de $0,0055\text{L.s}^{-1}$, foi definido floculador com diâmetro de 60mm, valor mais próximo do desejável e encontrado comercialmente, e altura da camada de pedregulho de 0,80m, já que essa altura apresentou os resultados mais confiáveis durante os ensaios anteriores. Para a etapa de filtração lenta que trabalhou com vazão de $0,0014\text{L.s}^{-1}$, definiu-se o diâmetro de 25mm, com altura da camada de 0,45m, também pela maior confiabilidade dos resultados.

Nos ensaios realizados com a mesma granulometria do pré-filtro, conjunto 2, os valores medidos durante os ensaios proporcionaram a definição dos Coeficientes de Forcheeimer e Gradiente de Mistura para definição do Número de Camp, nomeados como ensaios 15, 16 e 17, apresentados na figura 41 como C15, C16 e C17. A partir dos valores medidos e dos coeficientes identificados, extrapolou-se os dados para mil pontos de diferentes vazões (valores calculados) a partir de $0,001\text{L.s}^{-1}$, como pode ser observado na figura 42 e nomeados como Cc15, Cc16 e Cc17.

Ao comparar os valores medidos e calculados deste conjunto 2, notou-se que entre eles muita discrepância, revelando que os valores dos testes não foram confiáveis. Foi possível avaliar também que o valor de Número de Camp, entre 14000 e 16000 para a vazão de $0,0055\text{L.s}^{-1}$ não foi encontrado.

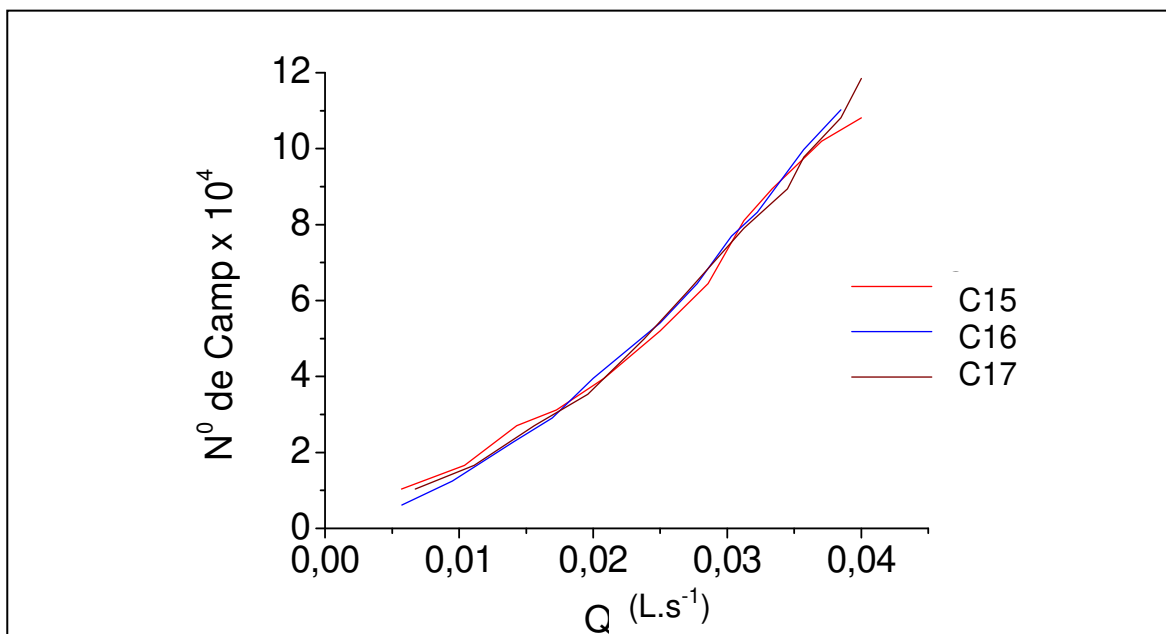


Figura 41. Número de Camp medido experimentalmente para 3 testes com mesma granulometria do pré-filtro

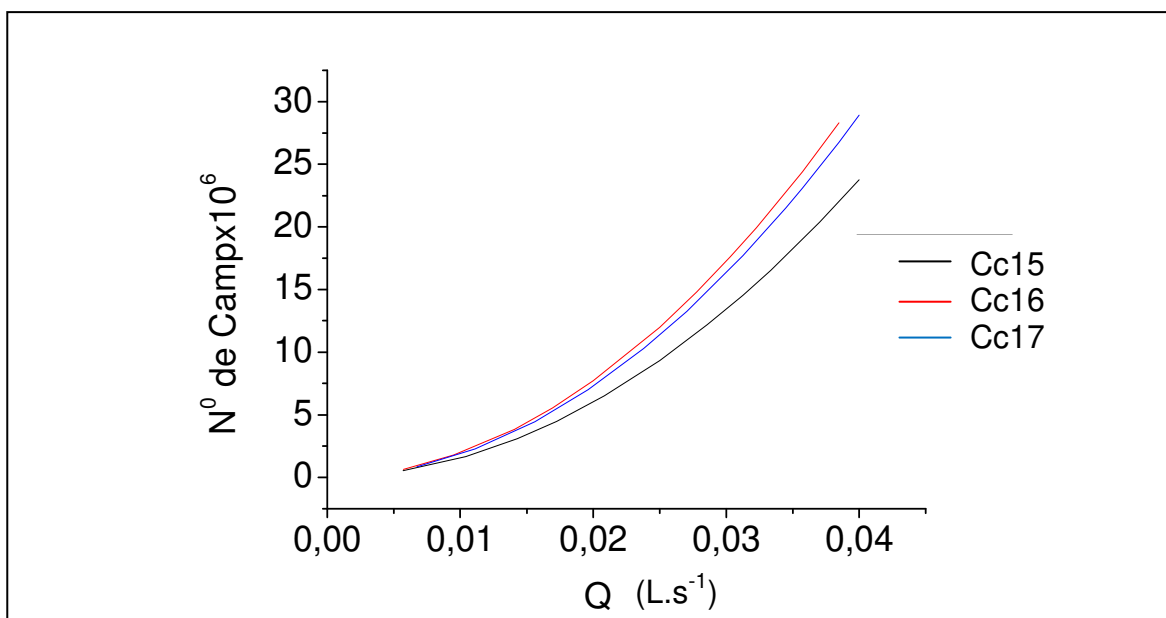


Figura 42. Número de Camp calculado, com valores de vazão extrapolados de 0,001 à 0,1 L.s⁻¹, para 3 testes com mesma granulometria do pré-filtro