ALICE KIMIE MARTINS MORITA

EMPREGO DE FILTRO DE FIBRA FLEXÍVEL CONSTITUÍDO DE SISAL E DE POLIPROPILENO NA CLARIFICAÇÃO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO CARLOS– SP
JULHO DE 2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Morita, Alice Kimie Martins
M862e Emprego de filtro de fibra flexível constituído de sisal e de polipropileno na clarificação de água para abastecimento / Alice Kimie Martins Morita; orientador Marco Antonio Penalva Reali . São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Tratamento de água para abastecimento. 2. Filtração. 3. Filtro de fibra flexível. 4. Sisal. 5. Polipropileno. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **ALICE KIMIE MARTINS MORITA**.

Título da dissertação: "Emprego de filtro de fibras flexíveis constituído de sisal e de polipropileno na clarificação de água para abastecimento".

Data da defesa: 12/06/2013

Comissão Julgadora: **Resultado:**

Prof. Dr. **Marco Antonio Penalva Reali - (Orientador)** Aprovada
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Profª. Drª. **Lyda Patrícia Sabogal Paz** Aprovada
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Valter Lúcio de Pádua** aprovada
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:
Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, por cada oportunidade e etapa cumprida.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali, pela orientação, pela atenção e paciência, e por todos os ensinamentos durante a pesquisa e também durante a graduação.

Ao técnicos Roberto Bérgamo e Alcino, pela montagem das instalações utilizadas na pesquisa, pela atenção e capricho e pelas valiosas dicas e explicações.

À técnica Maria Teresa, pelo auxílio em laboratório, pela disposição em sempre ajudar.

À CAPES, pela concessão de bolsas.

Ao Diego, meu companheiro de vida, por cada momento compartilhado, agora e sempre. Pelas conversas, pelo apoio, pelo amor e por estar ao meu lado, trilhando novos caminhos.

A meus pais, pela minha formação, por cada conversa e momento que me permitiram chegar até aqui.

A meus amigos, especialmente à Vivian, minha amiga do peito, por sempre me ajudar, me ouvir, e pelas risadas que sempre demos! Pela ajuda especial que me deu nesta etapa final dos estudos!

SUMÁRIO

RESUMO V
Abstract VI
Lista de Figuras VII
Lista de Tabelas XIII
Lista de Quadros XIV
Lista de abreviaturas e siglas XV
Lista de símbolos XVI
1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVOS 4
2.1. Objetivo geral 4
2.2. Objetivos específicos 4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
3.1. Filtração – considerações iniciais 5
3.2. Filtração com ação superficial e de profundidade 5
3.3. Fatores que influem no processo de filtração 7
3.4. Características dos materiais filtrantes 8
3.5. Perda de carga em colunas de filtração 10
3.6. Índices de filtrabilidade 11
3.7. Filtração em filtro de fibras flexíveis 12
3.7.1. Aplicação de filtro de fibra flexível na clarificação de águas superficiais 17
3.7.2. Outros estudos envolvendo filtros de fibra flexível 19
3.7.3. Fatores que influenciam o desempenho do filtro de fibras flexíveis 21
3.7.4. Carreiras de filtração e lavagem em filtro de fibra flexível 22
3.7.4.1. Amadurecimento do filtro de fibra flexível 24
3.8. Adequação de tecnologia e utilização de materiais locais 25
3.8.1. A fibra de sisal 26
3.8.1.1. Características das fibras de sisal 28
3.8.1.2. Cadeia produtiva 29
3.8.1.3. Colheita e transporte 30
3.8.1.4. Desfibramento 31
3.8.1.5. Lavagem e secagem da fibra 32
3.8.1.6. Seleção e classificação da fibra 33
3.8.1.7. Novos usos e aproveitamento dos resíduos 34

3.8.1.8. Problemas ambientais da produção do sisal 36
3.8.2. A fibra de polipropileno 37
3.8.3. Experiência da utilização de mantas não tecidas constituídas de polipropileno e de sisal aplicadas ä filtração lenta 38
3.9. Padrões de potabilidade: Portaria 518/2004 e Portaria 2914/2011 39
4. MATERIAL E MÉTODOS 41
4.1. Considerações iniciais 41
4.2. Água de estudo 42
4.3. Etapa I: Caracterização das fibras de sisal e polipropileno 42
4.3.1. Análise de solubilidade em ácido clorídrico e em hidróxido de sódio 42
4.3.1.1. Método para determinação de solubilidade em ácido clorídrico 43
4.3.1.2. Método para determinação de solubilidade em hidróxido de sódio 44
4.3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura 47
4.3.3. Microscopia Óptica 47
4.3.4. Cálculo e comparação das superfícies de contato nos diferentes filtros construídos 48
4.4. Etapa II: Obtenção dos parâmetros de coagulação da água sintética 50
4.5. Etapa III: Avaliação da eficiência de clarificação do processo de filtração em filtros de fibra flexível constituídos de sisal e de polipropileno 51
4.5.1. Instalação piloto 51
4.5.1.1. Sistema de filtros de fibra flexível 52
4.5.1.2. Sistema de preparo e armazenamento da água de estudo 60
4.5.1.3. Sistema de preparo e dosagem de coagulante e alcalinizante 65
4.5.2. Planejamento dos ensaios 69
4.5.3. Monitoramento dos ensaios 71
4.6. Etapa IV: Avaliação da lavagem dos filtros 73
4.7. Critério para avaliação do desempenho da coluna de filtração 78
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 81
5.1. Estudos preliminares: parâmetros de coagulação da água de estudo 81
5.2. Características da água de estudo 83
5.3. Caracterização das fibras de sisal e polipropileno 83
5.3.1. Solubilidade em ácido clorídrico e hidróxido de sódio 84
5.3.2. Microscopia eletrônica de varredura 86
5.3.2.1. Fibras de sisal antes da operação dos filtros 86
5.3.2.2. Fibras de polipropileno antes da operação dos filtros 90

5.3.2.3. Fibras de sisal após operação dos filtros 94
5.3.2.4. Fibras de polipropileno após operação dos filtros 95
5.3.3. Microscopia óptica 97
5.3.4. Degradação das fibras 98
5.4. Avaliação da eficiência de clarificação 99
5.4.1. Ensaios utilizando fibras de polipropileno e porosidade de leito de 93% 99
5.4.1.1. Operação dos filtros com taxa de 20m/h 99
5.4.1.2. Operação dos filtros com taxa de 40m/h 104
5.4.1.3. Operação dos filtros com taxa de 80m/h 108
5.4.1.4. Considerações sobre ensaios utilizando polipropileno 110
5.4.2. Ensaios utilizando fibras de sisal 112
5.4.2.1. Resultados de ensaios utilizando sisal e porosidade de leito de 93% 112
5.4.2.1.1. Operação dos filtros com 93% de porosidade e taxa de 20m/h 112
5.4.2.1.2. Operação dos filtros com 93% de porosidade e taxa de 10m/h 116
5.4.2.1.3. Operação dos filtros com 93% de porosidade e taxa de 5m/h 118
5.4.2.1.4. Considerações e diretrizes para próxima etapa 120
5.4.2.2. Resultados de ensaios utilizando porosidade de leito de 85% 121
5.4.2.2.1. Operação dos filtros com 85% de porosidade e taxa de 20m/h 121
5.4.2.2.2. Operação dos filtros com 85% de porosidade e taxa de 40m/h 129
5.4.2.2.3. Operação do filtro de 100 cm com 85% de porosidade e taxa de 80m/h 133
5.4.2.2.4. Conclusões dos estudos com sisal e porosidade de leito de 85% 135
5.4.3. Comparação dos resultados obtidos para ensaios utilizando sisal e polipropileno 138
5.4.3.1. Volumes filtrados e perda de carga final 139
5.4.3.2. Índices de filtrabilidade 140
5.4.3.3. Retenção de sólidos suspensos 143
5.4.3.4. Lavagem 144
5.4.3.4.1. Filtro de sisal S100-85% 145
5.4.3.4.2. Filtro de polipropileno PP100-93% 148
5.4.3.4.3. Filtro de polipropileno PP60-93% 150
5.4.3.4.4. Considerações sobre o processo de lavagem 152
5.4.3.5. Comparação da superfície de contato nos diferentes filtros 152
5.4.3.6. Considerações finais sobre a utilização de fibras de sisal e de polipropileno em filtros de fibra flexível 154
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 156

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 162

RESUMO

MORITA, A. K. M. (2013) Emprego de filtro de fibras flexíveis constituído de sisal e de polipropileno na clarificação de água para abastecimento.

Os filtros de fibra flexível são módulos de filtração recentemente desenvolvidos cujo leito é constituído de fibras de poliamida, o que permite a obtenção de altas eficiências de remoção de sólidos associadas a altas taxas de filtração. Este estudo objetivou avaliar o desempenho deste tipo de filtro utilizando-se como meio filtrante fibras flexíveis de sisal e de polipropileno. Com isso se buscou aprofundar o entendimento da técnica de filtração em leito de fibras flexíveis, além de propor e avaliar leitos com fibras diferentes daquelas citadas na literatura (constituídas de poliamida), neste caso fibras naturais (sisal) e fibras de polipropileno. A superfície das fibras em estudo foi analisada por meio de microscopia óptica e eletrônica de varredura e através de ensaios de solubilidade em ácido clorídrico e hidróxido de sódio, com a finalidade de investigar as características superficiais dos materiais filtrantes e sua solubilidade. Foram construídos 6 filtros com diâmetro interno de 28 mm e porosidade de leito de 93%, sendo 3 constituídos de fibras de sisal com comprimentos de leito de 25,60 e 100 cm, e 3 constituídos de fibras de polipropileno, também nos comprimentos de 25,60 e 100 cm. Em um segundo momento foi avaliado o desempenho de filtros constituídos de sisal nos mesmos comprimentos citados, no entanto com porosidade de leito de 85%. Foi utilizada para alimentação dos filtros água sintética com 8,19±0,85 uT e 14,47±5,25 uC e foi realizada coagulação *in-line* por meio da adição de 22,5 mg/L de sulfato de alumínio. Foram avaliadas taxas de filtração desde 5m/h até 80m/h no caso dos filtros do sisal com diferentes comprimentos e porosidades, e desde 20m/h até 80m/h no caso dos filtros de polipropileno. O limite de turbidez estabelecido para o filtrado foi de 1 uT. Puderam operar dentro do limite de turbidez estabelecido os filtros de polipropileno de 25,60 e 100 cm com taxa de 20m/h e de 60 e 100 cm com taxas de até 80m/h, e o filtro de sisal de 100 cm e 85% de porosidade com taxas de 20 e 40 m/h. Os maiores volumes de filtrado foram obtidos para filtro de polipropileno de 100 cm operando com taxa de 20m/h, no entanto estes foram associados a maior perda de carga. Por outro lado, o filtro de sisal de 100 cm produziu menor quantidade de filtrado, porém com perda de carga associada consideravelmente baixa. Os melhores índices de filtrabilidade foram obtidos para o filtro de sisal de 100 cm de comprimento e 85% de porosidade de leito, o que indica seu potencial de aplicação, especialmente em ocasiões em que a carga hidráulica disponível seja restrita e a turbidez exigida do filtrado não seja demasiadamente baixa (inferior a 0,5 uT). Sugere-se a utilização de filtros constituídos de fibras de sisal como unidades de pré-filtração ou a construção de leitos com menor porosidade e maior comprimento de leito do que os utilizados neste estudo, caso se objetive aplicação em tratamento de água para abastecimento. Este estudo mostrou que é possível utilizar fibras de sisal e de polipropileno em filtros de fibras flexível, e a escolha dos diferentes tipos de fibras, comprimentos e porosidades de leito dependeria da disponibilidade no local, da qualidade do efluente exigida e da carga hidráulica disponível.

Palavras-chave: tratamento de água para abastecimento; filtração; filtro de fibras flexíveis; sisal; polipropileno.

Abstract

MORITA, A. K. M. (2013) Employment of flexible fiber filter made of sisal and polypropylene in the clarification of water to supply.

The flexible fiber filter is a filtration module recently developed whose filter media is made of polyamide fibers, what permits to obtain high solids removal efficiency associated to high application rates. The objective of this study was to evaluate the performance of this kind of filter using as filter media flexible fibers of sisal and polypropylene. With this it was intended to deepen the understanding of the filtration technique using flexible fibers as media and to propose and evaluate filter medias made of fibers different from the ones found in the literature: natural fibers (sisal) and polypropylene fibers. The fibers in study were analysed by means of optic and scanning electronic microscopy and through solubility essays in chloridric acid and sodium hydroxide, with the intention to characterize the filtering materials and find if there are restrictions of their use. Six filters with 28 mm of intern diameter and 93% of porosity were constructed, three being made of sisal fibers with 25, 60 and 100 cm of length, and three being made of polypropylene fibers, with 25,60 and 100 cm of length, too. In a second moment three other sisal fibers were constructed and evaluated, with the same lengths studied before, but with porosity of the filter medium of 85%. The filtration system was fed with synthetic water with 8,19±0,85 uT and 14,47±5,25 uC, and *in-line* coagulation was applied by the addition of 22,5 mg/L of aluminium sulfate. In the case of the sisal filters, made of different lengths and porosities, rates from 5m/h to 80m/h were evaluated; in the case of polypropylene filters, rates from 20m/h and 80m/h were evaluated. It was established as the turbidity limit the value of 1 uT. The filters that worked within the established turbidity limit were the polypropylene filters of 25,60 and 100 cm for the rate of 20m/h and of 60 and 100 cm for rates until 80m/h, and the sisal filter of 100 cm and 85% of porosity for rates of 20 and 40 m/h. The biggest filtrate volumes were obtained for polypropylene filter of 100 cm working with the rate of 20 m/h; however this one was associated to the biggest values of pressure drop. On the other hand, the filter made of sisal with 100 cm produced a smaller quantity of filtrate, but associated to a considerably low value of pressure drop. The best filterability indexes were obtained for the filter made of sisal with 100 cm of length and 85% of porosity, what indicates its application potential, mainly to situations when there is not enough hydraulic charge and when the requested turbidity of the filtrate is not too low (less than 0,5 uT). It is suggested that the filters made of sisal are used as pre-filtration units or that they are built with smaller values of porosity and/or with a longer filter length than the ones used in this study, in the case that water treatment application is aimed. This study showed that it is possible to use sisal and polypropylene fibers in flexible fiber filters, and that the choice of different types of fibers, lengths and porosities depends on de availability of materials in the local, on the required quality of the filtrate and on the available hydraulic charge.

Keywords: treatment of water to supply; filtration; flexible fiber filter; sisal; polypropylene.

Lista de Figuras

Figura 1. Variação da perda de carga ao longo do comprimento de filtro, para diferentes tempos de operação, para filtro com ação superficial significativa. 6
Figura 2. Variação da perda de carga ao longo do comprimento de filtro, para diferentes tempos de operação, para filtro com ação de profundidade. 6
Figura 3. Leito de fibras de poliamida utilizado em filtro de fibras flexíveis. 13
Figura 4. Filtro de fibras flexíveis. 14
Figura 5. Esquema de funcionamento de filtro de fibra flexível. 15
Figura 6. Módulos de filtração utilizados na indústria Gwangyang Steel na Coréia do Sul. 16
Figura 7. Módulos de filtração utilizados no tratamento terciário de esgotos na estação de Yangsan na Coréia do Sul. 16
Figura 8. A planta de sisal. 27
Figura 9. Fio agrícola (Baler Twine), principal produto das fibras de sisal. 28
Figura 10. Cultivo de sisal isolado e em consórcio com mamona, feijão e milho. 30
Figura 11. Colheita das folhas de sisal e planta após corte. 30
Figura 12. Folhas de sisal recém cortadas. 31
Figura 13. Transporte das folhas e das fibras de sisal por jumentos. 31
Figura 14. Operadores de máquina para desfibramento da folha de sisal. 32
Figura 15. Secagem das fibras de sisal. 33
Figura 16. Fibras de sisal acondicionadas em fardos. 34
Figura 17. Beneficiamento da fibra. 34
Figura 18. Ruminantes se alimentando espontaneamente dos resíduos da produção do sisal. 35
Figura 19. Estrutura do monômero propileno e do polímero, polipropileno. 37
Figura 20. Fibras de sisal imersas em solução de hidróxido de sódio. 45
Figura 21. Fibras de sisal após serem secas em estufa a 110±5°C durante 3 horas. 46
Figura 22. Esquema de método de quarteamento, utilizado para redução da amostra de fibras de sisal. 48
Figura 23. Equipamento Jarteste utilizado para obtenção dos parâmetros de coagulação da água de estudo. 50
Figura 24. Três comprimentos de leito utilizados nos filtros de sisal – 25, 60 e 100 cm. 52
Figura 25. Estrutura para fixação das fibras vista de baixo e de lado, contendo fibras de sisal já fixadas. 54
Figura 26. Destaque para encaixe da estrutura para fixação das fibras nas tubulações de PVC – vista da parte inferior da coluna de filtração. 54
Figura 27. Rolo de corda de sisal e fibras de sisal abertas e fixas em estrutura para fixação das fibras. 55
Figura 28. Corda de polipropileno e fibras de polipropileno abertas e fixadas em estrutura para fixação das fibras. 55
Figura 29. Estrutura para distribuição de ar no interior dos filtros. À direita se observam pedaços de cano de PVC utilizados para manter distanciamento desta estrutura com a entrada do filtro (antes) e com a estrutura para fixação das fibras (depois). 56
Figura 30. Destaque da localização da estrutura de distribuição de ar na coluna de filtração, logo após a entrada. 56
Figura 31. Configuração de filtro de fibras utilizado nesta pesquisa. 58

Figura 32. Destaque para parede interna das colunas de filtração (tubulações de PVC), na qual foi aplicada camada de areia. 59
Figura 33. Sistema de 6 filtros construídos nesta pesquisa. 59
Figura 34. Reservatório de 15m³ utilizado para armazenamento e produção da água sintética e aquecedor a gás utilizado para aquecimento da água do reservatório. 60
Figura 35. Bomba localizada na saída do reservatório, responsável por recalcar a água de estudo até caixa de nível. 61
Figura 36. Caixa de nível constante utilizada na pesquisa. 62
Figura 37. Caixa de nível constante, indicando entrada, saída para os filtros e ladrão. 62
Figura 38. Tubulação vinda de caixa de nível constante e chegando a sistema de filtros, onde apresenta 6 saídas distintas para cada filtro. 63
Figura 39. Saída de tubulação de distribuição para filtro, com destaque para tê e registro de agulha. 63
Figura 40. Alturas e comprimentos de tubulações constituintes do sistema de filtração. 64
Figura 41. Reservatório para preparação de suspensão de coagulante, contendo misturador mecânico para homogeneização. 65
Figura 42. Bombas dosadoras utilizadas na pesquisa para dosagem de coagulante e alcalinizante à água de alimentação do sistema de filtros de fibra flexível. 67
Figura 43. Ponto de aplicação de coagulante, com destaque para os misturadores tubulares. 69
Figura 44. Pressurizador de ar utilizado para lavagem dos filtros. 74
Figura 45. Destaque para injeção de ar e aplicação de água de lavagem. 74
Figura 46. Rotâmetros utilizados para medição das vazões de ar (esquerda) e de água de lavagem (direita) aplicadas aos filtros de fibra flexível. 75
Figura 47. Diagrama de coagulação para remoção de cor por filtração da água de estudo, utilizando sulfato de alumínio como coagulante. 81
Figura 48. Diagrama de coagulação para remoção de turbidez por filtração da água de estudo, utilizando sulfato de alumínio como coagulante. 82
Figura 49. Solução resultante de procedimento para determinação da solubilidade das fibras de sisal em hidróxido de sódio. 84
Figura 50. Imagem de MEV de fibras de sisal sem tratamento, com aumento de 200 vezes. 86
Figura 51. Imagem de MEV de fibras de sisal sem tratamento, com aumento de 2000 vezes. 87
Figura 52. Imagem de MEV de fibras de sisal sem tratamento, com aumento de 5000 vezes. 87
Figura 53. Imagem de MEV de fibras de sisal após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumento de 200 vezes. 88
Figura 54. Imagem de MEV de fibras de sisal após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumento de 2000 vezes. 88
Figura 55. Imagem de MEV de fibras de sisal após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumento de 5000 vezes. 88
Figura 56. Imagem de MEV de fibras de sisal após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumento de 5000 vezes. 89
Figura 57. Imagem de MEV de fibras de sisal após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumento de 2000 vezes. 89
Figura 58. Imagem de MEV de fibras de sisal após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumento de 5000 vezes. 90
Figura 59. Imagem de MEV de fibras de polipropileno sem tratamento, com aumento de 200 vezes. 91

Figura 60. Imagem de MEV de fibras de polipropileno sem tratamento, com aumento de 2000 vezes..... 91
Figura 61. Imagem de MEV de fibras de polipropileno sem tratamento, com aumento de 5000 vezes..... 91
Figura 62. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumento de 200 vezes..... 92
Figura 63. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumento de 2000 vezes..... 92
Figura 64. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumento de 5000 vezes..... 92
Figura 65. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumento de 200 vezes..... 93
Figura 66. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumento de 2000 vezes..... 93
Figura 67.Imagem de MEV de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumento de 5000 vezes..... 93
Figura 68. Imagem de MEV de fibras de sisal após operação dos filtros, com aumento de 200 vezes..... 94
Figura 69. Imagem de MEV de fibras de sisal após operação dos filtros, com aumento de 2000 vezes..... 94
Figura 70. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após operação dos filtros, com aumento de 5000 vezes..... 95
Figura 71. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após operação dos filtros, com aumento de 200 vezes..... 96
Figura 72. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após operação dos filtros, com aumento de 2000 vezes..... 96
Figura 73. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após operação dos filtros, com aumento de 5000 vezes..... 96
Figura 74. Distribuição de frequência de diâmetros encontrados na amostra de fibras de sisal... 97
Figura 75. Fibras analisadas em microscópio óptico. Destaque para fibra de pequeno diâmetro, fibra de grande diâmetro, fibra com variação do diâmetro ao longo do comprimento e fibra com aberturas ou separação de fibras menores (da esquerda para a direita). 98
Figura 76. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de polipropileno, utilizando porosidade de leito de 92,47±0,90% e taxa de 20m/h..... 100
Figura 77. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de polipropileno, utilizando porosidade de leito de 92,47±0,90% e taxa de 20m/h..... 100
Figura 78. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 100 cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP100-93%), com taxa de 20m/h..... 102
Figura 79. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 60 cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP60-93%), com taxa de 20m/h..... 102
Figura 80. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 25cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP25-93%), com taxa de 20m/h..... 103

Figura 81. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de polipropileno, utilizando porosidade de leito de 92,47±0,90% e taxa de 40m/h. 104
Figura 82. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de polipropileno, utilizando porosidade de leito de 92,47±0,90% e taxa de 40m/h. 105
Figura 83. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 100cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP100-93%), com taxa de 40m/h. 106
Figura 84. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 60 cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP60-93%), com taxa de 40m/h. 107
Figura 85. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 25cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP25-93%), com taxa de 40m/h. 107
Figura 86. Variação da turbidez com o tempo para o filtro de 60cm de comprimento com leito de fibras de polipropileno, utilizando porosidade de leito de 92,47±0,90% e taxa de 80m/h. 109
Figura 87. Variação da cor com o tempo para o filtro de 60cm de comprimento com leito de fibras de polipropileno, utilizando porosidade de leito de 92,47±0,90% e taxa de 80m/h. 109
Figura 88. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 60 cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP60-93%), com taxa de 80m/h. 110
Figura 89. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 92,43±0,75%. e taxa de 20m/h. 112
Figura 90. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 92,43±0,75%. e taxa de 20m/h. 113
Figura 91. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do tempo de operação para 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) constituídos de fibras de sisal com porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 20m/h (ensaio 1). 114
Figura 92. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do tempo de operação para 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) constituídos de fibras de sisal com porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 20m/h (ensaio 2). 114
Figura 93. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 92,43±0,75%. e taxa de 10m/h. 116
Figura 94. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 92,43±0,75%. e taxa de 10m/h. 116
Figura 95. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do tempo de operação para 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) constituídos de fibras de sisal com porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 10m/h (ensaio 1). 117
Figura 96. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do tempo de operação para 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) constituídos de fibras de sisal com porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 10m/h (ensaio 2). 118

Figura 97. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 5m/h. 118
Figura 98. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 92,43±0,75%. e taxa de 5m/h. 119
Figura 99. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do tempo de operação para 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) constituídos de fibras de sisal com porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 5m/h (ensaio1). 119
Figura 100. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do tempo de operação para 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) constituídos de fibras de sisal com porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 5m/h (ensaio2). 120
Figura 101. Turbidez efluente referente ao filtro de sisal de comprimento 100cm, para as taxas de 20m/h, 10m/h e 5m/h. 121
Figura 102. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01%. e taxa de 20m/h. 122
Figura 103. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01%. e taxa de 20m/h. 122
Figura 104. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 100cm e 85% de porosidade (S100-85%). 123
Figura 105. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 60cm e 85% de porosidade (S60-85%) 125
Figura 106. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 25cm e 85% de porosidade (S25-85%) 126
Figura 107. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01%. e taxa de 40m/h. 130
Figura 108. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01%. e taxa de 40m/h. 130
Figura 109. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 100cm e 85% de porosidade (S100-85%), com taxa de 40m/h. 131
Figura 110. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 60cm e 85% de porosidade (S60-85%), com taxa de 40m/h. 132
Figura 111. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 25cm e 85% de porosidade (S25-85%), com taxa de 40m/h. 133
Figura 112. Variação da turbidez com o tempo para filtro de 100 cm de comprimento (S100-85%) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01% e taxa de 40m/h. 134

Figura 113. Variação da cor com o tempo para filtro de 100cm de comprimento (S100-85%) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01% e taxa de 40m/h. 134
Figura 114, Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 100cm e 85% de porosidade (S25-85%), com taxa de 80m/h. 135
Figura 115. Variação da turbidez com o tempo para os primeiros 60 cm de filtro de 100 cm de comprimento (S100-85%) e para filtro de 60cm de comprimento (s60-85%) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01%. e taxa de 20m/h. 136

Lista de Tabelas

Tabela 1. Vazões de solução de coagulante referente a cada filtro, segundo taxa de filtração estudada..... 68
Tabela 2. Parâmetros de qualidade da água de alimentação dos filtros de fibra flexível. 83
Tabela 3. Resultados dos ensaios de solubilidade das fibras de sisal e de polipropileno em ácido clorídrico e hidróxido de sódio. 84
Tabela 4. Valores médio, máximo, mínimo e desvio padrão do diâmetro das fibras de sisal analisadas em microscópio. 97
Tabela 5. Parâmetros e valores médios obtidos para os diferentes filtros estudados. 139
Tabela 6. Índice de funcionamento do filtro para os diferentes filtros estudados. 141
Tabela 7. Parâmetros e índice de filtrabilidade de Ives calculado para diferentes filtros investigados..... 142
Tabela 8. Resultados das análises de sólidos suspensos totais e do cálculo de sólidos totais retidos..... 144
Tabela 9. Parâmetros avaliados antes e após a lavagem do leito do filtro S100-85%..... 145
Tabela 10. Porcentagem de água de lavagem utilizada na operação do filtro S100-85%. 147
Tabela 11. Resultados obtidos com redução da vazão de água de lavagem. 147
Tabela 12. Porcentagem de água de lavagem com redução de sua vazão. 148
Tabela 13. Parâmetros avaliados antes e após a lavagem do leito do filtro PP100-93%..... 148
Tabela 14. Resultados obtidos com redução da vazão de água de lavagem. 149
Tabela 15. Porcentagem de água de lavagem com redução de sua vazão. 150
Tabela 16. Parâmetros avaliados antes e após a lavagem do leito do filtro PP60-93%..... 150
Tabela 17. Resultados com redução de vazão de água de lavagem..... 151
Tabela 18. Porcentagem de água de lavagem após redução da sua vazão..... 151
Tabela 19. Comparação de diâmetros das fibras de sisal e polipropileno e das superfícies de contato dos filtros com diferentes fibras e porosidades..... 153
Tabela 20. Comparação de superfícies de contato dos diferentes filtros..... 153
Tabela 21. Considerações sobre a utilização de fibras de sisal e de polipropileno em filtros de fibra flexível..... 155

Lista de Quadros

Quadro 1. Grade de ensaios realizados durante a pesquisa. 70
Quadro 2. Variáveis e frequência de amostragem. 72

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileiras de Normas Técnicas
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
PAC	Cloreto de polialumínio
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFSC	Instituto de Física de São Carlos
IQSC	Instituto de Química de São Carlos
LATAR	Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PSOM	Polisulfato orgânico de magnésio e alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
USP	Universidade de São Paulo

Lista de símbolos

g	aceleração da gravidade
$A_{cada\ fibra}$	área de seção transversal de 1 fibra
$A_{todas\ fibras}$	área de seção transversal de todas as fibras constituintes do leito
L	comprimento do leito
$C_{solução}$	concentração da solução de coagulante
C_{SR}	concentração de sólidos suspensos retidos no filtro
C_{SC}	concentração de sólidos suspensos existente na água coagulada
C_{SF}	concentração de sólidos suspensos existente na água filtrada
C_{SL}	concentração de sólidos suspensos existente na água de lavagem
σ	depósito específico
D	diâmetro de partícula constituinte do meio filtrante
d_m	diâmetro médio da fibra
d_{filtro}	diâmetro interno do filtro
$D_{coagulante}$	dosagem de coagulante adotada no experimento
t	duração da carreira de filtração ou tempo considerado
λ	eficiência de filtração
$E_L(\%)$	eficiência do processo de lavagem
PP25-93%	filtro constituído de polipropileno, com 25 cm de comprimento e porosidade de 93%
PP60-93%	filtro constituído de polipropileno, com 60 cm de comprimento e porosidade de 93%
PP100-93%	filtro constituído de polipropileno, com 100 cm de comprimento e porosidade de 93%
S25-93%	filtro constituído de sisal, com 25 cm de comprimento e porosidade de 93%
S60-93%	filtro constituído de sisal, com 60 cm de comprimento e porosidade de 93%
S100-93%	filtro constituído de sisal, com 100 cm de comprimento e porosidade de 93%
S25-85%	filtro constituído de sisal, com 25 cm de comprimento e porosidade de 85%
S60-85%	filtro constituído de sisal, com 60 cm de comprimento e porosidade de 85%
S100-85%	filtro constituído de sisal, com 100 cm de comprimento e porosidade de 85%

IFF	índice de funcionamento do filtro
IFI	índice de filtrabilidade de Ives
m_{s1}	massa da amostra seca de sisal antes da lavagem com ácido clorídrico
m_{s2}	massa da amostra seca de sisal após a lavagem com ácido clorídrico
m_{pp1}	massa da amostra seca de polipropileno após a lavagem com ácido clorídrico
m_{pp2}	massa da amostra seca de polipropileno após a lavagem com ácido clorídrico
P_{s1}	massa da amostra seca de sisal antes da lavagem com hidróxido de sódio
P_{s2}	massa da amostra seca de sisal após a lavagem com hidróxido de sódio
P_{pp1}	massa da amostra seca de polipropileno antes da lavagem com hidróxido de sódio
P_{pp2}	massa da amostra seca de polipropileno após a lavagem com hidróxido de sódio
$m_{inicial}$	massa de fibra antes do ensaio de solubilidade
m_{final}	massa de fibra após o ensaio de solubilidade
m_{SR}	massa de sólidos suspensos retidos no filtro
m_{SL}	massa de sólidos suspensos existentes na água de lavagem
n	número de fibras existentes no leito
H	perda de carga
H_0	perda de carga inicial
H_f	perda de carga no instante considerado
P(%)	perda, em porcentagem, de água no processo de lavagem
p	porosidade do leito
% solúvel	porcentagem em massa de fibra que foi perdida após o ensaio de solubilidade
s	superfície específica
$S_{cada\ fibra}$	superfície de contato de 1 fibra
S_{filtro}	superfície de contato existente em todo o filtro (leito de fibras)
T_{afl}	valor médio da turbidez do afluente
T_{efl}	valor médio da turbidez do efluente
$Q_{bomba\ dosadora}$	vazão ajustada na bomba dosadora
$Q\ filtro_n$	vazão de alimentação de cada um dos 6 filtros
Q	vazão de operação do filtro
V_{apr}	velocidade de aproximação ou taxa de filtração
γ	viscosidade cinemática

V_{fibras}	volume ocupado pelas fibras constituintes do leito
V_{filtro}	volume interno do filtro
V_{AL}	volume de água utilizado no processo de lavagem
V_{AF}	volume de água produzido durante a carreira de filtração

1. INTRODUÇÃO

A precariedade dos sistemas públicos de saneamento, a qual é materializada no frequente consumo de água contaminada por agentes infecciosos ou produtos químicos tóxicos – principalmente em países da América Latina, África e Ásia – ainda se configura em uma das principais causas das altas taxas de mortalidade nestes locais, segundo a Organização Mundial de Saúde (2004). Por conseguinte, a promoção de melhorias no acesso de água para consumo humano pode resultar em benefícios reais à saúde.

Estas melhorias nos sistemas de abastecimento de água não devem consistir, necessariamente, no emprego de processos e operações padronizados, cujos custos e tecnologia requeridos podem dificultar o acesso em locais menos desenvolvidos economicamente.

Em função das condições e dos recursos locais, bem como da qualidade da água bruta e da mão de obra disponível, podem ser buscadas alternativas mais acessíveis e compactas que o tratamento convencional – no qual devem constar as etapas de coagulação, floculação, sedimentação e filtração, além da desinfecção, que é imprescindível em qualquer alternativa adotada.

Ressalta-se que segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2011[1]), os piores índices de cobertura da rede geral de distribuição de água potável no Brasil estão nas regiões menos desenvolvidas (especialmente no Nordeste) e nos municípios de menor porte. Nestes locais a adoção de alternativas de menor custo, condizentes com as condições locais, possibilitaria o acesso da população à água potável. Consequentemente, o estudo de

[1] Disponível no site: ttp://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1998&id_pagina=1&titulo=Atlas-Saneamento-2011:-saneamento-basico-melhora-em-todas-as-regioes-do-pais,-mas-diferencas-ainda-existem Acesso em 15/06/2012.

alternativas ao tratamento convencional – tecnologias chamadas não-convencionais – tem fundamental importância no contexto atual de melhoria da cobertura de saneamento no país.

Como exemplos de alternativas que visam simplificar o processo de tratamento de água, eliminando etapas do ciclo completo, citam-se a filtração direta, a dupla filtração, a filtração lenta e a filtração em múltiplas etapas, as quais já foram largamente estudadas. Segundo Di Bernardo (2003) atualmente há cerca de 350 instalações de filtração direta ascendente no Brasil para tratamento de água destinada ao consumo humano, utilizadas principalmente para remoção de cor, turbidez e ferro.

Outras alternativas de simplificação e diminuição de custos dos sistemas de tratamento de água são sempre objetos de estudo de diversos pesquisadores. Um tipo de filtração recentemente desenvolvido, que permite a substituição dos processos convencionais de remoção de sólidos – como a floculação, a sedimentação e a filtração em areia – é o que se tem denominado filtração em filtro de fibra flexível.

Esta tecnologia foi primeiramente utilizada na Coréia do Sul em tratamento terciário de efluentes e na remoção de sólidos em efluentes industriais, sendo atualmente utilizada em diferentes projetos neste país, segundo publicação de Whittier Filtration[2]. Este tipo de filtro também pode ser utilizado no tratamento de água para reuso, na remoção de algas de rios e reservatórios e como alternativa para tratamento de água para abastecimento, quando associado à coagulação, em um tipo de filtração direta (LEE *et al.*, 2006).

O processo de filtração em filtro de fibra flexível é normalmente empregado utilizando como meio filtrante fibras de poliamida (náilon) de aproximadamente 30µm de diâmetro, o que permite a obtenção de altas eficiências de remoção de sólidos. A utilização de outros tipos de

[2] Disponível no site: http://www.whittierfiltration.com/whittierfiltration/ressources/files/1/24191,3FMBrochure-CURRENT.pdf

fibras neste tipo de filtro consiste em uma possível abordagem que analisa a versatilidade e adaptação da tecnologia, bem como aprofunda o entendimento dos processos e fatores de influência neste tipo de filtração.

A presente pesquisa analisou o emprego de fibras de sisal e de polipropileno em filtros de fibra flexível para sua utilização associada com a coagulação na clarificação de água para abastecimento. Com o desenvolvimento da pesquisa se pretendeu estudar o processo de filtração em filtro de fibra, tecnologia recente, inovadora e compacta e avaliá-la segundo o enfoque de utilização de materiais locais para possível redução de custos e incentivo do mercado interno.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste projeto foi avaliar o desempenho, na clarificação de água para abastecimento, de filtros concebidos de fibras flexíveis constituídas de sisal (fibra natural) e de polipropileno (fibra sintética).

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse projeto foram:

- Conceber, construir e operar instalação piloto de filtração em filtros com fibras flexíveis de sisal e de polipropileno, alimentados com água sintética simulando água bruta destinada ao abastecimento;
- Avaliar e comparar a influência do comprimento das fibras na eficiência de clarificação dos filtros de fibra flexível constituídos de sisal e de polipropileno;
- Avaliar e comparar a influência da porosidade do leito na eficiência de clarificação dos filtros de fibra flexível constituídos de sisal;
- Avaliar e comparar a influência da taxa de filtração na eficiência de clarificação dos filtros de fibra flexível constituídos de sisal e de polipropileno;
- Avaliar e comparar a influência do tipo de fibra (sisal ou polipropileno) na eficiência de clarificação dos filtros de fibra flexível;
- Avaliar e comparar a operação dos diferentes filtros estudados, segundo critérios de desempenho.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Filtração – considerações iniciais

A filtração é um processo de remoção de partículas e de microrganismos presentes em água quando esta escoa através de um meio filtrante. Trata-se de um processo final de remoção de partículas em uma estação de tratamento de água, o que faz com que seu funcionamento seja fundamental para o atendimento dos padrões de potabilidade exigidos e com que seu desempenho dependa diretamente da eficiência dos processos e operações anteriores (coagulação, floculação e sedimentação nos casos de ciclo completo e coagulação apenas no caso de filtração direta).

Segundo Arboleda (1973), o processo de filtração pode ocorrer de diferentes formas:

- com baixos ou altos valores de taxa de filtração, constituindo os filtros lentos (operados com taxas entre 7 e 14 $m^3.m^{-2}.d^{-1}$) e os filtros rápidos (operados com taxas de 120 a 360 $m^3.m^{-2}.d^{-1}$), respectivamente,
- em meios porosos (como pastas argilosas, papel de filtro) ou em meios granulares (como areia e antracita),
- com fluxo ascendente ou descendente, operados a pressão ou por gravidade.

3.2. Filtração com ação superficial e de profundidade

O processo de filtração pode ocorrer com retenção de impurezas apenas no início do meio filtrante – o que caracteriza a filtração com ação superficial – ou com retenção ao longo de todo o meio filtrante – o que caracteriza a filtração com ação de profundidade.

As Figuras 1 e 2 mostram as variações da perda de carga ao longo do comprimento do leito de dois filtros piloto estudados por Di Bernardo e Prezzoti (1991 *apud* DI BERNARDO e

DANTAS, 2005), o primeiro com ação superficial significativa e o segundo com ação de profundidade.

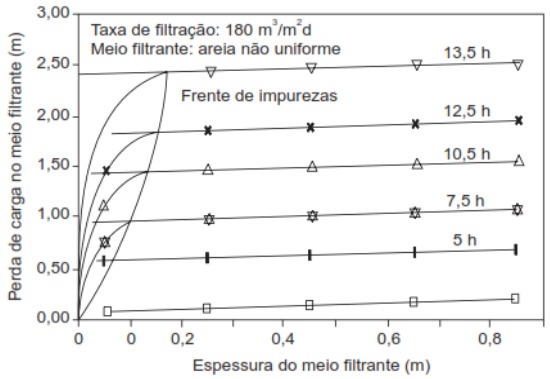

Figura 1. Variação da perda de carga ao longo do comprimento de filtro, para diferentes tempos de operação, para filtro com ação superficial significativa.

FONTE: DI BERNARDO e DANTAS, 2005.

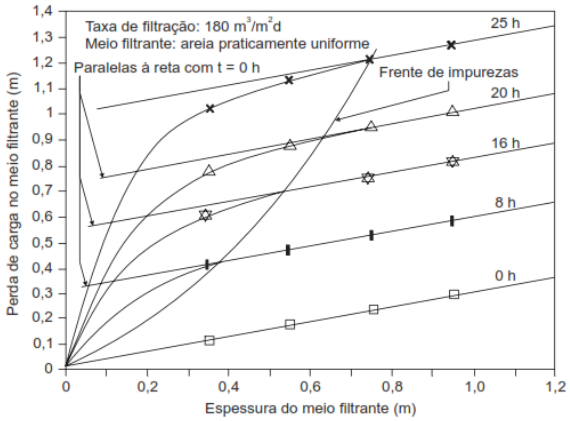

Figura 2. Variação da perda de carga ao longo do comprimento de filtro, para diferentes tempos de operação, para filtro com ação de profundidade.

FONTE: DI BERNARDO e DANTAS, 2005.

No primeiro caso, observa-se que a parte mais significativa da perda de carga, e portanto da retenção de impurezas, ocorreu no início da camada filtrante. Por outro lado, no segundo caso observa-se maior distribuição da perda de carga ao longo do comprimento, mostrando penetração das impurezas até aproximadamente 0,8 m. Neste último caso, observa-se o caminhamento das

impurezas através das camadas subsequentes, o que pode ser entendido como a ocorrência de uma sucessão de estágios relativos à colmatação das subcamadas que compõem o meio filtrante.

É conveniente que a filtração rápida ocorra com ação de profundidade, o que possibilita maior duração das carreiras de filtração e maior produção efetiva de água (ARBOLEDA, 1973).

3.3. Fatores que influem no processo de filtração

Dentre os fatores que influem no processo de filtração enumerados por Arboleda (1973), destacam-se os seguintes:

a. Tipo de meio filtrante

A forma do material filtrante tem importância não apenas pelo aspecto hidráulico (perda de carga inicial), mas também pela relação superfície e volume, uma vez que o processo de filtração tem relação direta com a superfície de contato do meio filtrante.

Por essa razão, a eficiência da filtração (λ) é assumida inversamente proporcional ao diâmetro (d) das partículas, da seguinte forma:

$$\lambda \propto \frac{1}{d^n}$$

em que n pode variar de 1 a 3 segundo diferentes autores estudados por Arboleda (1973).

Outros detalhes dos aspectos de importância relativos aos materiais filtrantes são dados no item 3.4.

b. Taxa de filtração

A taxa de filtração (v) é inversamente proporcional à eficiência de filtração (λ), assim:

$$\lambda \propto \frac{1}{v^n}$$

em que n pode variar de 0,7 a 1 segundo Arboleda (1973).

c. Tipo de suspensão

As características físicas e químicas da suspensão afetam notavelmente o desempenho dos filtros. Dentre as características físicas, destacam-se o volume, a densidade e o tamanho dos flocos, os quais influem na rapidez com que se aumenta a perda de carga nos filtros, uma vez que interferem no preenchimento dos poros do meio filtrante e na adesividade dos flocos.

Dentre as características químicas, destacam-se o pH e o potencial zeta, os quais interferem nas forças de atração ou repulsão entre as partículas da suspensão e do meio filtrante.

d. Temperatura

A temperatura interfere tanto nos mecanismos físicos como químicos da suspensão, influenciando na evolução da perda de carga ou na remoção dos flocos.

3.4. Características dos materiais filtrantes

Os meios filtrantes normalmente utilizados em sistemas de filtração são materiais granulares, para os quais são estudadas e monitoradas variáveis de importância para a execução de projetos. As principais variáveis são relativas à caracterização granulométrica, no entanto podem ser utilizadas como referência para melhor entendimento do processo de filtração, mesmo quando se utilizam materiais filtrantes diferentes dos granulares.

Alguns dos principais parâmetros avaliados para caracterização dos materiais filtrantes granulares citados por Di Bernardo e Dantas (2005) são enumerados a seguir.

a. Tamanho dos grãos, forma e geometria

Como já citado no item anterior (item 3.3), o diâmetro interfere na eficiência do processo de filtração. Por outro lado, a forma e geometria dos grãos exercem influência na perda de carga do meio filtrante, sendo que quanto mais irregular, melhor o desempenho na filtração e maior a perda de carga final.

b. Coeficiente de uniformidade

Este parâmetro é igual à relação entre os diâmetros D60 e D10 obtidos em curva de distribuição granulométrica dos materiais filtrantes. Os valores de D60 e D10 correspondem, respectivamente, aos diâmetros abaixo dos quais ficam 60 e 10% do solo, em massa. Em outras palavras, são as dimensões das peneiras que permitem a passagem de 60 e 10% do solo por suas aberturas, respectivamente. O coeficiente de uniformidade é um parâmetro de fundamental importância na avaliação da penetração de impurezas ao longo do meio filtrante, sendo que quanto menor o valor do coeficiente de uniformidade, mais uniforme será o material granular e consequentemente mais profunda resultará a penetração de impurezas e mais longa será a carreira de filtração.

c. Porosidade

Definida como a relação entre volume de vazios e volume total do meio filtrante,é um parâmetro importante na determinação da velocidade de água requerida para a lavagem do meio filtrante, da perda de carga no meio filtrante fixo e a capacidade do meio filtrante em reter impurezas.

d. Solubilidade em ácido clorídrico

Esta análise é utilizada para determinar as impurezas e compostos solúveis em ácido, presentes no material granular utilizado como meio filtrante, que podem ser liberados para a água. Assim, são estabelecidos limites de valores de solubilidade em ácido clorídrico com a finalidade de assegurar a ausência de quantidades substanciais de minerais prejudiciais ou outras substâncias liberadas pelo material filtrante em águas ácidas.

e. Solubilidade em hidróxido de sódio

Esta analise é utilizada para determinar a porcentagem mássica de compostos presentes no material filtrante solúveis em solução de hidróxido de sódio a 1%.

3.5. Perda de carga em colunas de filtração

Uma vez que os meios filtrantes atuam na clarificação de suspensões na medida em que estas fluem através deles, resulta que os poros do meio acumulam depósitos, o que causa diminuição da permeabilidade ou aumento da resistência ao fluxo.

O meio filtrante limpo oferece resistência ao fluxo, a qual pode ser prevista pela equação de Kozeny-Carman, apresentada abaixo. Esta equação foi utilizada por Ives e Pienvichitr (1965) no desenvolvimento teórico de modelos para previsão da perda de carga em filtros.

$$\frac{\partial H}{\partial L} = \frac{k.v.\gamma.s^2}{g.p^3}$$

em que H é a perda de carga, L é o comprimento do leito, v é a taxa de filtração, γ é a viscosidade cinemática, s é a superfície específica (superfície do meio por unidade de volume do leito), g é a aceleração da gravidade, p é a porosidade e k é um fator normalmente igual a 5.

Além desta equação apresentada, diversas outras foram desenvolvidas por diferentes autores para se calcular a perda de carga em meio granular. Independentemente da teoria utilizada, é interessante observar os fatores de influência na perda de carga em praticamente todas as equações: a taxa de filtração, a porosidade e, muitas vezes, a superfície de contato ou o diâmetro do grão.

Por outro lado, qualquer que seja a teoria utilizada para analisar a remoção de impurezas em um meio filtrante, sempre ocorre aumento da perda de carga com o decorrer da filtração, em função da retenção de impurezas e consequente ocupação de poros. De acordo com Ives e

Pienvichitr (1965) a perda de carga em meio granular pode ser expressa pela seguinte equação geral:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_0} = \frac{1}{(1 - m_1.\sigma)^{m_2}}$$

em que ΔP é a perda de carga em meio granular, ΔP_0 é a perda de carga inicial no meio granular, σ é o depósito específico (volume de sólidos depositados por volume do filtro) e m_1 e m_2 são coeficientes a serem determinados experimentalmente.

Pela equação, assim, quanto maior o depósito de partículas, maior será a perda de carga no final da carreira, em relação à perda de carga inicial.

3.6. Índices de filtrabilidade

A eficiência do processo de filtração depende de numerosos fatores, como já citados anteriormente, os quais englobam as características da suspensão, as características do meio filtrante e as características hidráulicas. Uma vez que existe dificuldade de se considerar todos os fatores que interferem no processo, diversos pesquisadores propuseram índices de filtrabilidade com a finalidade de avaliar o desempenho da filtração.

Gamet e Rademacher (1959 *apud* ARBOLEDA, 1973) propuseram o seguinte índice para avaliação do funcionamento do filtro (Índice de Funcionamento do Filtro ou IFF):

$$IFF = \frac{v\ x\ t}{\Delta P}$$

em que v é a taxa de filtração (m/h) , t é a duração da carreira de filtração (h) e ΔP é a perda de carga no final da carreira de filtração (mH_2O).

O inconveniente desde índice, segundo Arboleda (1973), está no fato de ele não considerar o valor da turbidez do efluente, o que leva a valores para esse índice praticamente

iguais nos casos em que o floco é fraco e a perda de carga é baixa, com finalização da carreira devido à deterioração da qualidade do efluente, e nos casos em que a qualidade do filtrado é elevada, mas a perda de carga final é alta.

Neste sentido, outro índice de interessante aplicação, que incorpora os valores médios de turbidez do efluente e do afluente, é o índice de filtrabilidade de Ives (1978 *apud* DI BERNARDO e DANTAS, 2005), definido por:

$$IFI = \frac{H_f T_{efl}}{T_{afl}.t.V_{apr}}$$

em que:

H_f: perda de carga no instante considerado (cm)

t: tempo considerado (min)

T_{afl} : valor médio da turbidez do afluente (uT)

T_{efl} : valor médio da turbidez do efluente (uT)

V_{apr} : velocidade de aproximação ou taxa de filtração (cm/min)

Diversos outros índices foram propostos por diferentes autores, no entanto sua aplicação não é de interesse a esta pesquisa, seja porque utilizam parâmetros comuns a meios granulares, seja pela necessidade de se conhecer o depósito especifico da suspensão no meio filtrante, o que torna sua utilização mais complexa.

3.7. Filtração em filtro de fibras flexíveis

A filtração em filtro de fibras flexíveis é uma tecnologia que vem sendo utilizada nos últimos 15 anos na Coréia do Sul, com especial aplicação em tratamento terciário de efluentes domésticos, após o tratamento convencional de lodos ativados (LEE *et al*., 2006).

O filtro de fibras flexíveis consiste em módulo de filtração preenchido por fibras de poliamida (náilon), as quais são empacotadas ao longo do seu comprimento, dispostas longitudinalmente e na mesma direção do fluxo. As fibras de poliamida possuem cerca de 30µm de diâmetro e são presas na parte inferior do filtro (entrada) e soltas na parte superior (saída). A Figura 3 mostra leito de fibras de poliamida, o qual é colocado no interior da unidade de filtração, e a Figura 4 mostra um módulo de filtração visto de fora.

Figura 3. Leito de fibras de poliamida utilizado em filtro de fibras flexíveis.
FONTE: MAUCHAUFFEE, 2010.

Neste tipo de filtro, o afluente é introduzido na parte inferior da unidade de filtração e percorre todo o comprimento do leito de fibras no sentido ascendente, o que permite a ocorrência da filtração em profundidade. A Figura 5 mostra esquema de funcionamento deste tipo de filtro, segundo forma como é comercializado pela Whittier Filtration[3].

[3] Disponível no site: http://www.whittierfiltration.com/whittierfiltration/ressources/files/1/24191,3FMBrochure-CURRENT.pdf Acesso em 25/02/2012.

Figura 4. Filtro de fibras flexíveis.

FONTE: MAUCHAUFFEE, 2010.

O tipo de leito utilizado no filtro de fibras flexíveis combina grandes superfícies específicas e altas porosidades (da ordem de 90%), o que leva a altas eficiências de remoção e baixas perdas de carga, apesar do emprego de altas taxas de filtração, segundo Lee *et al*. (2006).

De acordo com os mesmos autores, esta característica leva à possibilidade de se tratar afluentes com maiores valores de turbidez e produzir efluentes de qualidade satisfatória, como nos casos de tratamento terciário de esgotos, em que é possível produzir filtrados com turbidez inferior a 2 uT.

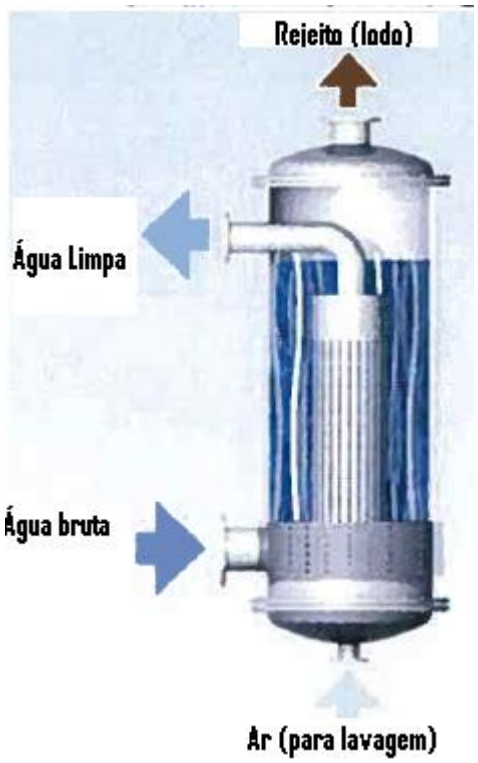

Figura 5. Esquema de funcionamento de filtro de fibra flexível.

FONTE: Catálogo da Whittier Filtration[3].

Segundo catálogo da Whittier filtration[3], as taxas de filtração utilizadas neste tipo de filtro são consideravelmente superiores às utilizadas em filtros rápidos de areia, chegando a ser 10 vezes maior no caso em que se utilizem taxas de 160 $m^3.m^{-2}.h^{-1}$. Dessa maneira, as áreas requeridas para instalação deste tipo de filtro são muito menores.

A Figura 6 mostra 8 módulos de filtros de fibras de 1600 mm de diâmetro e 3500 mm de altura, os quais são utilizados na indústria sul coreana Gwangyang Steel. Estes módulos operam à taxa de 3700 $m^3.m^{-2}.d^{-1}$ (ou aproximadamente 154 m/h) e possuem carreira de filtração de 3 horas, gerando efluente com teor de sólidos suspensos de 5 mg/L.

A Figura 7 mostra instalação utilizada na estação de tratamento de esgoto de Yangsan, a qual funciona com 54 módulos de filtros de fibra flexível de 900 mm de diâmetro e 2500 mm de

altura, e operam à taxa de 4000 $m^3.m^{-2}.d^{-1}$ (ou aproximadamente 165m/h) durante 3 horas de carreira, possibilitando a remoção de 12 mg/L de sólidos em suspensão.

Figura 6. Módulos de filtração utilizados na indústria Gwangyang Steel na Coréia do Sul.

FONTE: Whittier Filtration[3].

Figura 7. Módulos de filtração utilizados no tratamento terciário de esgotos na estação de Yangsan na Coréia do Sul.

FONTE: Whittier Filtration[3].

Os tipos de filtro comercializados pela Whittier Filtration, segundo seu catálogo[3], possuem diâmetro de 200 a 2000 mm, alturas de leito de 1500 a 3000 mm e são operados com bombas centrifugas submersíveis e sistemas automatizados. Nestes casos, as perdas de carga são da ordem de 0,2 a 0,6 kgf/cm² (cerca de 2 a 6 mH_2O). O comprimento e porosidade do leito são escolhidos de acordo com a qualidade do efluente requerida, bem como da qualidade do afluente. O período médio de duração do meio filtrante nestes filtros é superior a 5 anos, após os quais é necessária a trocas do leito.

3.7.1. Aplicação de filtro de fibra flexível na clarificação de águas superficiais

Apesar das altas eficiências encontradas no tratamento terciário de esgotos, o filtro de fibra teve sua eficiência de remoção de sólidos reduzida quando aplicado ao tratamento de águas superficiais de turbidez média e alta (LEE *et. al*., 2006). Com a finalidade de melhorar o desempenho dos filtros de fibra flexível no tratamento de água para abastecimento, os autores estudaram a adoção de coagulação *in-line* antes da filtração, em um tipo de filtração direta, o que substituiria as etapas de floculação, sedimentação e filtração em areia, convencionalmente utilizadas no tratamento de água para abastecimento.

O filtro utilizado pelos autores possuía diâmetro de 114 mm, altura de 1500 mm, leito composto de fibras de náilon de 30µm e porosidade de 93%. Para alimentação foi utilizada água do rio Nakdong sem pré-tratamento, cuja turbidez média variava de 8 a 11,5 uT. Foram estudadas as taxas de filtração de 80, 120 e 150 m/h e foram testados os coagulantes sulfato de alumínio, cloreto de polialumínio (PAC) e polisulfato orgânico de magnésio e alumínio (PSOM), nas dosagens de 0 a 20 mg/L.

Os melhores resultados foram encontrados para ensaios utilizando PAC, sendo que a dosagem de 1 mg/L resultou em eficiência de clarificação satisfatória associada a carreiras mais

longas. Isto mostrou que a dosagem de coagulante requerida em sistema de filtração em filtro de fibras flexíveis pode ser menor que aquela utilizada em plantas de tratamento convencional.

Por outro lado, o melhor desempenho foi encontrado para taxa de 120 m/h, com maior produção de filtrado dentro do limite de turbidez de 0,5 uT. A taxa de 150 m/h não levou à produção de efluente dentro do limite de 0,5 uT. As carreiras de filtração duraram cerca de 45 minutos quando aplicada taxa de 80 m/h e 35 minutos quando aplicada a taxa de 120 m/h, ambas utilizando 1 mg/L de PAC.

Os resultados encontrados por Lee *et al*. (2006) são promissores, uma vez que mostram a viabilidade de se utilizar filtro de fibras flexíveis na produção de água para abastecimento a partir de águas superficiais, utilizando dosagens de coagulante possivelmente menores e taxas de filtração muito maiores do que as comumente empregadas em estações de tratamento de água.

Em outro estudo, Lee *et al*. (2008a) estudaram a utilização de filtro de fibra flexível em escala piloto associado à coagulação *in-line* para substituir as etapas convencionais de floculação e sedimentação, os quais representam os processos com maiores tempos de residência em uma estação de tratamento de água. Tiveram como objetivo, assim, adequar o efluente do filtro de fibras à entrada de um filtro de areia convencional, para o qual a turbidez de entrada deveria estar em aproximadamente 1 uT.

Os autores estudaram filtro de diâmetro interno de 650 mm, altura de 1500 mm, porosidade de leito de 93% e fibras constituintes do leito de poliamida, de diâmetro de 30 μm. Para alimentação foi utilizada água do rio Nakdong, cuja turbidez variou entre 6,5 e 11,5 uT, e como coagulante foi utilizado o PAC. Foram estudadas as dosagens de 0 a 3 mg/L e as taxas de 60, 80 e 100 m/h.

Os melhores resultados foram obtidos para dosagem de 1mg/L, não tendo sido encontrada eficiência de clarificação satisfatória sem a adição de coagulantes. Em relação às

taxas estudadas, todas atenderam ao limite de turbidez estabelecido (1 uT), sendo que a taxa de 100 m/h levou a maior produtividade do filtro (2200 $m^3.m^{-2}.h^{-1}$), com duração de carreira de cerca de 50 minutos .

Dos resultados obtidos, os autores concluíram que o filtro de fibras pode ser utilizado na substituição das etapas de floculação e sedimentação, com a vantagem de ser mais compacto – com tempo de residência pelo menos 100 vezes menor – e de requerer dosagens de coagulante muito menores, o que leva à menor produção de lodo. Além disso, em comparação com efluente de etapas de floculação-sedimentação, o efluente do filtro de fibras flexíveis apresentou melhor qualidade.

3.7.2. Outros estudos envolvendo filtros de fibra flexível

Além dos envolvendo tratamento de águas superficiais para produção de água de abastecimento público, também são encontrados na literatura pesquisas que avaliam o desempenho do filtro de fibras flexíveis na remoção de partículas maiores que 5µm de água do mar (JEANMAIRE *et. al*, 2007), na remoção de algas de águas superficiais (CHA *et. al*, 2009) e no tratamento de águas pluviais (JOHIR *et.al*., 2009), todos apresentando resultados promissores.

Jeanmaire *et. al.* (2007) estudaram filtro de 200 mm de diâmetro, 1200 mm de altura e porosidade de 49%[4], visando sua aplicação na produção, a partir de água do mar com turbidez entre 0,5 e 5 uT, de água para injeção em poços offshore em plataformas de petróleo.

Os autores estudaram taxas de 50 a 200 m/h e a adição de diferentes dosagens dos coagulantes cloreto férrico e WAC HB (coagulante composto por clorosulfato básico de

[4] Neste estudo são apresentados os volumes das fibras (igual a 34 L) e do filtro como um todo (igual a70 L) utilizados na construção dos filtros. A porosidade foi obtida pela relação P = 1-(volume fibras/volume filtro).

alumínio). Objetivaram produzir efluente com turbidez menor que 0,1 uT e contendo poucas partículas maiores que 5µm.

Os resultados encontrados mostraram possibilidade de aplicação do filtro de fibra flexível para os objetivos propostos, sendo que para a taxas de 100 m/h e dosagem de 5 ppm de WAC HB ou de cloreto férrico foi encontrada remoção de 98% de partículas maiores que 5µm, a partir de água bruta com 1 uT, e foi produzida perda de carga final igual a 120 mbar (aproximadamente 1,22 mH_2O).

A qualidade da água bruta, no entanto, interferiu consideravelmente na qualidade do filtrado e na duração da carreira. Assim, foram necessárias diferentes dosagens de coagulantes para atendimento dos objetivos dependendo da turbidez de entrada, e a duração da carreira variou de 1 a 10 horas para turbidez de entrada na faixa de 0,5 e 5 uT, sempre com taxa de 100 m/h.

Por outro lado, Johir *et. al*. (2009) estudaram a aplicação de filtro de fibra como pré-tratamento de etapa de filtração em membranas (pós-tratamento) de águas pluviais. O filtro estudado possuía 1000 mm de altura, 30 mm de diâmetro interno, porosidades variáveis, correspondentes às densidades de empacotamento de 105, 115 e 125 kg/m³, e o leito era trocado a cada experimento.

Os autores avaliaram diferentes taxas de filtração (20, 40 e 60 m/h) e dosagens de cloreto férrico (5, 10 e 15 mg/L) e utilizaram para alimentação do filtro água proveniente de canal de águas pluviais em Sydney, Austrália, cujos valores de turbidez variavam entre 2,5 e 40 uT, de sólidos suspensos totais entre 24 e 35 mg/L e de cor verdadeira entre 29 e 270 PtCo.

Os resultados encontrados mostraram que as melhores eficiências de remoção ocorreram com o aumento da dosagem, diminuição da taxa de filtração e aumento da densidade de empacotamento (diminuição da porosidade). Assim, para a taxa de 20 m/h, dosagem de 15 mg/L

e densidade de empacotamento de 115 kg/m³, foi encontrada remoção de 95% da turbidez, 98% dos sólidos suspensos, 99% de cor e até 93% de coliformes, tendo sido verificada também alguma remoção de metais pesados.

Não tendo sido estabelecido limite de qualidade para o efluente, não foi avaliada a produtividade para diferentes taxas, mas sim a eficiência de remoção. As perdas de carga variaram de 1,7 a 3,9 kPa (0,17 a 0,39 mH_2O), de acordo com a porosidade do leito (densidades de empacotamento de 105, 115 e 125 kg/m³) e a taxa de filtração (20, 40 ou 60m/h).

3.7.3. Fatores que influenciam o desempenho do filtro de fibras flexíveis

Como mostram os estudos apresentados anteriormente (LEE *et.al*, 2006; JEANMAIRE *et. al*, 2007; LEE *et. al*, 2008a; JOHIR *et. al*, 2009), os principais fatores que interferem no desempenho do filtro de fibras flexíveis são a taxa de filtração, a porosidade do leito (ou densidade do empacotamento) e a dosagem de coagulante empregada. Em todos os casos estudados, no entanto, foi fixado o comprimento ou altura do filtro, não tendo sido avaliada a influência deste fator no desempenho do filtro.

Neste sentido, Lee *et al.* (2007) estudaram o comportamento do filtro de fibra variando comprimento de leito, porosidade de leito e taxa de filtração, e não avaliaram a aplicação de coagulantes. Neste caso utilizaram para alimentação do filtro água sintética, uma suspensão de argila (bentonita) de turbidez igual a 20 uT.

Com a finalidade de avaliar os fatores de influência no processo, assim, construíram 4 colunas verticais de filtração, todas com diâmetro interno de 30 mm e variando-se a altura do leito, em 400, 600, 800 e 1000 mm. Nestas colunas de filtração, avaliaram 3 diferentes porosidades, correspondentes às densidades de empacotamento de 50, 65 e 80 kg/m³, e aplicaram as taxas de 20,40 e 80 m/h.

Com base nos ensaios, os autores concluíram que o fator de maior importância no desempenho do filtro de fibras flexíveis era a taxa de filtração. Neste sentido, quanto maior a taxa de filtração, menor era a eficiência de remoção e maior a perda de carga. Foi verificado também que quanto maior a densidade de empacotamento (menor porosidade), maior era a remoção de partículas e mais rapidamente se dava a evolução da perda de carga. Este padrão de comportamento é similar ao encontrado em filtros granulares.

Por outro lado, alguma diferença foi verificada no comportamento do filtro de fibra em função do comprimento do leito, uma vez que se observou, segundo os autores, maior caminhamento da frente de impurezas que no caso dos filtros granulares. Isto significa que, ainda que a maior parte das partículas tenha sido retida na zona de entrada (primeiros 400 mm), ainda há retenção de partículas na parte superior (mais próxima à saída) do filtro. Este comportamento está relacionado com o processo de filtração em profundidade, que parece ser mais significativo nos filtros de fibra flexível que nos filtros granulares.

Dos estudos citados e descritos neste item, foram observadas similaridades de comportamento dos filtros de fibra com os filtros granulares. A vantagem da utilização dos filtros de fibra flexível estaria na possibilidade de se obter eficiências de remoção satisfatórias associadas a altas taxas de filtração.

Trata-se assim de uma tecnologia inovadora e eficiente, sendo interessante avaliar sua aplicabilidade em sistemas de tratamento de água visando eficiência de remoção e possivelmente baixos custos de implantação, operação e manutenção.

3.7.4. Carreiras de filtração e lavagem em filtro de fibra flexível

A interrupção de uma carreira de filtração – tempo entre o inicio da operação e a retirada do filtro para lavagem – pode ocorrer por dois motivos: transpasse da turbidez ou igualdade entre

a perda de carga total e a carga hidráulica disponível. Alcançado um dos dois limites, deve-se executar a lavagem ou troca do leito.

Lee *et al* (2006) observaram carreiras de filtração de 50 minutos quando empregaram taxas de filtração de 120 m/h em filtro de fibra flexível, utilizando como afluente água do rio Nakdong com adição de coagulantes. Após este período o limite de turbidez na saída do filtro foi alcançado (0,5 uT) e foi necessário realizar a lavagem.

Lee *et al*. (2008a) estudaram a influência da dosagem e da taxa na carreira de filtração, a qual foi determinada com base no limite de turbidez de 1 uT. Obtiveram condições ótimas para a dosagem de 1 mg/L de PAC e carreiras de filtração iguais a 100 e 180 minutos para as taxas de 80 e 60 m/h, respectivamente.

Jeanmaire *et al*. (2009) verificaram que a qualidade do afluente interferiu significativamente na duração da carreira. Em seus experimentos, a duração de carreira variou de 1 a 10 horas para afluentes com 0,5 a 5 uT.

Do exposto, verificou-se que as carreiras de filtração dos filtros de fibra são mais curtas do que nos convencionais filtros granulares. No entanto, os primeiros estão associados a maiores taxas de filtração, o que possivelmente leva à maior produção de água filtrada. Ainda, é importante ressaltar que a dosagem do coagulante utilizada tem fundamental importância na duração da carreira de filtração.

Em relação à lavagem (ou *backwashing*) dos filtros de fibra flexível, normalmente se utiliza injeção de ar e água em sequência, o que possibilita a recuperação da capacidade de retenção do filtro. É importante que este processo seja econômico, empregando apenas pequena porcentagem da água produzida pelo filtro.

Lee *et al*. (2008b) estudaram a adoção de fluxo de ar e água operados em sequência, e concluíram que a injeção de ar e o número de estágios da lavagem eram os fatores que mais

influenciavam a eficiência do processo. No caso estudado pelos autores, em que se empregou filtro de 650 mm de diâmetro e 1500 mm de comprimento e se utilizou como afluente água do rio Nakdong, com turbidez média de 9 uT, foi encontrada a condição ótima de lavagem de aplicação de 7 segundos de ar seguidos de 15 segundos de água, e repetindo esse processo 14 vezes. A carreira de filtração durou aproximadamente 160 minutos empregando taxa de filtração de 60m/h.

No caso estudado pelos autores, foi ressaltado que ainda que a frequência de lavagens seja maior no caso dos filtros de fibra flexível, a produtividade neste caso é alta, tendo sido utilizada apenas 3% da água produzida para o processo de lavagem. A eficiência do processo de lavagem foi avaliada segundo a recuperação de sólidos retidos, a avaliação da perda de carga inicial antes e após a lavagem e segundo reprodutibilidade da duração da carreira quando o filtro foi operado em sequência.

É importante ressaltar que as condições ótimas de operação da lavagem são específicas, variando com a configuração do filtro estudado e com a qualidade do afluente.

Como citado no inicio deste item, caso a lavagem do filtro não seja mais eficiente, será necessária a troca do leito. No caso dos filtros de fibra flexível, foi encontrado na literatura o intervalo de 5 anos entre trocas de leito, segundo catálogo da Whittier Filtration.

3.7.4.1. Amadurecimento do filtro de fibra flexível

Uma vez que a lavagem do leito é frequente em filtros de fibra flexível, seu período de amadurecimento passa a ganhar importância.

O período de amadurecimento (ripening) dos filtros consiste na primeira etapa da filtração, caracterizada pela água que inicialmente sai do filtro, frações remanescentes decorrentes da lavagem. Neste intervalo se verifica um pico de turbidez após o qual se observa

melhora continua da qualidade do efluente, até que seja iniciada a etapa intermediaria da filtração (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Segundo Lee et.al. (2006), o período de amadurecimento existe nos filtros de fibra flexível, assim como ocorre nos filtros de areia. Em termos absolutos, este período é mais curto nos filtros de fibra do que nos filtros de areia. No entanto, em termos relativos (comparando a duração desse período com o tempo de residência ou com a duração da carreira), o período de amadurecimento parece representar maior importância nos filtros de fibra flexível.

Ainda que não haja estudo especifico acerca do período de amadurecimento em filtros de fibra flexível, a análise dos dados apresentados por Lee *et al.* (2006) e Lee *et al*. (2007) mostram grande representatividade deste período. No caso dos estudos de Lee *et al*. (2007), o período de amadurecimento apresentou duração de cerca de 5 minutos em carreiras de filtração de 50 minutos, quando aplicada taxa de 100m/h, e de cerca de 10 minutos em carreiras de 180 minutos, quando aplicada taxa de 60m/h. Já no caso dos estudos de Lee *et al.* (2006), o período de amadurecimento pareceu ter duração pouco inferior a 10 minutos quando aplicadas taxas de 80 e 120m/h.

3.8. Adequação de tecnologia e utilização de materiais locais

Com vistas a viabilizar a adoção de tecnologias a diferentes condições, comumente se utiliza a terminologia ‘tecnologia apropriada’, a qual está associada, entre outros fatores, à utilização de materiais e produtos disponíveis no local – reduzindo a dependência de materiais externos e consequentemente reduzindo os custos – e à facilidade de operação, utilizando tecnologia acessível (MURPHY *et al.,* 2009).

Neste sentido é interessante considerar o potencial de aplicação de fibras naturais à tecnologia do filtro de fibra flexível, normalmente empregado com poliamida. Um potencial pela

qualidade e oferta da fibra no Brasil é o sisal, cujo cultivo ocupa extensa área de solos pobres na região semi-árida dos Estados da Bahia, Paraíba e Rio Grande do Norte, em regiões de escassa ou nenhuma alternativa para exploração de outras culturas (EMBRAPA ALGODÃO, 2006).

Assim, a utilização da fibra de sisal como meio filtrante no Brasil possuiria como vantagem a alta disponibilidade, o baixo custo e a possibilidade de geração de renda para o país. Além da possibilidade de utilização de fibras naturais, não se exclui a aplicabilidade de outras fibras sintéticas nos filtros de fibra. Como exemplo se cita o polipropileno, fibra cada vez mais utilizada mundialmente com diversas aplicações e baixo custo em comparação a outras fibras sintéticas.

A seguir é realizado maior detalhamento das fibras de sisal e de polipropileno, as quais possivelmente podem ser utilizadas na tecnologia de filtro de fibra flexível.

3.8.1. A fibra de sisal

O sisal, ou *Agave sisalana*, é uma planta pertencente à classe das monocotiledôneas da qual se extrai a principal fibra dura produzida no mundo. Trata-se de uma planta que prefere locais de altitude e possui elevada resistência à seca e ao estresse térmico, apresentando eficiência transpiratória e gastando muito pouca água para produzir fitomassa (EMBRAPA ALGODÃO, 2006). A Figura 8 mostra a planta do sisal.

Figura 8. A planta de sisal.

FONTE: EMBRAPA ALGODAO, 2006

Oriunda da região montanhosa mesoamericana, a planta chegou ao Brasil no século XX, tendo sido considerada alternativa econômica por volta da década de 40. Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial, com a exploração concentrada no semi-árido nordestino, geralmente em áreas de pequenos produtores e com condições climáticas pouco favoráveis para a exploração de outras culturas que ofereçam resultados econômicos satisfatórios. Assim, além de gerar emprego e renda nestas regiões, o sisal auxilia a fixar o homem no campo. Os estados produtores de sisal são a Bahia, Paraíba e Rio Grande do Norte, respectivamente responsáveis por 93,5%, 3,5% e 3% da produção nacional, totalizando em cerca de 110 municípios produtores (ANDRADE, 2006).

Nesses estados, mais de meio milhão de pessoas dependem desta cultura para a sua sobrevivência direta ou indiretamente, sendo que a produção rende cerca de 80 milhões de dólares em divisas para o Brasil (EMBRAPA ALGODÃO, 2006).

Da folha da planta de sisal se extrai fibra vegetal dura a qual é industrializada e convertida em fios, barbantes, cordas, tapetes, sacos, bolsas, chapéus e artesanato, e também pode ser utilizada na fabricação de pasta celulósica, empregada na confecção do papel Kraft e de outros tipos de papéis finos. Além dessas aplicações, a fibra de sisal pode ser empregada na

indústria automotiva, de móveis e eletrodomésticos, de geotêxteis, na mistura com polipropileno e na construção civil. A principal utilização da fibra do sisal, no entanto, é a fabricação de fios agrícolas (Twines, ilustrados na Figura 9), os quais são feitos de fio torcido, elaborado a partir de fibras de sisal paralelizadas que, necessariamente, devem ter uniformidade de comprimento para regularidade do seu diâmetro e melhor resistência (EMBRAPA ALGODÃO, 2006).

Figura 9. Fio agrícola (Baler Twine), principal produto das fibras de sisal.

FONTE: EMBRAPA ALGODAO, 2006.

Segundo a Andrade (2006), apesar de sua importância, o desempenho dessa cultura vem sofrendo, nos últimos anos, declínio na área plantada e na produtividade, estando os principais fatores responsáveis por este declínio ligados diretamente ao baixo valor pago pela fibra, à competição com os fios sintéticos, ao alto custo inicial de produção, à falta de máquinas modernas para a colheita, aos longos períodos de estiagem, às doenças e, sobretudo, ao fato de serem aproveitados apenas 3 a 4% do total da planta, referentes à porção da fibra, sem aproveitamento dos resíduos.

3.8.1.1. Características das fibras de sisal

As fibras vegetais, e consequentemente as fibras de sisal, são compostas de células individuais que, por sua vez, compõem-se de microfibrilas dispostas em camadas de diferentes espessuras e ângulos de orientação. As microfibrilas são ricas em celulose, polímero vegetal de cadeias longas, e estão aglomeradas por hemicelulose amorfa. A região central da fibra também pode conter uma cavidade central chamada lacuna. Em consequência da grande quantidade de

poros e cavidades existentes, as fibras vegetais apresentam considerável absorção de água (maior que 90%) e massa especifica aparente muito inferior à real (SAVASTANO JUNIOR, 2000).

Segundo Izquierdo (2011), as fibras de sisal apresentam significativa variação da seção transversal ao longo do comprimento, o que dificulta sua caracterização e padronização.

Em pesquisas desenvolvidas para utilização das fibras de sisal em elementos construtivos (SAVASTANO JUNIOR, 2000), foi verificada degradação das fibras em meios alcalinos, sendo que a intensidade do ataque, determinada pela mudança das características da fibra, depende do tipo de fibra e da solução alcalina. Neste caso a causa básica da degradação da fibra de sisal no interior das matrizes de cimento estaria associada à decomposição química da lignina e da hemicelulose pela água alcalina presente nos poros da matriz, quebrando as ligações entre as fibro-células e levando a uma perda de eficiência do reforço. O aumento da temperatura promove aceleração do processo de degradação.

3.8.1.2. Cadeia produtiva

O ciclo produtivo de uma planta de sisal dura, em media, 8 a 10 anos. Pode ser cultivada em consórcio com a pecuária, ou em plantio intercalar com milho, feijão, gergelim, mamona, algodão e outras culturas, constituindo alternativa capaz de proporcionar renda extra no período improdutivo.

Os itens a seguir descrevem as diferentes etapas do processo produtivo, com base nas publicações da Embrapa Algodão (2006) e de Andrade (2006). A Figura 10 mostra imagens de cultivo do sisal, isolado e em consórcio com outras culturas.

Figura 10. Cultivo de sisal isolado e em consórcio com mamona, feijão e milho.

FONTE: Revista Negócios e Cia.[5]

3.8.1.3. Colheita e transporte

A primeira etapa do processo de colheita de sisal consiste no corte periódico de determinado número de folhas da planta, com uso de instrumentos adequados, etapa ilustrada na Figura 11. No cultivo do sisal comum, o primeiro corte é realizado aos 36 meses. Neste primeiro corte, são colhidas de 50 a 60 folhas, das quais 30 a 40% são folhas curtas, impróprias para a cordoaria. Nas colheitas subsequentes, são retiradas cerca de 30 folhas por planta. A Figura 12 mostra folhas de sisal recém cortadas.

Figura 11. Colheita das folhas de sisal e planta após corte.

FONTE: Associação Comercial, Industrial e Agropecuária de Campo Formoso (ACIACF)[6].

[5] Disponível em http://revistanegociosecia.blogspot.com/2012/01/pesquisa-comprova-uso-do-sisal-como.html, acesso dia 20 de novembro de 2012.

Figura 12. Folhas de sisal recém cortadas.

FONTE: Associação Comercial, Industrial e Agropecuária de Campo Formoso (ACIACF)[6].

Na região sisaleira, após cortadas as folhas são transportadas para o local de desfibramento com auxilio de asininos e muares, sendo que cada animal transporta entre 130 e 180 kg, ou cerca de 200 folhas, em seu dorso.

Figura 13. Transporte das folhas e das fibras de sisal por jumentos.

FONTE: EMBRAPA ALGODAO, 2006.

3.8.1.4. Desfibramento

O desfibramento consiste na eliminação da polpa das fibras mediante a raspagem mecânica das folhas, através de rotores raspadores acionados com motor diesel.

[6] Disponível em http://www.aciacf.com.br/site/sisal/3.jpg, acesso dia 20 de novembro de 2012.

A principal desfibradora dos campos de sisal do nordeste brasileiro é a máquina denominada motor de agave ou maquina paraibana, que tem baixa capacidade operacional. Esta maquina desfibra em torno de 150 a 200 kg de fibra seca em um turno de 10 horas de trabalho, desperdiçando, em media, 20 a 30 % da fibra. Além disso, envolve um elevado número de pessoas para sua operacionalização, exige grandes esforços do operador e expõe os operadores a constantes riscos de acidentes.

Figura 14. Operadores de máquina para desfibramento da folha de sisal.

FONTE: ANDRADE, 2006.

3.8.1.5. Lavagem e secagem da fibra

Após o término da operação de desfibramento, a fibra obtida é transportada em carrinho de mão ou no dorso de animais, para tanques com água limpa, onde deverá ser imersa durante oito a doze horas. Isto é necessário para a eliminação dos resíduos da mucilagem péctica e da seiva clorofílica, que ficam aderidos à fibra de sisal.

Após a lavagem, as fibras deverão secar ao sol por 8 a 10 horas. Se este período for ultrapassado, os raios solares poderão depreciar a fibra, causando amarelecimento. A Figura 15 mostra fibras de sisal expostas ao sol para sua secagem.

Figura 15. Secagem das fibras de sisal.

FONTE: ANDRADE, 2006.

3.8.1.6. Seleção e classificação da fibra

Após o batimento, as fibras são classificadas e enfardadas para posterior comercialização. A classificação é feita de acordo com os padrões de classificação vigentes no Brasil, segundo Portarias do Ministério de Agricultura e Abastecimento, tendo como base a classe (comprimento) e o tipo (qualidade) da fibra.

A fibra beneficiada de sisal é classificada, segundo a Portaria n°. 71, de 16 de março de 1993 (BRASIL, 1987), quanto à classe em longa (comprimento acima de 0,90m), média (comprimento entre 0,71 e 0,90m) e curta (comprimento entre 0,60 e 0,70m), e quanto ao tipo em Tipo Superior, Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3. Os tipos de fibra diferem na coloração e maturação das fibras, na maciez, brilho e resistência, e possivelmente na existência de impurezas. Ressalta-se que a fibra utilizada para fabricação do Baler Twine (fio agrícola) é do tipo 3 (IZQUIERDO, 2011).

Figura 16. Fibras de sisal acondicionadas em fardos.

FONTE: ANDRADE, 2006.

Depois de classificadas e enfardadas, as fibras de sisal são comercializadas e seguem para as indústrias de fiação, para fabricação de fios, barbantes, tapetes, entre outros.

Figura 17. Beneficiamento da fibra.

FONTE: ANDRADE, 2006.

3.8.1.7. Novos usos e aproveitamento dos resíduos

Segundo a Embrapa Algodão (2006), o processo produtivo das fibras de sisal aproveita apenas 3 a 5% do peso das folhas da planta, sendo o restante, chamados de resíduos de desfibramento (15% de mucilagem ou polpa, 1% de bucha e 81% de suco ou seiva clorofilada) desperdiçado. No Brasil esses resíduos são na maioria das vezes abandonados no campo, sendo poucos os produtores que utilizam como adubo ou alimento para ruminantes.

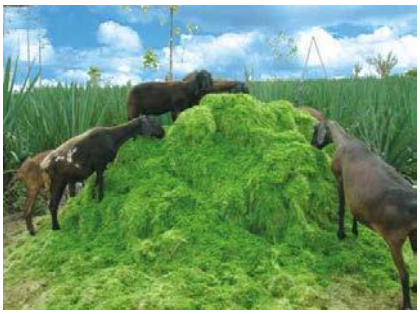

Figura 18. Ruminantes se alimentando espontaneamente dos resíduos da produção do sisal.

FONTE: Embrapa Algodão, 2006.

Recentemente diversas pesquisas foram desenvolvidas pela Embrapa e por universidades com o intuito de descobrir potenciais usos para os resíduos da produção de sisal. Dentre as descobertas de destaque, citam-se o uso do suco de sisal como fungicida, carrapaticida, bioinseticida e antioxidante para alimentos e cosméticos, bem como para fabricação de xampu anticaspa, dietéticos e cremes para candidíase, segundo Fraga (2012).

Além da utilização dos resíduos, novos usos estão sendo estudados para a fibra de sisal. Dentre eles destaca-se a fabricação de compósitos para utilização em revestimento interno de veículos, têxteis geológicos, filtros de ar, compósitos estruturais, produtos moldados, embalagens, etc. Se destacam também as pesquisas realizadas no Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo (IQSC/USP), em que foram fabricados materiais compósitos a partir de mistura de fibras de sisal e PET reciclado. No mesmo instituto também são conduzidas pesquisas que visam à utilização de sisal na fabricação de biocombustíveis.

Também na Universidade de São Paulo foram desenvolvidos estudos que comprovam a viabilidade de utilização das fibras de sisal em blocos de concreto e nas construções de baixo custo (SAVASTANO JÚNIOR, 2000; IZQUIERDO, 2011).

3.8.1.8. Problemas ambientais da produção do sisal

Em publicação feita em 2006 pelo Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial da Republica da Colômbia, intitulada *Guia ambiental del subsector fiquero*, foi relatada contaminação decorrente da lavagem do sisal (fique ou cabuya, como é conhecido nos países de língua espanhola) em corpos d'água. Esta contaminação é devida as propriedades físico-químicas do suco liberado pela fibra de sisal, o qual é rico em açúcares (principalmente glicose, sacarose e frutose), proteínas, esteroides e minerais que são extremamente tóxicos para os peixes e organismos aquáticos.

Segundo a publicação citada, bioensaios realizados com o suco de sisal estabeleceram que a concentração letal média deste para peixes era de 1mg/L, o que caracteriza este suco como mais toxico que alguns fungicidas e herbicidas.

Ainda, foi observado que quando se colocam as fibras de sisal inicialmente em corrente de água, há liberação de tinta verde com espuma e um forte cheiro de celulose. Os valores de DBO a montante e jusante do ponto de lavagem variaram de 17,8 para 180 mg/L e de DQO de 171 para 537 mg/L. Estas análises mostram que, além de a lavagem das fibras de sisal ser contaminante para os corpos d'água, o aporte de compostos é majoritariamente inorgânico, não biodegradável .

Com base nas informações apresentadas pela citada publicação, é imprescindível que se realizem ensaios visando a identificação e quantificação das substancias liberadas pelas fibras de sisal, após estas terem sido lavadas, secas e beneficiadas, ou seja, da forma como é comercializada. Possivelmente há alterações no potencial contaminante das fibras já secas, no entanto há necessidade de se avaliar os riscos de sua utilização como material filtrante.

3.8.2. A fibra de polipropileno

Segundo publicação do BNDES[7], desde a sua introdução em 1954, o polipropileno se tornou uma das mais importantes resinas termoplásticas da atualidade, continuando ainda como a resina de maior crescimento. No Brasil, o polipropileno se colocou no segundo termoplástico mais consumido em 1995, à frente inclusive do PVC.

De acordo com publicação do Brasil Global Net[8], a despeito do aumento da produção doméstica, o Brasil é tradicional importador de polipropileno. Segundo dados do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), no período de 1995 a 2005 as importações brasileiras do produto evoluíram de US$ 48 milhões para US$ 65,1 milhões, registrando ponto máximo em 2005.

O polipropileno (PP) é um termoplástico obtido através da polimerização do gás propeno (ou propileno) utilizando catalisadores, altas temperaturas e pressões. A fonte predominante para a produção do propeno é o craqueamento da nafta, uma vez que o gás natural não apresenta vantagem competitiva. Sua forma molecular é $(C_3H_6)_x$.

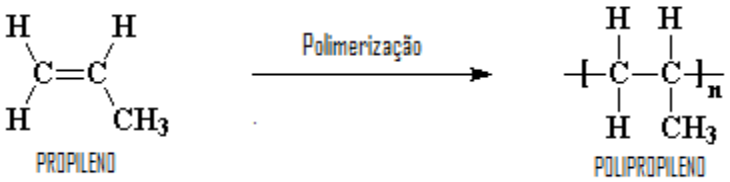

Figura 19. Estrutura do monômero propileno e do polímero, polipropileno.

[7] Disponível no site: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/polipr2a.pdf Acesso em 10 de janeiro de 2012

[8] Disponivel no site: http://www.brasilglobalnet.gov.br/ARQUIVOS/PSCI/PSCIColombiaPolipropileno.pdf Acesso em 10 de janeiro de 2012

Trata-se de um polímero quimicamente inerte, com alta flexibilidade, durabilidade, estabilidade dimensional e resistência a raios ultravioleta e a agentes químicos, a ácidos e bases, o que o torna aplicável em locais expostos à intempérie. Pode ser utilizado em sua forma de fibra, cujo diâmetro pode ser tão fino quanto 10µm, dependendo do processo de fabricação. A fibra de polipropileno é fácil de ser processada e possui menor custo em comparação com outras fibras sintéticas[9].

Mais da metade do polipropileno produzido no mundo industrializado é destinado à produção de automóveis, utensílios domésticos e carpetes. Porém, existem segmentos com altas taxas de crescimento no consumo de polipropileno, como embalagens, fios não tecidos, filmes industriais, construção civil. Além disso, é um produto que pode ser reciclado.

3.8.3. Experiência da utilização de mantas não tecidas constituídas de polipropileno e de sisal aplicadas ä filtração lenta

Javier Fernández et.al. (2000), do Instituto Cinara da Universidad del Valle, estudaram o uso de mantas não tecidas sintéticas e naturais aplicadas ä filtração lenta em areia, dentre elas mantas constituídas de polipropileno e de sisal (neste ultimo caso, dois tipos diferentes de mantas não tecidas foram avaliadas, o eco musgo e a felpa).

Os estudos mostraram melhoria da qualidade do filtrado com a utilização de mantas, sendo que os melhores valores de cor verdadeira, turbidez e coliformes fecais foram obtidos para os filtros utilizando mantas não tecidas naturais (constituídas de sisal).

Por outro lado, os estudos mostraram que não houve aumento da carreira de filtração com a utilização de mantas constituídas de sisal, o que foi observado com a utilização de mantas

[9] Informações retiradas do site http://web.utk.edu/~mse/Textiles/Olefin%20fibers.htm, acessado em 15 de janeiro de 2013.

sintéticas. Isto foi associado a possível degradação da manta e ao acúmulo dos resíduos da degeneração na areia do filtro, o que aceleraria sua obstrução. As mantas constituídas de polipropileno possibilitaram o aumento das carreiras de filtração em um fator de 1,33 e 1,72 para mantas com menor e maior porosidade, respectivamente.

Em relação às mantas naturais foi ressaltado no estudo que o nível de degeneração após o término da carreira de filtração foi tal que impossibilitou sua recuperação para uso posterior. Os autores ainda indicam que pode haver diferença na velocidade de degradação de materiais constituídos de mesma fibra, dependendo de aspectos como densidade. Neste sentido, sugerem que fibras podem degradar mais rapidamente que mantas.

Com base no exposto, os autores afirmam que mantas não tecidas constituídas de fibras naturais como o sisal tem aplicabilidade limitada devido a sua alta degradabilidade, no entanto não descartam seu uso uma vez que este gerou filtrado com melhor qualidade em parâmetros como cor e turbidez. As mantas constituídas de polipropileno, por outro lado, não apresentaram problemas com degradação, porém a qualidade do filtrado foi inferior a dos filtros utilizando mantas de sisal.

3.9. Padrões de potabilidade: Portaria 518/2004 e Portaria 2914/2011

A Portaria 2914, de 12 de dezembro de 2011, dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade para o Brasil. Anteriormente a esta portaria, era vigente a Portaria 518/2004 no país, a qual possuía padrões de potabilidade menos restritivos.

É de interesse considerar nesta pesquisa os padrões estabelecidos para turbidez na saída de filtros rápidos, seja associados a tratamento convencional, seja empregados como filtração direta. Segundo a Portaria anterior, 518/2004, eram exigidos filtrados com valor máximo de

turbidez igual a 1,0 uT. A nova Portaria 2914/2011, por outro lado, estabelece o limite de 0,5 uT na saída dos filtros, valor que deve ser alcançado gradualmente em um período de até 4 anos após a publicação da Portaria.

Neste sentido, os sistemas de tratamento de água brasileiros devem gradativamente, até 2015, se adequar aos novos e mais restritivos padrões de potabilidade.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Considerações iniciais

Para desenvolvimento desta pesquisa foram utilizadas as instalações do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR) e o Setor de Instalações Piloto vinculadas ao grupo de estudo do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SHS/EESC/USP).

O presente trabalho foi dividido em quatro etapas. Na etapa I foi realizada a caracterização das fibras a serem utilizadas como materiais filtrantes nos filtros de fibra. Nesta etapa foram realizados ensaios de solubilidade das fibras de sisal e de polipropileno em ácido clorídrico e em hidróxido de sódio e foi realizada microscopia óptica e eletrônica de varredura das mesmas fibras. Para a realização das análises de microscopia eletrônica de varredura foi utilizado o Laboratório de Microscopia Eletrônica do Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo (IFSC/USP).

Na etapa II foram realizados ensaios em equipamento de Jarteste, em escala de laboratório, com a finalidade de se obter os parâmetros de coagulação da água sintética (pH e dosagem de coagulante).

Na etapa III foram conduzidos os ensaios de filtração no sistema de filtros de fibra construído, com a finalidade de avaliar a eficiência de clarificação da água obtida em cada caso, variando-se tipo de fibra utilizada como material filtrante, comprimento de leito, porosidade de leito e taxa de filtração. Foi utilizado o par pH e dosagem de coagulante obtido na etapa II.

Finalmente, na etapa IV foi avaliado o processo de lavagem dos filtros operados na etapa III, com aplicação de ar e água em sequência, variando-se número de estágios, tempo de aplicação de ar e vazão de água aplicada.

4.2. Água de estudo

O trabalho foi desenvolvido utilizando-se para alimentação do sistema de filtros de fibra flexível água sintética, produzida por meio da adição de 15g de ácido húmico comercial (Aldrich 675-2) e 127,5g de Kaolin (Fluka 60609) a 15m³ de água proveniente de poço existente no campus 1 da USP São Carlos, resultando em solução de 1,0mg/L de ácido húmico e 8,5mg/L de caolinita. A adição destes produtos químicos teve a finalidade de conferir cor aparente e turbidez à água de estudo, respectivamente. Também foram adicionados 150g de carbonato de sódio (barrilha) à água de estudo (15m³) para controle e ajuste do pH.

Nestas condições de preparo da água sintética, foram obtidos os parâmetros de qualidade apresentados no item 5.2. Água sintética com características semelhantes à água estudada já foi objeto de diversas pesquisas no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas – LATAR (ARAUJO, 2010; MAIA, 2010).

4.3. Etapa I: Caracterização das fibras de sisal e polipropileno

A caracterização das fibras de sisal e de polipropileno foi realizada segundo avaliação de diâmetro e análise da superfície de contato com auxílio de imagens de microscopia óptica e de microscopia eletrônica de varredura e segundo análise de solubilidade em ácido clorídrico e hidróxido de sódio. As análises realizadas tiveram como referência os parâmetros de importância dos materiais filtrantes, conforme discutido no item 3.4.

4.3.1. Análise de solubilidade em ácido clorídrico e em hidróxido de sódio

A análise de solubilidade em ácido clorídrico e em hidróxido de sódio é normalmente realizada para avaliação de materiais filtrantes, com a finalidade de se verificar a possível liberação de substâncias na água a ser filtrada, conforme foi detalhado no item 3.4. Neste estudo

foi utilizada como referência para realização destes ensaios a norma ABNT NBR 14234/1998.

Esta norma, intitulada *Produtos químicos para tratamento de água de abastecimento – Carvão antracitoso – Especificação e Métodos de Ensaio*, fixa condições e exigências existentes para fornecimento e utilização de carvão antracitoso no tratamento de água para abastecimento. Dentre os requisitos e critérios apresentados na norma, foram utilizados neste estudo os requisitos químicos de solubilidade em ácido clorídrico e em hidróxido de sódio, que a norma fixa em menor que 5% e 2%, respectivamente, para o carvão antracitoso.

Uma vez que as fibras de sisal e de polipropileno são materiais muito menos densos que o carvão antracitoso, foi necessário reduzir as massas analisadas neste estudo. Os demais procedimentos e limites estabelecidos foram iguais aos citados na referida norma.

4.3.1.1. Método para determinação de solubilidade em ácido clorídrico

O método utilizado visa determinar os solúveis em ácido clorídrico, quando o material filtrante é imerso em volume conhecido de solução de ácido clorídrico.

A solução de ácido clorídrico utilizada neste ensaio foi obtida pela adição de 500 mL de ácido clorídrico concentrado em 500 mL de água destilada (solução 1:1).

Primeiramente, foram pesados separadamente, em balança analítica, cerca de 50g de sisal e 50g de polipropileno. Cada uma das amostras foi então lavada com água destilada em peneira de abertura 500µm por aproximadamente 3 minutos. As amostras foram então secadas em estufa a 110±5°C durante 3 horas e resfriadas em dessecador a temperatura ambiente.

Posteriormente foram pesados cerca de 30g da amostra de sisal (m_{s1}) e 30g da amostra de polipropileno (m_{pp1}), separadamente, e os valores foram anotados. Estas massas foram transferidas quantitativamente para dois béqueres secos e limpos de 1000 mL. A cada um dos béqueres foram adicionados 320 mL de solução de ácido clorídrico 1:1 (preparada conforme

descrito anteriormente).

As soluções contendo as fibras imersas foram deixadas em repouso, com movimentos ocasionais, durante 30 minutos. Após este tempo as soluções foram descartadas em local apropriado atentando para que não houvesse perda de massa.

As fibras de sisal e de polipropileno foram então lavadas, separadamente, com água destilada por meio de decantação (lavagem realizada em batelada) até que o pH da água atingisse aproximadamente 7,0.

Finalmente as fibras foram secadas em estufa a 110±5°C durante 3 horas, resfriadas em dessecador a temperatura ambiente e novamente pesadas (m_{s2} para sisal e m_{pp2} para polipropileno).

Desta maneira a solubilidade em ácido clorídrico, em porcentagem de massa, foi obtida por meio dos seguintes cálculos:

$$\% \text{ Solubilidade sisal} = \frac{m_{s1} - m_{s2}}{m_{s1}} \times 100$$

$$\% \text{ Solubilidade polipropileno} = \frac{m_{pp1} - m_{pp2}}{m_{pp1}} \times 100$$

em que:

m_{s1} é a massa da amostra seca de sisal antes da lavagem com ácido clorídrico, em gramas;

m_{s2} é a massa da amostra seca de sisal após a lavagem com ácido clorídrico, em gramas;

m_{pp1} é a massa da amostra seca de polipropileno antes da lavagem com ácido clorídrico, em gramas;

m_{pp2} é a massa da amostra seca de polipropileno após a lavagem com ácido clorídrico, em gramas.

4.3.1.2. Método para determinação de solubilidade em hidróxido de sódio

O método utilizado visa determinar os solúveis em hidróxido de sódio, quando o material

filtrante é imerso em volume conhecido de solução de hidróxido de sódio.

O reagente necessário para execução deste ensaio é a solução de hidróxido de sódio a 1%, preparada pela dissolução de 10g de hidróxido de sódio (NaOH) em água destilada, transferindo-a para um balão volumétrico de 1000 mL e avolumando-a com água destilada.

Primeiramente, foram pesados separadamente, em balança analítica, cerca de 50g de sisal e 50g de polipropileno. Cada uma das amostras foi então lavada com água destilada em peneira de abertura 500µm por aproximadamente 3 minutos. As amostras foram então secadas em estufa a 110±5°C durante 3 horas e resfriadas em dessecador a temperatura ambiente.

Posteriormente foram pesados cerca de 30g da amostra de sisal (P_{s1}) e 30g da amostra de polipropileno (P_{pp1}), separadamente. Estas massas foram transferidas quantitativamente para dois béqueres secos e limpos de 1000 mL. A cada um dos béqueres foram adicionados 500 mL de solução de hidróxido de sódio a 1% (preparada conforme descrito anteriormente).

As soluções contendo as fibras imersas foram deixadas em repouso por 24 horas em temperatura ambiente. Após este tempo as soluções foram descartadas em local apropriado atentando para que não houvesse perda de massa.

Figura 20. Fibras de sisal imersas em solução de hidróxido de sódio.

As fibras de sisal e polipropileno foram então lavadas, separadamente, com água destilada por meio de decantação até que o pH da água atingisse aproximadamente 7,0.

Finalmente as fibras foram secadas em estufa a 110±5°C durante 3 horas, resfriadas em dessecador a temperatura ambiente e novamente pesadas (P_{s2} para sisal e P_{pp2} para polipropileno).

Figura 21. Fibras de sisal após serem secas em estufa a 110±5°C durante 3 horas.

Desta maneira a solubilidade em hidróxido de sódio, em porcentagem de massa, foi obtida por meio dos seguintes cálculos:

$$\% \text{ Solubilidade sisal} = \frac{P_{s1} - P_{s2}}{P_{s1}} \times 100$$

$$\% \text{ Solubilidade polipropileno} = \frac{P_{pp1} - P_{pp2}}{P_{pp1}} \times 100$$

em que:

P_{s1} é a massa da amostra seca de sisal antes da lavagem com hidróxido de sódio, em gramas;

P_{s2} é a massa da amostra seca de sisal após a lavagem com hidróxido de sódio, em gramas;

P_{pp1} é a massa da amostra seca de polipropileno antes da lavagem com hidróxido de sódio, em gramas;

P_{pp2} é a massa da amostra seca de polipropileno após a lavagem com hidróxido de sódio, em gramas.

4.3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo (IFSC/USP).

Anteriormente às análises, as fibras de sisal e de polipropileno foram secas em estufa a aproximadamente 100°C por 24 horas. As amostras foram então preparadas sobre suporte metálico e foi feita a deposição de camada de ouro, segundo metodologia estabelecida para este tipo de análise.

Foram realizadas micrografias para as fibras de sisal e de polipropileno em 4 situações: a)sem qualquer tratamento, antes da operação como meio filtrante; b)sem qualquer tratamento, após sua operação por aproximadamente 3 meses como meio filtrante; c) após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, e d)após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio.

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada com a finalidade de se caracterizar a superfície das fibras de sisal e de polipropileno, em diferentes condições.

4.3.3. Microscopia Óptica

As análises de microscopia óptica foram realizadas nas instalações do LATAR, no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Estas análises foram realizadas para avaliação estatística do diâmetro das fibras de sisal, as quais possuem grande variação de diâmetros. Não foram feitas para as fibras de polipropileno, as quais são uniformes e não possuem variação do diâmetro.

Foram observadas em microscópio 100 fibras de sisal diferentes e, com auxílio de régua acoplada, foi determinado o diâmetro de cada uma. Estes valores foram utilizados para cálculo de diâmetro médio e desvio padrão das fibras de sisal utilizadas neste estudo.

Ressalta-se que para garantir a aleatoriedade das fibras observadas em microscópio, foram primeiramente cortados pedaços de aproximadamente 1 cm da fibra de sisal, os quais foram misturados para composição de amostra (aproximadamente 30 g). Esta amostra foi então homogeneizada e reduzida segundo o método do quarteamento, que possui metodologia estabelecida.

Neste procedimento, a amostra foi homogeneizada, disposta em forma de cone e dividida em quatro partes; foram escolhidas 2 partes opostas (uma sim, outra não) para composição de nova amostra, e as partes restantes foram descartadas. Este procedimento foi repetido 3 vezes, e a amostra obtida foi então utilizada para extração das 100 fibras de sisal analisadas em microscópio.

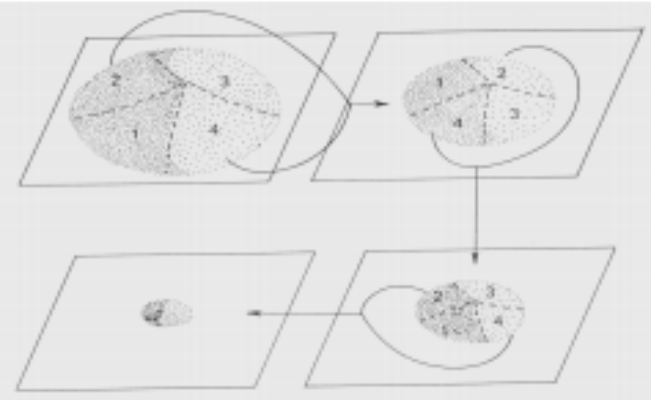

Figura 22. Esquema de método de quarteamento, utilizado para redução da amostra de fibras de sisal.

4.3.4. Cálculo e comparação das superfícies de contato nos diferentes filtros construídos

Por meio da análise das imagens de microscopia eletrônica de varredura e de microscopia óptica foi possível calcular o diâmetro médio (d_m) das fibras de sisal e de polipropileno. Com este dado, foram realizados cálculo e comparação das superfícies de contato nos diferentes filtros estudados, de sisal ou de polipropileno.

Para tanto, primeiramente foi calculada a área da seção transversal ($A_{cada\ fibra}$) e a superfície de contato ($S_{cada\ fibra}$) de cada fibra isolada, tendo como base o diâmetro analisado nas micrografias e supondo fibra de 1 metro de comprimento, correspondente ao maior comprimento de leito estudado:

$$A_{cada\ fibra} = \frac{\pi {d_m}^2}{4}$$

$$S_{cada\ fibra} = \pi d_m$$

Em seguida, tendo como base a porosidade de cada um dos filtros construídos, foi possível calcular o número de fibras existentes em cada caso:

$$A_{todas\ fibras} = (1 - p).\frac{\pi {d_{filtro}}^2}{4}$$

$$n = \frac{A_{todas\ fibras}}{A_{cada\ fibra}}$$

em que $A_{todas\ fibras}$ é a área de seção transversal ocupada por todas as fibras constituintes do leito, p é a porosidade do leito, d_{filtro} é o diâmetro interno o filtro estudado e n é o número de fibras existentes no leito

O diâmetro do filtro construído, d_{filtro}, é igual a 28 mm em todos os casos, como descrito posteriormente. Com base nestes cálculos prévios, foi possível estimar a superfície de contato existente em cada filtro estudado (constituído de fibras de sisal ou de polipropileno, com diferentes porosidades e comprimento de leito igual a 1 metro):

$$S_{filtro} = n.S_{cada\ fibra}$$

Esta estimativa permitiu melhor análise e interpretação dos resultados, possibilitando estabelecer comparação das superfícies de contato dos filtros construídos com fibras de sisal e de polipropileno, com diferentes porosidades.

4.4.Etapa II: Obtenção dos parâmetros de coagulação da água sintética

A fim de determinar o par dosagem de coagulante e pH de coagulação adequados para a filtração direta no sistema de filtros de fibra utilizado nesta pesquisa, foram realizados ensaios utilizando a água de estudo – produzida segundo descrição apresentada no item 4.2. – em equipamento Jarteste, em escala de laboratório, com monitoramento da remoção de cor e de turbidez da água de estudo por filtração e do pH de coagulação.

O equipamento Jarteste é composto por 6 jarros e 6 pás que promovem a mistura das soluções com os produtos químicos. A rotação das pás pode ser ajustada segundo curva apresentada no próprio equipamento, possibilitando ajuste para mistura rápida ou lenta (coagulação ou floculação). Este aparelho permite que sejam aplicadas diferentes dosagens de coagulante ou de alcalinizante nos diferentes jarros. A Figura 23 mostra o equipamento utilizado.

Figura 23. Equipamento Jarteste utilizado para obtenção dos parâmetros de coagulação da água de estudo.

Neste estudo, para cada batelada de ensaio era aplicada mesma dosagem de coagulante nos 6 frascos e variada a quantidade de acidificante ou alcalinizante adicionada em cada frasco. Terminada uma batelada de ensaios, novo ensaio era conduzido, com aplicação de outra dosagem de coagulante, a qual deveria ser igual nos 6 frascos, e variação da aplicação de

acidificante ou alcalinizante. O coagulante utilizado foi o sulfato de alumínio PA da marca VETEC, e as dosagens foram variadas de 5,0mg/L até 50mg/L, de 5 em 5 mg/L, resultando na execução de 10 bateladas de ensaios. Para variação do pH de coagulação foram utilizados barrilha ou ácido sulfúrico (ambos com concentração igual a 20g/L), proporcionando varredura de valores de pH entre 5,5 e 7,0.

A temperatura medida durante o experimento foi igual a 24°C. Para realização dos ensaios foram mantidos fixos os parâmetros gradiente médio de velocidade (900 s^{-1}) e tempo de mistura rápida (20 s). Finalizada a mistura rápida, efetuou-se a filtração de cada amostra em filtro Whattman 40, conforme metodologia estabelecida para este tipo de ensaio.

Para cada ensaio realizado, foram coletadas amostras de água filtrada dos 6 diferentes frascos e analisados pH de coagulação, turbidez e absorbância em comprimento de onda de 495 nm. Por meio destes resultados, foi possível avaliar as eficiências de remoção de cor (por meio da leitura de absorbância e ajuste de curva, a qual é apresentada no item 4.5.3) e de turbidez para cada dosagem de coagulante e pH de coagulação. Finalmente, foi possível construir diagrama de coagulação visando a obtenção do par dosagem de coagulante e pH de coagulação ótimo para a água de estudo, o qual foi utilizado na etapa posterior de filtração em filtros de fibra (etapa III).

4.5. Etapa III: Avaliação da eficiência de clarificação do processo de filtração em filtros de fibra flexível constituídos de sisal e de polipropileno

4.5.1. Instalação piloto

As instalações utilizadas nesta etapa foram divididas em sistema de filtros de fibra flexível – composto por 6 filtros de diferentes comprimentos, 3 constituídos de sisal e 3 de polipropileno – , sistema de preparo e armazenamento da água de estudo e sistema de preparo e dosagem de coagulante e alcalinizante.

Resumidamente, a água de estudo foi preparada em reservatório e bombeada até caixa de nível constante (sistema de preparo e armazenamento da água de estudo), de onde saiu por gravidade em tubulação de PVC, seguindo até ponto de aplicação de coagulante, após o qual há misturador rápido tubular capaz de promover coagulação da água (sistema de preparo e dosagem de coagulante). Finalmente, a água coagulada seguiu até sistema de filtros de fibra, onde a vazão foi dividida para operação dos 6 filtros de estudo (sistema de filtros de fibra flexível).

Tendo em vista esta configuração geral, é realizado detalhamento de cada sistema nos itens a seguir.

4.5.1.1. Sistema de filtros de fibra flexível

O sistema de filtros de fibra flexível em escala piloto estudado nesta pesquisa é constituído de 6 filtros de coluna vertical e fluxo ascendente em paralelo. Cada filtro foi construído com tubulação de PVC de 28 mm de diâmetro interno, em cujo interior foi colocado feixe de fibras de sisal ou de polipropileno.

Dos 6 filtros estudados, 3 foram construídos utilizando como material filtrante o polipropileno, correspondendo aos comprimentos de leito de 25, 60 e 100 cm, e 3 foram construídos utilizando como material filtrante o sisal, similarmente para os comprimentos de leito de 25, 60 e 100 cm.

Figura 24. Três comprimentos de leito utilizados nos filtros de sisal – 25, 60 e 100 cm.

Para os filtros com fibras de sisal foram avaliados dois valores de porosidade de leito fibroso: 93% e 85%. No caso dos filtros com fibras de polipropilenos somente foi avaliada a porosidade de leito de 93%.

A estimativa da porosidade do leito foi feita pela observação do volume deslocado pelas fibras constituintes do leito em proveta contendo água. Assim, possuindo o volume ocupado pelas fibras e sabendo o volume de cada filtro (todos possuem diâmetro interno de 28 mm, diferindo no comprimento, como anteriormente descrito) foi possível calcular a porosidade do leito para os diferentes filtros construídos:

$$p = 1 - \frac{Vfibras}{Vfiltro}$$

em que p é a porosidade do leito, $Vfibras$ é o volume ocupado pelas fibras constituintes do leito e $Vfiltro$ é o volume interno do filtro.

Para fixação das fibras no interior de cada tubulação foi utilizada base perfurada, construída com tela de aço galvanizada, como ilustra a Figura 25. Cada feixe de fibras foi passado por um furo da tela, dobrado e novamente passado por outro furo, o que permitiu a fixação das fibras na tela. Esta estrutura contendo as fibras fixadas foi encaixada na parte inferior das tubulações de PVC (vide Figura 26), possibilitando que as fibras ficassem dispostas longitudinalmente, paralelas ao eixo vertical do filtro.

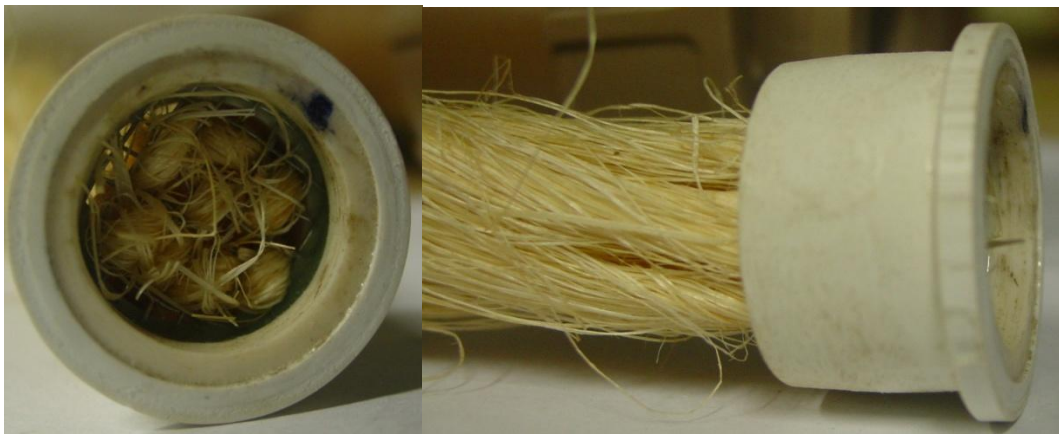

Figura 25. Estrutura para fixação das fibras vista de baixo e de lado, contendo fibras de sisal já fixadas.

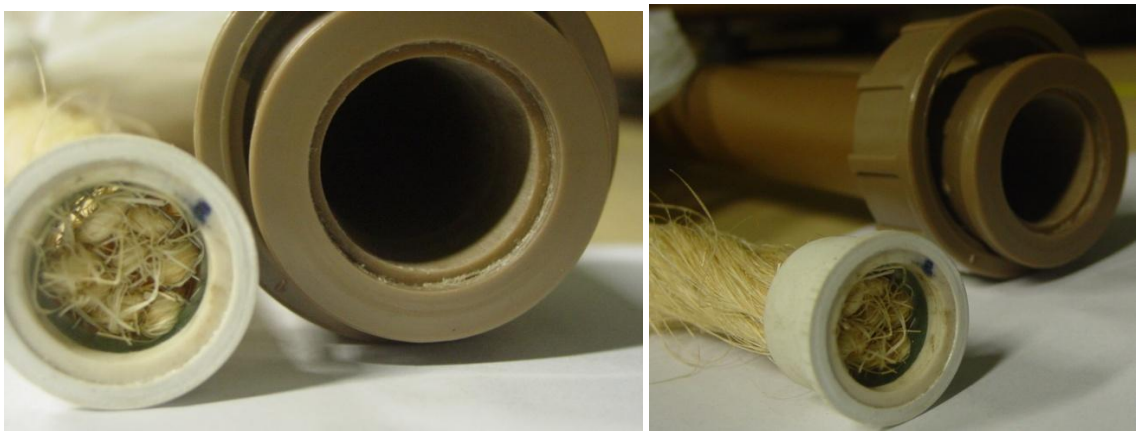

Figura 26. Destaque para encaixe da estrutura para fixação das fibras nas tubulações de PVC – vista da parte inferior da coluna de filtração.

Uma vez fixados os feixes de fibra na estrutura ilustrada na Figura 25, estes foram desenrolados e abertos, e posteriormente cortados nos diferentes comprimentos estudados. A Figura 27 mostra corda de sisal em rolo, como foi comprada para esta pesquisa, e após ter sido desenrolada e aberta na estrutura para fixação nos filtros. Similarmente, a Figura 28 mostra corda de polipropileno trançada, como foi comprada, e após ter sido desenrolada e aberta na estrutura para fixação.

Figura 27. Rolo de corda de sisal e fibras de sisal abertas e fixas em estrutura para fixação das fibras.

Figura 28. Corda de polipropileno e fibras de polipropileno abertas e fixadas em estrutura para fixação das fibras.

Com a finalidade de proporcionar distribuição de ar no momento da lavagem dos filtros foi construída estrutura perfurada contendo mangueiras encaixadas de aproximadamente 1,5cm de comprimento, como ilustra a Figura 29. Esta estrutura foi colocada na parte inferior da tubulação, logo após a entrada, e anteriormente à estrutura para fixação das fibras como mostra a Figura 30.

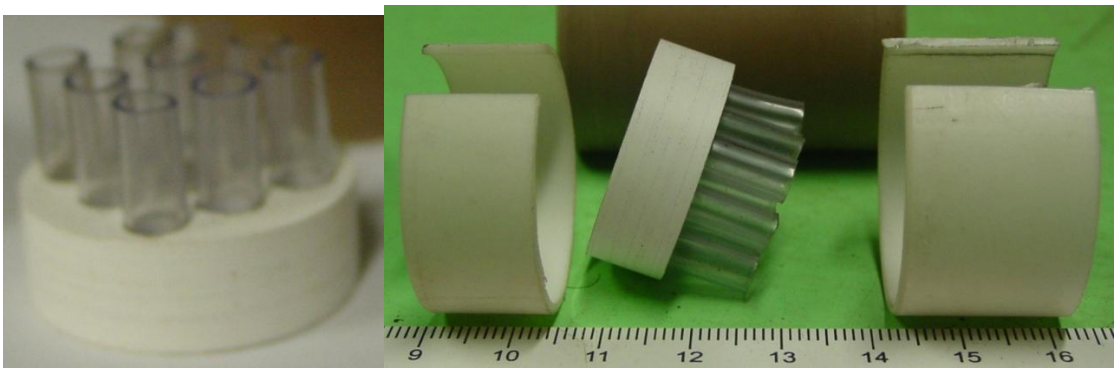

Figura 29. Estrutura para distribuição de ar no interior dos filtros. À direita se observam pedaços de cano de PVC utilizados para manter distanciamento desta estrutura com a entrada do filtro (antes) e com a estrutura para fixação das fibras (depois).

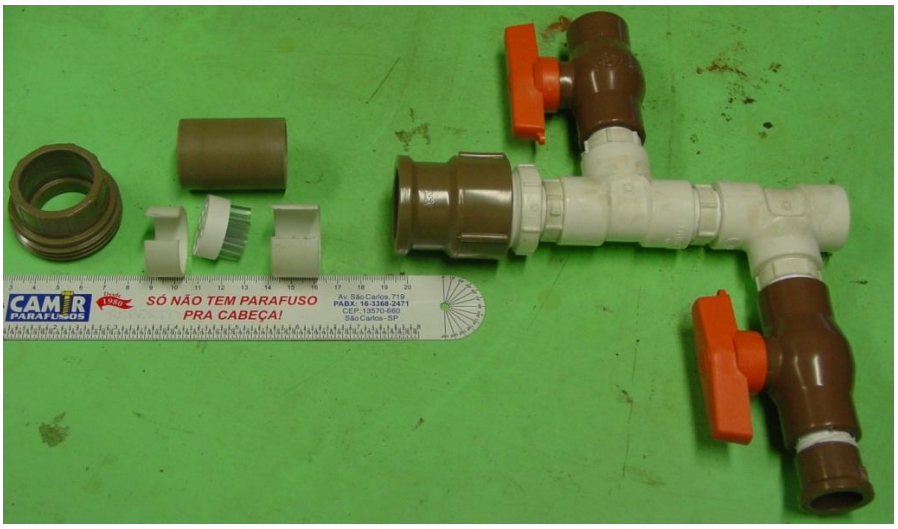

Figura 30. Destaque da localização da estrutura de distribuição de ar na coluna de filtração, logo após a entrada.

O controle de fluxo de água de alimentação e de água e ar para lavagem foi realizado por meio de subdivisões e registros instalados na entrada e na saída dos filtros. Para operação de cada filtro, foram abertos os registros de água de alimentação e água filtrada e fechados os registros de água e ar para lavagem.

Similarmente, na ocasião da lavagem, foram fechados os registros de água de alimentação e água filtrada e abertos, *alternadamente*, os registros de ar pressurizado e de água de lavagem,

segundo sistema descrito no item 4.6.

A Figura 31 mostra configuração de filtro utilizado no experimento, construído com tubulação de PVC e preenchido com fibras de sisal ou de polipropileno, como anteriormente descrito. Ressaltam-se as indicações de entrada e saída de água e ar e a localização das estruturas para fixação das fibras e para distribuição de ar.

Como ilustra a Figura 31, foram instaladas ao longo do comprimento de cada filtro 4 tomadas de pressão igualmente espaçadas, conectadas a piezômetro. Assim, para os filtros de 100 cm de comprimento foram instaladas tomadas logo antes da entrada do filtro (0 cm), a 33 cm, 66 cm e 99 cm; para os filtros de 60 cm foram instaladas tomadas na entrada (0 cm), a 20 cm, 40 cm e 60 cm, e para os filtros de 25 cm foram instaladas tomadas na entrada (0 cm), a 8 cm, 16 cm e 24 cm. Estas tomadas foram instaladas com a finalidade de acompanhar a perda de carga em cada trecho dos diferentes filtros, o que permitiu avaliação do caminhamento da frente de impurezas em cada caso.

Com o intuito de evitar correntes preferenciais, foi aplicada camada de areia (fixada com cola de PVC) nas paredes internas das colunas de filtração, como ilustra a Figura 32. Ainda assim, não se pode afirmar que não existiram caminhos preferenciais nos filtros, uma vez que isto não foi estudado e controlado em profundidade.

A Figura 33 mostra sistema de 6 filtros estudados nesta pesquisa.

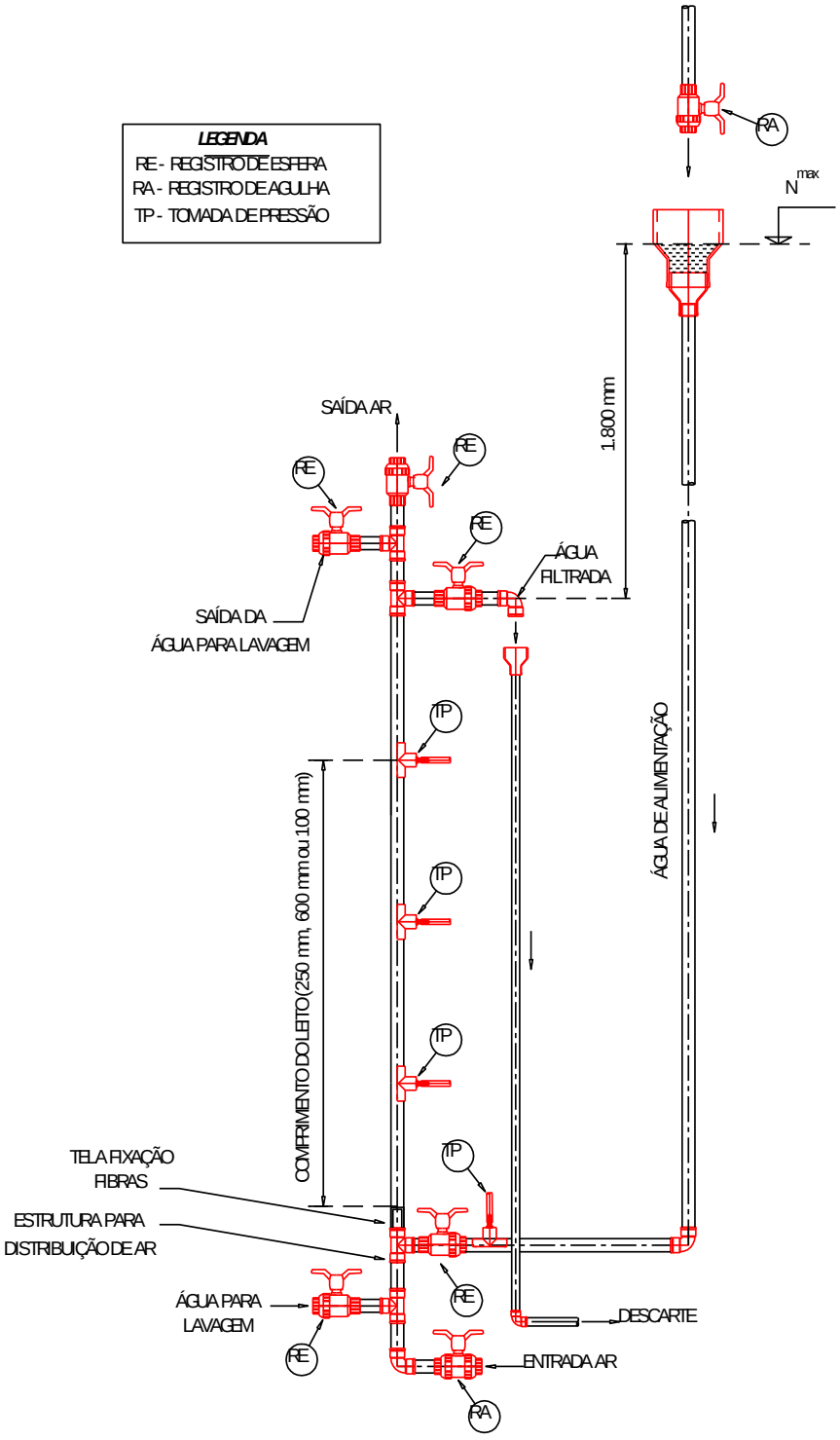

Figura 31. Configuração de filtro de fibras utilizado nesta pesquisa.

Figura 32. Destaque para parede interna das colunas de filtração (tubulações de PVC), na qual foi aplicada camada de areia.

Figura 33. Sistema de 6 filtros construídos nesta pesquisa.

4.5.1.2. Sistema de preparo e armazenamento da água de estudo

Primeiramente, foi necessário, para início do experimento, captar água do poço artesiano localizado no campus 1 da USP/São Carlos, a qual foi bombeada até reservatório de 15m³ existente nas instalações do LATAR. Neste reservatório foram adicionados os produtos químicos de interesse, os quais foram detalhados previamente (item 4.2.), e foi realizada a agitação e homogeneização de tais produtos, por meio de agitadores contínuos existentes no interior do reservatório.

Figura 34. Reservatório de 15m³ utilizado para armazenamento e produção da água sintética e aquecedor a gás utilizado para aquecimento da água do reservatório.

Foi realizado ajuste de temperatura no reservatório por meio de aquecedor a gás instalado em circuito com o mesmo (Figura 34), o qual foi responsável por aquecer a água de estudo e mantê-la a 25±1°C. O monitoramento da temperatura da água foi realizado por meio de coleta de amostras da água coagulada a cada 15 minutos, e sua leitura foi feita com auxílio de um termômetro.

O controle e ajuste da temperatura visaram manter as mesmas condições dos ensaios realizados em laboratório em equipamento Jarteste, para os quais foi obtido o par dosagem de coagulante e pH de coagulação ótimo para a água de estudo, à temperatura de aproximadamente 24°C.

A água preparada no reservatório, e previamente aquecida para manutenção da temperatura a 25±1°C durante todo o experimento, foi bombeada até caixa de nível constante instalada a aproximadamente 3 metros de altura, a qual tem a finalidade de eliminar as interferências devidas à carga hidráulica do reservatório, evitar a entrada de ar pela tubulação e promover a devida carga para funcionamento dos filtros. Ressalta-se que a carga hidráulica disponibilizada para os filtros foi igual a 1,8 metros.

Figura 35. Bomba localizada na saída do reservatório, responsável por recalcar a água de estudo até caixa de nível.

Uma vez recalcada até caixa de nível constante, a água de alimentação seguia por gravidade até a entrada no sistema de filtros de fibras, em tubulação de 1 polegada. Para distribuição desta tubulação aos 6 diferentes filtros construídos, foram instaladas 6 saídas diferentes por meio de tês colocados ao longo do comprimento desta tubulação, como mostra a Figura 38.

Figura 36. Caixa de nível constante utilizada na pesquisa.

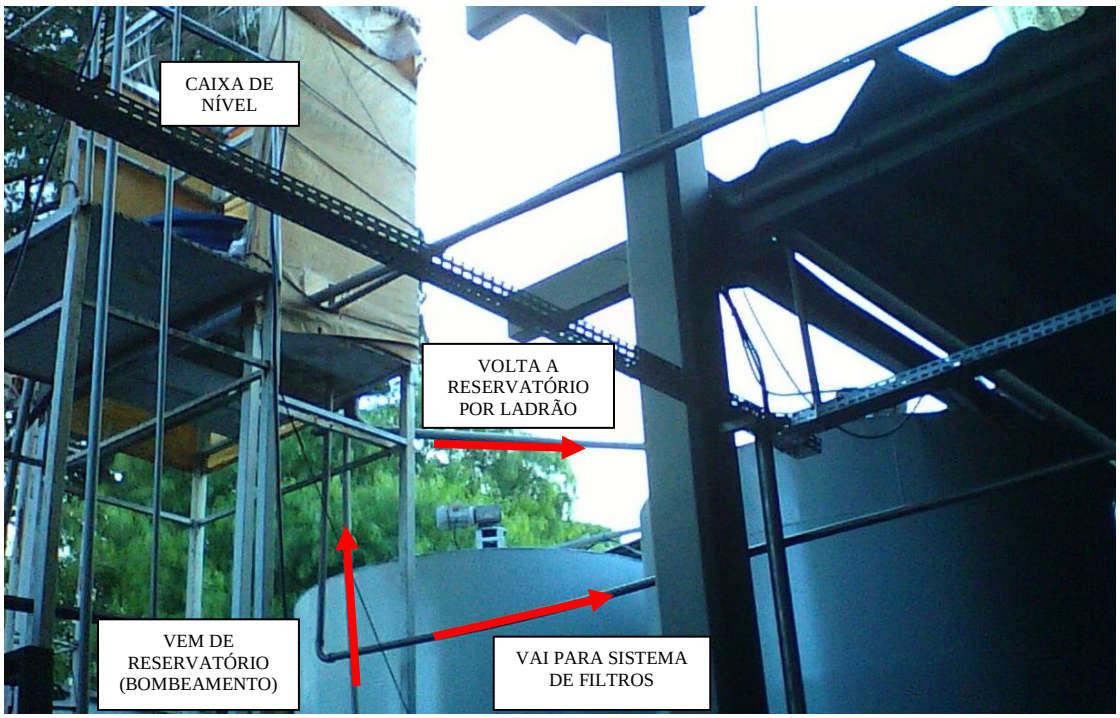

Figura 37. Caixa de nível constante, indicando entrada, saída para os filtros e ladrão.

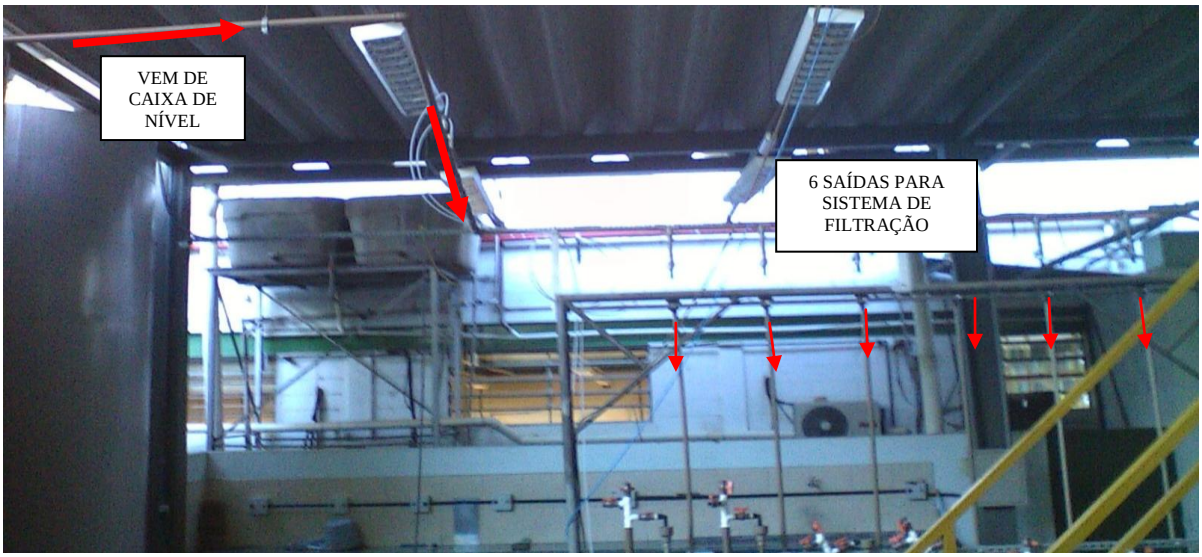

Figura 38. Tubulação vinda de caixa de nível constante e chegando a sistema de filtros, onde apresenta 6 saídas distintas para cada filtro.

Por meio de registros de agulha instalados nas 6 diferentes saídas, foi possível realizar ajuste de vazão para as diferentes taxas de filtração estudadas nesta pesquisa. A Figura 38 mostra registro colocado na saída destinada à alimentação de um dos filtros estudados.

Figura 39. Saída de tubulação de distribuição para filtro, com destaque para tê e registro de agulha.

Dos registros de agulha, a água de alimentação caía em tubulação vertical de ½ polegada e altura tal que proporcionasse carga hidráulica mínima de 1,8 metros para o funcionamento dos

filtros, os quais possuem diferentes comprimentos. A Figura 40 ilustra os comprimentos utilizados, mostrando que a altura total da tubulação vertical foi igual ao comprimento de cada filtro somado à altura mínima de 1,8 metros, a qual foi deixada para proporcionar carga hidráulica para o filtro.

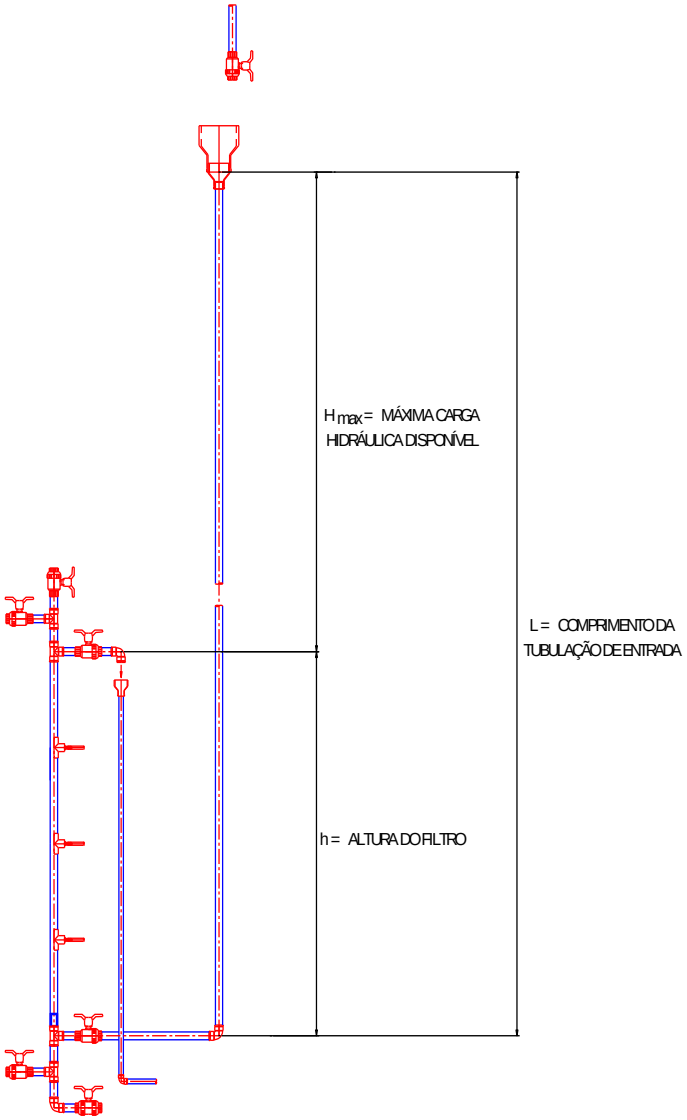

Figura 40. Alturas e comprimentos de tubulações constituintes do sistema de filtração.

Da tubulação vertical, a água seguia para a parte inferior de cada filtro, de forma a proporcionar fluxo ascendente nos mesmos. O controle de entrada e saída em cada filtro foi realizado por meio de registros, como descrito no item 4.5.1.1.

4.5.1.3. Sistema de preparo e dosagem de coagulante e alcalinizante

Nesta pesquisa foi utilizado como coagulante sulfato de alumínio PA da marca VETEC, como citado anteriormente. O preparo da suspensão de coagulante foi feito por meio da adição de 1 kg de sulfato de alumínio em 200 L de água proveniente do poço do campus I da USP São Carlos, resultando em concentração de 5g/L. A suspensão foi preparada em reservatório de 250 L e misturada e homogeneizada com auxílio de misturadores mecânicos, como mostra a Figura 41.

Figura 41. Reservatório para preparação de suspensão de coagulante, contendo misturador mecânico para homogeneização.

Similarmente, foi preparada solução de carbonato de sódio (alcalinizante) para ajuste de pH após o preparo da água sintética (em que já foi realizado ajuste prévio de pH, como descrito no item 4.2.), com a finalidade de ser utilizada em situações emergenciais, em que fosse necessário ajustar o pH durante o andamento do experimento.

A solução de alcalinizante foi preparada adicionando-se 1 kg de carbonato de sódio a 100L de água proveniente de poço, resultando em concentração de 10g/L. O preparo foi realizado em reservatório de 250 L, com agitação e homogeneização realizada por meio de agitadores mecânicos, similarmente ao caso da suspensão de sulfato de alumínio, vide Figura 41. Ao longo desta pesquisa, no entanto, não foi necessário realizar ajuste posterior (emergencial) de pH, e assim não foi utilizada esta solução.

A dosagem de coagulante foi realizada com auxílio de bomba dosadora (vide Figura 42), com ajuste de vazão realizado para operação nas diferentes condições de taxa de filtração estudadas. Para cada experimento conduzido, foi realizado o seguinte cálculo para ajuste da vazão da bomba dosadora:

$$Q_{bomba\ dosadora} = \sum_{n=1}^{n=6} \frac{D_{coagulante} . Q\ filtro_n}{C_{solução}}$$

em que

$Q_{bomba\ dosadora}$ é a vazão ajustada na bomba dosadora;

$D_{coagulante}$ é a dosagem de coagulante adotada para o experimento, igual a 22,5mg/L de sulfato de alumínio neste caso;

$Q\ filtro_n$ é a vazão de alimentação de cada um dos 6 filtros (n varia de 1 a 6);

$C_{solução}$ é a concentração da solução de coagulante utilizada, igual a 5g/L nesta pesquisa.

Figura 42. Bombas dosadoras utilizadas na pesquisa para dosagem de coagulante e alcalinizante à água de alimentação do sistema de filtros de fibra flexível.

Uma vez tendo sido adotada dosagem de coagulante fixa para todos os experimentos – segundo os resultados da etapa II apresentados no item 5.2 – e tendo sido produzida solução de sulfato de alumínio de concentração igual a 5g/L, a variável de cada experimento era apenas a vazão afluente a cada filtro, a qual variava com a taxa de filtração estudada – segundo descrição do item 4.5.2.

A Tabela 1 mostra cálculos para ajuste de vazão da bomba dosadora em cada condição de taxa de filtração estudada, sabendo-se que a área transversal de cada filtro é igual $8{,}04{,}10^{-4} m^2$ (diâmetro interno igual a 28 mm).

Assim, para escolha da vazão da bomba dosadora foi necessário somar as vazões parciais referentes à operação de cada um dos 6 filtros. Por exemplo, caso os 6 filtros operassem à taxa de 20m/h, era adotada a vazão da bomba dosadora igual a 7,56 mL/min (=6 x 1,26).

Tabela 1. Vazões de solução de coagulante referente a cada filtro, segundo taxa de filtração estudada.

Taxa de filtração (m/h)	**Vazão afluente ao filtro (L/min)**	**Vazão de solução de coagulante para 1 filtro (mL/min)**
5	0,07	0,315
10	0,14	0,63
20	0,28	1,26
40	0,56	2,52
80	1,12	5,04

A dosagem de coagulante foi realizada por meio de injetores acoplados à tubulação de saída da caixa de nível constante, em ponto anterior às subdivisões referentes aos 6 filtros construídos. Assim, a bomba dosadora transportava solução de coagulante do reservatório onde foi produzida até este ponto de aplicação. No local em que foi aplicado o coagulante, foram colocadas no interior da tubulação chapas metálicas com formato helicoidal que promoviam a mistura rápida entre o coagulante e a água de alimentação (misturador rápido tubular). A Figura 43 mostra ponto de aplicação do coagulante e os misturadores rápidos tubulares instalados após este ponto.

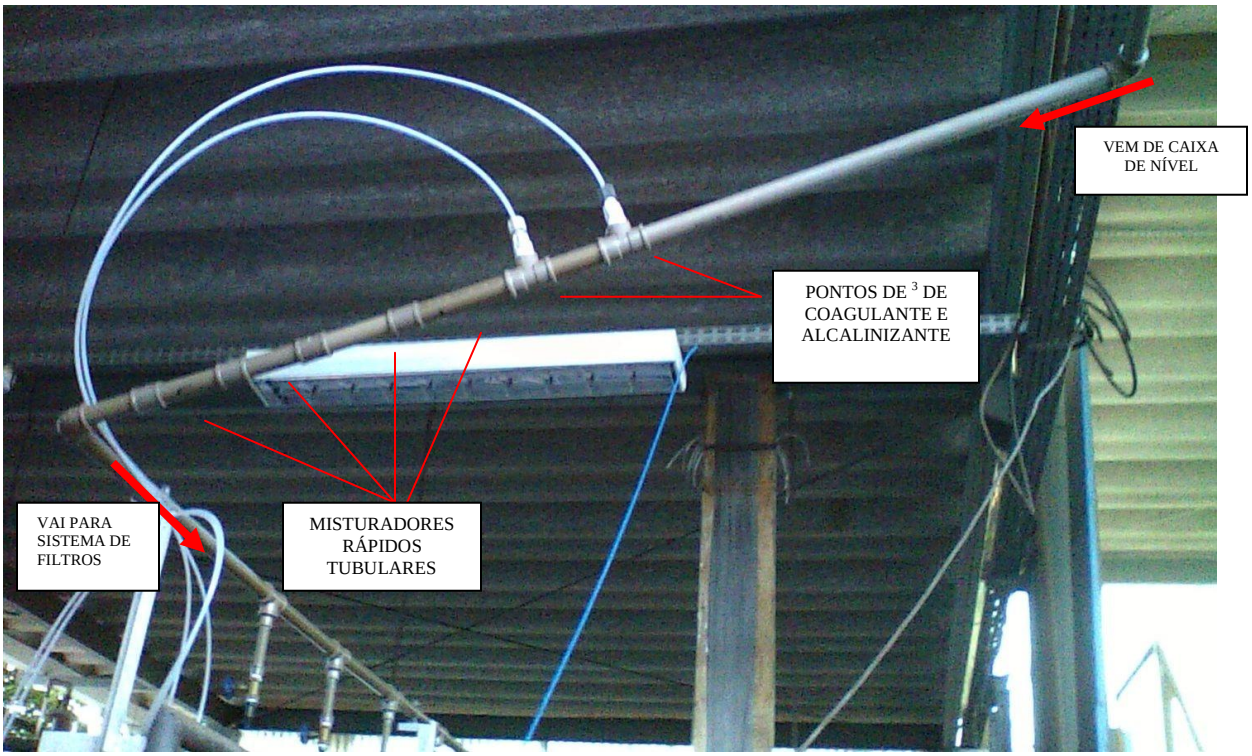

Figura 43. Ponto de aplicação de coagulante, com destaque para os misturadores tubulares.

Como se observa na Figura 43, foi construído injetor também para dosagem de solução de alcalinizante, no entanto não foi necessária sua utilização durante o experimento.

4.5.2. Planejamento dos ensaios

Com a finalidade de avaliar as condições operacionais e os fatores de importância na eficiência de clarificação do processo de filtração em filtros de fibra flexível, foram estudados 2 tipos de fibras como materiais filtrantes – o sisal e o polipropileno – , 3 comprimentos de leito – 25, 60 e 100 cm – e, no caso dos filtros de sisal, 2 porosidades de leito – 85 e 93%. No caso dos filtros de polipropileno, somente foi estudada a porosidade de leito de 93%, por esta já apresentar resultados satisfatórios.

Tendo sido construídos 6 filtros em paralelo – 3 constituídos de sisal nos comprimentos de 25, 60 e 100 cm e 3 constituídos de polipropileno nos comprimentos de 25, 60 e 100 cm –foi

necessário, para avaliação de todos os parâmetros em estudo, conduzir 3 etapas de experimentos no caso dos filtros de polipropileno, para avaliação das taxas de 20, 40 e 80m/h, e 6 etapas de experimentos no caso dos filtros de sisal, para avaliação das taxas de 20, 10 e 5 m/h aplicadas aos filtros de porosidade de 93% e das taxas de 20, 40 e 80 m/h aplicadas aos filtros de porosidade de 85%.

O Quadro 1 mostra a grade de ensaios realizada neste estudo. Ressalta-se que foram mantidos constantes durante o experimento a temperatura e o tipo de suspensão (água sintética produzida segundo descrição apresentada no item 4.2.).

Quadro 1. Grade de ensaios realizados durante a pesquisa.

TIPO DE FIBRA	**COMPRIMENTO DO LEITO (cm)**	**POROSIDADE DO LEITO (%)**	**TAXA DE FILTRAÇÃO (m/h)**
SISAL	100 cm	93%	20
			10
			5
		85%	20
			40
			80
	60 cm	93%	20
			10
			5
		85%	20
			40
			80
	25 cm	93%	20
			10
			5
		85%	20
			40
			80
POLIPROPILENO	100 cm	93%	20
			40
			80
	60 cm	93%	20
			40
			80
	25 cm	93%	20
			40
			80

Para realização dos ensaios, foi estabelecido limite de turbidez do efluente igual a 1,0 uT e da perda de carga do filtro igual a 1,8 mH_2O. O valor de turbidez limite foi estabelecido tendo em vista os valores recomendados pela antiga Portaria 518/2004. No entanto,também foi estudada a adequação para a nova Portaria 2014/2011, a qual estabelece o limite de turbidez de 0,5 uT, o qual deve ser alcançado até o ano 2015. Assim, as carreiras de filtração foram encerradas sempre que a turbidez do filtrado atingiu o valor de 1,0 uT *ou* a perda de carga no filtro (lida com auxílio de tomadas de pressão e piezômetros descritos no item 4.5.1.1) atingiu 1,8 mH_2O. Encerrada a carreira de filtração, realizava-se a lavagem do leito, segundo procedimento descrito no item 4.6.

Após a realização da limpeza de cada filtro, era iniciada nova carreira da filtração, variando-se a condição de taxa de filtração. Cada condição de taxa de filtração foi repetida pelo menos 2 vezes.

4.5.3. Monitoramento dos ensaios

Nesta etapa III em que se objetivou avaliar a eficiência de clarificação dos diferentes filtros de fibra, foram monitorados os seguintes parâmetros:

I. Vazão de entrada de cada filtro, por meio da medição do volume que escoava em cada registro de entrada em dado intervalo de tempo, com auxílio de proveta e cronômetro. Este controle foi importante para manter a taxa de filtração constante ao longo da carreira de filtração. A verificação era realizada a cada 30 minutos, e as vazões que deveriam ser lidas na saída de cada registro, referentes às diferentes taxas estudadas, são apresentadas na Tabela 1.

II. Evolução da perda de carga ao longo do leito de cada um dos 6 filtros, com auxílio de 4 tomadas de pressão localizadas ao longo do leito e de piezômetro com

coluna de água. Este parâmetro foi avaliado a cada 15 minutos.

III. Qualidade da água bruta, da água coagulada e do efluente de cada filtro, segundo as variáveis e freqüência apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Variáveis e frequência de amostragem.

VARIÁVEL	ÁGUA BRUTA	ÁGUA COAGULADA	ÁGUA FILTRADA
Cor aparente	Amostra composta por alíquotas coletadas a cada 15 minutos, durante toda a carreira de filtração	-	A cada 15 minutos
Cor verdadeira		-	-
Turbidez		A cada 15 minutos	A cada 15 minutos
Sólidos suspensos totais		Amostra composta por alíquotas coletadas a cada 15 minutos, durante toda a carreira de filtração	Amostra composta por alíquotas coletadas a cada 15 minutos, durante toda a carreira de filtração minutos
pH		A cada 15 minutos	
Alcalinidade		-	-
Condutividade		-	-
Temperatura	-	A cada 15 minutos	-

Como já descrito anteriormente, a temperatura foi mantida em 25±1°C com auxílio de aquecedor a gás, e sua verificação foi feita como mostra o Quadro 2, a cada 15 minutos, com auxilio de um termômetro.

Ressalta-se que os parâmetros de cor (aparente e verdadeira) foram obtidos por meio da leitura da absorbância em comprimento de onda de 459 nm em espectofotômetro seguido de

conversão para unidades de cor com emprego da seguinte curva, construída e utilizada por Maia (2010):

$$C = 22136.(abs^2)+330,2.abs$$

em que *abs* é o valor de absorbância lido em espectofotômetro e C é o valor de cor em uC.

4.6. Etapa IV: Avaliação da lavagem dos filtros

Nesta etapa foi avaliado o processo de lavagem dos filtros operados na etapa anterior. Foram avaliados diferentes procedimentos de lavagem, variando-se, em um primeiro momento, o tempo de aplicação de ar e o número de estágios de aplicação de ar e água em sequência, e mantendo-se fixa a vazão de ar e de água e o tempo total de aplicação de água (30 segundos). Em um segundo momento, tendo sido selecionado o melhor número de estágios e tempo de aplicação de ar, foi reduzida a *vazão* de água aplicada, mantendo-se, no entanto, o *tempo* de aplicação desta.

Para aplicação de ar no processo de lavagem dos filtros foi utilizado pressurizador de ar, ilustrado na Figura 44, o qual foi conectado aos diferentes filtros por meio de mangueira que podia ser acoplada logo antes do registro de agulha localizado na tubulação de entrada de ar de cada filtro, segundo configuração mostrada no item 4.5.1.1. A Figura 45 mostra sistema de injeção de ar nos filtros, com destaque para local em que era acoplada mangueira para injeção de ar nos diferentes filtros.

Figura 44. Pressurizador de ar utilizado para lavagem dos filtros.

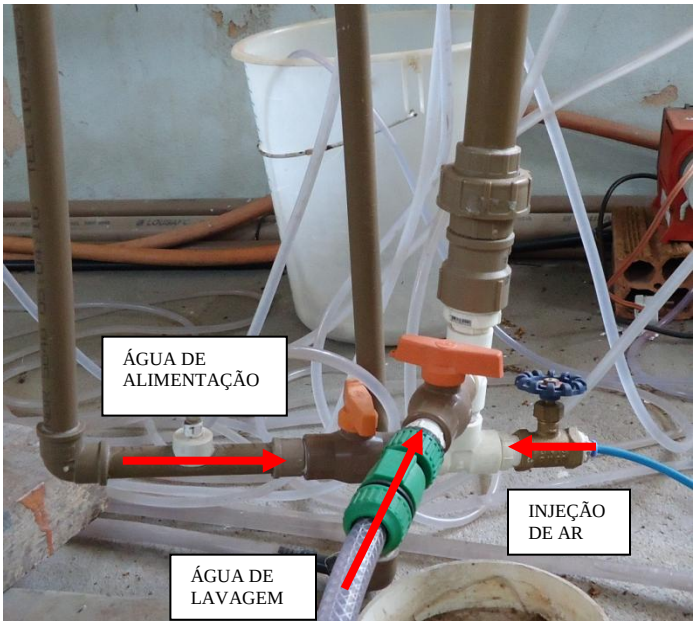

Figura 45. Destaque para injeção de ar e aplicação de água de lavagem.

A pressão de ar que saía do pressurizador foi regulada e controlada por meio de registro existente no mesmo. A vazão de ar foi ajustada e medida em rotâmetro acoplado à mangueira de saída do pressurizador (vide Figura 46).

Figura 46. Rotâmetros utilizados para medição das vazões de ar (esquerda) e de água de lavagem (direita) aplicadas aos filtros de fibra flexível.

A aplicação de água, por outro lado, era realizada acoplando-se, à tubulação destinada à aplicação de água de lavagem (segundo configuração do item 4.5.1.1.), mangueira alimentada por água de poço do campus I da USP São Carlos. Ressalta-se que esta água é a mesma utilizada para preparar a água de estudo. Nesta mangueira foi colocado rotâmetro para medição da vazão de água de lavagem (vide Figura 46). A Figura 45 mostra sistema de injeção de água de lavagem nos filtros.

O processo de lavagem somente foi estudado para os filtros com melhor desempenho segundo avaliação da Etapa III. Nestes filtros foram estudadas as seguintes condições (modos) de

lavagem, mantendo-se fixas as vazões de ar em 0,1m³/h e de água em 540 L/h:

i. Modo 1: Aplicação de água somente, durante 60 segundos;
ii. Modo 2: Operação de 1 estágio de lavagem, constituído pela aplicação de ar por 15 segundos seguida da aplicação água de lavagem por 30 segundos;
iii. Modo 3: Operação de 3 estágios de lavagem, cada um constituído pela aplicação de ar por 5 segundos seguida da aplicação de água de lavagem por 10 segundos;
iv. Modo 4: Operação de 3 estágios de lavagem, cada um constituído pela aplicação de ar por 10 segundos seguida da aplicação de água de lavagem por 10 segundos;
v. Modo 5: Operação de 5 estágios de lavagem, cada um constituído pela aplicação ar por 3 segundos seguida da aplicação de água de lavagem por 6 segundos;
vi. Modo 6: Operação de 5 estágios de lavagem, cada um constituído pela aplicação de ar por 6 segundos seguida da aplicação de água de lavagem por 6 segundos.

Variadas as condições acima descritas, foi possível selecionar o melhor procedimento em cada filtro analisado. Selecionado o número de estágios e o tempo de aplicação de ar ótimos para cada caso, em uma segunda etapa estudou-se a redução da vazão de água para 180 L/h, mantendo-se fixos o tempo de aplicação de água e de ar e o número de estágios anteriormente selecionados.

Com o procedimento descrito, foi possível avaliar a eficiência de lavagem em diferentes condições, selecionando aquela que, sendo eficiente, resultasse em maior economia de ar e água.

A eficiência do processo de limpeza dos filtros foi avaliada segundo dois critérios:

i. recuperação dos sólidos retidos durante a operação dos filtros, por meio da coleta de amostras de água de lavagem e análise de sólidos suspensos totais;
ii. recuperação da perda de carga inicial com taxa de 20m/h.

Assim, com base na análise de sólidos suspensos e no volume de água consumido na lavagem (coletado em balde), foi possível calcular a massa total de sólidos retirados do filtro no processo de lavagem. Comparando com os valores de sólidos suspensos obtidos para a água coagulada e para o filtrado de cada filtro – os quais permitiam a realização de balanço de massa para obtenção dos sólidos retidos no filtro – foi possível avaliar a eficiência do processo de lavagem. Assim:

$$C_{SR} = C_{SC} - C_{SF}$$

$$m_{SR} = C_{SR} x\ Q\ x\ t$$

$$m_{SL} = C_{SL}\ x\ V_{AL}$$

$$E_L(\%) = \frac{m_{SL}}{m_{SR}.100}$$

em que

C_{SR} é a concentração de sólidos suspensos retidos no filtro (mg/L);

C_{SC} é a concentração de sólidos suspensos existente na água coagulada (mg/L);

C_{SF} é a concentração de sólidos suspensos existente na água filtrada (mg/L);

C_{SL} é a concentração de sólidos suspensos existente na água de lavagem (mg/L);

m_{SR} é a massa de sólidos suspensos retidos no filtro (mg);

m_{SL} é a massa de sólidos suspensos existente na água de lavagem (mg);

Q é a vazão de operação do filtro (L/min);

t é o tempo de operação do filtro, ou sua carreira de filtração (min);

V_{AL} é o volume de água utilizado no processo de lavagem (L);

$E_L(\%)$ é a eficiência do processo de lavagem, em porcentagem.

A avaliação da recuperação da perda de carga inicial foi realizada comparando-se a perda de carga de início de operação dos filtros com taxa de 20m/h e após sua operação e lavagem,

também para taxa de 20m/h.

O processo de lavagem somente foi considerado eficiente quando a perda de carga de inicio de carreira fosse *igual* ou inferior à perda inicial antes da operação do filtro *e* quando a recuperação dos sólidos retidos fosse superior a 98%.

4.7. Critério para avaliação do desempenho da coluna de filtração

Tendo em vista que a carreira de filtração de cada um dos 6 filtros foi encerrada quando a perda de carga no leito atingiu 1,8 mH_2O ou a turbidez de saída atingiu 1 uT, foram observados em cada caso diferentes tempos de duração de carreira, volumes filtrados, valores médios de turbidez do efluente e perda de carga no final da carreira. Similarmente, na ocasião de lavagem foram observadas diferentes condições ótimas de operação, levando a diferentes relações de volumes consumidos na lavagem com os volumes de água filtrada produzida, entre outros fatores.

Assim, foi possível estabelecer parâmetros de comparação do desempenho dos diferentes filtros, com base em índices de avaliação do desempenho ou relações entre fatores de importância no processo.

Primeiramente, assim, foi possível comparar os diferentes volumes de água filtrada produzidos através de cálculo indireto, multiplicando-se as vazões aplicadas pelo tempo de duração das carreiras.

Ainda que este seja um parâmetro de comparação de desempenho, se julgou mais interessante avaliar a relação desta produção de água filtrada com as perdas de carga associadas, por meio da utilização do Índice de Funcionamento do Filtro proposto por Gamet e Rademacher (1959 *apud* ARBOLEDA, 1973) – discutido no item 3.6.:

$$IFF = \frac{v\ x\ t}{\Delta P}$$

em que v é a taxa de filtração (m/h) , t é a duração da carreira de filtração (h) e ΔP é a perda de carga no final da carreira de filtração (mH_2O).

Além deste índice, também foi utilizado o Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI), o qual também foi apresentado no item 3.6. e é definido por:

$$IFI = \frac{H_f T_{efl}}{T_{afl}.t.V_{apr}}$$

em que:

H_f: perda de carga no instante considerado (cm)

t: tempo considerado (min)

T_{afl} : valor médio da turbidez do afluente (uT)

T_{efl} : valor médio da turbidez do efluente (uT)

V_{apr} : velocidade de aproximação ou taxa de filtração (cm/min)

Este índice, diferentemente do IFF, incorpora valores médios de remoção de turbidez, sendo interessante para comparar as eficiências de clarificação dos diferentes filtros, associadas aos volumes filtrados e às perdas de carga de final de carreira.

Sob o ponto de vista da produtividade de cada filtro, ou da porcentagem de água filtrada que é gasta posteriormente durante o processo de lavagem, foi analisada a seguinte relação para cada filtro:

$$P(\%) = \frac{V_{AL}}{V_{AF}}$$

em que :

$P(\%)$ é a perda, em porcentagem, de água no processo de lavagem;

V_{AL} é o volume de água consumido no processo de lavagem (L);

V_{AF} é o volume de água produzido durante a carreira de filtração (L).

Os índices e relações citados foram adotados para possibilitar melhor análise de desempenho dos diferentes filtros, pela ponderação dos parâmetros de importância para melhor interpretação dos resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Estudos preliminares: parâmetros de coagulação da água de estudo

Após realização dos ensaios em Jarteste descritos no item 4.4 foram construídos os diagramas de coagulação para remoção de cor e turbidez por filtração apresentados nas Figuras 47 e 48 respectivamente.

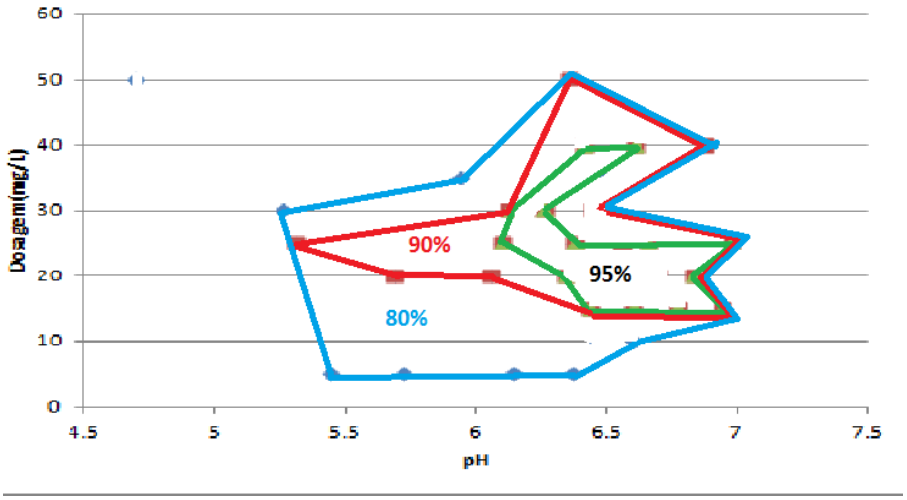

Figura 47. Diagrama de coagulação para remoção de cor por filtração da água de estudo, utilizando sulfato de alumínio como coagulante.

Na Figura 47, a área delimitada pelo contorno maior (em azul) refere-se à região (dosagens de coagulante versus pH) em que foram obtidas eficiências de remoção de cor por filtração direta (unidade de bancada) maiores ou iguais a 80%. As demais áreas menores mostradas no diagrama referem-se às regiões com remoções maiores ou iguais à 90%(em vermelho) e à 95% (em verde).

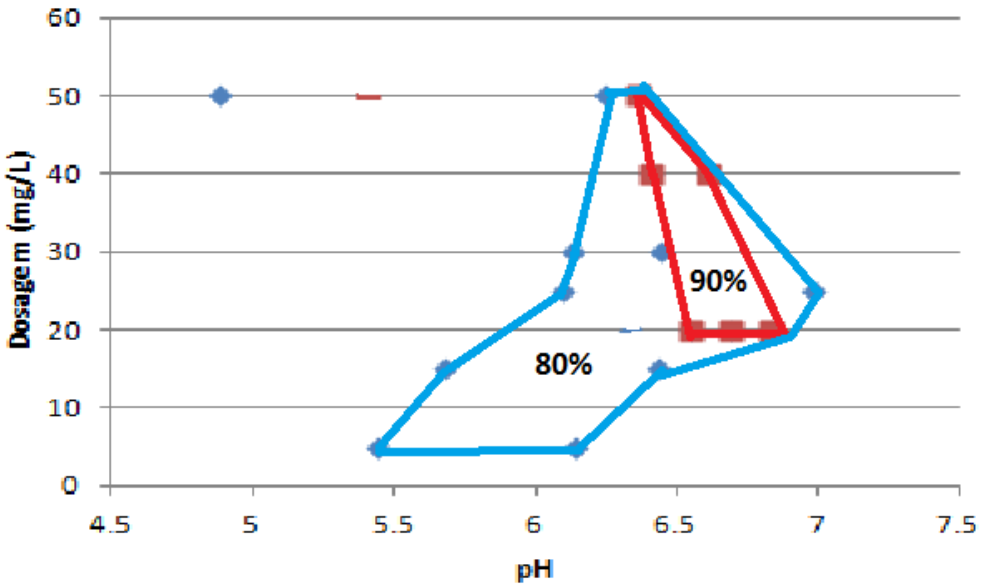

Figura 48. Diagrama de coagulação para remoção de turbidez por filtração da água de estudo, utilizando sulfato de alumínio como coagulante.

Na Figura 48 a área delimitada pelo contorno maior (em azul) refere-se à região (dosagens de coagulante versus pH) em que foram obtidas eficiências de remoção de turbidez por filtração direta (unidade de bancada) maiores ou iguais a 80%. A área menor, delimitada em vermelho, corresponde à região com remoções maiores ou iguais a 90%. Neste caso não foram verificadas remoções maiores que 95%, e portanto não foi delimitada outra área menor.

Com base nos diagramas construídos, observa-se que para valores de pH próximos a 6,5 a dosagem de sulfato de alumínio de entre 20 e 25 mg/L foi a mais eficiente para remoção de cor e turbidez da água em estudo. Este resultado é compatível com as dosagens adotadas por Araujo (2010) e Maia (2010), as quais foram iguais a 22,5mg/L para as mesmas condições de água de estudo.

Desta maneira foi adotada nesta pesquisa envolvendo filtração em filtro de fibras flexíveis a dosagem de 22,5mg/L de sulfato de alumínio e mantidos, durante os experimentos, pH de coagulação em aproximadamente 6,5±0,2 e temperatura em 25± 1°C. As características da

água sintética produzida, que são parâmetros importantes no processo de coagulação, são apresentadas no item 5.2.

5.2. Características da água de estudo

As características da água de estudo utilizada na alimentação dos filtros de fibra flexível, a qual foi preparada segundo descrição realizada no item 4.2, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de qualidade da água de alimentação dos filtros de fibra flexível.

Parâmetros	*Água de alimentação*
pH	7,30±0,22
Turbidez (uT)	8,19±0,85
Cor aparente (uC)	14,47±5,25
Cor verdadeira (uC)	1,59±0,38
Alcalinidade ($mgCaCO_3/L$)	35,74±1,60
Condutividade (µS/cm)	70,13±1,40
Sólidos suspensos totais (mg/L)	7,98±0,74

5.3. Caracterização das fibras de sisal e polipropileno

Anteriormente à operação dos filtros, foram realizadas análises de solubilidade das fibras em ácido clorídrico e hidróxido de sódio e avaliação de imagem em microscopia óptica e em microscopia eletrônica de varredura (MEV), com a finalidade de promover melhor caracterização dos meios filtrantes estudados e/ou encontrar restrições para sua utilização. Foi realizada, também, avaliação visual da degradação das fibras de sisal e de polipropileno, com vistas a verificar alterações visíveis no volume das fibras e/ou a formação de biofilmes na superfície.

5.3.1. Solubilidade em ácido clorídrico e hidróxido de sódio

A Tabela 3 mostra os resultados da análise de solubilidade das fibras de sisal e de polipropileno em ácido clorídrico e hidróxido de sódio.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de solubilidade das fibras de sisal e de polipropileno em ácido clorídrico e hidróxido de sódio.

	Ácido clorídrico			***Hidróxido de sódio***		
	m inicial	*m final*	*% solúvel*	*m inicial*	*m final*	*% solúvel*
Sisal	31,12	30,40	2,30	30,01	27,33	8,92
Polipropileno	30,27	28,76	4,99	30,16	30,09	0,21

*m inicial é a massa de fibra antes do ensaio de solubilidade, m final é a massa de fibra após o ensaio de solubilidade, e % solúvel representa a porcentagem em massa da fibra que foi perdida após o ensaio.

Segundo a Norma NBR 14234/1998, para o carvão antracito a solubilidade em ácido clorídrico e hidróxido de sódio não devem exceder, respectivamente, 5 e 2%. Apenas a título de comparação, ambas as fibras de sisal e polipropileno apresentaram solubilidade em ácido clorídrico menor que os 5% recomendados para o antracito. Em relação à solubilidade em hidróxido de sódio, no entanto, as fibras de sisal tiveram perda superior aos 2% recomendados para leitos de antracito.

A Figura 49 mostra líquido resultante do ensaio de solubilidade das fibras de sisal em hidróxido de sódio, mostrando a mudança de cor da solução (que era transparente a principio) decorrente da possível liberação de substâncias nesta.

Figura 49. Solução resultante de procedimento para determinação da solubilidade das fibras de sisal em hidróxido de sódio.

Do exposto, conclui-se que caso os limites estabelecidos pela norma NBR 14234/1998 fossem adequados aos leitos fibrosos em questão, a fibra de polipropileno se enquadraria aos limites exigidos, no entanto a fibra de sisal não se enquadraria no caso da solubilidade em base.

Uma vez que ambas as fibras se enquadraram, segundo a norma NBR 14234/1998, aos limites de solubilidade em ácido – o que mostra que possivelmente não são liberadas quantidades substanciais de compostos em águas ácidas – admitiu-se que as fibras não parecem apresentar restrições a sua utilização como materiais filtrantes.

Deve-se atentar, no entanto, para a utilização de fibras de sisal como meio filtrante em águas alcalinas, ou para a utilização de produtos químicos básicos na lavagem deste tipo de filtro. Esta advertência está de acordo com as observações de Savastano Junior (2000), o qual verificou em suas pesquisas que as fibras de sisal degradavam mais rapidamente em contato com meios alcalinos. Também é importante ressaltar a possibilidade de liberação de substâncias contaminantes em águas superficiais quando fibras de sisal são lavadas em corpos d'água, como foi apresentado no item 3.8.1.8. Desta maneira, a utilização de fibras de sisal como meio filtrante requer estudos mais aprofundados.

É importante ressaltar que seria recomendável o estabelecimento de métodos específicos para avaliação da qualidade de materiais fibrosos orgânicos como é o caso dos materiais utilizados neste estudo – fibras orgânicas – uma vez que estas podem ter diferente susceptibilidade à ação de ácidos e bases, sendo necessária a adoção de limites estabelecidos especificamente para tais materiais, e não a utilização de normas aplicadas a outros tipos de materiais filtrantes.

Se recomenda também que sejam identificadas e caracterizadas as substancias possivelmente liberadas pelas fibras de sisal em água, possivelmente por meio de métodos cromatográficos.

5.3.2. Microscopia eletrônica de varredura

Como descrito anteriormente, foram realizadas micrografias das fibras de sisal e de polipropileno em 4 diferentes condições: a) sem qualquer tratamento e antes de sua utilização como meio filtrante; b) sem qualquer tratamento e após sua utilização como meio filtrante durante 2 meses; c) após o ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, descrito no item 4.3.1.; d) após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, também descrito no item 4.3.1.

As micrografias realizadas são apresentadas a seguir.

5.3.2.1. Fibras de sisal antes da operação dos filtros

As Figuras 50, 51 e 52 mostram imagens de fibras de sisal de diferentes diâmetros sem tratamento, com aumentos de 200, 2000 e 5000 vezes, respectivamente.

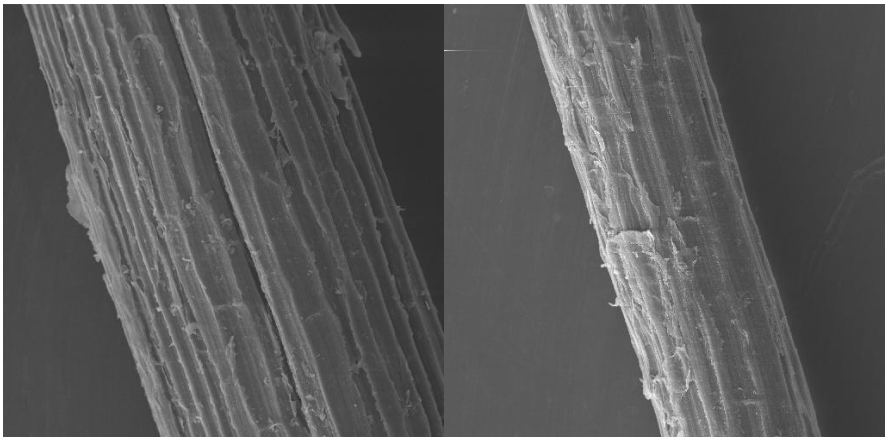

Figura 50. Imagem de MEV de fibras de sisal sem tratamento, com aumento de 200 vezes.

As imagens mostram que a superfície das fibras de sisal é repleta de fibrilas e resíduos do processo de beneficiamento da fibra, como foi verificado por Iozzi *et al*. (2010). A existência de fibrilas parece aumentar a superfície de contato destas fibras, o que seria vantajoso sob o ponto de vista de sua utilização como material filtrante.

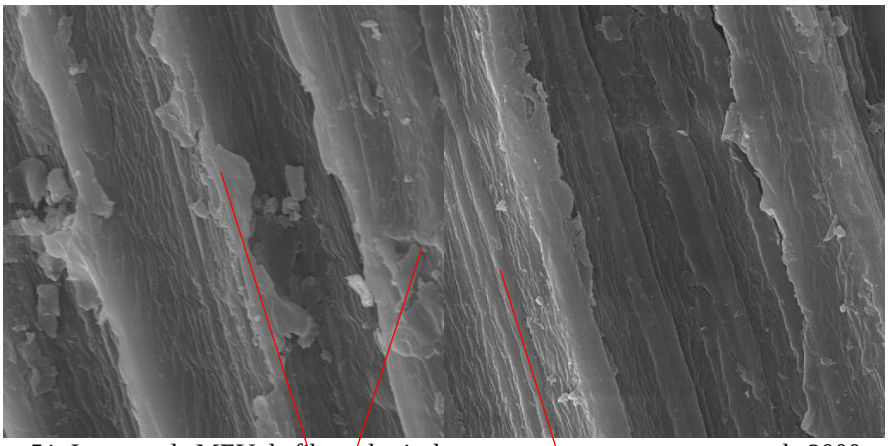

Figura 51. Imagem de MEV de fibras de sisal sem tratamento, com aumento de 2000 vezes.

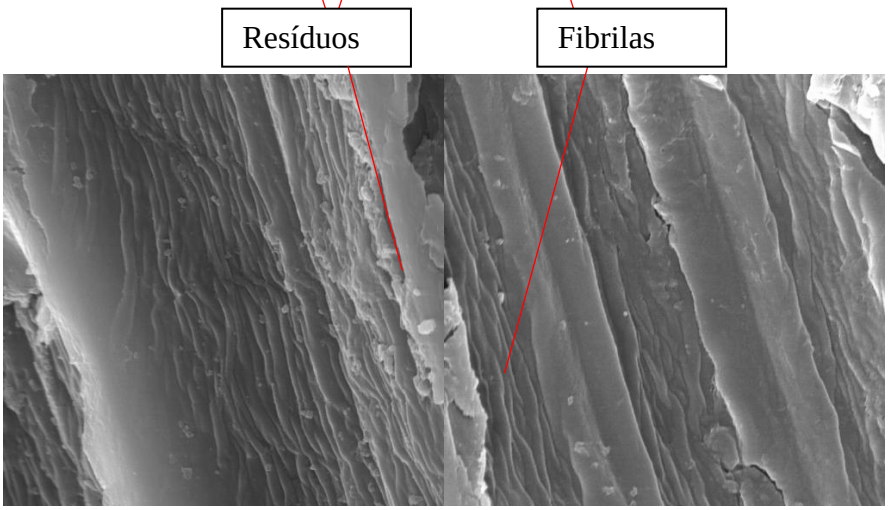

Figura 52. Imagem de MEV de fibras de sisal sem tratamento, com aumento de 5000 vezes.

Por outro lado, as imagens de MEV permitiram verificar a existência de diâmetros variados de fibras. Com a finalidade de se estimar um valor médio do diâmetro das fibras de sisal, foi realizada microscopia óptica de 100 fibras distintas, possibilitando cálculo de média e desvio padrão. Os valores encontrados são apresentados no item 5.3.3.

As Figuras 53, 54 e 55 mostram imagens de fibras de sisal de diferentes diâmetros após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumentos de 200, 2000 e 5000 vezes, respectivamente.

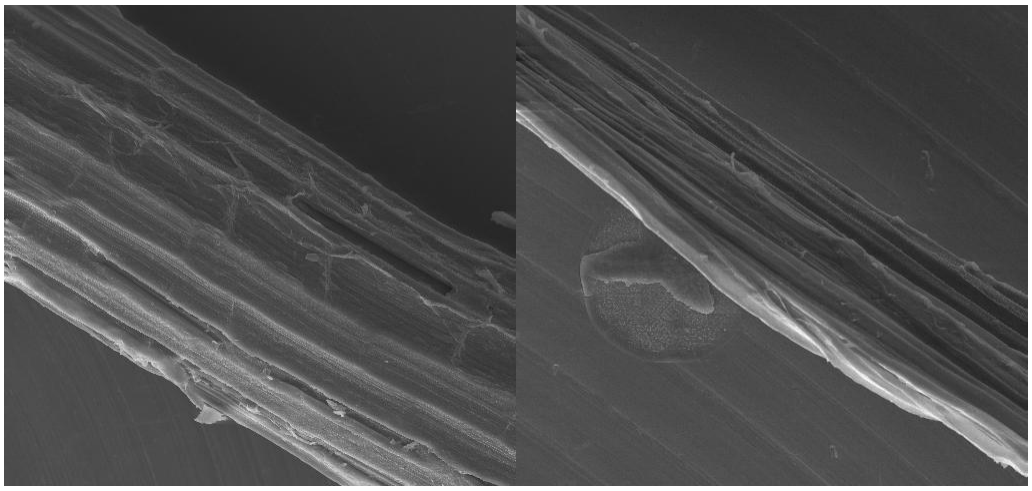

Figura 53. Imagem de MEV de fibras de sisal após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumento de 200 vezes.

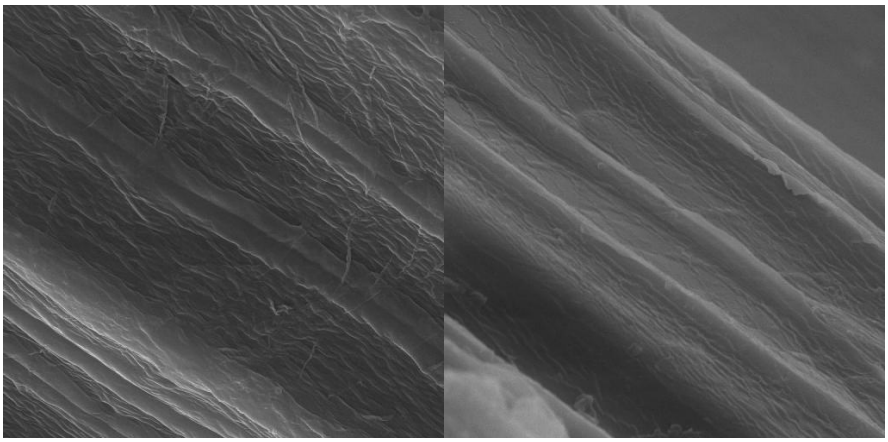

Figura 54. Imagem de MEV de fibras de sisal após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumento de 2000 vezes.

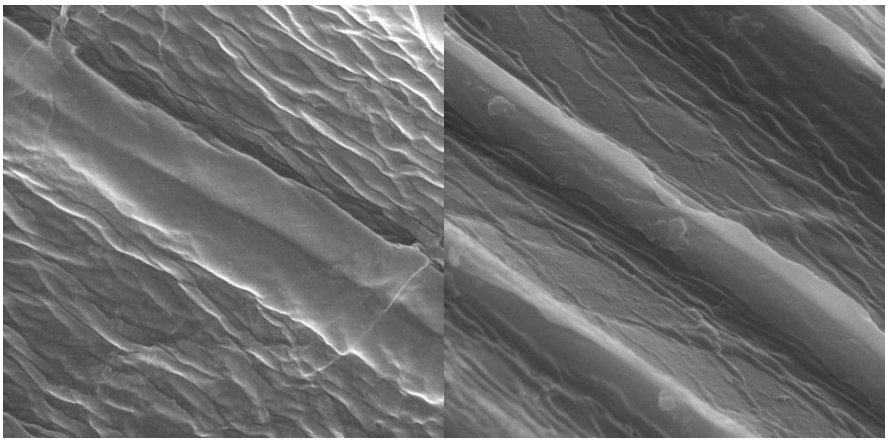

Figura 55. Imagem de MEV de fibras de sisal após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumento de 5000 vezes.

A análise das imagens de MEV permite perceber que, após o ensaio de solubilidade em ácido, houve certa remoção dos resíduos anteriormente verificados na superfície da fibra. As

fibrilas parecem estar mais separadas e menos evidentes. Desta análise é possível concluir que parcela da massa perdida no ensaio de solubilidade é devida à remoção dos resíduos anteriormente verificados na superfície da fibra. Assim, possivelmente a perda de massa da fibra em banho ácido é menor do que a exposta no item 5.3.1.

As Figuras 56, 57 e 58 mostram imagens de fibras de sisal de diferentes diâmetros após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumentos de 200, 2000 e 5000 vezes, respectivamente.

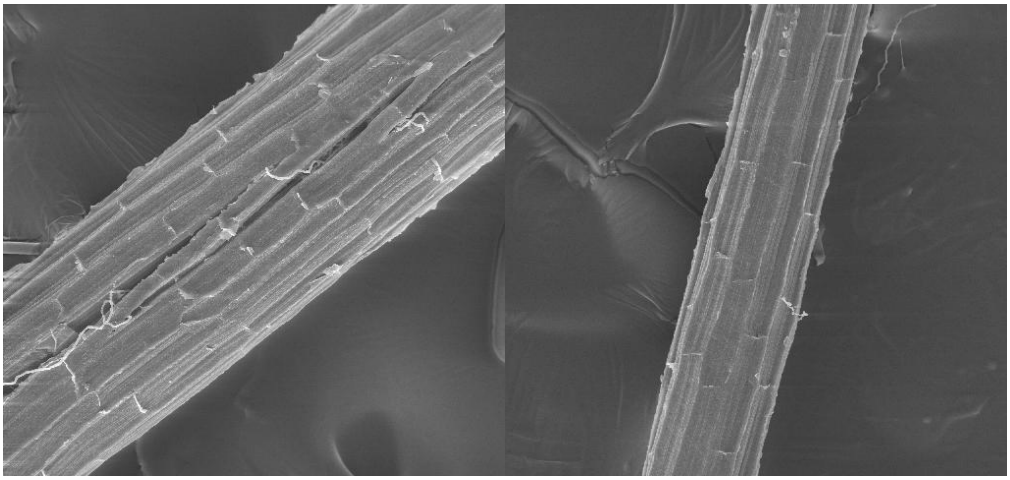

Figura 56. Imagem de MEV de fibras de sisal após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumento de 5000 vezes.

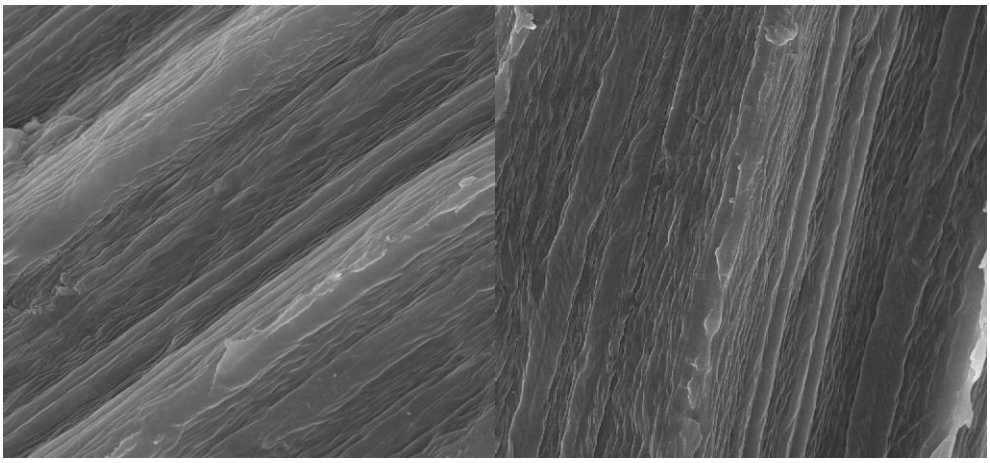

Figura 57. Imagem de MEV de fibras de sisal após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumento de 2000 vezes.

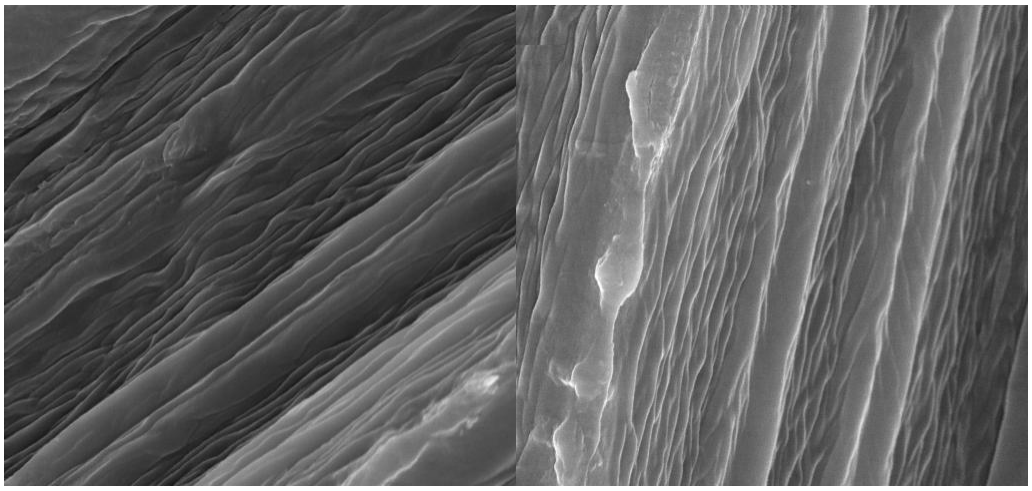

Figura 58. Imagem de MEV de fibras de sisal após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumento de 5000 vezes.

Similarmente às imagens de MEV de fibras após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, neste caso se verifica que houve remoção de resíduos da superfície da fibra. As fibrilas que compõem a fibra ficaram mais expostas, o que poderia levar a um aumento da superfície de contato. As fibras parecem estar um pouco mais claras, possivelmente devido à liberação de substâncias de coloração amarelada verificada na Figura 49. Mais uma vez, admite-se que parcela da perda em massa após ensaio de solubilidade em base foi devido à remoção de impurezas na superfície da fibra.

5.3.2.2. Fibras de polipropileno antes da operação dos filtros

As Figuras 59, 60 e 61 mostram imagens de fibras de polipropileno sem tratamento, com aumentos de 200, 2000 e 5000 vezes, respectivamente. Ressalta-se que apenas é apresentada micrografia de 1 fibra neste caso devido à grande uniformidade e semelhança das fibras de polipropileno.

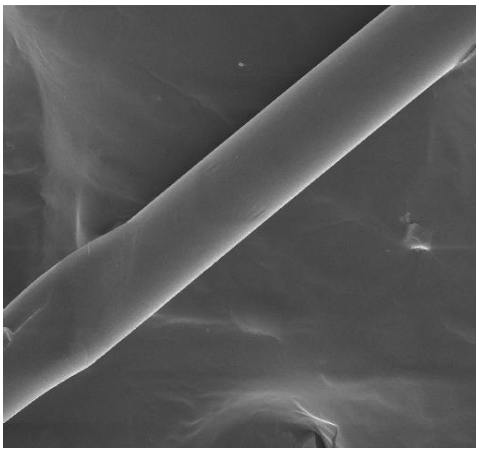

Figura 59. Imagem de MEV de fibras de polipropileno sem tratamento, com aumento de 200 vezes.

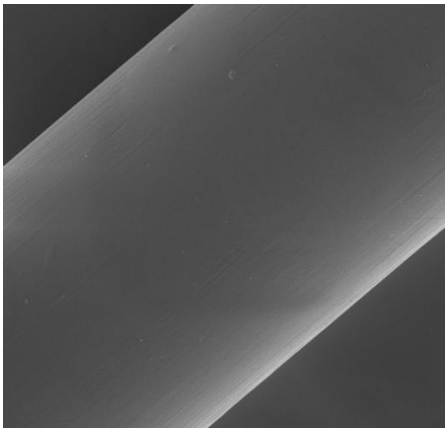

Figura 60. Imagem de MEV de fibras de polipropileno sem tratamento, com aumento de 2000 vezes.

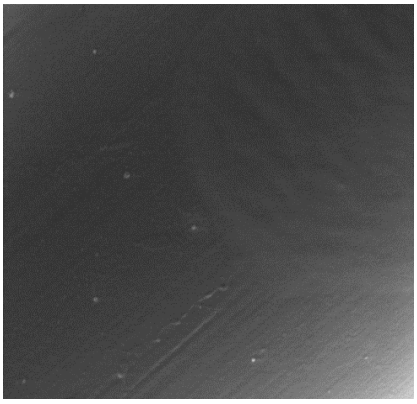

Figura 61. Imagem de MEV de fibras de polipropileno sem tratamento, com aumento de 5000 vezes.

Da análise das imagens de MEV, observa-se que as fibras de polipropileno são uniformes, com diâmetro de aproximadamente 34 μm, e a superfície também é uniforme e lisa.

As Figuras 62, 63 e 64 mostram imagens de fibras de polipropileno após ensaio de

solubilidade em ácido, com aumentos de 200, 2000 e 5000 vezes, respectivamente.

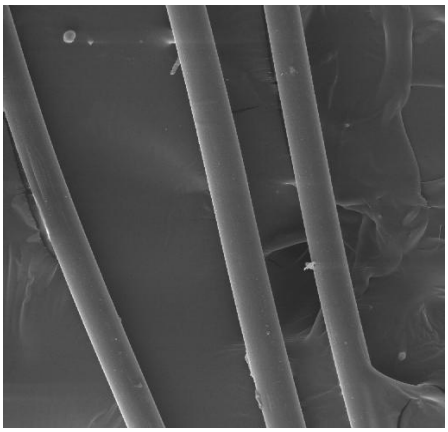

Figura 62. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumento de 200 vezes.

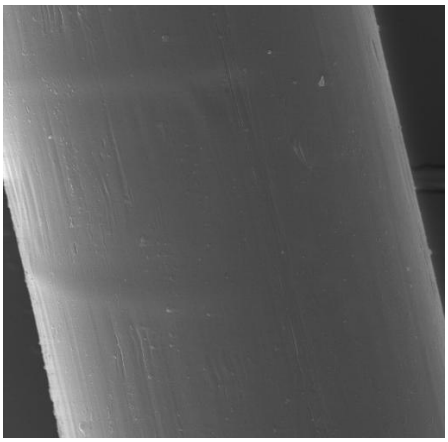

Figura 63. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumento de 2000 vezes.

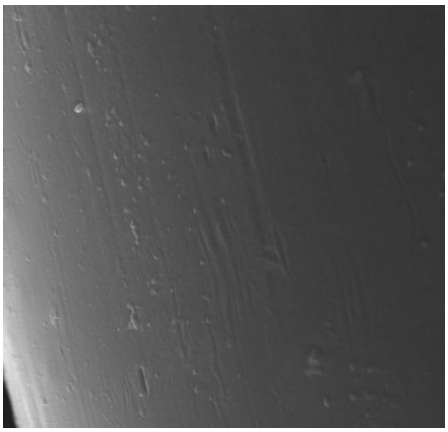

Figura 64. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em ácido clorídrico, com aumento de 5000 vezes.

A análise das imagens de MEV não permite verificar alterações na superfície e

integridade das fibras de polipropileno após o ensaio de solubilidade em ácido.

As Figuras 65, 66 e 67 mostram imagens de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumentos de 200, 2000 e 5000 vezes, respectivamente.

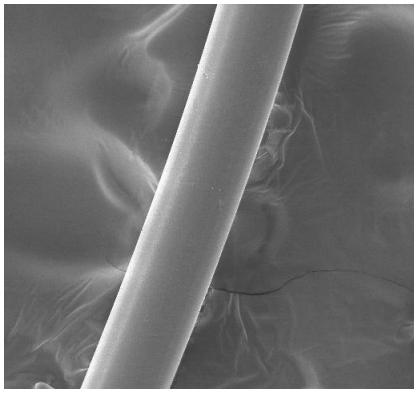

Figura 65. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumento de 200 vezes.

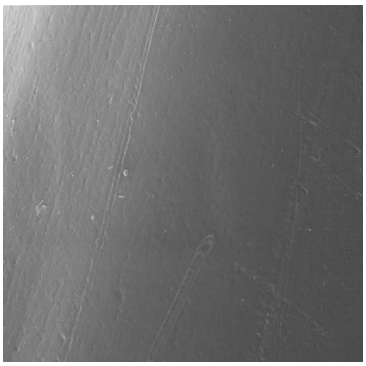

Figura 66. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumento de 2000 vezes.

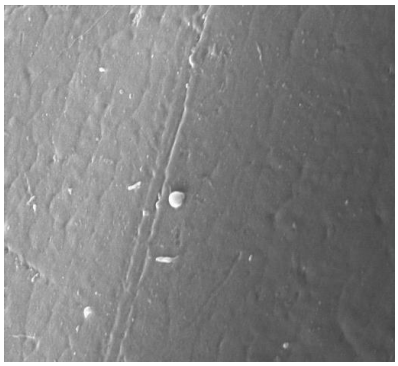

Figura 67.Imagem de MEV de fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio, com aumento de 5000 vezes.

Pela análise das imagens de MEV, também parece não ter havido alterações significativas na superfície das fibras de polipropileno após ensaio de solubilidade em hidróxido de sódio.

5.3.2.3. Fibras de sisal após operação dos filtros

As Figuras 68, 69 e 70 mostram imagens de MEV das fibras de sisal após aproximadamente 3 meses de operação dos filtros.

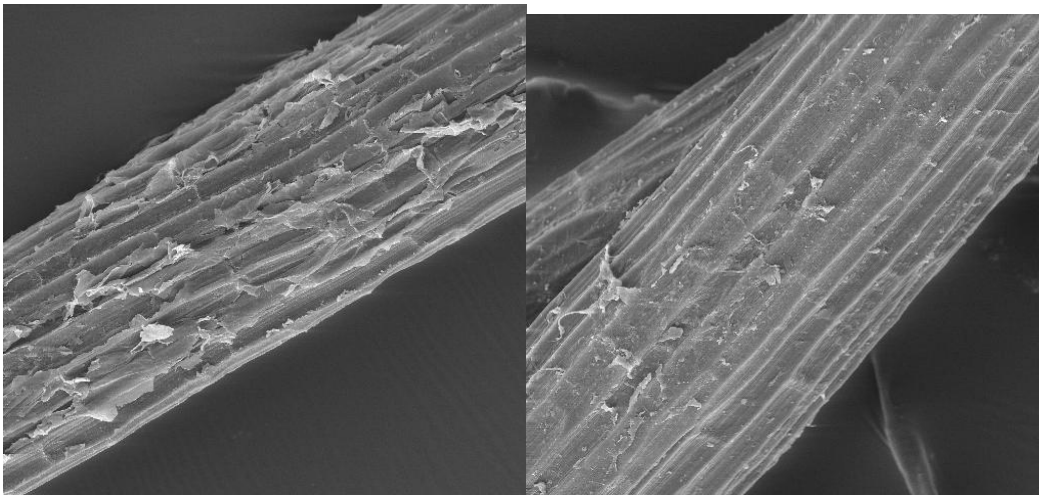

Figura 68. Imagem de MEV de fibras de sisal após operação dos filtros, com aumento de 200 vezes.

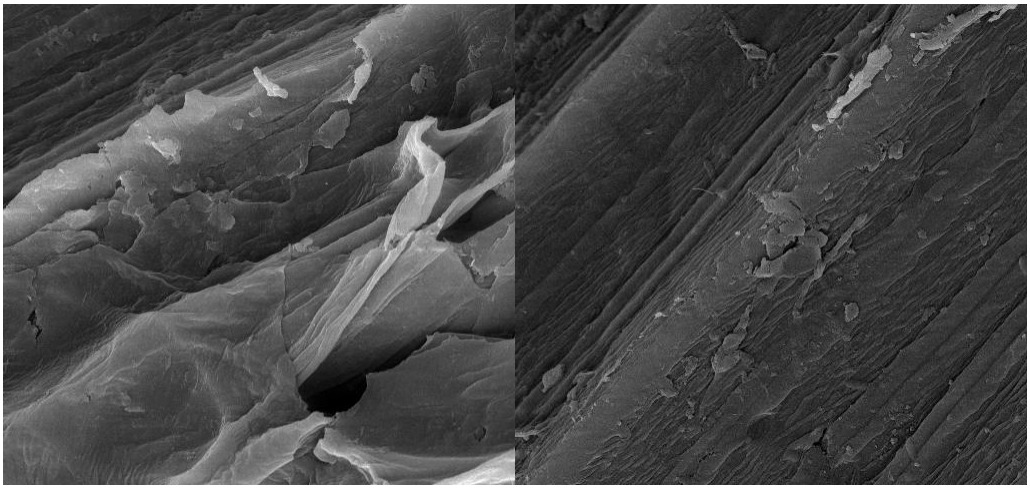

Figura 69. Imagem de MEV de fibras de sisal após operação dos filtros, com aumento de 2000 vezes.

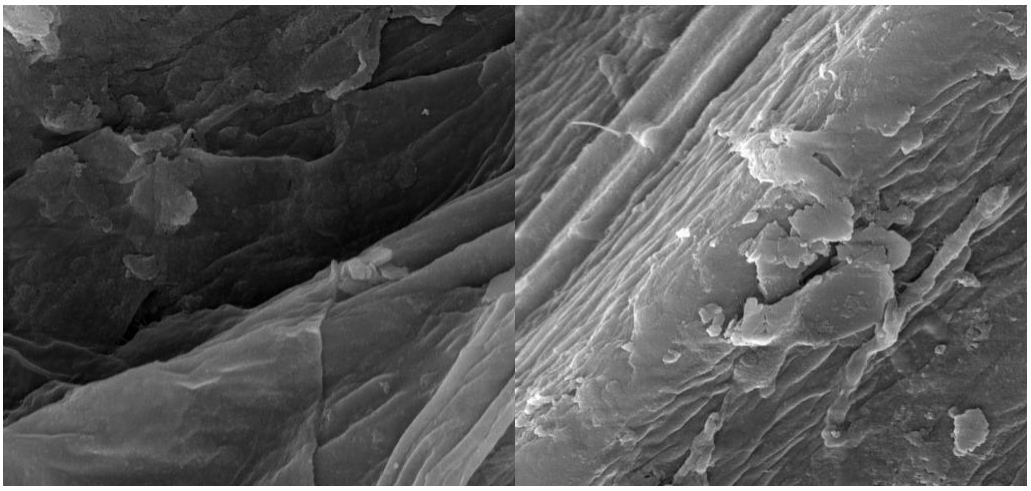

Figura 70. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após operação dos filtros, com aumento de 5000 vezes.

A análise das imagens de MEV mostra a existência de grande quantidade de impurezas retidas na superfície das fibras de sisal. Uma vez que as fibras foram analisadas após procedimento de lavagem dos filtros, verifica-se que ainda há impurezas presas à superfície. Assim, possivelmente seria necessário realizar lavagem do leito periodicamente de forma mais efetiva (lavagem química), por meio da aplicação de produtos de limpeza específicos. É importante relembrar que não se recomenda a aplicação de produtos básicos (como a soda cáustica) nos leitos constituídos de fibras de sisal, uma vez que os ensaios de solubilidade mostraram que pode haver liberação de substâncias e perda de massa do meio filtrante.

5.3.2.4. Fibras de polipropileno após operação dos filtros

As Figuras 71, 72 e 73 mostram imagens de MEV após operação dos filtros por aproximadamente 3 meses, com aumentos de 200, 2000 e 5000 vezes.

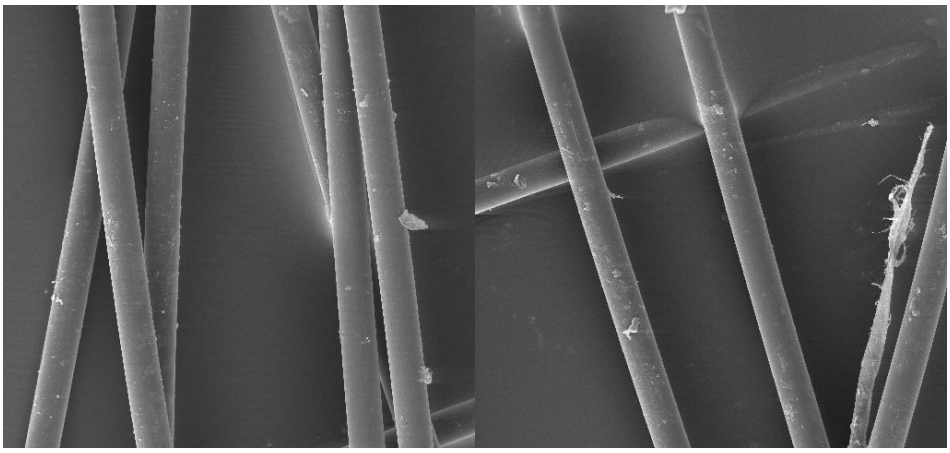

Figura 71. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após operação dos filtros, com aumento de 200 vezes

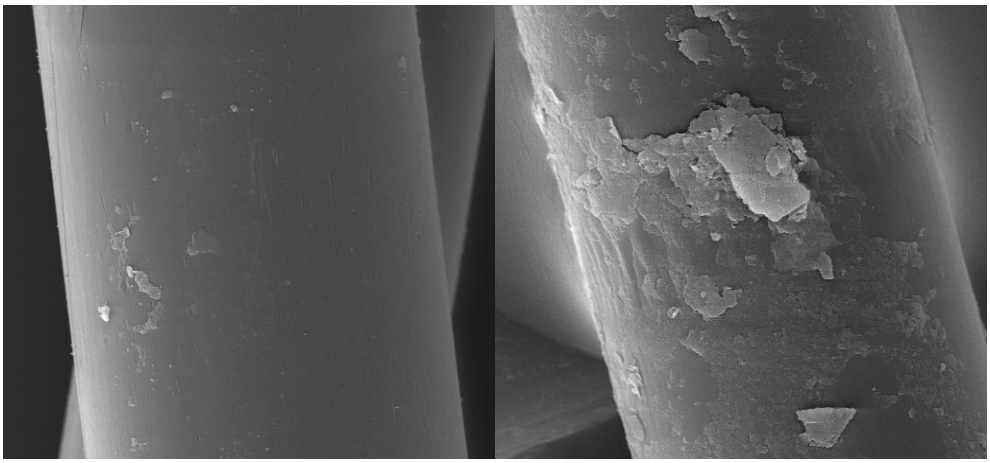

Figura 72. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após operação dos filtros, com aumento de 2000 vezes.

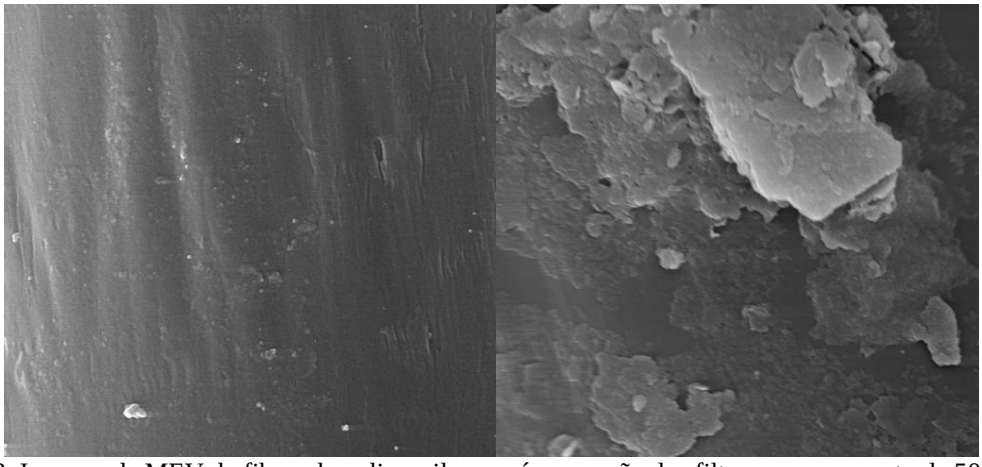

Figura 73. Imagem de MEV de fibras de polipropileno após operação dos filtros, com aumento de 5000 vezes.

Similarmente ao caso das fibras de sisal, neste caso parece ter havido grande retenção de impurezas na superfície das fibras de polipropileno. Isto por um lado mostra efetividade da etapa

de filtração e por outro, necessidade de lavagem, ainda que temporária, de forma mais efetiva (lavagem química) no leito.

5.3.3. Microscopia óptica

A microscopia óptica foi realizada com fibras de sisal, com a finalidade de se obter uma estimativa do diâmetro médio deste tipo de fibra. Foram analisadas 100 diferentes fibras e os valores de diâmetro médio, diâmetro máximo, diâmetro mínimo e desvio padrão são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores médio, máximo, mínimo e desvio padrão do diâmetro das fibras de sisal analisadas em microscópio.

Parâmetro	***Valor***
Diâmetro médio (µm)	198,5
Diâmetro máximo encontrado(µm)	400
Diâmetro mínimo encontrado(µm)	50
Desvio padrão da amostra	75,2

A Figura 74 mostra distribuição de frequência da amostra, mostrando que mais de 50% das fibras possui diâmetro entre 100 e 200 µm, e cerca de 30% possui diâmetro entre 200 e 300 µm.

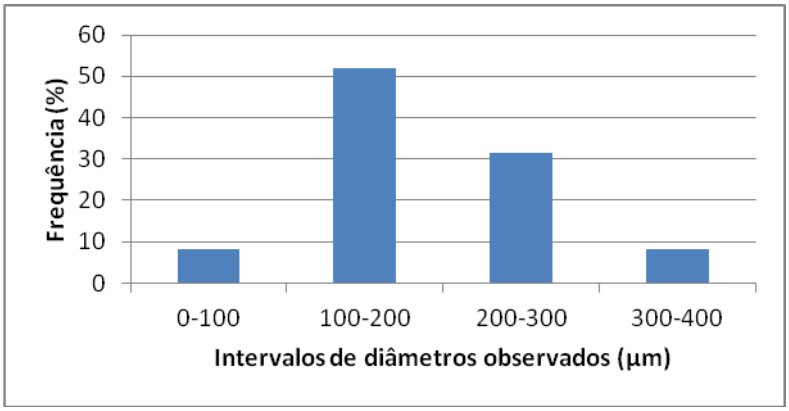

Figura 74. Distribuição de frequência de diâmetros encontrados na amostra de fibras de sisal.

A Figura 75 mostra imagens de fibras observadas em microscópio com mesmo aumento, ilustrando a grande variedade de diâmetros encontrados, como já anteriormente descrito. Ressalta-se, ainda, que foi observada grande variação da seção transversal das fibras, ou seja, diferentes valores de diâmetro eram encontrados ao longo de uma mesma fibra analisada. Ainda, muitas fibras se abriam, o que dificultou seu isolamento e identificação.

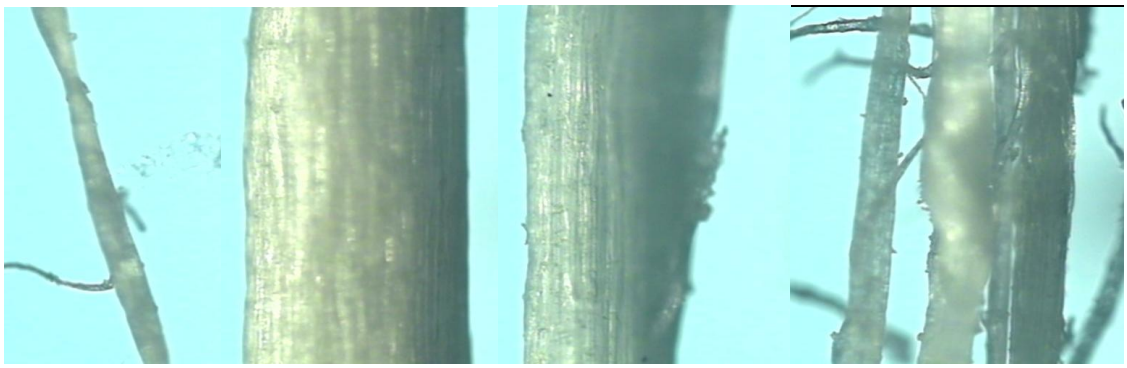

Figura 75. Fibras analisadas em microscópio óptico. Destaque para fibra de pequeno diâmetro, fibra de grande diâmetro, fibra com variação do diâmetro ao longo do comprimento e fibra com aberturas ou separação de fibras menores (da esquerda para a direita).

Com base na avaliação estatística realizada, pode-se assumir que o diâmetro das fibras de sisal é de 198,5 ± 75,2 µm, valor praticamente 7 vezes superior àqueles das fibras de náilon utilizados nos ensaios de Lee *et al*. (2006, 2007, 2008a e 2008b), os quais eram de aproximadamente 30µm. A mesma relação existe para comparação com diâmetro das fibras de polipropileno, o qual é de 34 µm segundo análise em MEV. Isto leva a significativa redução da superfície de contato no caso da utilização de fibras de sisal como material filtrante, o que pode ser uma desvantagem para as fibras de sisal, considerando o processo de filtração em profundidade.

5.3.4. Degradação das fibras

Foi realizada avaliação visual da degradação das fibras de sisal e de polipropileno após sua utilização como meio filtrante durante os 3 meses de operação dos filtros. Não foi verificada

decomposição ou degeneração das fibras, não tendo sido observada alteração no volume destas. Também não parece ter havido alteração da superfície das fibras, como mostrou as micrografias eletrônicas de varredura.

No entanto, estudos mais aprofundados visando a avaliação da degradabilidade e durabilidade dos leitos constituídos de sisal e de polipropileno são recomendados. É importante ressaltar a experiência citada no item 3.8.3, em que se verificou considerável degradação das fibras de sisal após x meses de operação como mantas não tecidas.

5.4. Avaliação da eficiência de clarificação

Tendo como base os diferentes parâmetros variados para avaliação da eficiência de clarificação, foram conduzidos os ensaios segundo a grade proposta no item 4.5.2 e segundo as análises descritas no item 4.5.3. Os resultados dos ensaios são apresentados nos itens a seguir.

5.4.1. Ensaios utilizando fibras de polipropileno e porosidade de leito de 93%

Uma vez que os filtros foram construídos manualmente, ocorrem pequenas variações da porosidade do leito em cada um dos 3 filtros (25, 60 e 100cm), e assim foi obtida porosidade de leito de 92,47±0,90%.

Os itens a seguir mostram os resultados e parâmetros monitorados para as diferentes taxas de estudo.

5.4.1.1. Operação dos filtros com taxa de 20m/h

Para esta taxa de estudo foram acompanhados os parâmetros turbidez e cor da água bruta, pH e temperatura da água coagulada, tendo sido obtidos, respectivamente, os valores 8,10±0,44 uT, 12,74±4,43 uC, 6,49 ±0,12 e 25,27±0,63°C.

Os gráficos das Figuras 76 e 77 mostram, para os três comprimentos de filtro estudados, a evolução da turbidez e da cor do filtrado. As legendas PP100-93%, PP60-93% e PP25-93% correspondem, respectivamente, aos filtros de polipropileno de 100, 60 e 25 cm de comprimento, todos construídos com porosidade de leito de aproximadamente 93%. Os ensaios 1,2 e 3 se referem a repetições das mesmas condições de ensaio (estes ensaios foram realizados em triplicata).

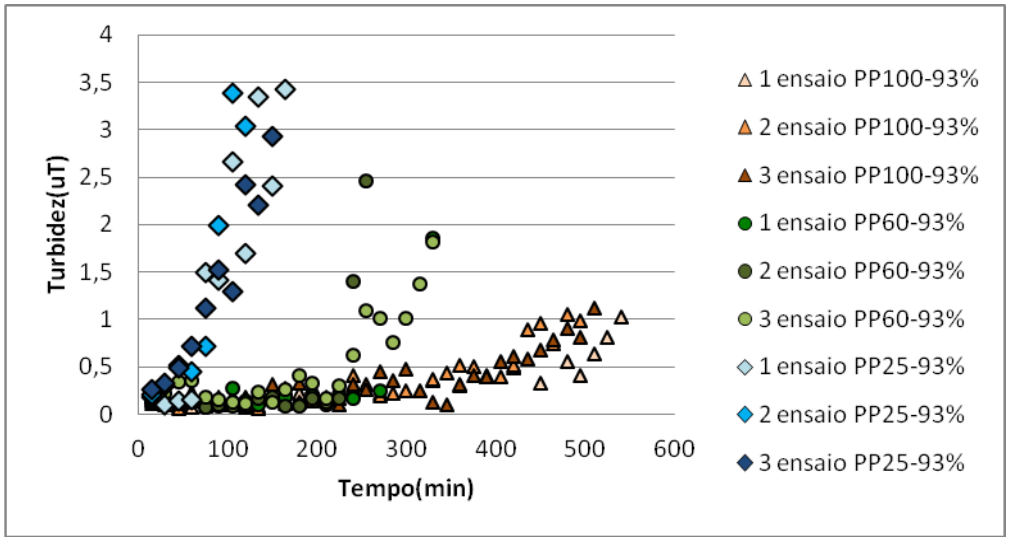

Figura 76. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de polipropileno, utilizando porosidade de leito de 92,47±0,90% e taxa de 20m/h.

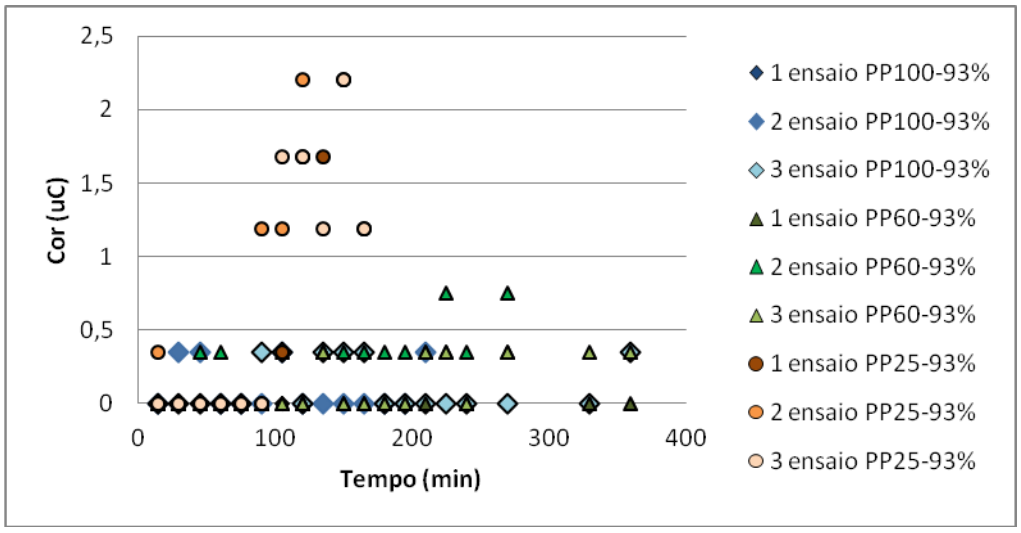

Figura 77. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de polipropileno, utilizando porosidade de leito de 92,47±0,90% e taxa de 20m/h.

Pela análise do gráfico da Figura 76 se percebe que todos os 3 filtros operaram em faixa aceitável de turbidez por diferentes períodos de tempo. No caso do filtro de 25 cm, a carreira durou cerca de 100 minutos; no caso do filtro de 60 cm a carreira durou cerca de 250 minutos, e no caso do filtro de 100 cm a carreira superou os 500 minutos.

Neste sentido, pode-se admitir que o primeiro trecho de 25 cm já promove filtração do afluente, e sua carreira tem duração dependente da ocupação dos espaços existentes ao longo do comprimento do filtro. Uma vez já tendo ocorrido retenção de partículas no caso do filtro menor, o aumento do comprimento do filtro pode aumentar a carreira de filtração uma vez que aumenta os espaços a serem ocupados. No caso dos filtros de polipropileno com porosidade de leito igual a aproximadamente 93%, o comprimento não é essencial, assim, para a obtenção de filtrado de qualidade satisfatório, mas sim para o aumento da carreira.

No caso do parâmetro cor, houve considerável eficiência de remoção em todos os casos (PP25-93%, PP60-93% e PP100-93%), com produção de filtrado com valor de cor inferior a 0,5 uC (eficiência de remoção superior a 96%) durante toda a carreira de filtração.

Os gráficos das Figuras 78, 79 e 80 mostram evolução da perda de carga com o comprimento do leito, em função do tempo de operação.

Pela análise do gráfico da Figura 78, percebe-se que houve utilização do segundo trecho (entre 33 e 66 cm) do filtro a partir da quarta hora e do último trecho (entre 66 e 99 cm) apenas após a sexta hora de operação. Isto pode ser verificado pela observação da mudança de inclinação das curvas. Assim, as curvas referentes aos períodos de operação de 1,2 e 3 horas apresentam paralelismo em relação a curva de inicio de operação. As curvas de operação de 4 horas e acima apresentam trechos não paralelos a curva inicial, o que mostra caminhamento da frente de impurezas para os diferentes trechos. Todos os trechos parecem estar operando após 8 horas de carreira, quando se verificou filtrado com turbidez superior ao limite estabelecido (1

uT). Isto mostra utilização da profundidade do leito para os fins propostos (clarificação da água bruta com produção de filtrado com no máximo 1 uT), com ocorrência do transpasse de turbidez praticamente simultânea ao alcance do limite de perda de carga disponível. Não houve, assim, sub-utilização do comprimento do leito.

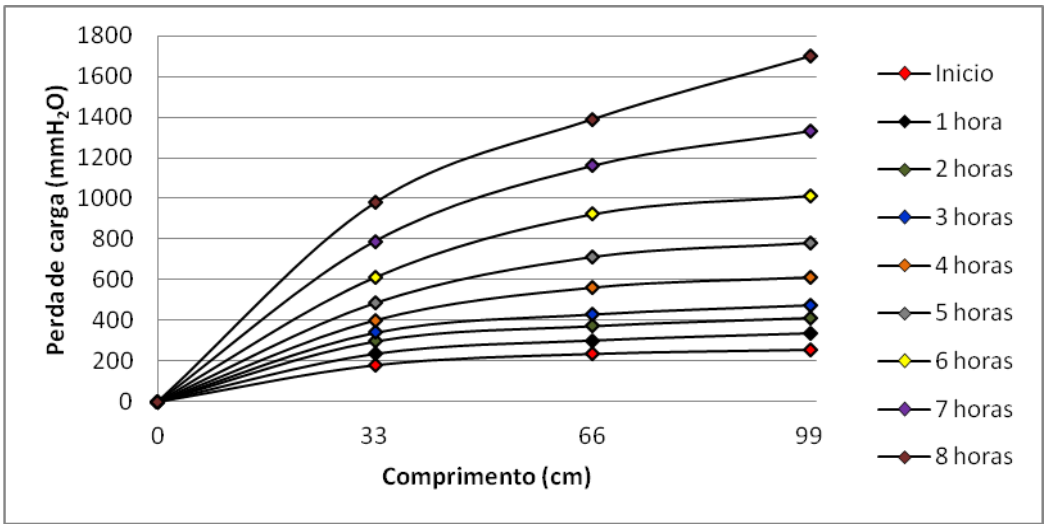

Figura 78. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 100 cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP100-93%), com taxa de 20m/h.

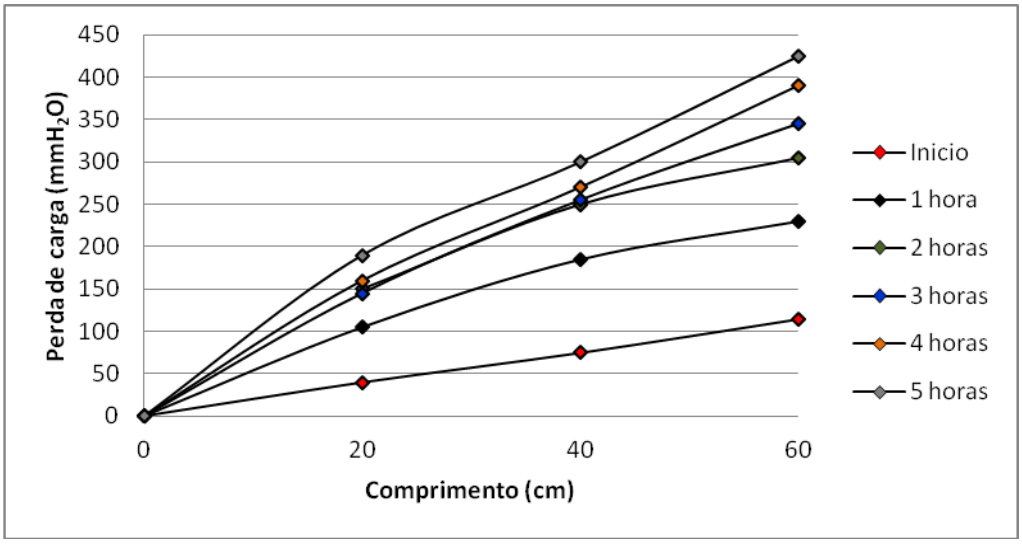

Figura 79. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 60 cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP60-93%), com taxa de 20m/h.

Pela análise do gráfico da Figura 79, observa-se ocupação do segundo trecho (de 20 a 40 cm de profundidade do leito) após a primeira hora, e do último (de 40 a 60 cm) a partir da terceira hora de operação. Na quinta hora de operação foi verificado pequeno aumento em todos os trechos, sem destaque para nenhum, mostrando ocupação dos espaços ao longo de todo o comprimento do leito, em tempo simultâneo à superação do limite de turbidez do filtrado. Assim como no caso do filtro PP100-93%, houve utilização do comprimento do filtro para obtenção de efluente com turbidez limite igual a 1uT.

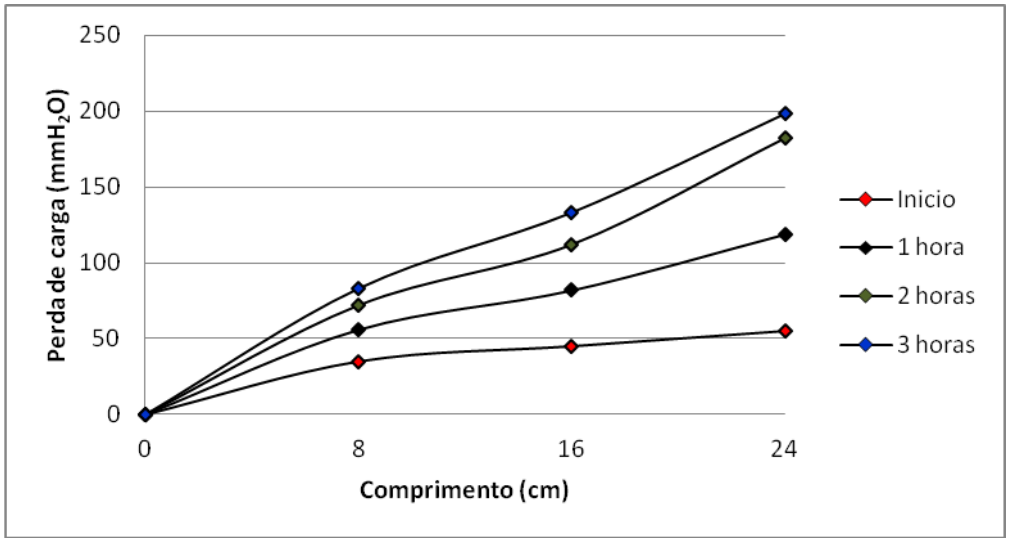

Figura 80. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 25cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP25-93%), com taxa de 20m/h.

Finalmente, no caso do filtro de 25 cm foi verificado comportamento semelhante aos filtros de maior comprimento (PP100-93% e PP60-93%), no entanto em intervalo de tempo menor, como esperado. Foi verificada utilização dos três trechos do filtro já após a primeira hora de operação, quando foi superado o limite de turbidez do efluente. Após este intervalo, ainda houve retenção de partículas especialmente no último trecho.

Retomando a Figura 76, é interessante observar que caso o limite de turbidez estabelecido fosse 0,5 uT – como é atualmente exigido pela Portaria 2914/2011, com prazo para adequação

dos sistemas de tratamento até o ano 2015 – os três filtros também teriam operado satisfatoriamente por diferentes períodos de tempo. No caso do filtro PP25-93%, a carreira duraria cerca de 60 minutos; no caso do filtro PP60-93%, cerca de 300 minutos e, no caso do filtro PP100-93%, cerca de 480 minutos. Em outras palavras, os filtros construídos com fibras de polipropileno, operados com taxas de 20m/h, também podem produzir filtrado com turbidez inferior a 0,5 uT, o que possibilita sua utilização em conformidade com a nova Portaria 2914/2011.

5.4.1.2. Operação dos filtros com taxa de 40m/h

Para esta taxa de estudo foram acompanhados os parâmetros turbidez e cor da água bruta, pH e temperatura da água coagulada, tendo sido obtidos, respectivamente, os valores 8,16±0,36 uT, 14,26±2,21 uC, 6,47 ±0,09 e 25,53±0,52°C.

As Figuras 81 e 82 mostram a evolução da turbidez e da cor do filtrado.

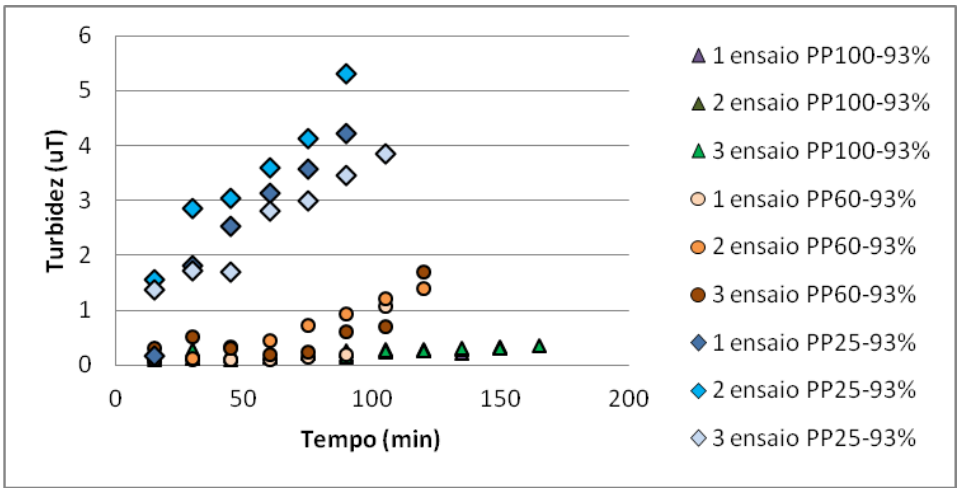

Figura 81. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de polipropileno, utilizando porosidade de leito de 92,47±0,90% e taxa de 40m/h.

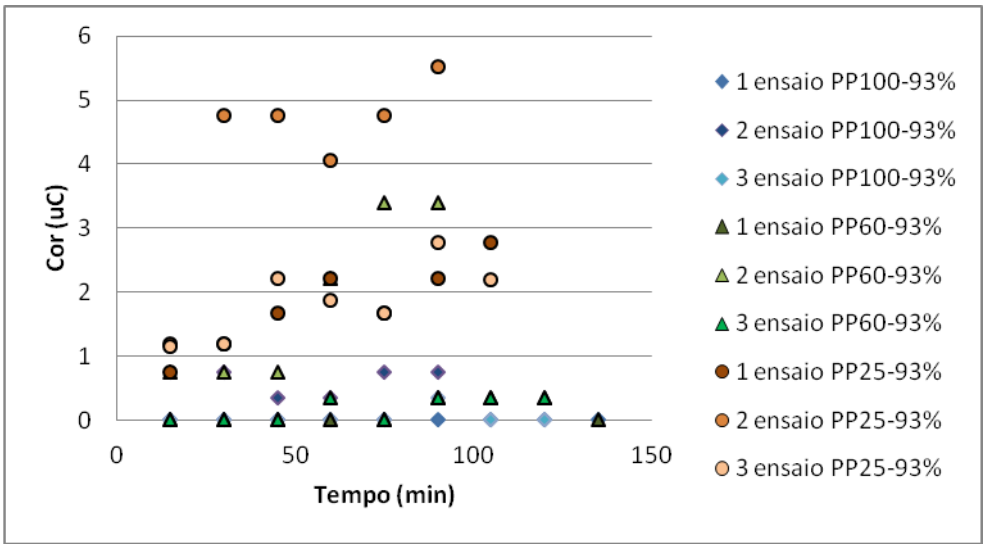

Figura 82. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de polipropileno, utilizando porosidade de leito de 92,47±0,90% e taxa de 40m/h.

Pela análise dos gráficos das Figuras 81 e 82, para a taxa de 40m/h foi observada adequação da qualidade do filtrado para os filtros de 60 e 100 cm, sendo que o filtro de 25 cm sempre apresentou filtrado com turbidez superior a 1uT. No caso do filtro de 60 cm, a carreira teve duração de aproximadamente 100 minutos, sendo que após este tempo houve superação do limite de turbidez no efluente (traspasse).

No caso do filtro de 100 cm, por outro lado, o término da carreira após 150 minutos de operação não se deu por superação do limite de turbidez, mas sim devido à utilização de toda a carga hidráulica, como mostra a Figura 83.

Pela análise da Figura 82, observa-se que houve considerável remoção de cor nos casos em que foi possível estabelecer carreira de filtração, ou seja, nos casos em que a turbidez no efluente foi inferior a 1 uT. Nestes casos, que correspondem aos filtros PP60-93% e PP100-93%, os valores de cor do filtrado não excederam 1 uC durante toda a carreira de filtração, o que corresponde a eficiência de remoção superior a 93%.

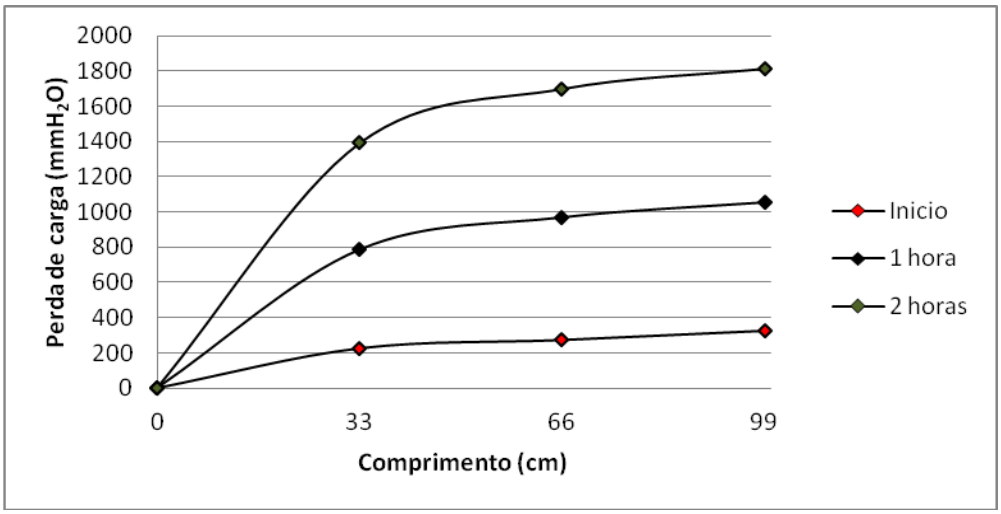

Figura 83. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 100cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP100-93%), com taxa de 40m/h.

Pela análise da Figura 83, percebe-se que após 2 horas de operação a perda de carga total superava os 1800 mmH_2O. Uma vez que a carga hidráulica disponível era de pouco superior a 1800 mm, após 150 minutos de operação houve extravasamento da coluna d'água e necessidade de finalizar a carreira, mesmo não tendo sido alcançado o limite de turbidez do filtrado. Observa-se, também, que não houve caminhamento das impurezas até o ultimo trecho do leito filtrante (66 a 99 cm de profundidade), o qual continua com pequena inclinação, praticamente paralelo à curva inicial.

É evidente, assim, que neste caso do filtro de 100 cm e taxa de 40m/h o fator limitante foi a carga hidráulica disponível, o que levou à necessidade de parar a carreira mesmo sem ter sido utilizado adequadamente o último trecho do filtro e nem atingido o limite de turbidez do filtrado.

Os gráficos das Figuras 84 e 85 mostram a evolução da perda de carga com o comprimento do leito em função do tempo de operação, para os filtros PP60-93% e PP25-93%, respectivamente:

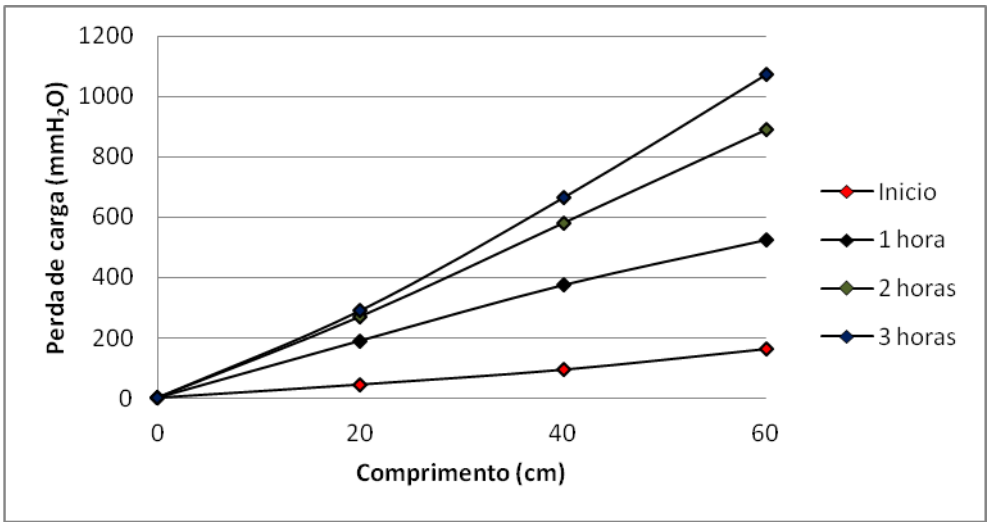

Figura 84. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 60 cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP60-93%), com taxa de 40m/h.

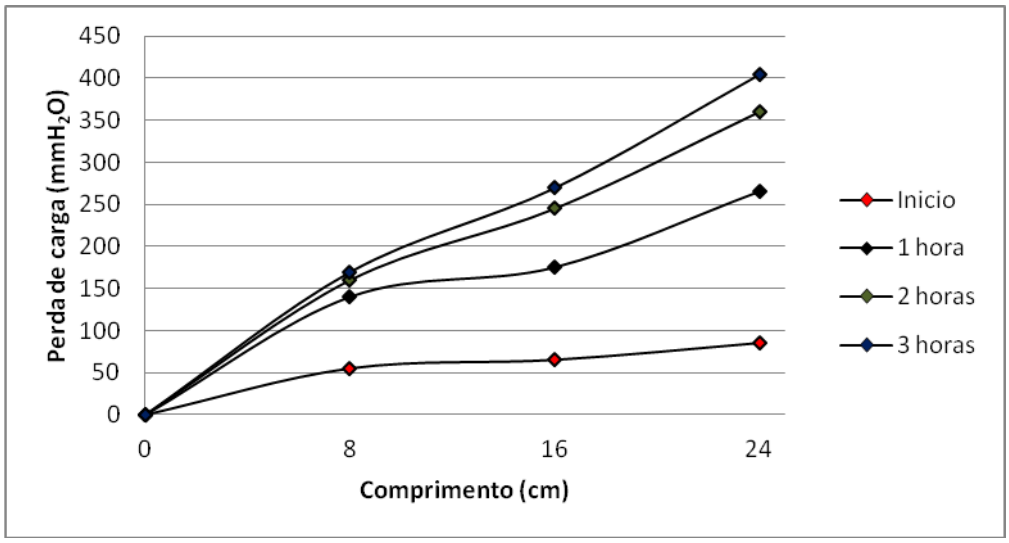

Figura 85. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 25cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP25-93%), com taxa de 40m/h.

Nos casos dos filtros de 60 e 100 cm, foi observado caminhamento da frente de impurezas para o segundo e terceiro trechos, com filtração em profundidade, após 2 horas de operação. Houve, em ambos os casos, ação da profundidade do leito, com caminhamento das partículas ao longo do comprimento das fibras.

Finalmente, é interessante observar, pela análise da Figura 81, que os filtros PP60-93% e PP100-93% também puderam produzir filtrado com turbidez inferior a 0,5 uT, operando com taxa de 40m/h. No caso do filtro de 60 cm, a carreira teria durado mais de 60 minutos e, no caso do filtro de 100 cm, mais de 150 minutos com finalização devido ao limite de perda de carga atingido, similarmente ao caso estudado, em que o limite de turbidez estabelecido foi de 1 uT.

5.4.1.3. Operação dos filtros com taxa de 80m/h

Para esta taxa de estudo, o filtro de comprimento de 100 cm já alcançava o limite de perda de carga após menos de 20 minutos de operação. Portanto, este filtro não foi avaliado para esta taxa. Cabe ressaltar, no entanto, que a turbidez do efluente neste caso ainda estava dentro do limite proposto, mesmo após ter sido atingido o limite de perda de carga. Assim, admite-se que se a montagem tivesse permitido a disponibilização de maior carga hidráulica, haveria possibilidade de operação do filtro de 100 cm por período maior.

Já no caso do filtro de 25 cm, foi atingido o limite de turbidez já na primeira leitura realizada, não sendo conveniente utilizar este filtro nesta taxa de filtração. Assim, para esta taxa somente serão apresentados resultados para o filtro de 60 cm, o qual foi o único capaz de se adequar aos limites propostos (carga hidráulica e turbidez limite).

Para esta taxa de estudo foram acompanhados os parâmetros turbidez e cor da água bruta, pH e temperatura da água coagulada, tendo sido obtidos, respectivamente, os valores 8,29±0,25 uT, 14,26±3,12 uC, 6,52 ±0,11 e 25,42±0,63°C.

Os gráficos das Figuras 86, 87 e 88 mostram a evolução da turbidez, cor e perda de carga ao longo da carreira de filtração, para o filtro de 60 cm (PP60-93%).

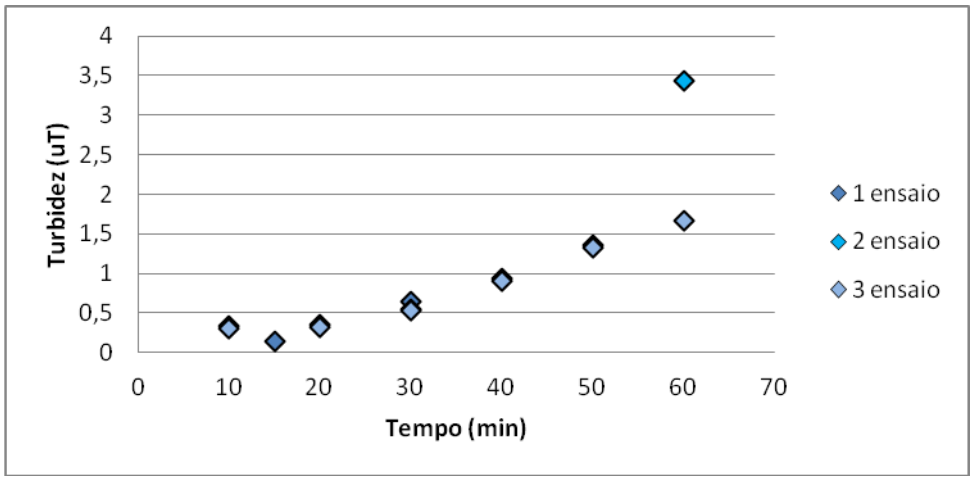

Figura 86. Variação da turbidez com o tempo para o filtro de 60cm de comprimento com leito de fibras de polipropileno, utilizando porosidade de leito de 92,47±0,90% e taxa de 80m/h.

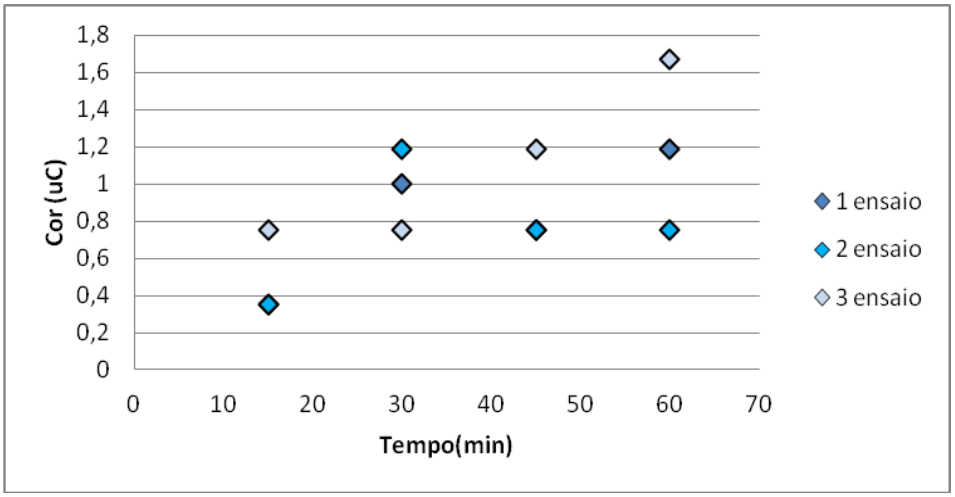

Figura 87. Variação da cor com o tempo para o filtro de 60cm de comprimento com leito de fibras de polipropileno, utilizando porosidade de leito de 92,47±0,90% e taxa de 80m/h.

Neste caso, houve operação do filtro de 60 cm por cerca de 40 minutos, período no qual a turbidez do efluente foi mantida em menos de 1 uT. Após este período de tempo, já havia retenção de impurezas no último trecho do filtro (de 40 a 60 cm). Durante a carreira de filtração, também foi verificada considerável remoção de cor, da ordem de 92%, com produção de efluente com até 1,2 uC.

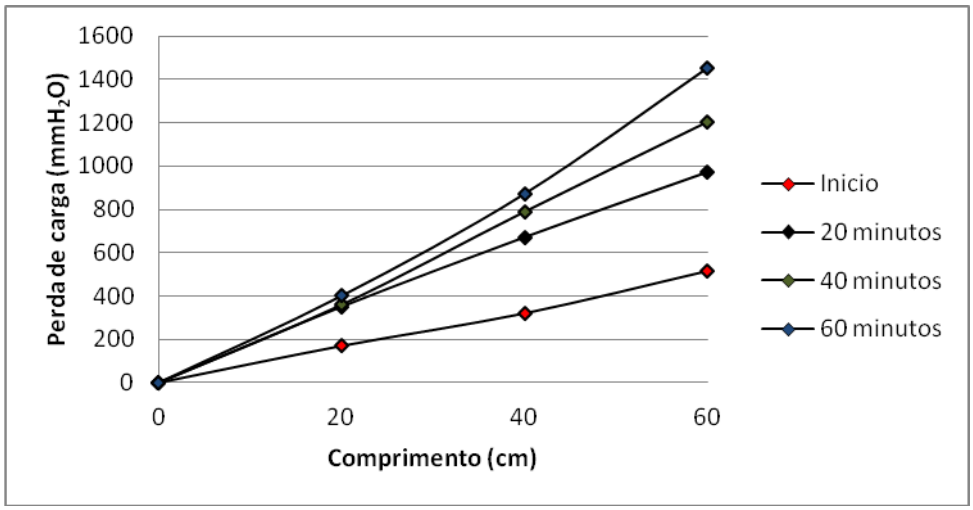

Figura 88. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de polipropileno com L igual a 60 cm e 92,47±0,90% de porosidade (PP60-93%), com taxa de 80m/h.

É interessante observar, pela análise da Figura 86, que o filtro PP60-93% produziu filtrado com turbidez inferior a 0,5 uT por aproximadamente 30 minutos, o que mostra a possibilidade de sua utilização também em casos em que sejam requeridos padrões mais restritivos, operando a taxa de 80m/h. Ressalta-se que caso tivesse sido disponibilizada maior carga hidráulica ao filtro PP100-93%, este seria capaz de produzir filtrado com turbidez inferior a 0,5 uT por período ainda maior.

5.4.1.4. Considerações sobre ensaios utilizando polipropileno

Os resultados apresentados neste estudo mostraram que os filtros com fibras flexíveis de polipropileno, de forma análoga aos filtros com fibras de poliamida estudados por Lee *et al*. (2006, 2007, 2008a), apresentaram elevada eficiência de remoção de cor e turbidez desse tipo de água de estudo. Esta compatibilidade entre os resultados encontrados pode ser associada ao diâmetro praticamente igual das fibras de polipropileno e de poliamida (cerca de 30µm), o qual é fator de grande importância no processo de filtração.

Ressalta-se que a semelhança entre os resultados (eficiências obtidas, tempo de duração de carreira e perda de carga de final de carreira) foi considerável mesmo tendo em vista as diferenças existentes nos métodos construtivos adotados e na natureza da água de alimentação utilizada (sintética neste estudo e superficial no caso dos autores citados).

Neste sentido, todos os filtros construídos com polipropileno (nos comprimentos de 25, 60 e 100 cm) produziram filtrado com turbidez inferior a 1 uT quando foi aplicada a taxa de 20m/h, e os filtros PP100-93% e PP60-93% também operaram satisfatoriamente quando se aplicaram as taxas de 40 e 80 m/h. É interessante observar que os filtros PP100-93% e PP60-93% também foram capazes de produzir filtrado com turbidez inferior a 0,5 uT para todas as taxas estudadas, mostrando possibilidade de utilização destes filtros mesmo quando se requer melhor qualidade do filtrado produzido.

Sem dúvida, em estudos futuros seria interessante a modificação da instalação piloto de forma a permitir a adoção de maiores cargas hidráulicas para operação do filtro com comprimento de fibras iguais ou maiores que 100 cm.

É importante observar que nesta pesquisa se utilizou como coagulante sulfato de alumínio na dosagem de 22,5 mg/L, enquanto na maioria das pesquisas encontradas na literatura foi utilizado o cloreto de polialuminio (PAC), na dosagem de 1 mg/L. Este é um fator que diferencia as pesquisas realizadas e pode ser tema de estudos futuros, em que se busque diminuir a dosagem de coagulante aplicada nos filtros estudados através do emprego de outros tipos de coagulante. Admite-se também que a diminuição da dosagem de coagulante possa aumentar as carreiras de filtração.

Os resultados dessa etapa de estudo (com filtros de fibras de polipropileno) serão posteriormente comparados aos resultados obtidos com emprego de filtros de fibras de sisal.

5.4.2. Ensaios utilizando fibras de sisal

5.4.2.1. Resultados de ensaios utilizando sisal e porosidade de leito de 93%

Uma vez que os filtros foram construídos manualmente, ocorrem pequenas variações da porosidade do leito em cada um dos 3 filtros (25, 60 e 100cm), e assim foi obtida porosidade de leito de 92,43±0,75%.

Os itens a seguir mostram os resultados e parâmetros monitorados para as diferentes taxas de estudo.

5.4.2.1.1. Operação dos filtros com 93% de porosidade e taxa de 20m/h

A água coagulada foi monitorada a cada 15 minutos para controle e manutenção de temperatura e pH. Assim foi mantido pH em 6,44±0.09 e temperatura em 25,60±0.52°C para estes ensaios com taxa de filtração de 20m/h.

Os gráficos das Figuras 89 e 90 mostram a variação da turbidez e da cor do filtrado ao longo do ensaio. Os valores de turbidez e cor do afluente foram 8,1±0,7 uT e 10,2±2,3 uC.

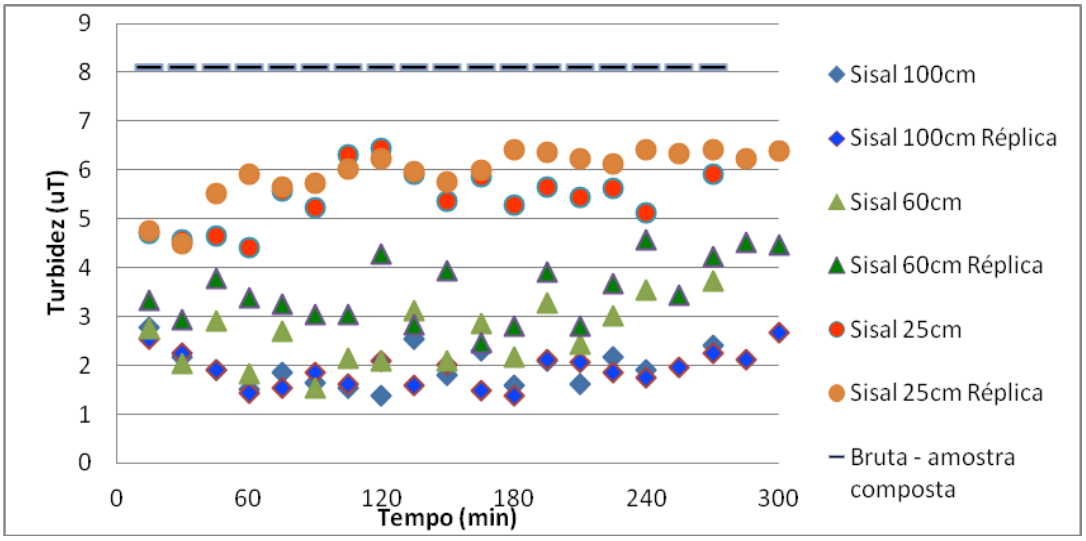

Figura 89. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 92,43±0,75%. e taxa de 20m/h.

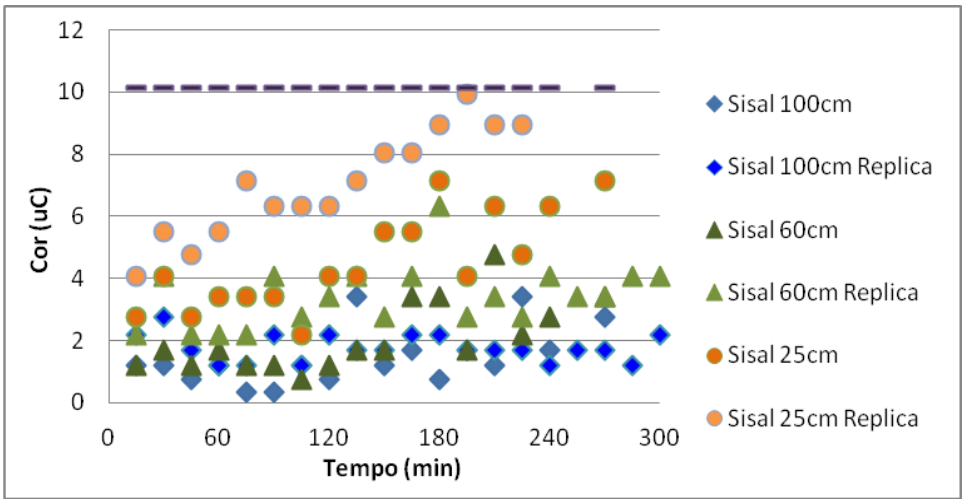

Figura 90. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 92,43±0,75%. e taxa de 20m/h.

Pela análise dos gráficos pode-se afirmar que em nenhum dos filtros estudados para esta taxa de filtração foi verificado filtrado com turbidez inferior a 1 uT (critério de qualidade adotado para o presente estudo). As eficiências de remoção foram elevadas, mas ainda não foram satisfatórias. Ainda que para cor se tenha verificado remoção de até 95% (no caso do filtro S100-93%), para turbidez a remoção ficou abaixo de 80%.

Os gráficos das Figuras 91 e 92 mostram a evolução da perda de carga em cada filtro para os dois ensaios realizados sob a condição citada (20m/h e porosidade de 93%). Como para esta condição foi verificada inadequação do filtrado ao limite de turbidez estabelecido previamente, optou-se por realizar medições apenas da perda de carga total, a fim de realizar acompanhamento geral dos processos e verificação de comportamentos esperados em teoria.

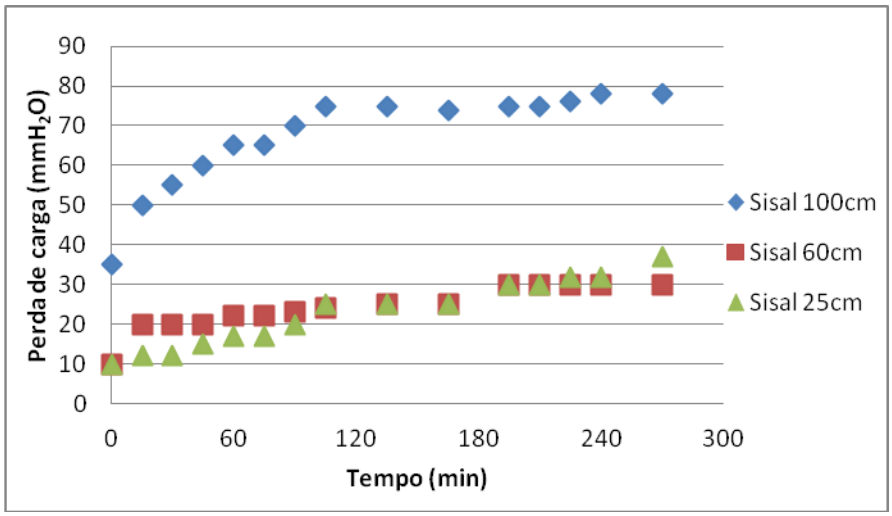

Figura 91. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do tempo de operação para 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) constituídos de fibras de sisal com porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 20m/h (ensaio 1).

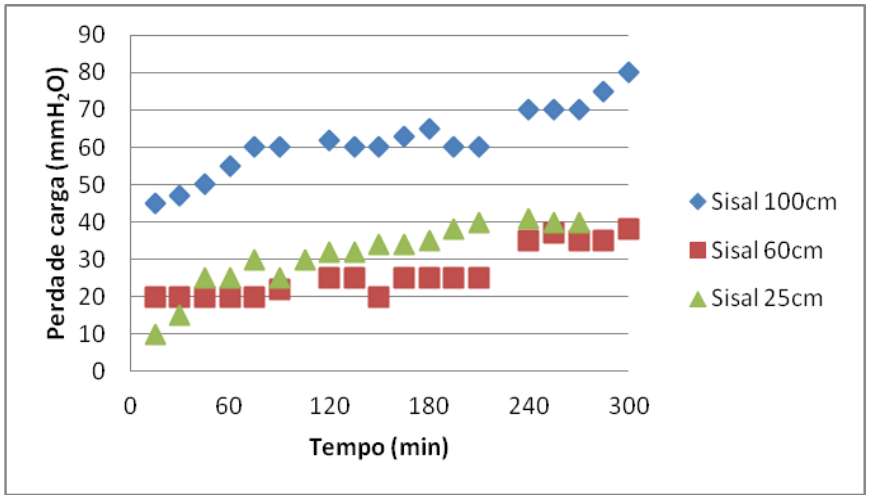

Figura 92. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do tempo de operação para 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) constituídos de fibras de sisal com porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 20m/h (ensaio 2).

Como é possível observar, após 300 minutos de operação com taxa de 20m/h, as perdas de carga foram baixas (máximo de 80 mmH_2O para filtro com L=100cm) nos filtros utilizando sisal como meio filtrante e porosidade de aproximadamente 93%. Ainda que a qualidade do filtrado não tenha se adequado ao limite estabelecido de turbidez, a carga hidráulica necessária para promover alguma clarificação da água (turbidez do filtrado entre 1 e 2uT em grande parte

do tempo da carreira do filtro de 100cm) possui ordem de grandeza muito baixa (entre 0,04 e 0,08 mH_2O), o que pode sugerir potencialidade para ser utilizado como unidade de pré-filtração de águas com elevadas concentrações de sólidos em suspensão, desde que haja associação com outro filtro para polimento final.

É interessante observar que, curiosamente, o filtro S25-93% desde o inicio apresentou perda de carga de mesmo nível que o filtro S60-93%. Tal discrepância é difícil de ser explicada, tendo em vista que a turbidez no efluente do filtro S60-93% foi, na maior parte do tempo, inferior àquela do filtro S25-93%, demonstrando que houve maior retenção de material em suspensão no primeiro. Portanto, esperavam-se maiores valores de perda de carga nesse filtro (S60-93%) comparada ao S25-93%.

Em relação aos filtros S100-93% e S60-93%, por outro lado, foi observada proporção esperada, com perda de carga diretamente proporcional ao comprimento do leito filtrante. Assim, sendo o filtro S100-93% de comprimento praticamente igual a duas vezes o do filtro S60-93%, observou-se naquele perda de carga desde o inicio de aproximadamente o dobro deste. É interessante observar, ainda, que ambas as perdas de carga do filtro S100-93% e do filtro S60-93% dobraram, o que mostra que o filtro S100-93% reteve massa de partículas significativamente maior do que o filtro S60-93%, justificando assim a melhor qualidade do efluente no primeiro caso.

Tendo em vista a clarificação não satisfatória da água de estudo promovida por filtros de sisal com porosidade de leito de cerca de 93%, não se julgou conveniente aumentar a taxa de filtração, como era previsto neste estudo. Contrariamente, foi reduzida a taxa para avaliar se essa medida era capaz de produzir aumento da eficiência de remoção de partículas em suspensão. Desta maneira, foi avaliada na próxima etapa a taxa de 10m/h.

5.4.2.1.2. Operação dos filtros com 93% de porosidade e taxa de 10m/h

A água coagulada foi monitorada a cada 15 minutos para controle e manutenção de temperatura e pH. Assim foi mantido pH em 6.39±0.11 e temperatura em 25.28±0.75°C.

Os gráficos das Figuras 93 e 94 mostram evolução de cor e turbidez do filtrado para este experimento. Os valores de turbidez e cor do afluente foram 8,1±0,7 uT e 14,3±3,1 uC.

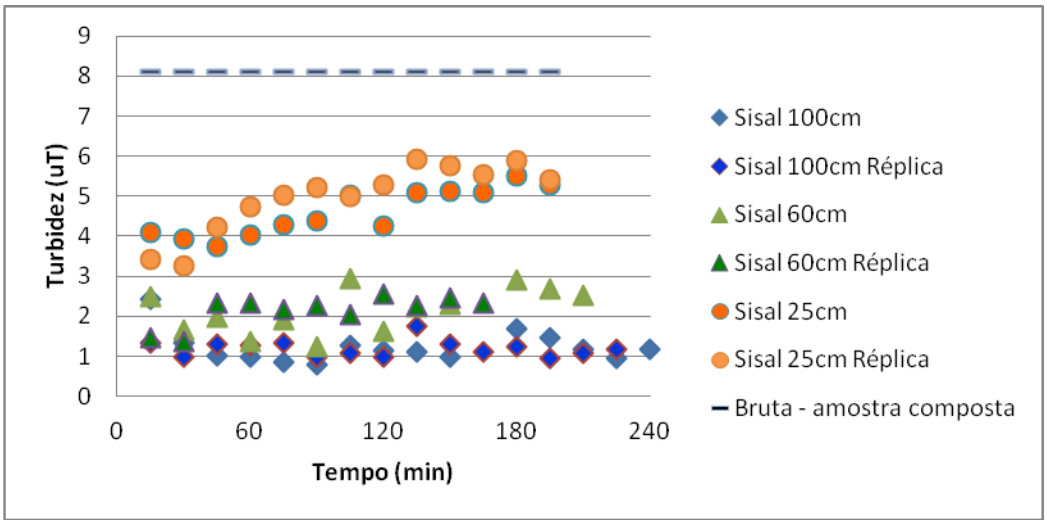

Figura 93. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 92,43±0,75%. e taxa de 10m/h.

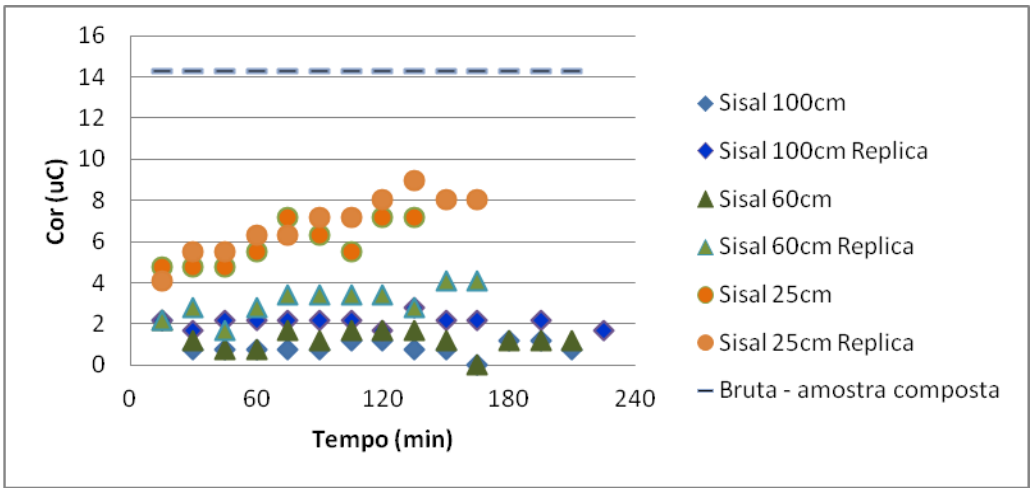

Figura 94. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 92,43±0,75%. e taxa de 10m/h.

Pela análise dos gráficos da Figura 89 e 93 (referentes às taxas de 20 e 10m/h), pode-se afirmar que com a redução da taxa de filtração nos filtros houve redução da turbidez efluente aos mesmos. No caso do filtro de 100 cm, a turbidez efluente atingiu por vezes valores inferiores a 1uT, no entanto por períodos de tempo curtíssimos, não sendo possível admitir uma carreira de filtração nesta faixa de turbidez. De forma lógica, imaginou-se que se reduzindo ainda mais a taxa de filtração, haveria adequação do efluente. Ainda que taxas menores não compensem por serem inferiores aos convencionais filtros rápidos de areia, é interessante realizar este estudo a fim de verificar se é possível atingir clarificação satisfatória utilizando sisal como meio filtrante e porosidade de leito de 92,43±0,75%.

Os gráficos a seguir mostram a evolução da perda de carga para esta taxa de 10m/h. Os valores se reduziram consideravelmente (para praticamente a metade daqueles obtidos para taxa de 20m/h), como era de se esperar. Mais uma vez, os valores de perda de carga do filtro de 25 cm se mostraram semelhantes aos do filtro de 60 cm.

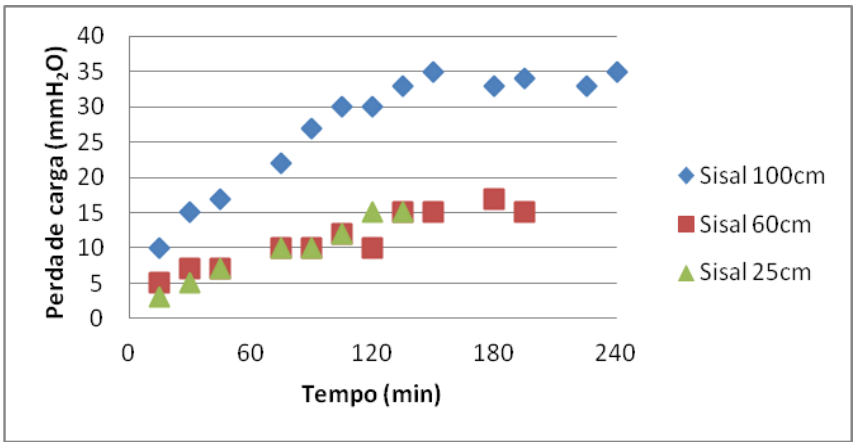

Figura 95. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do tempo de operação para 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) constituídos de fibras de sisal com porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 10m/h (ensaio 1).

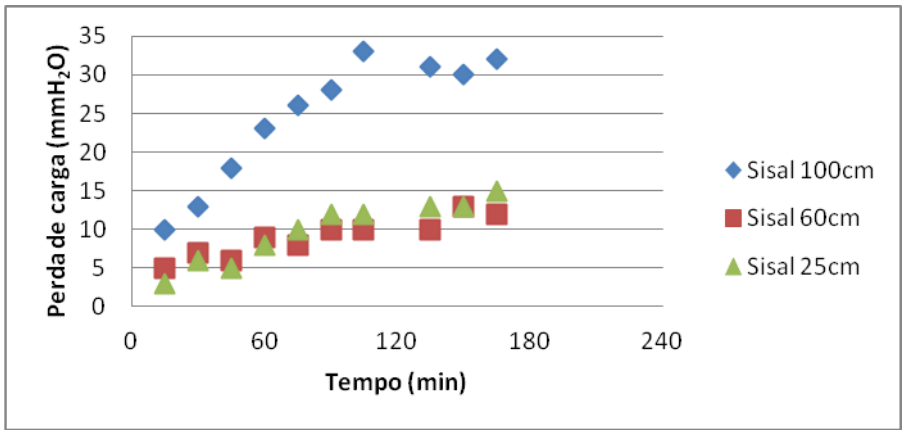

Figura 96. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do tempo de operação para 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) constituídos de fibras de sisal com porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 10m/h (ensaio 2).

5.4.2.1.3. Operação dos filtros com 93% de porosidade e taxa de 5m/h

A água coagulada foi monitorada a cada 15 minutos para controle e manutenção de temperatura e pH. Assim foi mantido pH em 6,52±0.12 e temperatura em 25,12±0.35°C. Os gráficos das Figuras 97 e 98 mostram evolução dos parâmetros de cor e turbidez do filtrado para este experimento utilizando taxa de 5m/h. Os valores de turbidez e cor do afluente foram 8,1±0,7 uT e 14,3±3,1 uC.

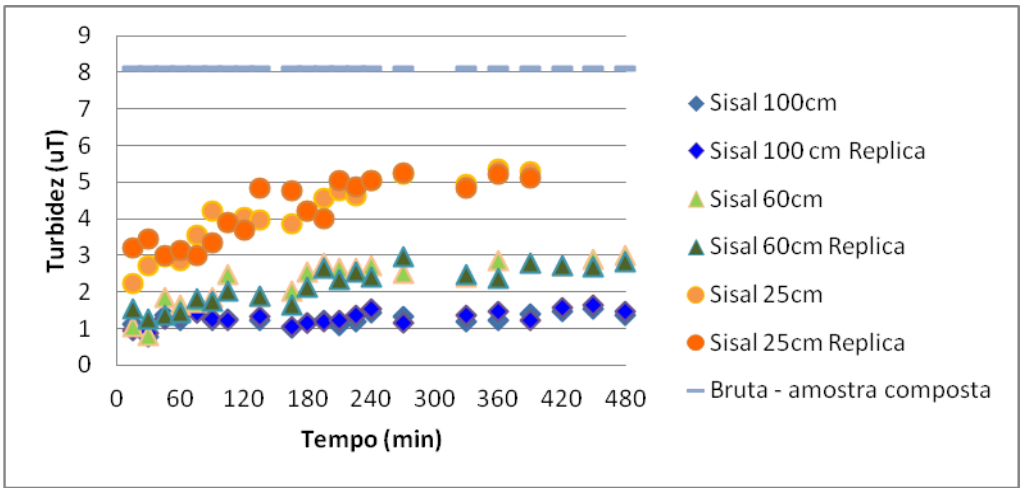

Figura 97. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 5m/h.

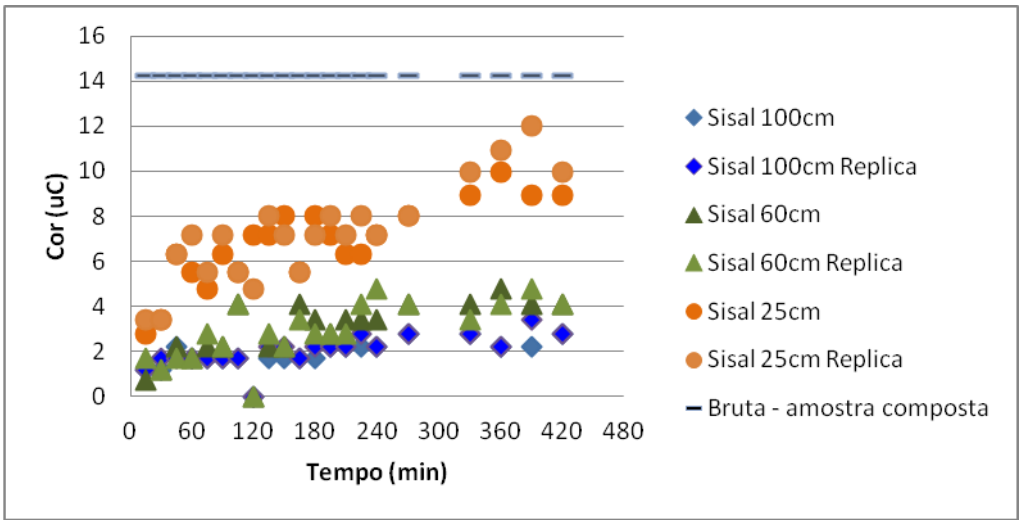

Figura 98. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 92,43±0,75%. e taxa de 5m/h.

As Figuras 99 e 100 mostram a evolução da perda de carga para os 3 filtros operados com taxa de filtração de 5m/h.

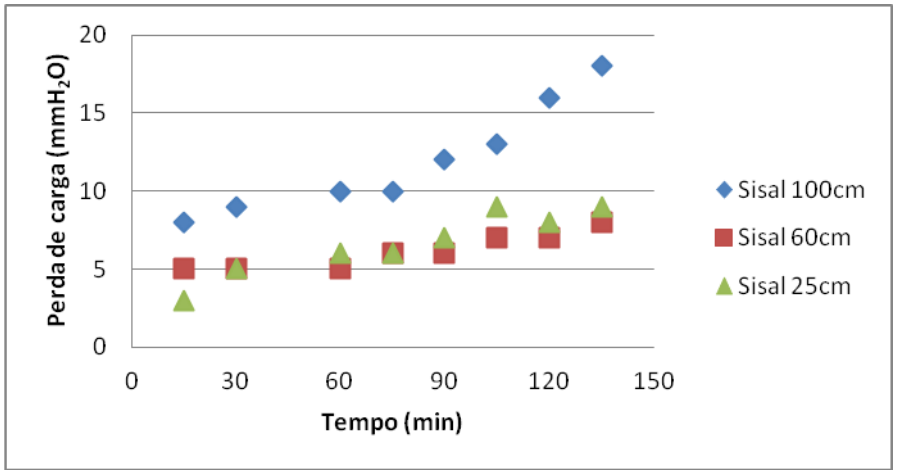

Figura 99. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do tempo de operação para 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) constituídos de fibras de sisal com porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 5m/h (ensaio1).

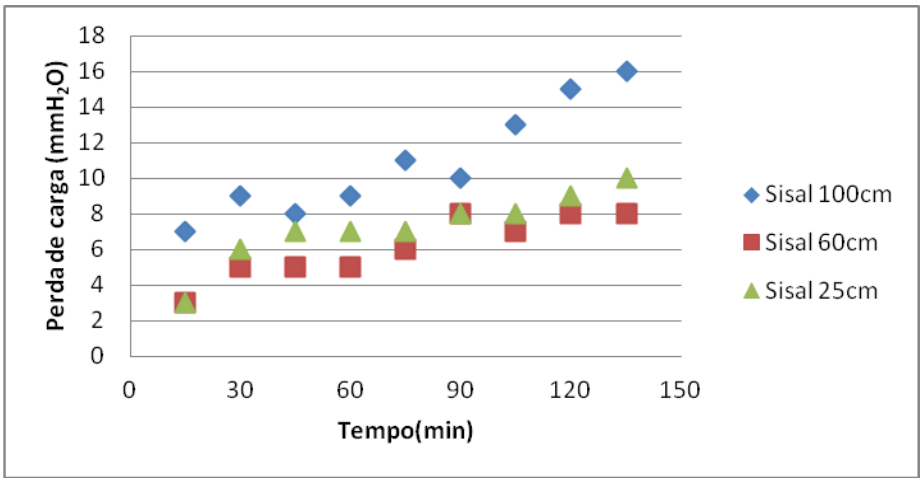

Figura 100. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do tempo de operação para 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) constituídos de fibras de sisal com porosidade de leito de 92,43±0,75% e taxa de 5m/h (ensaio2).

Pela análise do gráfico da Figura 97, é possível perceber que reduzindo ainda mais a taxa de filtração para 5m/h, verificou-se melhoria na eficiência de remoção de turbidez, no entanto não a ponto de se atingir valores residuais do parâmetro menores que 1uT. Com isso, conclui-se que mesmo impondo-se redução das velocidades intersticiais, não foi possível reter com maior eficiência as partículas em meio filtrante composto de sisal, com a porosidade de cerca de 93%.

5.4.2.1.4. Considerações e diretrizes para próxima etapa

A Figura 101 mostra evolução da turbidez efluente ao filtro com aproximadamente 93% de porosidade e 100 cm de comprimento de leito – condição em que se verificou melhor clarificação do filtrado – , operado com taxas de 20, 10 e 5 m/h.

Como é possível perceber pela análise do gráfico, diminuindo a taxa de operação do filtro de 20m/h para 5m/h há certa melhoria na clarificação do afluente, ou seja, redução na turbidez do efluente. No entanto essa redução não foi tão marcante quando se diminuiu a taxa de 10m/h para 5m/h, sendo que o filtrado apresenta praticamente a mesma turbidez para ambas as taxas.

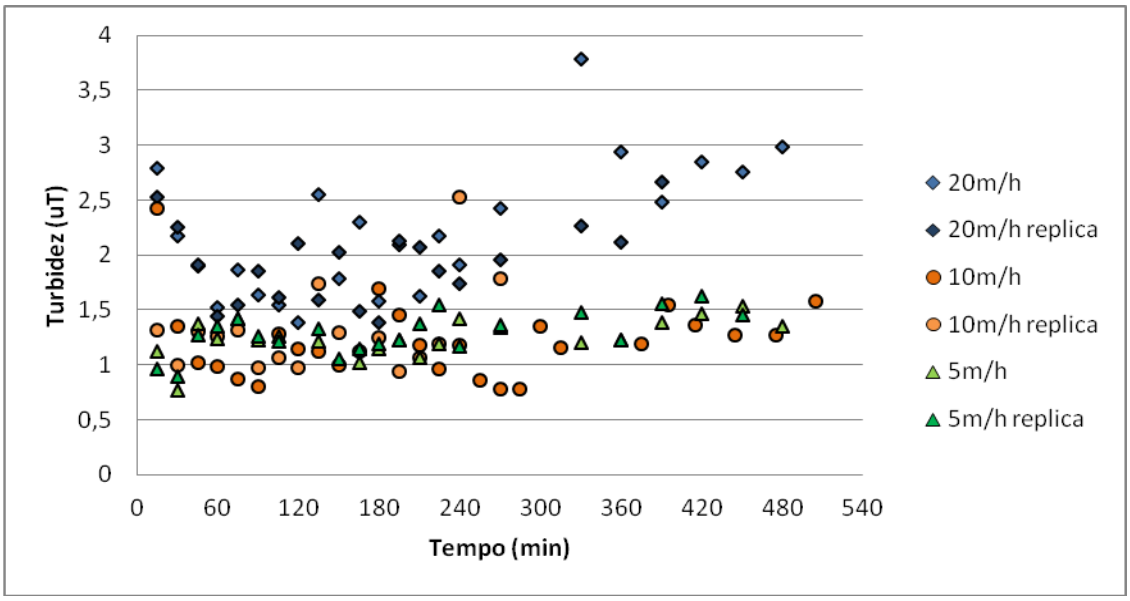

Figura 101. Turbidez efluente referente ao filtro de sisal de comprimento 100cm, para as taxas de 20m/h, 10m/h e 5m/h.

Conforme descrito no capítulo anterior (Material e Métodos) na etapa subsequente do estudo foi utilizado leito de sisal com porosidade de aproximadamente 85%, com a finalidade de avaliar a possibilidade de se obter melhor eficiência de remoção de sólidos em suspensão com esta porosidade e empregando taxas de pelo menos 20m/h.

5.4.2.2. Resultados de ensaios utilizando porosidade de leito de 85%

Para estes ensaios foram manufaturados novos leitos de fibras de sisal (comprimentos de 25, 60 e 100 cm) de forma a apresentarem porosidade de leito na faixa de 84,49±0,01%. A seguir se apresentam os resultados obtidos para as diferentes taxas estudadas.

5.4.2.2.1. Operação dos filtros com 85% de porosidade e taxa de 20m/h

Neste ensaio o pH foi mantido em 6,59±0,10, e a temperatura em 24,80±0,48°C. Os gráficos das Figuras 102 e 103 mostram a evolução dos parâmetros de cor e turbidez do filtrado, para os diferentes filtros estudados.

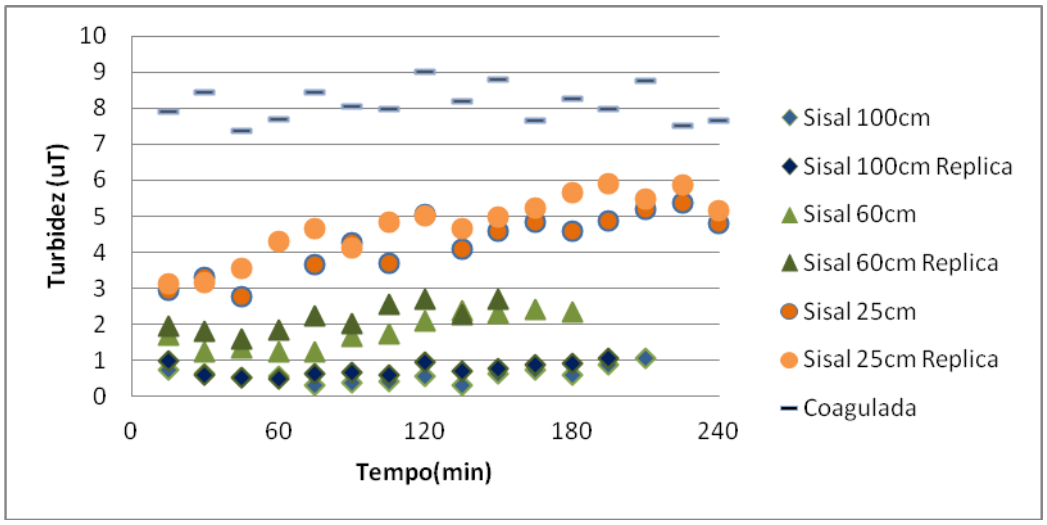

Figura 102. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01%. e taxa de 20m/h.

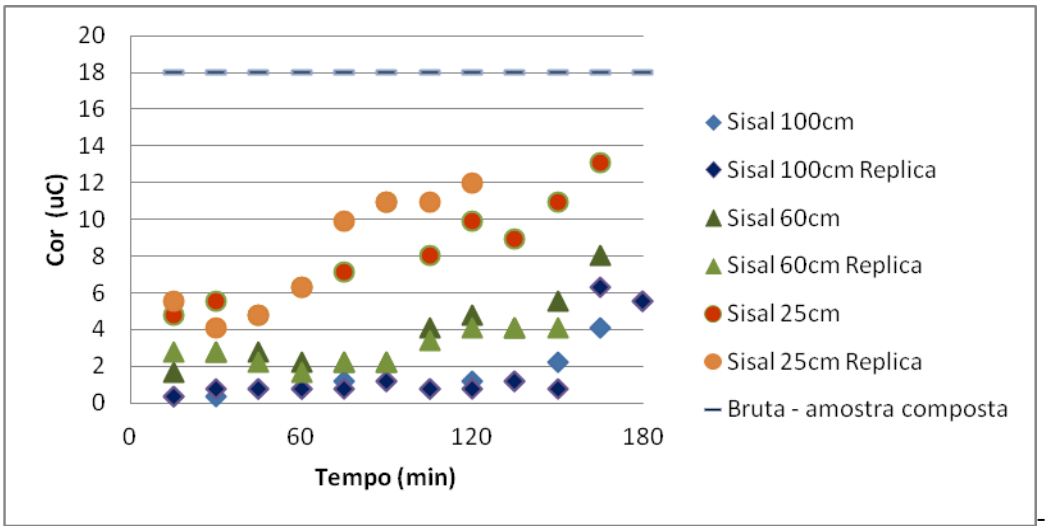

Figura 103. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01%. e taxa de 20m/h.

Observa-se que somente o filtro S100-85% foi capaz de produzir filtrado com turbidez inferior a 1 uT, operando com taxa de 20 m/h. Ressalta-se, ainda, que caso fosse adotado limite de 0,5 uT, este mesmo filtro não produziria filtrado com qualidade satisfatória, uma vez que

durante praticamente toda a carreira de filtração a turbidez do efluente se encontrou entre 0,5 e 1 uT.

Pela análise da Figura 103, percebe-se que houve eficiência de remoção de cor superior a 93% no caso do filtro S100-85%, durante toda a carreira de filtração. Houve, assim, produção de filtrado com até 1,2 uC.

A seguir se verificam os gráficos de frente de impurezas dos 3 filtros estudados, os quais foram construídos com base em operação durante 5 horas, correspondente ao primeiro ensaio realizado. A réplica do ensaio apresentou mesmo comportamento e valores muito próximos a estes apresentados, portanto optou-se por construir o gráfico de evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação, com base nos dados do primeiro ensaio, o qual foi acompanhado por período maior de tempo.

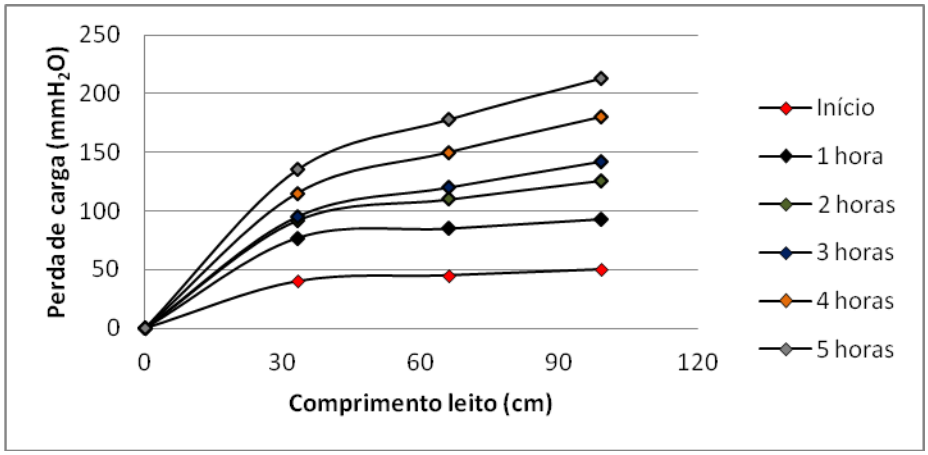

Figura 104. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 100cm e 85% de porosidade (S100-85%).

Para o filtro de 100 cm de comprimento de leito (S100-85%), praticamente toda a perda de carga ocorreu no primeiro trecho (33 cm) no início da operação, quando todo o leito estava limpo. Isto provavelmente deveu-se ao fato de o sistema construtivo do filtro levar à maior concentração de fibras na entrada do leito (local em que as fibras são dobradas para sua fixação à

tela que serve de suporte às mesmas). Assim, provavelmente ocorreu certa diminuição da porosidade no início deste primeiro trecho, o que levou a uma maior retenção de partículas com consequente aumento da perda de carga no mesmo.

Na primeira hora há retenção de impurezas ainda apenas no primeiro trecho do leito (0 a 33 cm). Entretanto, a partir da segunda hora começa a haver penetração das impurezas na segunda (entre 33 e 66 cm) e terceira camadas (entre 66 e 100 cm). Desta maneira, como esperado, ocorre filtração em profundidade, com utilização de todas as camadas do meio filtrante após 5 horas de operação.

É importante observar que mesmo o último trecho apresenta retenção significativa a partir da segunda hora de operação, o que pode justificar a alta eficiência de remoção de cor e turbidez, permitindo que fosse atingido níveis em conformidade com o limite estabelecido, somente no caso do filtro de 100 cm de comprimento (S100-85%). Neste sentido, foi verificado que o comprimento foi fator limitante na obtenção de filtrado de qualidade satisfatória para leitos de comprimento inferior a 100 cm.

Para o caso do filtro S100-85%, verificou-se superação dos valores de turbidez em relação ao valor limite estabelecido (1uT) , por volta dos 180 minutos (3 horas) de operação (ver Figuras 102 e 103). Desta maneira, é interessante buscar alternativa que promova melhor aproveitamento de todos os trechos e maior utilização da carga hidráulica disponível, a fim de que o valor limite de perda de carga ocorra pouco antes do traspasse (situação de máximo aproveitamento do leito). Essa configuração seria muito provavelmente alcançada com a diminuição da porosidade e aumento do comprimento do leito, avaliação que não foi realizada neste estudo, mas que será posteriormente citada como sugestão de próximos trabalhos.

Por outro lado, em relação ao filtro de 60 cm (S60-85%), cujo gráfico de evolução da perda de carga em função do comprimento do leito e do tempo de operação é apresentado na

Figura 105, verifica-se que começa a haver penetração na segunda (entre 20 e 40 cm) e terceira (entre 40 e 60 cm) camadas a partir da terceira hora de operação. Isto pode ser comprovado pela observação da alteração da inclinação das retas (aumento da inclinação ou coeficiente angular em relação ao leito limpo) referentes aos trechos acima de 20 cm após 3 horas de operação. No entanto, mesmo após as 5 horas de operação, parece ter havido aproveitamento do primeiro e segundo trechos, mas ainda sem retenção significativa de partículas no último trecho (40 a 60 cm).

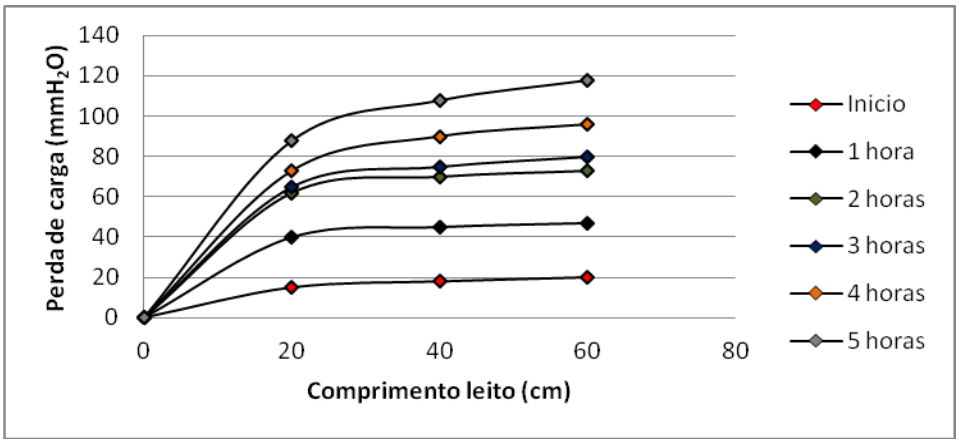

Figura 105. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 60cm e 85% de porosidade (S60-85%)

Foram verificados valores de perda de carga unitária (J) similares para cada trecho dos filtros S100-85% e S60-85%, o que permite admitir que ambos possuem padronização e similaridade. Neste sentido, uma vez que os valores de J são próximos, encontra-se maior retenção de partículas, em termos absolutos, no caso do filtro S100-85%, logicamente devido ao maior comprimento do leito do mesmo. Mais uma vez, comprova-se a importância do comprimento neste tipo de filtro, com valores inferiores a 100 cm nesta pesquisa.

No caso especifico de filtro de 25 cm (vide Figura 106), foi observado que o trecho final (entre 16 e 24cm) apresentou perda de carga mais significativa que o trecho intermediário (entre

8 e 16cm), em todos os intervalos de tempo. Para esta taxa estudada, apenas de forma especulativa, isto talvez possa ser atribuído ao fato de as partículas ainda não terem sofrido floculação significativa nos primeiros trechos, havendo retenção de partículas maiores apenas após o segundo trecho. Este fato não pôde ser percebido nos demais filtros uma vez que nestes as primeiras tomadas de pressão estão localizadas a 20 e 33 cm, e portanto em comprimento suficientemente longo para que tenha ocorrido floculação das partículas e consequentemente retenção a partir do segundo trecho. Mais uma vez, os altos valores de perda de carga encontrados no primeiro trecho talvez possam ser devidos à ação localizada dos elementos de entrada, estreitamento, estrutura para fixação das fibras e maior concentração das mesmas no inicio.

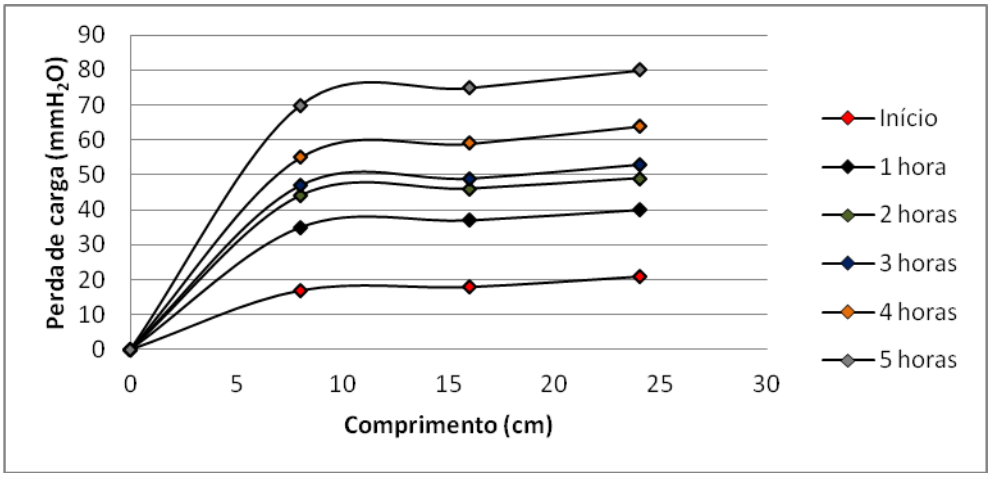

Figura 106. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 25cm e 85% de porosidade (S25-85%)

Em todos os três filtros foi observada pequena variação da perda de carga entre a segunda e terceira horas de operação. A justificativa encontrada para isto talvez esteja no fato de poder ter ocorrido eventual pequena variação da vazão afluente ao conjunto de filtros exatamente no momento da leitura referente às 3 horas de operação. Ainda que o controle, monitoramento e ajuste de vazão tenham sido realizados a cada 15 minutos, ocasionalmente ocorriam pequenas

variações de uma leitura para outra, o que era verificado e constatado com as leituras dos piezômetros.

Assim como havia sido observado nos experimentos utilizando porosidade de leito de 93%, o filtro S25-85% possui perda de carga mais significativa comparativamente aos demais filtros, sendo que o primeiro trecho, ainda que de comprimento menor do que o trecho inicial do filtro S60-85%, apresenta perda de carga de aproximadamente mesma magnitude.

A justificativa encontrada para explicar este fato está na maior influencia dos elementos de entrada do leito de fibras – nos quais as fibras foram dobradas para fixação na tela suporte, constituindo estreitamento da área de escoamento antes do contato da água com as fibras flexíveis. No caso do filtro S25-85%, a influência dos elementos de entrada e saída no escoamento parece ser maior do que no caso dos filtros maiores, provavelmente devido ao menor comprimento do leito. Isto pode ter levado a uma maior compactação e concentração de fibras como um todo e dificultou mais intensamente a passagem de água.

Quanto a possíveis diferenças na estrutura de entrada das diferentes unidades de filtração (falta de padronização dos filtros), não parece ter sido significativa, uma vez que tendo sido instalada tomada de pressão em mesma altura (16 cm) em todos os filtros, verificaram-se valores de perda de carga próximos nessa região dos três filtros investigados (aproximadamente 20mmH_2O para a taxa de filtração de 20m/h e leito limpo).

Com base neste estudo utilizando sisal com porosidade de 85% e taxa de 20m/h, foram feitas as seguintes considerações:

i. Uma vez tendo sido provada a semelhança dos três diferentes filtros construídos (tomada de pressão em mesma altura, aos 16 cm da entrada), assume-se que os valores de qualidade do filtrado obtidos no ensaio realmente correspondem a filtros de 3 diferentes comprimentos e

aproximadamente mesma porosidade. Não se atribui, assim, a qualidade insatisfatória dos filtrados dos filtros de 25 e 60 cm a possíveis problemas construtivos, mas sim à real influência do comprimento neste processo de remoção. Assim verificou-se que os tamanhos de 25 e 60 cm (com porosidade de 85%) não foram capazes de remover com a eficiência desejada (turbidez residual menor que 1 uT) as partículas da água sintética para esta taxa de 20m/h, sendo necessário pelo menos 100 cm para obtenção de turbidez no efluente dentro do limite proposto.

ii. Nas condições de estudo com utilização de leito de sisal com porosidade de 85% e taxa de 20m/h, ocorreu remoção de cor e turbidez já desde o primeiro trecho, mas estes processos continuaram ocorrendo nos trechos seguintes. Assim, verificou-se considerável remoção de turbidez nos primeiros 25 cm (cerca de 50% de eficiência) e nos primeiros 60 cm (cerca de 70% de eficiência) mas a adequação final ocorreu após pelo menos 100 cm (mais de 86% de eficiência). Estes resultados estão de acordo com Lee *et.al.* (2007), os quais apontam para a importância do comprimento do leito na clarificação da água para a filtração em filtro de fibras de poliamida.

iii. Como era previsto, foi observada maior eficiência de clarificação com a diminuição da porosidade do leito de sisal de 93% para 85%, tendo sido obtido, paro o caso do filtro S100-85%, filtrado de qualidade satisfatória caso fossem objetivados os limites da antiga Portaria 518/2004.

iv. O filtrado produzido pelo filtro S100-85% possuía turbidez na faixa de 0,5 a 1,0 uT. Desta forma, este filtro não seria adequado caso fosse adotado

limite de turbidez igual a 0,5 uT, ou seja, não produziria filtrado em adequação a Portaria 2914/2011.

Dado que foi verificada adequação do filtrado nos limites propostos para esta pesquisa (1 uT) de turbidez para esta taxa de 20m/h e para o filtro de 100 cm, foi estudada em etapa posterior a aplicação de taxa de 40m/h. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

5.4.2.2.2. Operação dos filtros com 85% de porosidade e taxa de 40m/h

Neste ensaio o pH foi mantido em 6,46±0,10, e a temperatura em 25,20±0,78°C. Os gráficos das Figuras 107 e 108 mostram a evolução dos parâmetros de cor e turbidez do filtrado, para os filtros com diferentes comprimentos de fibra de sisal estudados.

Pela análise dos gráficos, admite-se que o filtro S100-85% foi capaz de operar com taxa de filtração de 40m/h por cerca de 90min, produzindo filtrado com turbidez inferior a 1 uT. Os demais filtros, como era esperado, não foram capazes de produzir filtrado com turbidez abaixo de 1 uT. Ressalta-se, ainda, que o filtro S100-85% não foi capaz de produzir filtrado com turbidez inferior a 0,5 uT; o valor da turbidez do filtrado neste caso ficou próximo a 1 uT durante toda a carreira de filtração.

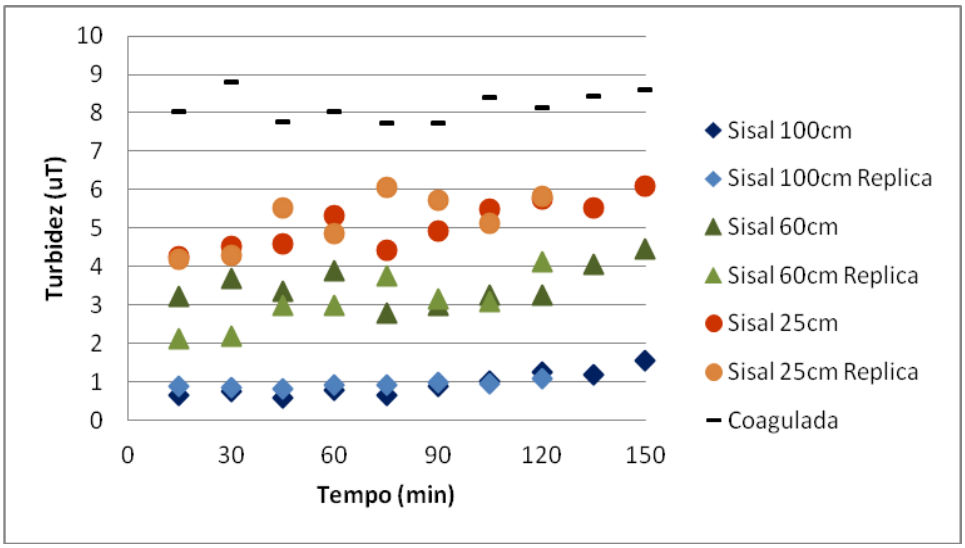

Figura 107. Variação da turbidez com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01%. e taxa de 40m/h.

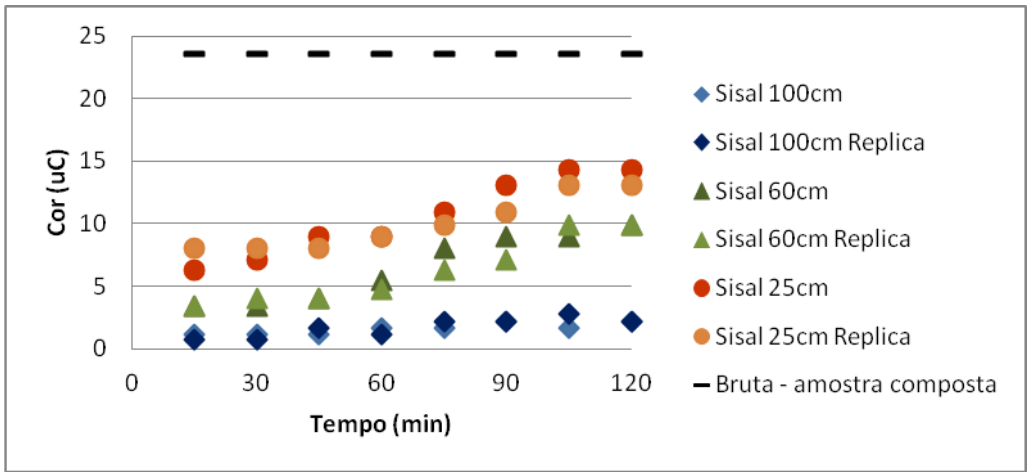

Figura 108. Variação da cor com o tempo para os 3 diferentes filtros (L=25cm, L=60cm e L=100cm) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01%. e taxa de 40m/h.

A Figura 108 mostra que o filtro S100-85% foi capaz de remover cerca de 90% de cor operando com taxa de 40m/h, produzindo filtrado com até 2,5 uC.

Os gráficos 109, 110 e 111 mostram evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para cada um dos 3 filtros, operando com taxa de 40m/h.

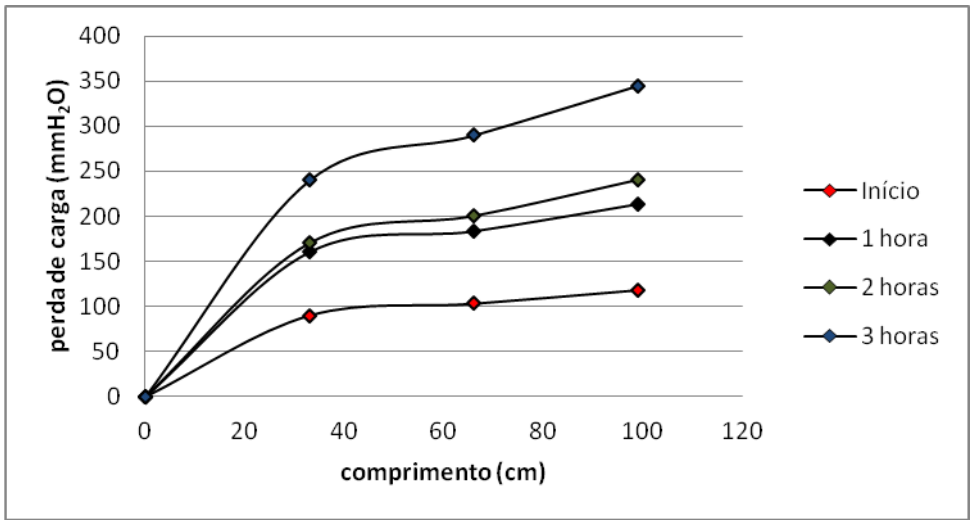

Figura 109. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 100cm e 85% de porosidade (S100-85%), com taxa de 40m/h.

Após 3 horas de operação para esta taxa de 40m/h parece ter havido caminhamento das impurezas pelas 3 camadas do filtro de 100 cm, caracterizando a retenção de impurezas ao longo de toda a profundidade do leito, como já comentado para a taxa de 20m/h. Os valores absolutos praticamente dobraram em relação à taxa de 20m/h, o que era esperado. Mais uma vez é importante ressaltar que mesmo o ultimo trecho oferece contribuição significativa para o polimento final e adequação do filtrado dentro dos limites estabelecidos, diferenciando a qualidade do efluente do filtro de maior comprimento em relação aos demais.

No caso do filtro S60-85% (vide Figura 110), similarmente ao caso em que foi aplicada taxa de 20m/h, após 2 horas de operação ainda parece haver pouca retenção de partículas no último trecho (últimos 20cm) do filtro, sendo que os valores de perda de carga foram mais significativos no primeiro e no segundo trechos do filtro. Os valores observados são praticamente o dobro daqueles para taxa de 20m/h, o que era esperado.

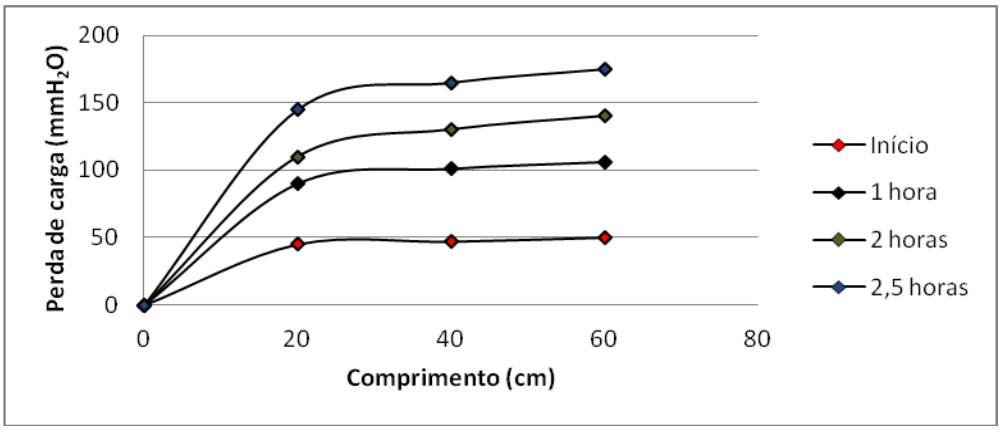

Figura 110. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 60cm e 85% de porosidade (S60-85%), com taxa de 40m/h.

No caso do filtro S25-85% (vide Figura 111), foi observado comportamento diferente daquele para taxa de 20m/h, para mesmo filtro de 25 cm de comprimento. Naquele caso havia sido observada perda de carga mais significativa no ultimo trecho do que no segundo, o que poderia ser atribuído ao fato de as partículas terem floculado somente após o segundo trecho. Diferentemente, neste caso de taxa de 40m/h a penetração das impurezas foi observada primeiramente no segundo trecho, não tendo ainda sido utilizado o ultimo trecho após 2 horas de operação. Neste caso, possivelmente as maiores velocidades intersticiais observadas podem ter promovido floculação mais intensa já no primeiro trecho, podendo ter havido retenção de partículas maiores já no segundo trecho.

Assim, para o filtro S25-85% operando com taxa de 40m/h, houve penetração na segunda camada após 2 horas de operação, não tendo havido ainda neste momento penetração na terceira camada.

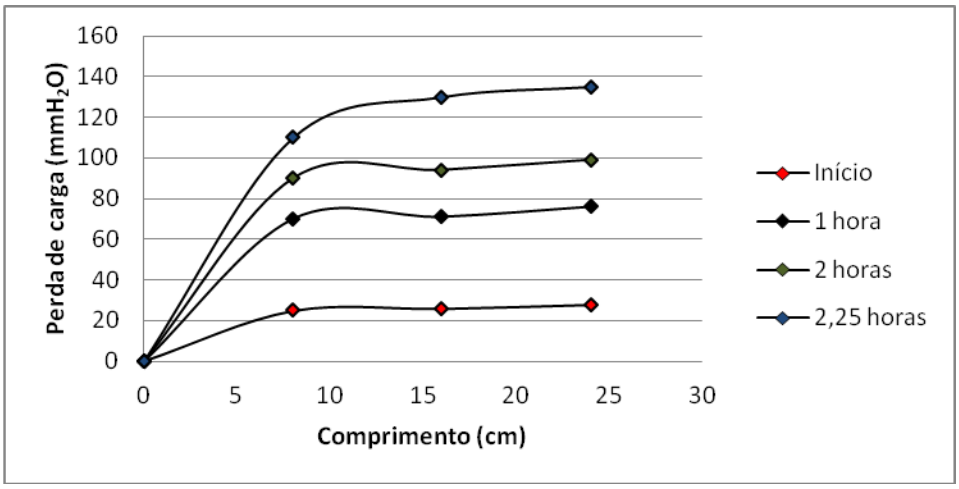

Figura 111. Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 25cm e 85% de porosidade (S25-85%), com taxa de 40m/h.

Uma vez que houve possibilidade de operação do filtro de 100 cm com taxas de 40m/h, foi estudada em próxima etapa a aplicação de taxa de 80m/h, somente para este filtro de maior comprimento.

5.4.2.2.3. Operação do filtro de 100 cm com 85% de porosidade e taxa de 80m/h

Neste caso foi testado apenas o filtro de 100 cm, o qual apresentava possibilidade de promover clarificação satisfatória. Os demais filtros não foram testados por já não terem se adequado aos limites propostos para as demais taxas. O pH foi monitorado neste experimento, tendo sido obtido o valor 6,51±0,03. A temperatura foi mantida em 25,42±0,61°C.

Os gráficos das Figuras 112 e 113 mostram os resultados obtidos para cor e turbidez.

Pela análise dos gráficos, observa-se que não foi possível obter, para esta taxa de 80m/h, filtro de 100 cm e porosidade de leito de aproximadamente 85%, filtrado com turbidez inferior a 1 uT. No entanto, por quase 60 minutos a turbidez permaneceu entre 1 e 2 uT, o que é um resultado promissor para este tipo de filtro, permitindo supor que a diminuição da porosidade para valores abaixo de 85% poderá conduzir a maiores eficiências de filtração quando se

pretender operar com taxas de 80 m/h ou até maiores, desde que o comprimento das fibras do leito não seja menor que 100cm.

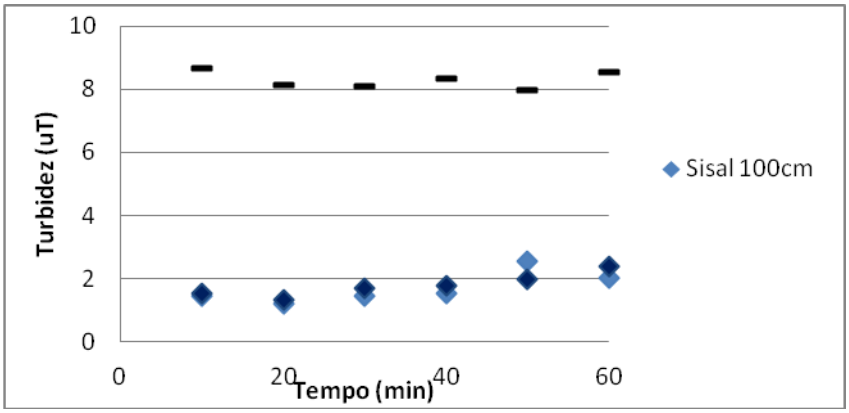

Figura 112. Variação da turbidez com o tempo para filtro de 100 cm de comprimento (S100-85%) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01% e taxa de 40m/h.

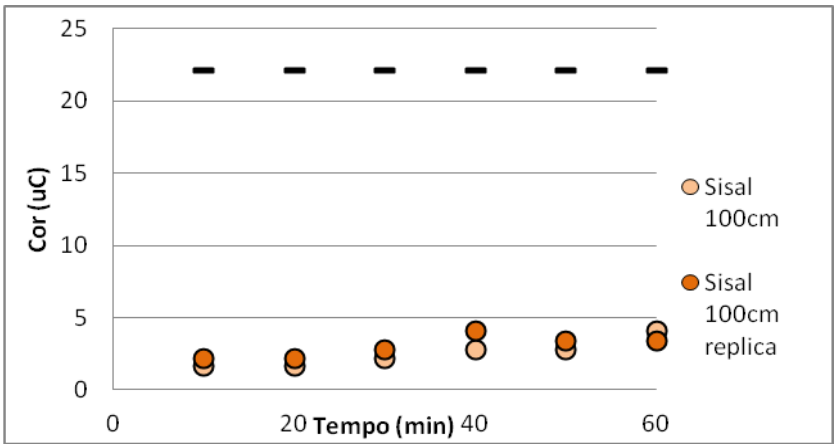

Figura 113. Variação da cor com o tempo para filtro de 100cm de comprimento (S100-85%) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01% e taxa de 40m/h.

O gráfico da Figura 114 mostra evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal de 100 cm de comprimento, operado com taxa de 80m/h.

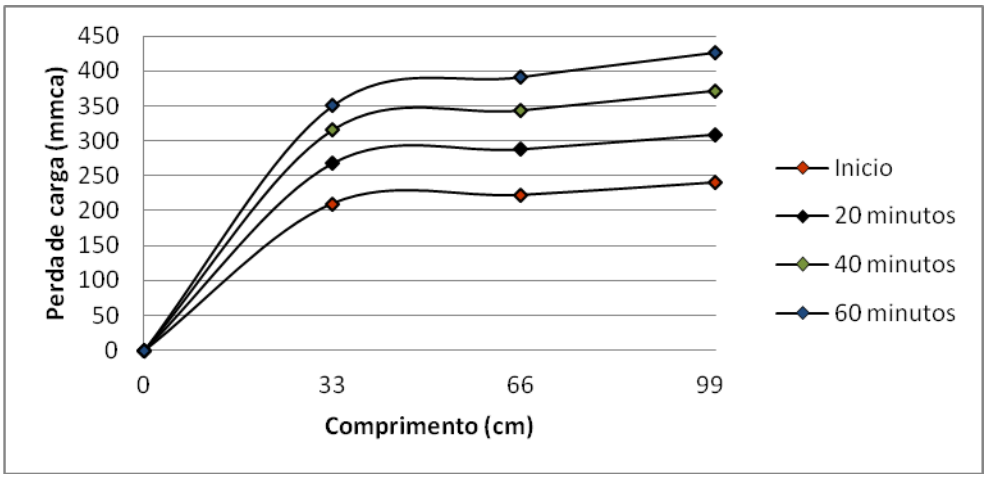

Figura 114, Gráfico da evolução da perda de carga ao longo do comprimento do leito em função do tempo de operação para filtro de sisal com L igual a 100cm e 85% de porosidade (S25-85%), com taxa de 80m/h.

Assim como para a taxa de 40m/h, parece haver caminhamento das impurezas para a segunda e parcialmente para a terceira camada do filtro, com aproveitamento da profundidade do mesmo. As perdas de carga ainda são baixas para esta taxa, estando sempre abaixo de 0,45 mH_2O.

Do exposto, mesmo para taxa de 80m/h, houve considerável eficiência de clarificação da água de alimentação associada a baixas perdas de carga. Durante aproximadamente 60 minutos, assim, o filtrado apresentou turbidez efluente entre 1 e 2uT, o que demonstra potencial para sua utilização como pré-filtro – uma vez que promove remoção de cor e turbidez a altas taxas de filtração e produz baixas perdas de carga – ou para a possibilidade de construção de filtro com menor porosidade de leito e/ou maior comprimento, o qual possivelmente adequaria o filtrado aos limites propostos, mesmo com altas taxas de filtração.

5.4.2.2.4. Conclusões dos estudos com sisal e porosidade de leito de 85%

Dos resultados apresentados concluiu-se que não é possível obter filtrado com turbidez inferior a 1 uT utilizando filtros constituídos de sisal, porosidade de leito maiores que 85% ,

comprimentos de leito inferiores a 100 cm e taxas de filtração maiores que 40m/h. Assim, foi verificada adequação do filtrado aos limites estabelecidos para esta pesquisa apenas no caso do filtro de sisal de 100cm, operado com porosidade de 85% e taxas de filtração de 20 e 40m/h.

A fim de se realizar mais uma verificação da veracidade dos valores obtidos, comprovando de fato que filtros menores que 100 cm utilizando fibra de sisal com porosidade de leito maiores ou iguais a 85% não são capazes de produzir filtrado com turbidez inferior a 1 uT, foram cortadas, em uma etapa final após a realização de todos os ensaios, as fibras do filtro de 100 cm no comprimento de 60 cm. Este ensaio buscou garantir que as condições do filtro de 60 cm eram realmente iguais aos primeiros 60 cm do filtro de 100 cm. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 115, a qual compara os valores de turbidez do filtrado efluente ao filtro S60-85% com o efluente aos primeiros 60 cm do filtro S100-85%. O gráfico mostra os primeiros 90 minutos de operação com taxa de filtração de 20m/h.

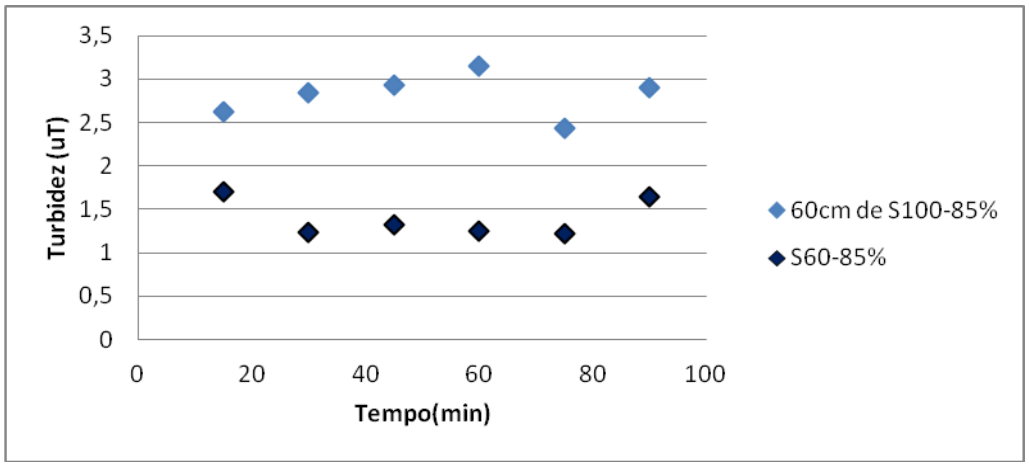

Figura 115. Variação da turbidez com o tempo para os primeiros 60 cm de filtro de 100 cm de comprimento (S100-85%) e para filtro de 60cm de comprimento (s60-85%) com leito de fibras de sisal, utilizando porosidade de leito de 84,49±0,01%. e taxa de 20m/h.

Como é possível observar na Figura 115, foram encontrados valores de turbidez maiores para o filtrado dos primeiros 60 cm do filtro S100-85%. Isto confirma que os resultados anteriormente avaliados são consistentes, e portanto comprimentos de leito inferiores a 100 cm

não foram capazes de produzir filtrado de qualidade satisfatória. Para respeitar o critério de turbidez residual inferior a 1 uT, o comprimento de 100 cm foi o mínimo admissível para esta porosidade de leito (85%) utilizando sisal como material filtrante e taxas de até 40 m/h.

Em relação à mudança de perda de carga dos filtros de maior porosidade para estes de menor porosidade foi verificado certo aumento: no caso do filtro de 100 cm de comprimento operado com taxa de 20 m/h, a perda de carga aumentou de 35 para 50 mmH_2O para o leito limpo e de 80 para cerca de 220 mmH_2O após 300 minutos operação. Ainda assim, os valores de perda de carga referentes aos filtros com 85% de porosidade são bastante baixos comparados àqueles obtidos para os filtros de polipropileno ou a filtros com leitos granulares convencionais. Isto leva a hipótese de que se poderia diminuir ainda mais a porosidade do leito a fim de se obter melhor qualidade do filtrado, e ainda neste caso não seria limitante a perda de carga. No entanto, esta análise não foi realizada neste estudo, devido a limitações construtivas inerentes ao método utilizado, pois seria extremamente difícil a inserção de mais fibras no leito do filtro por tal método. A fim de se realizar este tipo de ensaio, seria necessário utilizar outro modelo de suporte para o leito de fibras.

É interessante lembrar também da potencialidade de utilização deste tipo de filtro (sisal com porosidade de 85%) como unidade de pré-filtração, com leitos de 100 cm de comprimento operando a taxas de até 80m/h, desde que associada a uma unidade de tratamento final capaz de dar o polimento ao filtrado de modo a atingir a qualidade exigida pelo uso a ser dado à água. Isto poderia trazer como benefícios a obtenção de unidade muito compacta com considerável eficiência de pré-clarificação da água e aproveitamento da carga hidráulica disponível, devido à retenção de impurezas ao longo de todo leito de fibras flexíveis.

5.4.3. Comparação dos resultados obtidos para ensaios utilizando sisal e polipropileno

Com base nos dados apresentados nos itens 5.4.1 e 5.4.2, é possível concluir que ambas as fibras de sisal e de polipropileno têm aplicabilidade na utilização como materiais filtrantes em filtros de fibra, visando a clarificação de águas para abastecimento, com diferentes taxas de filtração, duração de carreira e perda de carga final. As possíveis restrições da utilização das fibras estão na liberação de substâncias ainda desconhecidas na água, o que foi parcialmente avaliado e discutido no item 5.3 e necessita estudos mais aprofundados. Neste sentido foi observado que deve ser evitado o contato das fibras de sisal com meios alcalinos e que são recomendados estudos futuros que identifiquem, caracterizem e quantifiquem as possíveis substancias liberadas pelas fibras de sisal na água.

Em relação à liberação de sabor e odor à água clarificada, não foi verificada alteração significativa em nenhum dos casos quando da aplicação de vazão continua de água. No caso das fibras de sisal, deve-se atentar para a interrupção do funcionamento do filtro, quando o contato contínuo com a água parada parece liberar certo odor à água. Neste caso, quando do reinício da operação, seria necessário descartar pequena quantidade de água (igual ao volume do filtro) para recuperação da qualidade de água filtrada (sem odor).

Com a finalidade de apontar vantagens e desvantagens da utilização dos diferentes tipos de fibra, seus diferentes comprimentos e porosidades e da aplicação de diferentes taxas, foram comparados duração de carreira, volume total filtrado, perda de carga final, sólidos retidos e, finalmente, os índices de filtrabilidade dos diferentes filtros estudados, além do processo de lavagem.

5.4.3.1. Volumes filtrados e perda de carga final

A Tabela 5 mostra os valores médios de duração de carreira, volume filtrado e perda de carga de fim de carreira, para diferentes filtros estudados. Somente são apresentados resultados dos filtros que se adequaram ao limite de turbidez estabelecido (1 uT).

Tabela 5. Parâmetros e valores médios obtidos para os diferentes filtros estudados.

Filtro	Taxa (m/h)	Duração carreira (min)	Volume filtrado (L)	Perda de carga final (mH_2O)
S100-85%	20	202.5	56.7	0.162
S100-85%	40	112.5	63	0.18
PP100-93%	20	515	144.2	1.7
PP60-93%	20	290	81.2	0.385
PP25-93%	20	80	22.4	0.13
PP100-93%	40	155	86.8	1.7
PP60-93%	40	110	61.6	0.89
PP60-93%	80	50	56	1.45
PP100-93%	80	20	-	1.8(limite)

Observa-se pela análise da Tabela 5 que o filtro PP100-93% com taxa de 80 m/h alcançou o limite de perda de carga (1,8 mH_2O) após menos de 20 minutos de operação. Portanto, este filtro não foi avaliado para esta taxa. Cabe ressaltar que a turbidez do efluente neste caso ainda estava dentro do limite proposto, mesmo após ter sido atingido o limite de perda de carga. Assim, se a montagem tivesse permitido a disponibilização de maior carga hidráulica, haveria possibilidade de operação do filtro de 100 cm por período maior.

Pela análise da Tabela 5, o filtro que produziu maior quantidade de filtrado por carreira foi o PP100-93%; no entanto esta produção está associada a maior perda de carga de final de carreira. Observa-se também que existem condições equivalentes dependendo do parâmetro analisado. Em relação ao filtrado produzido, por exemplo, os filtros S100-85% e PP60-93% produzem praticamente mesmo volume para taxa de 40m/h, com a diferença de que a perda de carga no primeiro caso é de 18 cm e no segundo, de 89 cm.

Analisando apenas estes dados, a escolha de um ou outro filtro (constituído de sisal, cujo diâmetro médio das fibras é de 198,5±75,2 µm ou constituído de polipropileno cujo diâmetro médio das fibras é de 30 µm) para aplicação em diferentes situações dependeria do fator limitante que fosse imposto. Por exemplo, carga hidráulica disponível ou necessidade de se produzir dado volume de água filtrada em certo intervalo de tempo. Assim, se fosse objetivo operação com baixa perda de carga, o filtro de sisal apresentar-se-ia como opção mais interessante. Por outro lado, uma vez sendo disponível carga hidráulica de mais de 1,5m, talvez fosse mais conveniente optar por filtros de polipropileno, os quais produziram maior quantidade de filtrado, a custo de maior perda de carga.

Nesse ponto, vale ressaltar que, para se efetuar uma comparação mais segura entre os dois tipos de material de leito flexível (polipropileno e sisal), é importante que sejam realizadas pesquisas futuras, complementares ao presente estudo, envolvendo a construção e operação de filtro de polipropileno contendo fibras de mesmo diâmetro médio que as fibras de sisal, além de mesma porosidade.

5.4.3.2. Índices de filtrabilidade

Outro tipo de análise que visa englobar e ponderar os diversos parâmetros de importância na filtração é por meio de índices de filtrabilidade, discutidos no item 3.6. A relação entre volume filtrado e perda de carga no final da carreira pode ser assim expressa pelo índice de funcionamento do filtro (IFF) citado no item em questão.

Para este índice, admite-se que valores maiores correspondem a melhor funcionamento e eficiência do filtro (maiores volumes filtrados com menor perda de carga associada). A Tabela 6 mostra os valores deste índice para os mesmos filtros apresentados na Tabela 5, os quais apresentaram funcionamento adequado aos limites impostos (limite de turbidez igual a 1 uT).

Tabela 6. Índice de funcionamento do filtro para os diferentes filtros estudados.

Filtro	IFF (L/mH_2O)
S100-85%-20m/h	350,00
S100-85%-40m/h	350,00
PP100-93%-20m/h	84,82
PP60-93%-20m/h	210,91
PP25-93%-20m/h	172,31
PP100-93%-40m/h	51,06
PP60-93%-40m/h	69,21
PP60-93%-80m/h	38,62

Tendo como base a avaliação deste índice (IFF), foram obtidos melhores valores para o filtro de sisal de 100 cm e porosidade de leito de 85%, o qual, ainda que tenha produzido menor volume de filtrado, gera perda de carga muito menor. É importante ressaltar que este índice avalia a geração de filtrado por unidade de perda de carga, sem avaliar a eficiência de clarificação, o que poderia ser outro parâmetro de análise.

Ainda, sabe-se que mesmo tendo disponível maior carga hidráulica não é possível produzir maior volume de filtrado no caso dos filtros do sisal, o que é um limitante deste tipo de filtro. A análise destes índices deve ser assim cuidadosa, não significando que os filtros de sisal (com fibras de 198,5±75,2 µm de diâmetro e porosidade de 85%) são melhores que os de polipropileno aqui investigados (com fibras de 30 µm de diâmetro e porosidade de 93%) e portanto mais aplicáveis, pois cada um possui características diferentes.

Da análise dos índices IFF se conclui que os filtros de sisal geralmente apresentam perda de carga muito menor proporcionalmente do que os de polipropileno, sendo interessante sob este aspecto, necessitando menor disponibilização de carga hidráulica. Por outro lado a geração de filtrado por carreira é menor, sendo necessário maior número de lavagens para mesma produção. A escolha da melhor fibra estaria vinculada, assim, aos condicionantes de projeto.

Outro índice que foi analisado para os filtros estudados é o índice de filtrabilidade de Ives (IFI), o qual foi detalhado no item 3.6.

Diferentemente do outro índice analisado (IFF), neste caso quanto menor o valor obtido melhor o desempenho do filtro. A Tabela 7 mostra os parâmetros e os valores obtidos para o índice de Ives, para os diferentes filtros analisados.

Tabela 7. Parâmetros e índice de filtrabilidade de Ives calculado para diferentes filtros investigados.

Filtro	*Vapr (cm/min)*	*T (min)*	*Hf (cm)*	*Turb efluente (uT)*	*Turb afluente (uT)*	*INDICE IVES ($.10^{-4}$)*
S100-85%-20m/h	33,33	202,5	16,2	0,67	8,15	1,98
S100-85%-40m/h	66,67	112,5	18	0,84	8,67	2,32
PP100-93%-20m/h	33,33	515	170	0,34	8,07	4,12
PP60-93%-20m/h	33,33	290	38,5	0,25	8,07	1,23
PP25-93%-20m/h	33,33	80	13	0,56	8,07	3,41
PP100-93%-40m/h	66,67	155	170	0,26	8,16	5,18
PP60-93%-40m/h	66,67	110	89	0,57	8,16	8,50
PP60-93%-80m/h	133,33	50	145	0,69	8,29	18,17

Mais uma vez a análise do índice deve ser cuidadosa, já que é possível se obter altos valores de turbidez efluente com baixas perdas de carga, levando a valores baixos para este índice. Similarmente, valores baixos de turbidez efluente (alta eficiência de clarificação) associados a valores relativamente altos de perda de carga levam a valores altos para este índice. Isto não significaria que o último é menos eficiente, mas sim que a perda de carga relacionada é maior.

No caso deste estudo, os melhores valores para este índice foram obtidos para o filtro PP60 -93% seguido do filtro S100– 85%, ambos para a taxa de 20m/h. Mais uma vez, se observa que o filtro S100-85% possui configuração interessante, com produção de filtrado com turbidez inferior a 1 uT associada a perdas de carga muito baixas.

É importante atentar para a aplicabilidade deste resultado apenas para esta água de estudo, podendo haver variações significativas quando se muda a qualidade da água de alimentação.

5.4.3.3. Retenção de sólidos suspensos

Tendo em vista a avaliação de sólidos suspensos realizada para cada condição e filtro, foi possível calcular a retenção média (mg/L) em cada caso, bem como a retenção total (g) nos casos em que se estabeleceram carreiras de filtração (turbidez efluente menor que 1uT). A Tabela 8 mostra os resultados. Ressalta-se que a massa total de sólidos retidos (g) não foi calculada para os casos em que não foi possível estabelecer carreira de filtração (filtrado com turbidez inferior a 1 uT).

A maior retenção de sólidos em massa ocorreu para o filtro PP100-93%, para as taxas de 20 e 40m/h respectivamente. Os filtros S100-85% e PP60-93% apresentaram praticamente a mesma remoção de sólidos para as taxas de 20 e 40m/h. Não foi observada, de forma nítida, a tendência citada por Lee *et al*. (2006), de que aumentando-se a taxa de filtração aumentava-se a retenção de sólidos. No entanto os valores obtidos são médios e calculados de forma indireta o que pode levar a pequenas variações de valor.

Em termos de concentração de sólidos suspensos retidos (em mg/L), observa-se que os valores encontrados para o filtro S100-85% são próximos àqueles obtidos para os filtros de polipropileno, os quais tinham apresentado, no geral, melhor eficiência de clarificação (menor turbidez efluente) que os filtros de sisal. A diferença, no entanto, está na menor duração de carreira dos filtros de sisal, o que levou a uma menor retenção de sólidos em termos absolutos (em massa).

Tabela 8. Resultados das análises de sólidos suspensos totais e do cálculo de sólidos totais retidos.

Tipo de água	Sólidos suspensos no filtrado (mg/L)	Sólidos Retidos pelo filtro (mg/L)	Massa total sólidos retidos (g)
Bruta	7,92±0.67	-	-
Coagulada	15,91±0.86	-	-
Filtrado - (S100-93%-20m/h)	3,40±0.96	12,51±0.10	-
Filtrado - (S60-93%-20m/h)	3,90±0.10	12,01±0.76	-
Filtrado - (S25-93%-20m/h)	9,20±0.58	6,71±0.28	-
Filtrado - (S100-93%-10m/h)	1,70±0.46	14,21±0.40	-
Filtrado - (S60-93%-10m/h)	4,20±1.14	11,71±0.28	-
Filtrado - (S25-93%-10m/h)	6,00±0.12	9,91±0.74	-
Filtrado - (S100-93%-5m/h)	2,00±0.60	13,91±0.26	-
Filtrado - (S60-93%-5m/h)	2,95±0.65	12,96±0.21	-
Filtrado - (S25-93%-5m/h)	6,30±0.70	9,61±0.16	-
Filtrado - (S100-85%-20m/h)	1,60±0.15	14,31±0.71	0,81
Filtrado - (S60-85%-20m/h)	3,20±1.22	12,71±0.36	-
Filtrado - (S25-85%-20m/h)	4,87±2.50	11,04±1.64	-
Filtrado - (S100-85%-40m/h)	1,35±0.74	14,56±0.12	0,92
Filtrado - (S60-85%-40m/h)	3,60±1.11	12,31±0.25	-
Filtrado - (S25-85%-40m/h)	5,01±2.40	10,90±1.54	-
Filtrado - (S100-85%-80m/h)	4,85±0.15	11,06±0.71	-
Filtrado - (PP100-93%-20m/h)	1,37±0.30	14,54±0.56	2,10
Filtrado - (PP60-93%-20m/h)	2,47±1.71	13,44±0.85	1,09
Filtrado - (PP25-93%-20m/h)	1,00±0.35	14,91±0.51	0,33
Filtrado - (PP100-93%-40m/h)	0,61±0.42	15,30±1.44	1,33
Filtrado - (PP60-93%-40m/h)	2,80±1.87	13,11±1.01	0,81
Filtrado - (PP25-93%-40m/h)	1,82±0.95	14,09±0.10	-
Filtrado - (PP60-93%-80m/h)	0,69±0.10	15,22±0.76	0,85

5.4.3.4. Lavagem

Os índices de filtrabilidade anteriormente avaliados são uteis na comparação e análise dos diferentes filtros, porém não consideram a produtividade de água filtrada, ou seja, os gastos de água inerentes do processo (lavagem). Assim, foi estudada separadamente a lavagem dos filtros que apresentaram melhor desempenho, a fim de se obter o procedimento adequado (número de

estágios para a lavagem, vazão de ar e de água) e de verificar se a quantidade de água filtrada foi consideravelmente superior à água de lavagem, o que torna viável a operação deste tipo de filtro.

Dentre os filtros estudados, aqueles que apresentaram desempenho satisfatório (limite de turbidez de 1uT) e com possibilidade de aplicação são o filtro de sisal de 100cm (S100-85%) e os filtros de polipropileno de 100 e 60 cm (PP100-93% e PP60-93% respectivamente), os quais tiveram o processo de lavagem avaliado.

O estudo do processo de lavagem foi realizado variando-se, em diferentes etapas, estágios e tempo de aplicação de ar e de água, em sequência, como descrito no item 4.6.

O processo de lavagem foi avaliado simultaneamente aos experimentos. Assim, após cada condição ou taxa estudada era avaliado um processo de lavagem. Caso o processo não se mostrasse eficiente (por meio da verificação da perda de carga inicial), eram operadas mais etapas de lavagem até que o filtro estivesse devidamente limpo para a próxima operação.

Os itens abaixo mostram os resultados obtidos para os diferentes filtros.

5.4.3.4.1. Filtro de sisal S100-85%

A Tabela 9 mostra a comparação de sólidos retidos na operação do filtro com os sólidos retirados no processo de lavagem e a diferença de perda de carga no leito limpo *com taxa de 20m/h*, antes e após a operação e lavagem do leito. Os valores de sólidos são médias calculadas a partir de triplicata de análise.

Tabela 9. Parâmetros avaliados antes e após a lavagem do leito do filtro S100-85%.

Parâmetros	***20m/h***	***40m/h***

	Lavagem Modo 1	Lavagem Modo 2	Lavagem Modo 3	Lavagem Modo 4	Lavagem Modo 5	Lavagem Modo 6
Sólidos retidos(g)	0.81	0.81	0.81	0.92	0.92	0.92
Sólidos lavagem(g)	0.55	0.88	0.82	0.92	0.91	0.88
Eficiência lavagem(%)	67.9	100	100	100	98.9	95.7
Perda carga inicial (mH_2O)	55	55	55	55	55	55
Perda carga após lavagem (mH_2O)	70	60	50	55	50	60

Da análise da Tabela 9 observa-se que as lavagens modos 3, 4 e 5 foram eficientes, tanto sob o aspecto de remoção de sólidos retidos como sob o aspecto de recuperação de perda de carga inicial. Dentre estes padrões de lavagem, o mais interessante é o de 5 estágios (Modo 5), cada um constituído da aplicação de 3 segundos de ar seguidos da aplicação de 6 segundos de água, devido ao menor tempo de aplicação de ar e ao fato de que a maior quantidade de estágios tenha levado a melhor recuperação da perda de carga no filtro. Neste caso o tempo total gasto na lavagem foi de cerca de 60 segundos.

É importante observar que o ensaio para quantificação de sólidos apresenta variação de resultados, e os valores médios calculados podem apresentar erros e desvios. Assim, verifica-se em alguns casos eficiência de lavagem superior a 100%, o que não pode ser verdadeiro. Neste sentido foi fundamental a verificação da perda de carga inicial nos filtros, a fim de confirmar os melhores processos de lavagem do filtro.

Em alguns casos foram observados valores de perda de carga inferiores após a lavagem do que aqueles antes da operação do filtro. Isto pode ter sido verificado devido a possível existência de resíduos no leito antes do inicio da operação, os quais foram retirados após a lavagem. Nestes casos se considerou eficiente o processo de lavagem.

Para todas as variações de lavagem foi utilizado mesmo tempo de aplicação de água, 30s no total, o que levou à produção de em média 4,5L de água de lavagem, com vazão de média de

água de lavagem igual a 540L/h. É nítido que este valor não está otimizado, já que a porcentagem que a água de lavagem representa na produtividade de água tratada é alta, como mostra a Tabela 10:

Tabela 10. Porcentagem de água de lavagem utilizada na operação do filtro S100-85%.

Filtro	***Volume filtrado (L)***	***Volume água lavagem (L)***	***% lavagem/filtrado***
S100-85%-20m/h	56.7	4.5	7.9
S100-85%-40m/h	63	4.5	7.1

Assim, em uma segunda etapa reduziu-se a vazão de água de lavagem para 1/3 do valor inicial, ou seja, aproximadamente 180L/h, com auxílio de rotâmetro medidor de vazão. Ressalta-se que este valor foi escolhido a fim de se estabelecer vazão de água de lavagem aproximadamente 10 vezes superior a vazão de operação. Assim, para a taxa de 20m/h aplicada aos filtros de 28 mm de diâmetro,, a vazão de operação é de 17L/h e portanto a vazão de lavagem deve ser de aproximadamente 170L/h.

Assim, em um segundo momento foi operada a lavagem em 5 estágios de aplicação de ar por 3 segundos seguida da aplicação de água por 30 segundos (Modo 5, procedimento que foi anteriormente elegido como mais eficiente), no entanto agora com menor vazão de água. Os resultados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Resultados obtidos com redução da vazão de água de lavagem.

S100 – 85% 20m/h	
Sólidos retidos(g)	0.68
Sólidos lavagem(g)	0.71

Eficiência lavagem(%)	100
Perda carga inicial (mH_2O)	55
Perda carga após lavagem (mH_2O)	55

Pela análise da tabela confirma-se que o processo de lavagem foi eficiente com redução da vazão da água de lavagem. Com isso, houve produção de aproximadamente 2,0L de água de lavagem, o que melhora a produtividade dos filtros, como mostra a Tabela 12:

Tabela 12. Porcentagem de água de lavagem com redução de sua vazão.

Filtro	*Volume filtrado (L)*	*Volume água lavagem (L)*	*% lavagem/filtrado*
S100-85%-20m/h	56.7	2.0	3.5

Observa-se que tendo sido produzido 2,0L de água de lavagem, a vazão média foi de 240L/h e a água de lavagem representou 3,5% do volume de água produzido pelo filtro. Este valor está dentro dos valores convencionais encontrados em filtros granulares. Admite-se, no entanto, que seja possível otimizar ainda mais o processo, no entanto esta etapa não foi conduzida neste estudo.

5.4.3.4.2. Filtro de polipropileno PP100-93%

A Tabela 13 mostra a comparação de sólidos retidos na operação do filtro com os sólidos retirados no processo de lavagem e a diferença de perda de carga no leito limpo *com taxa de 20m/h*, antes e após a operação e lavagem do leito. Os valores de sólidos são médias calculadas a partir de triplicata de análise.

Tabela 13. Parâmetros avaliados antes e após a lavagem do leito do filtro PP100-93%

	PP100 - 93% 20m/h			*PP100 – 93% 40m/h*		
	Lavagem Modo 1	**Lavagem Modo 2**	**Lavagem Modo 3**	**Lavagem Modo 4**	**Lavagem Modo 5**	**Lavagem Modo 6**
Sólidos retidos (g)	2.1	2.1	2.1	1.33	1.33	1.33

Sólidos lavagem (g)	1.5	1.76	2	1.07	1.4	1.02
Eficiência lavagem(%)	71.4	83.8	95.2	80.5	100	76.7
Perda carga inicial (mH_2O)	260	260	260	260	260	260
Perda carga após lavagem (mH_2O)	410	320	295	300	250	390

No caso do filtro PP100-93% as lavagens mais eficientes são aquelas com 5 estágios, mostrando ter mais importância o número de estágios que o tempo total de aplicação de ar. No entanto, assumindo-se a aplicação de 5 estágios, aquele que apresentou melhor eficiência foi com aplicação de 3 segundos de ar seguidos de 6 segundos de água (Modo 5). Neste caso o tempo total gasto na lavagem foi de cerca de 70 segundos.

Neste caso também foram observados valores de perda de carga inferiores, em alguns caso, após o procedimento de lavagem do que antes da operação do filtro.

Similarmente ao caso do filtro S100-85% supõe-se que seja possível reduzir a vazão de água de lavagem, para valor próximo a 10 vezes a vazão de operação – aproximadamente 180L/h no caso da taxa de 20m/h (taxa para qual o filtro apresentou melhor produtividade, como mostram as Tabelas 7, 8 e 9). Os resultados são apresentados na Tabela 14:

Tabela 14. Resultados obtidos com redução da vazão de água de lavagem.

PP100 – 93% 20m/h		
Sólidos retidos (g)		1.95
Sólidos lavagem(g)		1.89
Eficiência lavagem(%)	96.9	
Perda carga inicial (mH_2O)		260
Perda carga após lavagem (mH_2O)		255

Ainda que a eficiência da lavagem pela análise de sólidos tenha sido razoável (97%) observa-se que houve recuperação da perda de carga inicial. Assim, assumiu-se que a redução da vazão de água de lavagem para 180L/h não alterou a eficiência do processo. Com isso, houve

produção de aproximadamente 2,5L de água de lavagem, o que melhora a produtividade dos filtros:

Tabela 15. Porcentagem de água de lavagem com redução de sua vazão.

Filtro	*Volume filtrado (L)*	*Volume água lavagem (L)*	*% lavagem/filtrado*
PP100-93%-20m/h	144.2	2.5	1.7

Neste caso houve redução da porcentagem da água de lavagem para aproximadamente 2% da produtividade dos filtros, o que é um valor interessante em comparação com os convencionais filtros granulares.

5.4.3.4.3. Filtro de polipropileno PP60-93%

A Tabela 16 mostra a comparação de sólidos retidos na operação do filtro com os sólidos retirados no processo de lavagem e a diferença de perda de carga no leito limpo *com taxa de 20m/h*, antes e após a operação e lavagem do leito. Os valores de sólidos são médias calculadas a partir de triplicata de análise.

Tabela 16. Parâmetros avaliados antes e após a lavagem do leito do filtro PP60-93%

	PP60 - 93% 20m/h			*PP60-93% 40m/h*		
	Lavagem Modo 1	**Lavagem Modo 2**	**Lavagem Modo 3**	**Lavagem Modo 4**	**Lavagem Modo 5**	**Lavagem Modo 6**
Sólidos retidos (g)	1.09	1.09	1.09	0.81	0.81	0.81
Sólidos lavagem (g)	0.91	1.3	1.12	1.18	0.98	0.75
Eficiência lavagem(%)	83.5	100	100	100	100	92.5
Perda carga inicial (mH_2O)	120	120	120	120	120	120
Perda carga após lavagem (mH_2O)	155	90	80	95	90	135

Para este caso, todas as lavagens operadas, com exceção de 1 estágio ou somente água, foram eficientes. Isto é devido ao menor comprimento do filtro, o que facilita o processo de lavagem. O processo escolhido como mais interessante foi então o de 3 estágios de 5 segundos

de aplicação de ar seguidos por 10 segundos de aplicação de água (Modo 3). Neste caso o tempo total gasto na lavagem foi de cerca de 50 segundos.

Neste caso também se verificaram valores de perda de carga inferiores após o procedimento de lavagem em relação ao filtro antes da operação. Isto pode ser devido a,...

Assim como nos casos anteriores, foi reduzida a vazão de água aplicada, e os resultados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Resultados com redução de vazão de água de lavagem.

PP60 – 93% 20m/h	
Sólidos retidos (g)	1.20
Solidos lavagem(g)	1.27
Eficiência lavagem(%)	100
Perda carga inicial (mH_2O)	120
Perda carga após lavagem (mH_2O)	95

Pelos dados da tabela, assumiu-se que a redução da vazão de água de lavagem para 180L/h não alterou a eficiência do processo. Com isso, houve produção de aproximadamente 2,25L de água de lavagem, o que melhora a produtividade dos filtros:

Tabela 18. Porcentagem de água de lavagem após redução da sua vazão.

Filtro	***Volume filtrado (L)***	***Volume água lavagem (L)***	***% lavagem/filtrado***
PP60-93%-20m/h	81.2	2.5	3.1

Similarmente aos casos anteriores, verificou-se que a redução na vazão de água de lavagem não causou redução da eficiência do processo de lavagem. Assim, foi obtida porcentagem de água de lavagem igual a aproximadamente 3% da produtividade do filtro, o que é valor interessante comparativamente com os filtros convencionais.

5.4.3.4.4. Considerações sobre o processo de lavagem

O processo de lavagem foi analisado a fim de se verificar o procedimento mais adequado para limpeza deste tipo de filtro, bem como para se obter uma estimativa aproximada da porcentagem que a água de lavagem representa na produção de água tratada. O processo não foi otimizado, ou seja, não foi buscado valores mínimos possíveis de vazão e tempo de aplicação de água, por não ser objeto deste estudo. No entanto já foram obtidos valores interessantes em comparação com os filtros convencionais granulares.

Os resultados obtidos neste estudo são válidos apenas para este caso – dimensões do filtro, qualidade da água bruta – não sendo aplicáveis para filtros maiores ou tratando diferentes tipos de água. Neste sentido admite-se que o pequeno porte dos filtros (diâmetro inferior a 30 mm) facilita o processo de lavagem. Para filtros piloto, a porcentagem de água de lavagem e o número de estágios podem ser diferentes.

Em todos os casos o tempo gasto na lavagem foi de cerca de 60 segundos. No caso do filtro PP100-93%, dado que este foi capaz de produzir maior volume de filtrado por carreira de filtração, a porcentagem que representa a água de lavagem é inferior que a dos demais filtros.

É interessante e recomendável para futuras pesquisas que se operem filtros de fibra flexível de forma continua, por um período pré-estabelecido (por exemplo, por 24 horas ou 1 semana) com a finalidade de avaliar se as carreiras de filtração tem duração que se repete ao longo do tempo, sem consideráveis desvios, bem como para se estimar a produtividade em um período de tempo compatível com os filtros convencionais.

5.4.3.5. Comparação da superfície de contato nos diferentes filtros

A fim de melhor interpretar os resultados obtidos para eficiência de clarificação e produção de filtrado nos diferentes filtros (construídos com fibras de sisal com porosidades de 93% e 85% e com fibras de polipropileno com porosidade de 93%), foram calculadas e

comparadas as superfícies de contato em cada caso, o que é fator de importância no processo de filtração, como discutido no item 3.4 e 3.5.

Os resultados obtidos para os filtros de 100 cm de comprimento são apresentados na Tabela 19:

Tabela 19. Comparação de diâmetros das fibras de sisal e polipropileno e das superfícies de contato dos filtros com diferentes fibras e porosidades.

Filtro	*Diâmetro médio fibra (m)*	*Seção transversal filtro (m²)*	*Número fibras*	*Superficie 1 fibra (m²)*	*Superficie contato total (m²)*
S100-93%	0.000249	0.000616	957	0.000782	0.75
S100-85%	0.000249	0.000616	1961	0.000782	1.53
PP100-93%	0.0000343	0.000616	50179	0.000108	5.41

A Tabela 20 mostra as relações entre as superfícies de contato dos diferentes filtros analisados:

Tabela 20. Comparação de superfícies de contato dos diferentes filtros.

Relações	*Valor*
S100-85%/S100-93%	2.05
PP100-93%/S100-93%	7.22
PP100-93%/ S100-85%	3.52

Do exposto verifica-se que as superfícies de contato dos filtros de polipropileno são cerca de 7 vezes maiores do que os filtros de sisal, para mesmas porosidades de leito. Mesmo reduzindo a porosidade do leito de sisal para 85%, a superfície de contato dos filtros de polipropileno ainda é aproximadamente 3,5 vezes superior.

Este fator associado contribui significativamente para a pior qualidade do filtrado no caso dos filtros de sisal, bem como para a menor duração da carreira. Desta forma, como já discutido anteriormente, são necessários maiores comprimentos de leito para adequação do filtrado no caso

da utilização de fibras de sisal. Diferentemente, no caso dos filtros de polipropileno menores comprimentos de leito já são suficientes para obtenção de filtrado de qualidade satisfatória.

A diferença encontrada de superfícies de contato entre os filtros de sisal e polipropileno também justifica a discrepância de perda de carga verificada nos diferentes casos (vide item 3.5).

5.4.3.6. Considerações finais sobre a utilização de fibras de sisal e de polipropileno em filtros de fibra flexível

Com a finalidade de resumir os resultados de maior importância obtidos e incluir os dados relevantes do levantamento bibliográfico realizado nesta pesquisa foi construída a Tabela 21.

Ressalta-se que o náilon ou poliamida, fibra sintética que normalmente é utilizada nos filtros de fibra, possui características semelhantes àquelas do polipropileno, tanto em relação ao desempenho, quanto em relação às vantagens e desvantagens de sua utilização. No entanto, a utilização de fibras de polipropileno no lugar das de poliamida parece ser vantajoso sob o ponto de vista econômico, uma vez que as primeiras são mais baratas.

Por outro lado, é importante acrescentar que a utilização de fibras naturais como o sisal como meio filtrante em filtros de fibra é interessante para o Brasil, pois possibilita o uso de materiais locais, incentiva o mercado interno e pode propiciar a melhoria das condições de produção. No entanto, um fator que merece estudo mais aprofundado acerca da utilização de fibras naturais como o sisal como meios filtrantes é a biodegradabilidade das mesmas, o que leva a possibilidade de se liberarem substancias indesejáveis na água destinada a abastecimento.

Tabela 21. Considerações sobre a utilização de fibras de sisal e de polipropileno em filtros de fibra flexível.

SISAL	POLIPROPILENO
Somente filtros com comprimento maior que 100 cm e porosidade inferior a 85% foram capazes de produzir filtrado com turbidez inferior a 1 uT, operando com taxa de 20m/h por cerca de 180 minutos e com taxa de 40 m/h por cerca de 90 minutos.	Filtro com comprimento de 25 cm já pode produzir filtrado com turbidez inferior a 1 uT operando por cerca de 100 minutos com taxa de 20 m/h. Para taxa de 20m/h os filtros de 60 e 100 cm de comprimento tiveram carreiras de 250 e 500 minutos respectivamente. Filtros com 60 e 100 cm também puderam produzir filtrado com turbidez inferior a 0,5 uT operando com taxas de até 80 m/h.
Perdas de carga consideravelmente baixas, inferiores a 0,25 mH_2O no caso do filtro de 100 cm e 85% de porosidade após 2 horas de operação com taxa de 40 m/h.	Perda de carga alta, da ordem de 1,8 mH_2O no caso do filtro de 100 cm e 93% de porosidade, após 2 horas de operação com taxa de 40 m/h.
Possibilidade de usar como pré-filtro, promovendo consideráveis eficiências de remoção associadas a baixas perdas de carga.	Possibilidade de utilização como pós-filtro, promovendo polimento final para adequação aos parâmetros de potabilidade (turbidez inferior a 0,5 uT)
Produtividade compatível, em termos de porcentagem, com os filtros convencionais, no caso de filtros de 28 mm de diâmetro, 85% de porosidade e 100 cm de comprimento.	Produtividade compatível e mesmo superior, em termos de porcentagem, para filtro de 28 mm de diâmetro, 93% de porosidade e 100 cm de comprimento (gasto de 2% da água produzida no processo de lavagem).
Pode liberar substâncias desconhecidas na água, principalmente quando exposta a meio alcalino, como mostrou o ensaio de solubilidade.	Não parece liberar substâncias nocivas a água, de acordo com os ensaios de solubilidade e tendo em vista o fato de ser uma fibra inerte, segundo literatura.
Sua utilização fornece novo uso à fibra de sisal, gerando renda para o Brasil e promovendo melhoria nas condições de trabalho da cadeia produtiva.	A fibra sintética já é parcialmente importada pelo Brasil, e a sua produção não está associada diretamente com a geração de renda para o país.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos experimentos realizados e nos resultados obtidos, foi possível chegar às seguintes conclusões e recomendações:

i. Ambos os filtros constituídos de sisal e de polipropileno puderam operar satisfatoriamente na produção de filtrado com turbidez inferior a 1 uT a partir de água de alimentação sintética simulando água bruta destinada a abastecimento (a qual possuía valores de turbidez e cor aparente iguais a 8,19±0,85 uT e 14,47±5,25 uC, respectivamente). Os filtros constituídos de sisal somente alcançaram os resultados esperados quando se adotou comprimento de leito de 100 cm, porosidade de 85% e taxas de até 40 m/h. Já os filtros constituídos de polipropileno (construídos com porosidade de 93%) alcançaram os resultados esperados para todos os comprimentos estudados (25, 60 e 100 cm) no caso da aplicação de taxa de 20 m/h, e para os comprimentos de 60 e 100 cm para o caso da aplicação de taxas de 40 e 80 m/h. Estes últimos filtros, ainda, puderam produzir filtrado com turbidez inferior a 0,5 uT. Ressalta-se que em todos os casos foi utilizado como coagulante o sulfato de alumínio, cuja dosagem foi fixada em 22,5 mg/L, fator que possui fundamental importância nos resultados obtidos.

ii. Os filtros constituídos de sisal e de polipropileno produziram diferentes volumes de filtrado, tiveram diferentes durações de carreira e geraram diferentes perdas de carga de final de carreira. Neste sentido, em termos de volume de filtrado produzido, o melhor desempenho dos filtros de sisal foi o S100-85% com taxa de 20m/h, e dos filtros de polipropileno foi o PP100-93%, também com taxa de 20m/h. Ainda que a produção de filtrado tenha sido maior no caso do filtro de

polipropileno, neste caso também houve perda de carga consideravelmente superior. A fim de se estabelecer parâmetros de comparação entre os filtros, foram avaliados índices de filtrabilidade (IFF e IFI), os quais foram mais promissores para o filtro S100-85%, uma vez que as perdas de carga associadas a seu funcionamento são muito inferiores que aquelas dos filtros de polipropileno. Por outro lado, do ponto de vista da produtividade de água filtrada (porcentagem de água utilizada na lavagem), o desempenho mais vantajoso foi aquele do PP100-93%, com utilização de menos de 2% de água no processo de lavagem, neste caso de filtro com 28 mm de diâmetro e 93% de porosidade. Assim, a escolha de filtros constituídos de uma ou outra fibra, com diferentes porosidades e comprimentos de leito, ficaria a critério da qualidade da água requerida e da disponibilidade de carga hidráulica, além da quantidade de água requerida para o processo de lavagem.

iii. A baixa perda de carga associada ao funcionamento dos filtros do sisal aponta para possibilidade de sua utilização como unidade de pré-filtração, uma vez que estes são capazes de efetuar remoção de cor e turbidez significativa (turbidez inferior a 1 uT, mas nunca inferior a 0,5 uT) associada a baixa perda de carga (inferior a 35 cmH_2O no fim da carreira do filtro de 100 cm). Outra possibilidade de utilização dos filtros constituídos de fibras de sisal seria diminuir a porosidade do leito (inferior a 85%) e/ou aumentar o comprimento de leito. Esta alternativa poderia melhorar a eficiência de remoção do leito filtrante, adequando o filtrado para usos mais restritivos, e geraria aumento da perda de carga.

iv. A diferença observada na eficiência de remoção de cor e turbidez dos filtros constituídos de sisal ou de polipropileno pode ser atribuída parcialmente aos

diferentes diâmetros e superfícies de contato existentes em cada filtro. No caso do filtro constituído de polipropileno – similarmente aos filtros constituídos de náilon, uma vez que ambas as fibras possuem diâmetro de cerca de 30µm – foi encontrada superfície de contato cerca de 7 vezes superior ä dos filtros constituídos de sisal, quando comparados filtros com mesma porosidade de leito (93%). Isto interferiu no desempenho do filtro e na perda de carga associada.

v. Foi observado caminhamento das impurezas nos filtros analisados, mostrando que há ocorrência de filtração em profundidade, com aproveitamento dos diferentes trechos do leito filtrante.

vi. O processo de lavagem empregando estágios de aplicação de ar e de água em sequência se mostrou satisfatório *para os filtros estudados*, com utilização de 3,5% da água produzida no processo de lavagem no caso do S100-85% e de 1,7% no caso do PP100-93%. Em todos os casos, a produtividade encontrada é compatível, em termos de porcentagem, com aquelas associadas aos filtros rápidos convencionais. No entanto, deve-se considerar a possível dificuldade operacional de se efetuar o processo de lavagem com maior frequência, como seria o caso dos filtros de fibra flexível. Também é necessário considerar e avaliar o período de amadurecimento do filtro, que pode representar maior importância nestes casos em que a lavagem é realizada com maior frequência.

vii. Os ensaios de solubilidade em ácido clorídrico e hidróxido de sódio mostraram possibilidade de liberação de substâncias do sisal em águas alcalinas, o que requereria estudos complementares acerca dessas substâncias para os casos em que estiver exposta a este tipo de água, a fim de se conhecer sua nocividade e consequentemente assegurar seu uso. Similarmente, a utilização de produtos

básicos para limpeza do leito parece ser inapropriada devido à degradação que pode causar no leito. No caso de exposição das fibras de sisal a meios ácidos e das fibras de polipropileno a meios ácidos ou básicos, não parece haver restrições da utilização como meio filtrante.

viii. Fibras naturais ou sintéticas podem ser aplicáveis para construção de filtros de fibra flexível. As restrições estão associadas à avaliação da possível liberação de substâncias nocivas à água e das características da fibra que podem interferir no desempenho (como o diâmetro médio e a superfície de contato).

A tecnologia de filtro de fibras flexíveis demonstrou potencial de utilização em tratamento de água, com alta produtividade e consideráveis eficiências de remoção de cor e turbidez. Com a finalidade de seguir avançando no conhecimento desta tecnologia são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar águas de alimentação com qualidades distintas, com a finalidade de verificar a possibilidade de utilização desta tecnologia na clarificação de águas com altos valores de turbidez e cor.
- Avaliar a utilização de outros coagulantes e polímeros, bem como variar e reduzir a dosagem aplicada, com a finalidade de se chegar a uma configuração otimizada, de baixo custo e com baixa produção de lodo.
- Reduzir a porosidade e aumentar o comprimento dos leitos constituídos de fibras de sisal com a finalidade de aumentar as eficiências de remoção.
- Construir e avaliar sistema de filtração composto de filtro de sisal como unidade de pré-filtração seguido de filtro de polipropileno ou náilon como unidade de pós-filtração na clarificação de águas com altos valores de turbidez.

- Estudar a filtração lenta, por meio da adoção de baixas taxas de filtração, em filtros de fibras flexíveis.
- Estudar a utilização de leitos constituídos de sisal ou outras fibras naturais na remoção de sólidos de águas residuárias.
- Comparar o desempenho de filtros de fibra flexível – constituídos de diferentes fibras – com filtros convencionais de areia, aplicados à clarificação de água para abastecimento por meio de filtração direta.
- Operar filtros de fibra flexível de forma continua por período compatível com filtros convencionais, possibilitando comparar de forma mais efetiva a produtividade e verificar possíveis problemas operacionais.
- Avaliar o período de amadurecimento dos filtros, por meio de coleta em intervalos menores no inicio da operação.
- Avaliar a degradabilidade das fibras de sisal, bem como identificar, caracterizar e quantificar as substancia possivelmente liberadas por estas fibras em água.
- Verificar se ocorrem caminhos preferenciais em filtros de fibra flexível do tipo proposto neste trabalho, possivelmente por meio da construção de filtros de acrílico que possibilitem a visualização do interior dos filtros.

Em todos os casos, se recomenda utilizar instalações que permitam a disponibilização de cargas hidráulicas maiores do que aquelas utilizadas no presente trabalho, para que o fim da carreira de filtração não ocorra devido a superação do limite da carga hidráulica.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, W. (2006) O sisal do Brasil. SINDIFIBRAS. Disponível em http://www.brazilianfibres.com. Acesso 20 de julho de 2012.

ARAUJO, C.J. (2010) Influência da velocidade Cross-Flow na câmara de flotação na eficiência de unidades de flotação por ar dissolvido tratando água para abastecimento. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ARBOLEDA, J (1973) Teoria, diseño y control de lós procesos de clarificacion del agua Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 14234. Produtos químicos para tratamento de água para abastecimento – Carvão antracitoso – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro,1998.

BRASIL (1987) Ministério da Agricultura. Especificações para padronização, classificação e comercialização interna do sisal bruto. Brasília.

BRASIL (2004) Ministério da Saúde. Portaria n° 518, 24 de março de 2004.

BRASIL (2011). Ministério da Saúde. Portaria n° 2914, 12 de dezembro de 2011.

CHA, J.H.; LEE, J.J; BENAIM, R.; MOON, T.; HAN, K.B.; KIM, C.W. (2009) Flexible fibre filter: potential for algae removal. Water supply: Aqua, 58(2), 153-157.

DI BERNARDO, L. (coord) (2003) Tratamento de água para abastecimento por filtração direta. Rio de Janeiro: RiMa, ABES.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. (2005) Métodos e técnicas de tratamento de água. São Carlos: RiMa.

EMBRAPA ALGODÃO (2006) Sistemas de Produção, n.5 Disponível em http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sisal/CultivodoSisal/index.html Acesso 20 de julho de 2012.

FRAGA, A. (2012) Modernização da cadeia produtiva de sisal vai abrir novos mercados. Editora Globo: Revista Globo Rural. Disponível no site http://revistagloborural.globo.com Acesso em 21 de novembro de 2012.

IOZZI, M.A.; MARTINS, G.S.; MARTINS, M.A.; FERREIRA, F.C.; JOB, A.E.; MATTOSO, L.H.C. (2010) Estudo da influência de tratamentos químicos da fibra de sisal nas propriedades de compósitos com borracha nitrílica. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol.20, n. 1.

IVES, K. J; PIENVICHITR, V. (1965) Kinects of the filtration of dilute suspensions. Chemichal Engineering Science, vol. 20. Pergamon Press Ltda, Oxford.

IVES, K. J (1970) Rapid Filtration. Water Research, vol. 4. Pergamon Press.

IZQUIERDO, I. S. (2011) Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

JAVIER FERNANDEZ M., JORGE LATORRE M., FABIOLA BERÓN C., NOEL MUNOZ, VIVIANA VARGAS. (2000) Uso de mantas sintéticas y naturales en filtración lenta en arena: Una experiencia en ambientes tropicales. Disponível em: http://www.infoandina.org/recursos/uso-de-mantas-sint%C3%A9ticas-y-naturales-en-filtraci%C3%B3n-lenta-en-arena-una-experiencia-en

Acesso em 20/06/2013.

JEANMAIRE, J-P.; SUTY, H.; MARTELI, P.; BREANT, P.; PEDENAUD, P. (2007) Aplication of the flexible fiber filter module (3FM) filter to sea water filtration. Water Science and Technology: Vol. 56, n.10, 157-165.

JOHIR, M.A; LEE, J.J; VIGNESWARAN, S.; KANDASAMY, J.; SHAW, K. (2009) Treatment of Stormwater using fibre filter media. Water Air Soil Pollut: Focus, 439-447.

LEE, J.J; JEONG, M.K; IM, J.H; BENAIM, R; LEE, S.H; OH, J.E; WOO, H.J; KIM, C.W. (2006) Enhancing flexible fiber filter (3FM) performance using in-line coagulation. Water Science and Technology: Vol. 53, n.7, 59-66.

LEE, J.J; IM, J.H; KIM, J.R; KIM, Y.J; POO, K.M; KIM, C.W. (2007) Better understanding of the filtration characteristics in the flexible fibre filter module (3FM). Water Science and Technology: Vol. 55, n. 1-2, 77-83.

LEE, J.J; CHA, J.H; BENAIM, R.; HAN, K.B; KIM, C.W. (2008a) Fiber filter as an alternative to the process of flocculation-sedimentation for water treatment. Desalination 231, 323-331.

LEE, J.J; CHA, J.H; BENAIM, R.; HAN, K.B.; KIM, C.W. (2008b) Toward an Optimization of the backwashing process in the flexible fiber filter. Separation Science and Technology, 43, 1667-1676.

MAIA, K.A. (2010) Influência da velocidade de entrada na zona de contato na eficiência de clarificação de unidades retangulares de flotação por ar dissolvido aplicado no tratamento de água para abastecimento. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MAUCHAUFFEE, S.(2010) Application of 3FM technology to pulp and paper waster water filtration. Disponível em http://www.aquafit4use.eu/userdata/file/Mid-term%20Conference/Session%203%20Advanced%20Treatments/Application%20of%203FM%20to%20pulp%20paper%20ww%20filtration.pdf. Acesso 23 de junho de 2012.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESAROLLO TERRITORIAL. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Guia ambiental del subsector fiquero. Bogotá, 2006. Segunda edición.

MURPHY, H.M.; MCBEAN, E.A.;FARAHBAKHSH, K. (2009) Appropriate technology: A comprehensive approach for water and sanitation in the developing world. Technology in Society 31 (2009): 158-167.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE - OMS (2004) Sanitation challenge: Turning commitment into reality. Disponível em http://www.who.int. Acesso 17 de março de 2011.

SAVASTANO JÚNIOR, H. (2000) Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2000.