

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

Marcelo Luiz Emmendoerfer

**A UTILIZAÇÃO DA MADEIRA COMO ELEMENTO
FILTRANTE EM TRATAMENTO DE ÁGUA**

Florianópolis
2013

Marcelo Luiz Emmendoerfer

A UTILIZAÇÃO DA MADEIRA COMO ELEMENTO FILTRANTE EM TRATAMENTO DE ÁGUA

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental da
Universidade Federal de
Santa Catarina para a
obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Ambiental.
Orientador:
Prof. Dr. Maurício Luiz Sens

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Emmendoerfer, Marcelo Luiz

A utilização da madeira como elemento filtrante em
tratamento de água / Marcelo Luiz Emmendoerfer ;
orientador, Maurício Luiz Sens - Florianópolis, SC, 2013.
127 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Filtração de água em
madeira. 3. Elemento filtrante. 4. Escoamento tangencial
helicoidal. 5. Tratamento de água. I. Sens, Maurício Luiz.
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

“A Utilização da Madeira como Elemento Filtrante em Tratamento de Água”

MARCELO LUIZ EMMENDOERFER

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

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental

Aprovado por:

Prof. Maurício Luiz Sens, Dr.
(orientador)

Prof. José Carlos Mierzwa, Dr.

Prof. Ramon Lucas Dalsasso, Dr.

Profa. Maria Eliza Nagel
Hassemer, Dra.

Renata Iza Mondardo, Dra.

Prof. William Gerson Matias, Dr.
(coordenador)

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL
SETEMBRO, 2013

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha família e a minha namorada (futura esposa) pelo apoio motivacional e ajuda de maneira geral.

Ao Prof. Maurício Luiz Sens pela orientação, que inclui valiosas horas de discussões durante todo o desenvolvimento deste trabalho, confiança, compreensão e bom humor, além dos conhecimentos transmitidos e também pela amizade.

Agradeço também aos colegas do LAPOÁ: Laura, que foi quem mais “quebrou a cabeça” comigo no laboratório sobre este trabalho e me acompanhou em toda a parte prática da pesquisa; Bruno, que me auxiliava no empréstimo dos aparelhos e os demais que me receberam muito bem no laboratório e sempre se demonstraram dispostos a ajudar.

Agradeço à Profa. Marisa Santos da biologia que mostrou o que pode ser considerado poro na madeira e como se preparar amostras para microscopia eletrônica de varredura.

Agradeço ao Prof. Flávio Rubens Lapolli por disponibilizar o sistema piloto para a elaboração da primeira etapa da pesquisa.

Aos amigos e aos colegas do trabalho, que sempre estiveram por perto.

Aos professores do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Aos professores que compõem a banca de avaliação desse trabalho.

Ao Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da UFSC. E por fim, agradeço à UFSC.

Muito Obrigado!

*A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.*
(Albert Einstein)

ÍNDICE GERAL

| | |
|---|-----------|
| RESUMO | XV |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> | 3 |
| 1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> | 3 |
| 1.2. JUSTIFICATIVA..... | 4 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1. TRATAMENTO DE ÁGUA | 6 |
| 2.2. TIPOS DE FILTRAÇÃO EM ELEMENTOS FILTRANTES | 7 |
| 2.3. CARACTERÍSTICA E ESTRUTURA DE MADEIRAS..... | 10 |
| 2.3.1 <i>Anatomia da madeira</i> | 13 |
| 2.3.2 <i>Espécies de madeira</i> | 15 |
| 2.3.2.1 <i>Caixeta</i> | 15 |
| 2.3.2.2 <i>Garapuvu</i> | 16 |
| 2.3.2.3 <i>Pinus</i> | 19 |
| 2.3.3 <i>Cor da madeira</i> | 23 |
| 2.3.4 <i>Porosidade da madeira</i> | 24 |
| 2.4. FILTRAÇÃO EM MADEIRA..... | 26 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 28 |
| 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 28 |
| 3.2. ENSAIO PRELIMINAR | 28 |
| 3.3. ESTRUTURAÇÃO DAS ETAPAS DA PESQUISA | 30 |
| 3.3.1. ENSAIOS REALIZADOS..... | 30 |
| 3.4. CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS ESTUDADAS | 31 |
| 3.4.1. MADEIRAS ESTUDADAS..... | 32 |
| 3.4.2. LIMPEZA E DESINFECÇÃO DO ELEMENTO FILTRANTE | 33 |
| 3.4.3. AUTOCLAVAGEM | 34 |
| 3.4.4. SECAGEM EM ESTUFA..... | 35 |
| 3.5. ETAPA I – FILTRAÇÃO FRONTAL | 36 |
| 3.5.1. SISTEMA PILOTO 1..... | 36 |
| 3.5.2. PREPARAÇÃO DO ELEMENTO FILTRANTE | 38 |
| 3.5.3. ENSAIOS DE FILTRAÇÃO FRONTAL EM BATELADA | 40 |
| 3.6. ETAPA II – FILTRAÇÃO TANGENCIAL HELICOIDAL | 42 |
| 3.6.1. SISTEMA PILOTO 2 – FILTRAÇÃO TANGENCIAL | 43 |
| 3.6.2. SISTEMA PILOTO 3 – FILTRAÇÃO TANGENCIAL HELICOIDAL | 45 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.6.3. | ENSAIOS DE FILTRAÇÃO TANGENCIAL HELICOIDAL EM BATELADA | 48 |
| 3.7. | CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DE ÁGUA | 48 |
| 3.8. | ENSAIOS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV | 52 |
| 3.8.1.1. | MEDIÇÃO DE DIÂMETRO DE PORO | 54 |
| 3.8.1.2. | CÁLCULO DE POROSIDADE | 55 |
| 3.8.1.3. | CÁLCULO DE DENSIDADE DE POROS | 55 |
| 3.8.1.4. | PROFUNDIDADE DE COLMATAÇÃO NOS POROS | 55 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 57 |
| 4.1. | CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA | 57 |
| 4.1.1. | MASSAS ESPECÍFICAS | 57 |
| 4.1.2. | ENSAIOS DE MEV DOS ELEMENTOS FILTRANTES | 57 |
| 4.1.3. | MEV APÓS A CARREIRA DE FILTRAÇÃO | 61 |
| 4.2. | CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA | 64 |
| 4.3. | FILTRAÇÃO COM ESCOAMENTO FRONTAL | 64 |
| 4.4. | FILTRAÇÃO COM ESCOAMENTO TANGENCIAL HELICOIDAL | 68 |
| 5. | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 73 |
| | APÊNDICE A | 78 |
| | APÊNDICE B | 92 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 - FILTRAÇÃO CONVENCIONAL (ESCOAMENTO FRONTAL) X FILTRAÇÃO TANGENCIAL | 7 |
| FIGURA 2 - CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS [MIERZWA, 2008] | 8 |
| FIGURA 3 - FILTRAÇÃO TANGENCIAL E FRONTAL [SCHNEIDER E TSUTIYA, 2001] | 9 |
| FIGURA 4 - SENTIDOS DE CORTE DA MADEIRA (ADAPTADO DA REFERÊNCIA [GONZAGA, 2006]) | 12 |
| FIGURA 5 – SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO DA MADEIRA [SILVA, 2008] | 13 |
| FIGURA 6 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA ANATOMIA DE UMA CONÍFERA – NÃO PINÁCEA [GONZAGA, 2006] | 14 |
| FIGURA 7 - ANATOMIA DE UMA CONÍFERA NÃO PINÁCEA (ESQUERDA) E DE UMA FOLHOSA (DIREITA) (ADAPTADO DE REFERÊNCIA [GONZAGA, 2006]) | 24 |
| FIGURA 8 – ELEMENTOS FILTRANTES COM DIFERENTES ESPESSURAS [CORRÊA, 2002] | 26 |
| FIGURA 9 – RELAÇÃO ENTRE ESPESSURA DA PAREDE E EFICIÊNCIA [CORRÊA, 2002] | 27 |
| FIGURA 10 – ENSAIO PRELIMINAR DE PASSAGEM DE ÁGUA PELA MADEIRA | 29 |
| FIGURA 11 – FLUXOGRAMA DA ETAPA I | 31 |
| FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DA ETAPA II | 31 |
| FIGURA 13 – MADEIRAS ESTUDADAS (CAIXETA, GARAPUVU E PINUS, DA ESQUERDA PARA A DIREITA) | 32 |
| FIGURA 14 – DESINFECÇÃO DA MADEIRA COM HIPOCLORITO DE SÓDIO .. | 34 |
| FIGURA 15 - AUTOCLAVE VERTICAL AV SD | 34 |
| FIGURA 16 – ESTUFA PARA SECAGEM DAS AMOSTRAS | 35 |
| FIGURA 17 – SISTEMA PILOTO DE FILTRAÇÃO EM ESCOAMENTO FRONTAL | 37 |
| FIGURA 18 - FILTRO PILOTO DE FILTRAÇÃO EM ESCOAMENTO FRONTAL .. | 37 |
| FIGURA 19 - DETALHES DO FILTRO PILOTO DE FILTRAÇÃO EM ESCOAMENTO FRONTAL | 38 |
| FIGURA 20 – CORTE DOS ELEMENTOS FILTRANTES PARA FILTRAÇÃO FRONTAL | 38 |
| FIGURA 21 - ELEMENTOS FILTRANTES PARA A FILTRAÇÃO FRONTAL | 39 |
| FIGURA 22 – MEDIÇÃO DA PRESSÃO DE TRABALHO | 41 |
| FIGURA 23 – COLETA DE ÁGUA TRATADA (FILTRADA) | 41 |
| FIGURA 24 – SISTEMA PILOTO 2 – FILTRAÇÃO TANGENCIAL | 43 |
| FIGURA 25 – SEQUENCIA DA CONSTRUÇÃO DO SISTEMA PILOTO 2 | 44 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 26 – CONSTRUÇÃO DO FILTRO PILOTO PARA FILTRAÇÃO TANGENCIAL HELICOIDAL | 45 |
| FIGURA 27 – ESQUEMA DA MONTAGEM DO SISTEMA PILOTO | 46 |
| FIGURA 28 – SISTEMA PILOTO CONSTRUÍDO EM LABORATÓRIO | 46 |
| FIGURA 29 - DETALHE DO FILTRO PILOTO E ESCOAMENTO TANGENCIAL HELICOIDAL | 48 |
| FIGURA 30 - PRODUÇÃO DE ÁGUA COAGULADA | 50 |
| FIGURA 31 – APARELHO DE <i>JAR TEST</i> | 50 |
| FIGURA 32 - ÁGUA BRUTA COAGULADA E ÁGUA FILTRADA, RESPECTIVAMENTE (ETAPA II) | 51 |
| FIGURA 33 - MEV, MODELO JEOL JSM-6390LV | 52 |
| FIGURA 34 - AMOSTRAS DAS MADEIRAS APÓS CORTE E COBRIMENTO DE OURO | 53 |
| FIGURA 35 – CONTAGEM DE POROS (CAIXETA, GARAPUVU E PINUS (DA ESQUERDA PARA DIREITA) | 54 |
| FIGURA 36 – PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA MEV – ETAPA II | 55 |
| FIGURA 37 – DESMONTAGEM DO FILTRO PILOTO E ELEMENTO FILTRANTE COLMATADO | 56 |
| FIGURA 38 - IMAGENS FRONTAIS DE MEV DA MADEIRA CAIXETA NO SENTIDO PARALELO AS FIBRAS (LCME) | 57 |
| FIGURA 39 - IMAGENS FRONTAIS DE MEV DA MADEIRA GARAPUVU NO SENTIDO PARALELO AS FIBRAS (LCME) | 58 |
| FIGURA 40 - IMAGENS FRONTAIS DE MEV DA MADEIRA PINUS NO SENTIDO PARALELO AS FIBRAS (LCME) | 58 |
| FIGURA 41 - IMAGENS FRONTAIS DE MEV DA MADEIRA PINUS NO SENTIDO TRANSVERSAL AS FIBRAS (LCME) | 59 |
| FIGURA 42 – PONTOAÇÕES DA MADEIRA PINUS | 60 |
| FIGURA 43 – POROS DA MADEIRA PINUS NO SENTIDO TRANSVERSAL AO ESCOAMENTO | 61 |
| FIGURA 44 – COLMATAÇÃO DA MADEIRA PINUS | 62 |
| FIGURA 45 – COLMATAÇÃO DA MADEIRA PINUS (500x) | 62 |
| FIGURA 46 – COLMATAÇÃO DA MADEIRA PINUS, A 5 MM DE PROFUNDIDADE DA SUPERFÍCIE DE FILTRAÇÃO | 63 |
| FIGURA 47 – COLMATAÇÃO DA MADEIRA PINUS, A 10 MM E 15 MM DE PROFUNDIDADE DA SUPERFÍCIE DE FILTRAÇÃO, RESPECTIVAMENTE | 63 |
| FIGURA 48 – REMOÇÃO DE COR APARENTE E TURBIDEZ (%) E VAZÃO MÉDIA (L/H) PARA AS MADEIRAS ANALISADAS COM ÁREA DE 12,5 CM ² | 66 |
| FIGURA 49 – ABSORBÂNCIA X COMPRIMENTO DE ONDA (NM) PARA AS ÁGUAS FILTRADAS NAS MADEIRAS ANALISADAS | 67 |
| FIGURA 50 – AMOSTRAS DA MADEIRA CAIXETA ANTES E DEPOIS DA FILTRAÇÃO FRONTAL | 68 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 51 – COR APARENTE E TURBIDEZ DA ÁGUA BRUTA E FILTRADA, PARA A MADEIRA PINUS AO LONGO DO ENSAIO DE FILTRAÇÃO SEM COAGULAÇÃO..... | 68 |
| FIGURA 52 – COR APARENTE E TURBIDEZ DA ÁGUA BRUTA E FILTRADA, PARA A MADEIRA PINUS AO LONGO DO ENSAIO DE FILTRAÇÃO COM COAGULAÇÃO (AL ₂ SO ₄)..... | 69 |
| FIGURA 53 – COR APARENTE E TURBIDEZ DA ÁGUA BRUTA E TRATADA, COM E SEM COAGULAÇÃO (VALORES MÉDIOS) | 70 |
| FIGURA 54 – VOLUME ACUMULADO AO LONGO DO ENSAIO DE FILTRAÇÃO COM E SEM COAGULAÇÃO EM 95 CM ² DE MADEIRA | 71 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1 - ESTRATÉGIAS DE LIMPEZA PARA DIFERENTES DEPÓSITOS [SCHNEIDER E TSUTIYA, 2001]..... | 10 |
| TABELA 2 – NOMENCLATURA REFERENTE AO ESCOAMENTO E AO CORTE DA MADEIRA | 14 |
| TABELA 3 – RESULTADOS ESTATÍSTICOS DE PERMEABILIDADE PARA AS AMOSTRAS (ADAPTADO DE SILVA, 2007)..... | 25 |
| TABELA 4 - ESPÉCIES DE MADEIRA, PRÉ-TRATAMENTO, SENTIDO DO ESCOAMENTO E MASSA ESPECÍFICA | 39 |
| TABELA 5 - MASSA ESPECÍFICA DAS MADEIRAS ESTUDADAS | 40 |
| TABELA 6 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA | 49 |
| TABELA 7 – RESULTADOS DO DIÂMETRO MÉDIO DO PORO (MM), POROSIDADE (%) E DENSIDADE DE POROS (PORO/MM ²) NAS 3 MADEIRAS ESTUDADAS..... | 60 |
| TABELA 8 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA | 64 |
| TABELA 9 – PRESSÕES DE TRABALHO PARA A FILTRAÇÃO FRONTAL SEM AL ₂ SO ₄ | 64 |
| TABELA 10 – PRESSÕES DE TRABALHO PARA A FILTRAÇÃO FRONTAL COM AL ₂ SO ₄ | 65 |
| TABELA 11 – VALORES MÉDIOS DOS RESULTADOS DA FILTRAÇÃO FRONTAL COM E SEM COAGULAÇÃO (AL ₂ SO ₄) | 65 |
| TABELA 12 – REMOÇÃO ESPECÍFICA PARA A FILTRAÇÃO FRONTAL COM COAGULAÇÃO | 66 |
| TABELA 13 – VALORES MÉDIOS DOS RESULTADOS DA FILTRAÇÃO TANGENCIAL HELICOIDAL COM E SEM COAGULAÇÃO | 70 |

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E UNIDADES

| | |
|-----------------------------------|--|
| % | porcentagem |
| g/cm ³ | unidade de massa específica ou densidade |
| m ³ /m ² .d | unidade de taxa de filtração, metros cúbicos por metro quadrado vezes dia |
| mm | unidade de comprimento, milímetros |
| cm | unidade de comprimento, centímetros |
| mca | unidade de pressão, medido em metros de coluna d'água |
| LCME | Laboratório Central de Microscopia Eletrônica |
| LARA | Laboratório de Reuso de Água |
| LAPOÁ | Laboratório de Potabilização de Água |
| LIMA | Laboratório Integrado de Meio Ambiente |
| ENS | Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental |
| UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina |
| PVC | Poli Cloreto de Vinila |
| // | escoamento paralelo às fibras da madeira |
| # | escoamento transversal às fibras da madeira |
| ρ | densidade ou massa específica, expressa em g/cm ³ |
| m | massa, expressa em grama (g) |
| V | volume, expresso em mL (mililitro), L (litro), cm ³ (centímetro cúbico) |
| °C | unidade de temperatura em Graus Celsius |
| mL | unidade de volume expresso em mililitro |
| s ⁻¹ | unidade de gradiente de velocidade |
| uH | unidade de cor aparente |
| uT | unidade de turbidez (equivalente a NTU) |
| ppm | unidade de concentração, parte por milhão (equivalente a mg/L) |
| STD | Sólidos Totais Dissolvidos |
| C | Condutividade |
| psi | unidade de pressão (1 psi = 0,7 mca) |
| nm | unidade de comprimento de onda, nanômetro |
| μ S/cm | unidade de condutividade, microSiemens por centímetro |
| h | unidade de tempo, horas |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| ϵ | porosidade, expresso em porcentagem (%) |

| | |
|---------------------------------|--|
| Σ | somatório |
| Poros/mm ² | unidade de densidade de poros, expresso em números de poros por milímetros quadrado |
| Q | vazão, litros por hora (L/h), litros por segundo (L/s) |
| T | tempo, expresso em segundos (s), minutos (min) ou horas (h) |
| A | área, expresso em centímetros quadrados (cm ²), milímetros quadrados (mm ²) |
| v | velocidade, expresso em metros por segundo (m/s), centímetros por segundo (cm/s) |
| CV | unidade de potência, Cavalos Vapor (1CV = 732 Watts) |
| SMWW | Standard Methods for the examination of Water and Wastewater |
| Al ₂ SO ₄ | fórmula química de sulfato de alumínio |
| NaClO | fórmula química de hipoclorito de sódio |
| Vac | volume acumulado, em litros (L) |
| X | números de vezes (pode-se referir ao aumento do MEV ou ao número de repetições de uma determinada análise) |
| AU | unidades de Absorbância |
| μm | micron, igual 10 ⁻⁶ m ou 10 ⁻³ mm |
| nm | nanômetro, igual 10 ⁻⁹ m ou 10 ⁻⁶ mm ou 10 ⁻³ μm |
| R | remoção específica (% / L / h.mca) |

RESUMO

A utilização da madeira como elemento filtrante em tratamento de água pode ser uma forma eficiente e de baixo custo, já que a madeira é um material renovável. O estudo foi desenvolvido em duas etapas, mediante a construção de sistemas pilotos. Etapa I, estudo em escoamento frontal e Etapa II, estudo em escoamento tangencial helicoidal. Foram estudadas 3 espécies: caixeta (*Tabebuia cassinoides* Lam. P. DC.), garapuvu (*Schizolobium parahyba* Vell. Blake) e pinus (*Pinus elliottii*). Foram determinadas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com aproximações iguais para as três amostras no sentido dos poros, paralelo às fibras. Com relação à permeabilidade das madeiras estudadas, observou-se que quanto mais porosa for a madeira, maior será sua permeabilidade e menor será sua massa aparente. Os poros das madeiras podem se enquadrar dentro da faixa da microfiltração. A filtração no sentido transversal das fibras não foi interessante, por apresentar baixíssima taxa de filtração e requerer uma pressão de trabalho alta. Com relação à filtração com escoamento frontal, considerando ao mesmo tempo qualidade e produção de água, a pinus foi a melhor opção. Existe uma correlação entre massa específica da madeira e sua porosidade. Neste trabalho, a massa específica de $0,50 \text{ g/cm}^3$ e uma porosidade na faixa de 40 % foram interessantes para o tratamento. Entre as madeiras estudadas, o diâmetro de poro com maior desempenho foi em torno de 0,02 mm. Os resultados na filtração com escoamento tangencial helicoidal geraram uma remoção média de 70% da cor aparente e remoção média de 93% de turbidez. A pressão de trabalho, não ultrapassou 30 mca, para uma taxa de filtração $15 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. Os ensaios de filtração tangencial helicoidal envolvendo coagulação demonstraram melhores resultados e maior eficiência no tempo de filtração. A colmatação sobre a superfície da madeira chegou a uma profundidade de 5 mm, não sendo encontrado em 10 mm. Este sistema de tratamento gerou baixo consumo de energia (por trabalhar com baixas pressões) e utilizou matéria-prima renovável.

Palavras-chave: filtração de água em madeira, elemento filtrante, escoamento tangencial helicoidal, tratamento de água.

ABSTRACT

The use of wood as a filter element for water treatment can be an efficient, low cost alternative because wood is a renewable material. Therefore, pioneering a study to examine the possibility of filtering water through wood was advantageous. This study was conducted in two steps by the construction of pilot systems. The first step studied dead-end filtration and the second step studied helical cross-flow. The three species of wood studied: caixeta (*Tabebuia cassinoides* Lam P. DC.) garapuvu (*Schizolobium parahyba* Vell. Blake), and pine (*Pinus elliottii*). The images obtained in the Scanning Electron Microscope (SEM) had the same approximations for all three samples in the pores' direction as well as the direction of fibers. The porosity of the wood can fit within the range of the microfiltration. The observation of the wood's permeability revealed that the more porous the wood, the greater the permeability and the smaller the apparent mass. Filtration in the perpendicular direction of the fibers did not prove valuable because of its very low filtration rate and the need for high working pressure. Pine proved to be the superior option when considering the quality and production of water in the dead-end filtration. In this study, the density of the wood calculated 0.50 g/cm^3 and the porosity in the range of 40%, which proved to be significant in this treatment system. This discovery displayed a correlation between wood density and its porosity when choosing a wood for water filtration. With respect to the observed wood, the pore diameter with higher performance was approximately 0.02 mm. The results in helical cross-flow filtration generated an average removal of 70% to apparent color removal and 93% for average turbidity. The working pressure did not exceed 40 psi for a filtration rate of $15 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$. The helical cross-flow filtration tests involving coagulation showed enhanced results and higher efficiency. The fouling on the surface of the wood reached a depth of 5 mm, not found in 10 mm. This treatment system exhibited improved and cost effective results with minimal power consumption due to the low working pressures.

Keywords: water treatment, filter element, helical cross-flow, water filtration in wood.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de água tratada para consumo humano ou para outras aplicações, seja para uma comunidade ou para uma residência, vem aumentando com o passar dos anos e ficando cada vez mais oneroso seu tratamento devido ao mal estado de conservação dos mananciais.

A utilização da madeira como elemento filtrante pode ser uma forma eficiente e de baixo custo, já que a madeira é um material renovável e encontrado em toda a Terra, nos diversos ambientes.

Sendo assim, iniciou-se esta pesquisa para analisar a possibilidade de filtrar água através da madeira. Este trabalho deu continuidade ao trabalho de conclusão de curso [Corrêa, 2002], no qual obtiveram os primeiros experimentos com filtração em madeira no sentido transversal as fibras.

Este estudo avaliou o desempenho do sistema de filtração de água em madeira com escoamento frontal, tangencial e tangencial helicoidal escolhendo 3 espécies de madeiras, determinando a eficiência das mesmas, além de estudar o melhor sentido do escoamento da água no processo de filtração (paralelo ou transversal às fibras).

Neste contexto, a tecnologia proposta poderá suprir a demanda, tanto em qualidade quanto quantidade, nas situações como as apresentadas acima, pois ao passar pelo elemento filtrante de madeira, espera-se que a água alcance os padrões mínimos exigidos na Portaria nº2914 de 2011 do Ministério da Saúde que estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Este trabalho foi estruturado em objetivo geral e objetivos específicos, revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussão, conclusão e recomendações.

No item objetivos é descrito os sistemas que foram estudados e o que foi necessário realizar para selecionar as madeiras em termos de qualidade e quantidade de água tratada.

A revisão bibliográfica buscou relatar os tipos de filtração a serem utilizadas em madeira, sua anatomia, as espécies estudadas e a primeira pesquisa realizada sobre este assunto.

Em materiais e métodos é descrito a metodologia utilizada e suas respectivas etapas, caracterização das madeiras selecionadas, detalhamento de seus ensaios de filtração com e sem coagulação,

microscopia eletrônica de varredura (MEV) antes e depois dos ensaios.

No item resultados e discussões é apresentado e discutido os ensaios de filtração frontal, tangencial e tangencial helicoidal, qualidade da água bruta e tratada, além das imagens de MEV.

Por fim, em conclusões e recomendações, são apresentados os ganhos que esta pesquisa trouxe para a comunidade científica, trazendo pontos relevantes sobre o tratamento de água em madeira, principais parâmetros no processo de filtração e recomendações para a continuidade de se estudar este assunto pioneiro.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliação do desempenho de sistemas de filtração utilizando a madeira como elemento filtrante no escoamento frontal, tangencial e tangencial helicoidal para uso em tratamento de água.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Estudar e selecionar 3 espécies de madeira que possam servir para a finalidade de filtração de água;
- ✓ Determinar a capacidade de filtração frontal com as 3 espécies estudadas, selecionando a madeira com melhor desempenho;
- ✓ Avaliar o melhor sentido de escoamento da água em relação às fibras da madeira no processo de filtração;
- ✓ Analisar a filtração tangencial helicoidal em madeira para o processo de tratamento de água;
- ✓ Avaliar parâmetros relevantes para a filtração em madeira, tais como: diâmetro do poro, massa específica, porosidade, pressão de trabalho, taxa de filtração, profundidade de colmatação.

1.2. Justificativa

Este projeto de pesquisa teve como principal finalidade aplicar a tecnologia de filtração tangencial helicoidal em madeira para tratamento de água, obtendo água de qualidade para o consumo humano. O desenvolvimento desta nova tecnologia vem contribuir para aplicação da madeira a este uso, algo inovador e até o momento nunca testado, exceto no trabalho de [Corrêa, 2002].

Este trabalho trata-se da continuação do trabalho supracitado. É de extrema importância a adoção de novas alternativas, pois membranas para tratamento de água tem ainda alto custo de implantação, além do alto custo de trabalho e manutenção.

A madeira em geral tem inúmeras finalidades e aplicações ao ser humano, sendo que a filtração em madeira é uma nova aplicação. Observou-se que para a água passar através de um meio sólido, este material precisa necessariamente ser poroso, pois caso contrário a filtração será impossibilitada pela grande perda de carga gerada.

Em março de 2004, 133 municípios do interior catarinense decretaram situação de emergência ou calamidade pública em função da estiagem que afetava 38% dos municípios do estado [Deser, 2004]. Isto mostra que se houver outras formas de tratamento de água, a população poderá ter possibilidade de obter água utilizando mananciais próximos as suas residências.

Diante deste fato, estudar formas de tratamento para pequenas comunidades ou até residências isoladas tem sido o alvo desta técnica alternativa, uma vez que a zona urbanizada do município dispõe de abastecimento público de água potável.

Como medida de atenuação ao racionamento e conseqüentemente a melhoria da qualidade da água consumida, propõe-se a utilização de um sistema de tratamento de água através da madeira, que poderá trabalhar com pouca pressão d'água (metros de coluna d'água - mca) e resolver problemas de qualidade de água em residências ou comunidades isoladas que o sistema público de distribuição de água não tem capacidade de atender ou presta serviço precário vulnerável a sazonalidade.

A obtenção de madeira em zonas rurais é de certa forma fácil, pois muitas vezes as florestas plantadas para fins comerciais estão próximas, facilitando a possibilidade de aquisição de toras para esta finalidade. Dependendo da situação, o refugo das madeireiras, início e fim de tronco, pode ser utilizado para obtenção de madeira para

tratamento de água, fazendo com que a mesma tenha ainda menor custo.

A operação de filtração através da madeira consiste basicamente em pressurizar a água bruta e fazer com que a conexão com o duto e a madeira seja algo estanque, possibilitando a água passar pelos poros da madeira, filtrando-a.

Com relação à limpeza do elemento filtrante (madeira), poderá simplesmente o mesmo ser substituído, por ser tratar de uma matéria-prima de fácil obtenção e baixo custo. Por outro lado, existe a possibilidade também da sua reutilização para outras finalidades, como por exemplo, a fabricação de carvão vegetal ou insumo para usina termoeleétrica.

Estudar a filtração tangencial helicoidal com a utilização de matéria-prima renovável é realmente uma solução promissora que deverá nessa pesquisa ser bem analisada, a fim de produzir água com qualidade dentro dos padrões de potabilidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fornecimento de água para abastecimento da população deve ser em quantidade e qualidade compatíveis com as necessidades da mesma, objetivando a proteção da saúde e possibilitando o desenvolvimento econômico. [Funasa, 2004]

Segundo [Von Sperling, 1996], é evidenciado que a qualidade da água requerida pela população depende do uso previsto, que necessita de mais qualidade e mais tratamento quanto mais nobre for o destino da água.

Nesse contexto, a água para abastecimento doméstico deve ter alta qualidade de modo a proteger a saúde da população abastecida. [Funasa, 2004]

Em localidades mais isoladas, não é comum haver abastecimento de água para os moradores, dessa forma são instalados sistemas descentralizados ou individuais de tratamento. Ao mesmo tempo, que as soluções coletivas permitem a supervisão do sistema de abastecimento e controle da qualidade de água fornecida, os sistemas individuais são preferíveis por apresentarem maior viabilidade econômica para uso em áreas isoladas com população dispersa, acarretando melhor custo x benefício. [Funasa, 2004]

2.1. Tratamento de água

Os sistemas convencionais de tratamento de água “consistem em uma sequência de processos que incluem a coagulação, floculação, sedimentação (ou flotação), filtração, fluoração, cloração e correção de pH.” [Pádua, 2009], resultando em sistemas que ocupam grandes áreas, produtos químicos e energia.

Uma opção de tratamento de água são as membranas filtrantes, que vem sendo utilizadas com maior frequência, visto que são mais compactas e eficientes, quando comparadas com sistemas convencionais.

Apesar das vantagens apontadas, as membranas possuem altos custos de fabricação e os processos de limpeza também são caros, por necessitarem de processos complexos para que sua porosidade seja adequada, para melhorar a eficiência na filtração.

Dessa forma, a utilização das mesmas em locais isolados torna-se inviável, pois geralmente essas regiões não podem arcar com os custos destas tecnologias. [Schneider e Tsutiya, 2001]

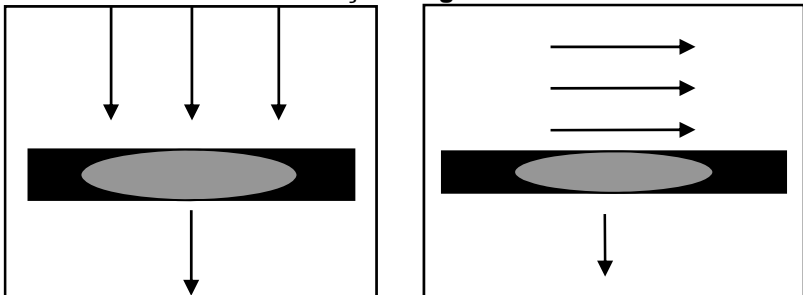
Não se pode afirmar que a filtração em madeira seja filtração em membrana, entretanto será utilizado conhecimentos aplicados à membranas para se aplicar à filtração em madeira, como por exemplo a filtração com escoamento tangencial.

2.2. Tipos de filtração em elementos filtrantes

Devido à conformação geométrica das membranas, a filtração deixa de ser realizada de maneira convencional e passa a ser realizada tangencialmente às mesmas (do inglês, *cross-flow filtration*), conforme Figura 1, pois desta forma é observada turbulência em sua superfície, o que acarreta arraste de partículas que ocasionam a formação de depósitos aderidos devido à precipitação de sais com baixa solubilidade.

Com a filtração tangencial, deverá ser aplicada pressão necessária para “empurrar” o líquido através dos poros da membrana, para que o mesmo seja tratado. A pressão a ser aplicada deve obedecer às recomendações do fabricante para que a mesma não venha danificar sua própria superfície. [Mallevalle, 1998]

Figura 1 - Filtração convencional (escoamento frontal) x Filtração tangencial



As membranas eram utilizadas para análise bacteriológica de água para consumo antes do ano 1933 pelos russos, ou seja, as membranas serviam para cultivo de bactérias. [Dutka, 1981],

Na Alemanha, durante a segunda guerra mundial, devido à contaminação da água, a tecnologia russa de membranas foi desenvolvida para potabilização da água para consumo. Após a segunda guerra mundial, os EUA perceberam a importância dessa técnica, devido aos rumores de uma guerra biológica e iniciaram pesquisas baseando-se na tecnologia alemã.

Na década de 60, as membranas de osmose inversa foram utilizadas para dessalinização da água do mar. [Pádua, 2009]

A evolução das membranas [Schneider e Tsutiya, 2001], ocorreu em três gerações. A primeira possuía poros regulares que atravessavam toda a espessura do elemento filtrante, por isso, possuíam baixa produtividade e quando submetidas a elevadas pressões entravam em colapso.

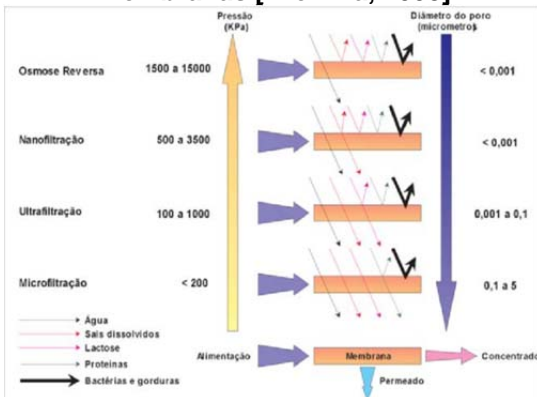
A seguir, foram produzidas membranas assimétricas, segunda geração, com maior resistência mecânica, aumento de porosidade e aumento de espessura.

A terceira geração, inicia-se com a produção de membranas compostas, ou seja, para a superfície utiliza-se um filme fino que fica sobre uma estrutura de suporte, ambas possuindo capacidade de filtração. As membranas filtrantes são fabricadas geralmente com polímeros orgânicos, sendo que também podem ser utilizadas membranas inorgânicas, que são de alto custo.

Uma vez que a utilização de membranas filtrantes destinadas à separação de materiais comprovou-se eficaz, vários processos começaram a ser desenvolvidos, nos quais o principal fator de escolha se encontra na relação entre o que será filtrado e o tamanho dos poros do material filtrante.

Em geral, o princípio de funcionamento das membranas baseia-se na passagem do fluido pressurizado pelo elemento filtrante que possui determinada porosidade. É a porosidade que determina o que ficará retido (partículas com diâmetro maior que o dos poros), e o que será permeado (partículas com diâmetro menor que o dos poros).

Figura 2 - Características dos processos de separação por membranas [Mierzwa, 2008]



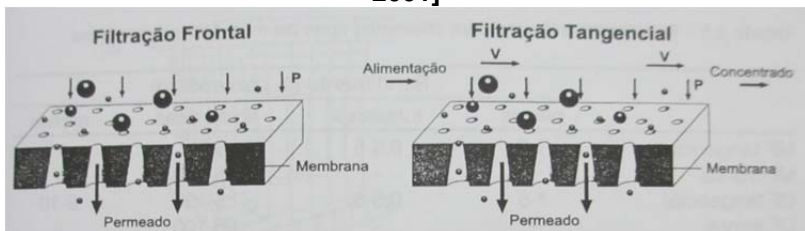
Portanto, quanto menores os poros das membranas, maior a pureza da água permeada [Basseti, 2002, Dutka, 1981, Schneider e Tsutiya, 2001]. Com relação à porosidade, as membranas são divididas em microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa. A representação das principais características das membranas são apresentadas na Figura 2.

Segundo [Amaral, 2011], sugere-se que as membranas de microfiltração possam ser utilizadas como opção de tratamento de água já que possibilitam vazões maiores com pressões menores, e podem remover organismos como vírus e bactérias; ou seja, menor custo com energia, em comparação com os outros tipos de membranas. Porém, esse uso depende da atividade a qual a água se destina.

Segundo [Silva, 2008], foi possível modelar numericamente o processo de filtração tangencial em tubos permeáveis para os regimes de escoamento laminar e turbulento, diferentemente das demais literaturas. Estudos aplicados ao processo de filtração tangencial têm sido o objetivo de muitos trabalhos devido a sua ampla capacidade de adequação aos mais diversos processos industriais.

As membranas podem ser operadas em fluxo frontal ou tangencial (*cross-flow*), como representado na Figura 3. Em escoamento frontal o líquido é bombeado perpendicularmente as membranas. No tangencial, o escoamento ocorre paralelamente à membrana, o que proporciona a autolimpeza da sua superfície. O efluente que carrega as impurezas da superfície da membrana é chamado concentrado, o que atravessa a superfície é chamado permeado. [Oliveira, 2010, Schneider e Tsutiya, 2001]

Figura 3 - Filtração tangencial e frontal [Schneider e Tsutiya, 2001]



Além da classificação com relação ao escoamento, as membranas podem ser classificadas com relação à forma

geométrica. Podem ser em forma de placas, cilindros tubulares, espirais, cilindros de fibra oca e discos rotatórios. [Schneider e Tsutiya, 2001]

Após um determinado período de utilização é comum ocorrer a colmatação das membranas causando perda de eficiência de filtração e redução de escoamento, devido ao aumento da perda de carga, nesses casos para manter a vazão é necessário aumentar a pressão de entrada de água.

A colmatação, também chamada de torta é causada pelo acúmulo de material, na superfície da membrana. [Schneider e Tsutiya, 2001] Esse material pode ser removido através da limpeza da mesma, podendo ser realizada através de determinadas estratégias de limpeza que são mais adequadas dependendo da origem da colmatação, ou seja, depósitos inorgânicos, orgânicos, partículas ou microorganismos.

A Tabela 1 apresenta a relação entre o material a ser removido e a estratégia mais adequada de limpeza das membranas.

Tabela 1 - Estratégias de limpeza para diferentes depósitos [Schneider e Tsutiya, 2001]

| Tipo de depósito | Estratégia de limpeza | | | |
|--------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|
| | Limpeza hidráulica | Cloração da alimentação | Acidificação da alimentação | Limpeza química |
| Inorgânico | - | - | ++ | ++ |
| Particulado | ++ | - | - | ++ |
| Microbiano | + | ++ | + | ++ |
| Orgânico | - | + | - | ++ |

Nota: - sem efeito ou com consequências negativas;
 + algum controle;
 ++ controle adequado;
 * em conjunto com cloração do efluente.

Como pode se observar, não foi encontrado na literatura outro trabalho sobre filtração de água em madeira; apenas o trabalho de [Corrêa, 2002], que pertence ao mesmo grupo de pesquisa (Laboratório de Potabilização de Água – LAPOÁ).

2.3. Característica e estrutura de madeiras

A madeira é um produto do caule das árvores, sendo necessário estudar sua estrutura e suas características, visto que essas propriedades influenciam em sua porosidade, permeabilidade, comportamento em diferentes condições de temperatura, entre outros. [Klock, 2005]

As árvores ou vegetais superiores ou, ainda, fanerógamas, se dividem em gimnospermas e angiospermas. As gimnospermas são compostas pelas coníferas. No Brasil, existem duas famílias nativas: Podocarpaceae e Araucariaceae. Já as angiospermas também chamadas de folhosas, são mais complexas e organizadas e podem ser divididas em monocotiledôneas e dicotiledôneas, que compõem a maior parte das árvores brasileiras. [Gonzaga, 2006]

A estrutura das coníferas é basicamente composta por traqueóides e traqueídes axiais, além disso, existem canais no sentido radial, chamados de pontoações, que interligam os traqueídeos, e são responsáveis pelo transporte e armazenamento de substâncias. [Gonzaga, 2006, Klock, 2005]

Já as folhosas apresentam o tecido básico composto por fibras libriformes e fibro-traqueóides onde se distribuem vasos condutores que tem como função a distribuição da seiva bruta por toda a árvore. O tronco das folhosas é também composto por fibras que tem como função o suporte e a estrutura do tronco. Estes canais podem também conter diversas substâncias, entre elas as resinas que podem ser gorduras, ceras e esteróides. [Gonzaga, 2006, Klock, 2005] Estas resinas poderão causar a obstrução dos poros, o que pode interferir no fluxo de permeado nos testes de filtração, ou seja, quanto maior a obstrução dos poros menor o escoamento de água.

As madeiras são compostas basicamente por celulose, hemicelulose e lignina, porém existem outras substâncias que podem fazer parte da composição química das madeiras, como: substâncias poliméricas secundárias e substâncias de baixo peso molecular, que podem ser responsáveis por gosto, cheiro e cor [Klock, 2005], a presença destas substâncias depende da espécie da madeira em questão.

A madeira pode ser um material problemático para seu manuseio devido a sua anisotropia, que pode causar deformações ao perder ou ganhar umidade e rachaduras ao secar, se comportando diferentemente conforme a direção analisada. Além disso, por ser um material orgânico e degradável pode ser atacado por bactérias, insetos e fungos, entre outros.

De acordo com [Brasil e Ferreira, 1979], a espécie *Eucalyptus Grandis* apresentou variação nos resultados no sentido radial e evidenciaram a possibilidade de se selecionar árvores com as características de fibras mais desejáveis já nos primeiros anos de crescimento. Outro fator importante é que as propriedades físico-

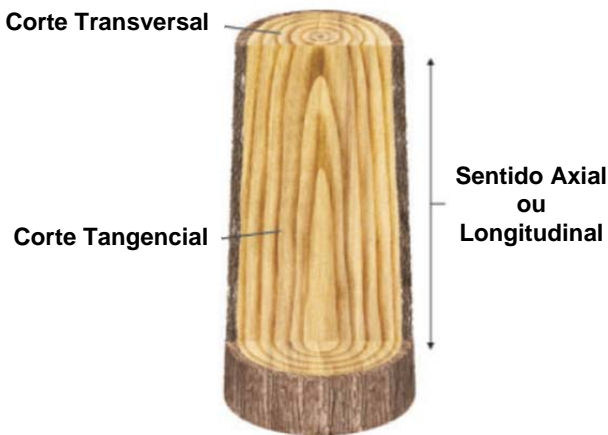
mecânicas variam muito pouco em relação aos anéis (raios) centrais para os periféricos.

Desta forma, devem ser tomadas precauções na manufatura do elemento filtrante, sendo importante também facilitar a secagem da madeira. Esta secagem pode causar deformações, que são maiores, quando o corte é realizado no sentido longitudinal tangencial aos anéis; médias, quando o corte é feito no sentido transversal; e desprezíveis no sentido radial longitudinal. Os sentidos de corte podem ser melhor compreendidos observando a Figura 4. [Gonzaga, 2006]

A escolha da madeira como elemento filtrante surgiu da possibilidade de utilizar material renovável e de fácil obtenção em localidades isoladas. Nestes locais onde a água dos cursos hídricos geralmente já é utilizada para consumo humano e o uso destes elementos de madeira poderia resultar em um sistema de tratamento de água de baixo custo, neste caso, tratamentos preliminares, sendo utilizado apenas um tratamento para melhoria da qualidade da água.

Desta forma, o uso de filtros de madeira reduziria custos na fabricação das peças de madeira e facilitaria a sua manutenção, sendo que elementos de madeira podem ser construídos pelos próprios usuários dos filtros.

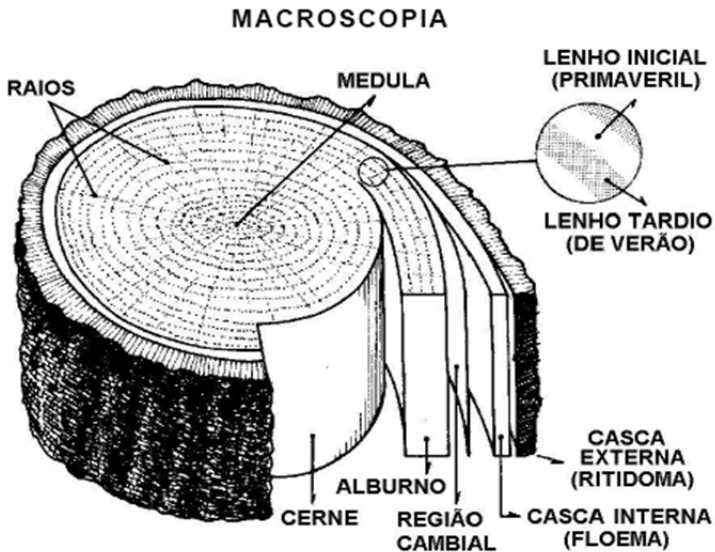
Figura 4 - Sentidos de corte da madeira (Adaptado da referência [Gonzaga, 2006])



2.3.1 Anatomia da madeira

A descrição da macroscopia da madeira (Figura 5) mostra que as fibras formam-se anualmente em dois lenhos: primaveril (inicial) e de verão (tardio). As fibras crescem no sentido longitudinal ao tronco, possibilitando a confecção do elemento filtrante no sentido frontal ou transversal às mesmas.

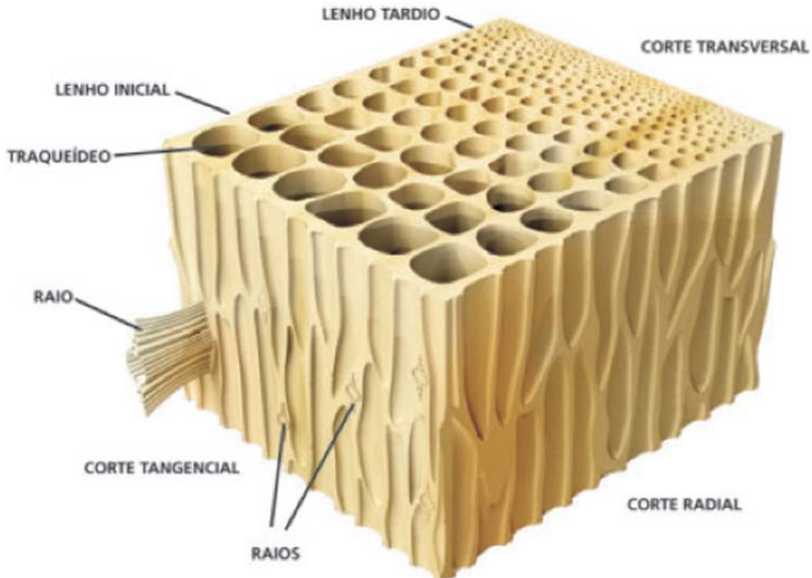
Figura 5 – Seção transversal tipo da madeira [Silva, 2008]



A Figura 6 mostra a anatomia de uma conífera, que pode ser traduzido como a madeira pinus, distinguindo o lenho tardio do lenho inicial.

O lenho inicial é caracterizado por células de paredes finas e por vasos de diâmetros grandes, que tem objetivo de condução da seiva e possuem coloração mais clara. O lenho tardio é caracterizado por células de parede mais grossa e vasos com diâmetros menores, desta forma, esta estrutura da sustentação a árvore e possui coloração mais escura. [Brisolari, 2008]

Figura 6 - Desenho esquemático da anatomia de uma conífera – não pinácea [Gonzaga, 2006]



A Tabela 2 apresenta um quadro que destaca a nomenclatura que será utilizada nesta pesquisa, visto que, dependendo da finalidade (tratamento de água ou descrição da madeira), utiliza-se uma designação diferenciada. Neste trabalho a nomenclatura utilizada será do escoamento em relação às fibras da madeira, como descrito a seguir.

Tabela 2 – Nomenclatura referente ao escoamento e ao corte da madeira

| Escoamento para Filtração (relacionado às fibras) | Anatomia (relacionada ao corte) |
|---|---|
| Paralelo às fibras | Seção transversal ao tronco |
| Transversal ou Perpendicular às fibras | Seção tangencial ou Longitudinal ao tronco |
| Finalidade: Tratamento de água | Finalidade: Biologia, descrição da madeira. |

2.3.2 Espécies de madeira

2.3.2.1 Caixeta

A madeira conhecida como caixeta é da espécie *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC pertence à família das Bignoniaceae. [Kuniyoshi, 1993] No Brasil, pode ser encontrada em terrenos alagadiços do litoral entre Espírito Santo e Santa Catarina. [Kuniyoshi, 1993, Mainieri e Chimelo, 1989]

Segundo o sistema de CRONQUIST *apud* [Kuniyoshi, 1993] a classificação taxonômica da madeira caixeta é a seguinte:

- ✓ Reino: Vegetal;
- ✓ Divisão: Magnoliophyta;
- ✓ Classe: Magnoliopsida;
- ✓ Subclasse: Asteridae;
- ✓ Ordem: Scrophulariales;
- ✓ Família: Bignoniaceae Jussieu, 1789;
- ✓ Tribo: Tecomeae Endl.;
- ✓ Subtribo: Tecomineae Bur. Et Schum.;
- ✓ Espécie: *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC.

A caixeta é caracterizada por ser leve, pouco porosa, possuir baixa densidade, o que, no caso desta pesquisa, resultaria em maior retenção de partículas.

Além disso, seu tronco possui coloração branca levemente rosada, não há diferenciação entre cerne e alborno e possui pouco óleo-resina que também é de cor clara. Devido a suas características anatômicas, pode se concluir que possui boa permeabilidade à soluções preservantes. [Mainieri e Chimelo, 1989] Estas características indicam que a princípio a madeira caixeta pode ser um bom elemento filtrante.

Algumas propriedades da espécie *T. cassinoides* são apresentadas por MAINIERI e CHIMELO [Mainieri e Chimelo, 1989]:

- ✓ Massa específica aparente (Densidade) a 15% de umidade (g/cm^3) 0,59 → mediana.
- ✓ Contrações (%) (até 0% de umidade):
 - Radial: 3,3 → Baixa;
 - Tangencial: 5,9 → Baixa;
 - Volumétrica: 10,0 → Baixa.

Com relação à durabilidade natural, a madeira caixeta, pelas suas características anatômicas, deve apresentar resistência muito baixa ao apodrecimento.

A madeira da caixeta, por ser leve, de cor clara, de baixa retratabilidade e de baixa resistência mecânica, é indicada para caixas finas, brinquedos, tamancos, saltos de calçados, molduras para quadros, palitos de fósforo, lápis, componentes de violas, violões, fabricação de pranchetas, etc.

Sobre sua anatomia, parênquima axial pouco notado a olho nu, contrastado, distinto sob lente; paratraqueal confluyente, ligando poros, formando faixas estreitas e longas ou trechos curtos em disposição oblíqua; pouco óleo-resina de cor clara presente.

Poros/vasos visíveis a olho nu, distribuição uniforme, ligeiramente ovalados, com paredes de espessura média e um tanto angulosa; poucos a pouco numerosos, raramente até 20 poros por mm²; solitários ligeiramente predominantes e múltiplos radiais de 3 a 7, e alguns grupos com distribuição tangencial; muito pequenos a pequenos, até 60 µm de diâmetro tangencial, raramente maiores; placa de perfuração simples; pontuações intervasculares extremamente pequenas, menos de 4 µm de diâmetro, areoladas e em disposição alternado. Linhas vasculares finas, longas e nítidas.

Raios no topo, muito finos, numerosos, aproximados uniformemente, distintos só sob lente; homocelulares de células procumbentes; unisseriados predominantes com variação de 60 a 90% e bisseriados; poucos a pouco numerosos, raramente até 14 raios por mm; extremamente baixos, raramente acima de 500 µm de altura, maioria até 15 células de altura, esporadicamente maiores; pontuações radiovasculares do mesmo tipo das intervasculares; óleo-resina claro, muito pouco.

Fibras de paredes finas e lume grande; pontuações simples, muito pequenas. Máculas medulares eventualmente presentes, pequenas. Camadas de crescimento pouco distintas, demarcadas por fibras de paredes mais grossas e eventualmente pelo parênquima marginal.

2.3.2.2 Garapuvu

Conhecida popularmente como guapuruvu ou fischeira, a espécie *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake possui grande importância econômica. [Mainieri e Chimelo, 1989] publicaram um estudo tecnológico sobre a espécie, no qual destacou algumas

características da madeira, como a durabilidade e baixa suscetibilidade ao ataque de insetos, o que favorece a fabricação de tábuas para assoalho e caixas.

A madeira da garapuvu é bastante utilizada na confecção de canoas e objetos para aerodelismo, em função da baixa densidade. É bastante utilizada na confecção de painéis, portas, brinquedos e caixas.

A espécie desempenha, ainda, papel de destaque em programas para o reflorestamento misto de áreas degradadas visando à preservação permanente, devido principalmente ao seu rápido crescimento no campo, podendo atingir dez metros de altura no período de dois anos.

Esta espécie ocorre na floresta da região litorânea, desde o sul do Estado da Bahia até o Rio Grande do Sul, cujas árvores podem atingir de 25 a 30 metros de altura, com 80 a 100 cm de diâmetro. Recebe, nessa região, os nomes de BACURUVU, BUHURUVU, BANDARRA, GARAPUVA, FAVEIRA, etc.

Na Amazônia, a espécie afim *S. amazonicum* DuRoi, conhecida por PARICÁ, apresenta sua madeira muito semelhante quanto ao aspecto, peso e características anatômicas a do GUAPURUVU. O nome PARICÁ, na Amazônia, é também aplicado a outras espécies de Leguminosas, principalmente às dos gêneros *Piptadenia*, *Acacia*, *Parkia* e *Pithecolobium*.

Sobre suas características gerais, madeira muito leve; cerne branco-palha, com nuances amarelados ou rosados, e róseo-pálido em certas peças; alborno não diferenciado; superfície sedosa, lisa ao tato e irregularmente lustrosa; textura grossa; grã irregular; cheiro e gosto imperceptíveis.

A madeira de garapuvu é considerada de resistência muito baixa ao ataque de organismos xilófagos, segundo observações práticas de sua utilização. Quando submetida a tratamentos sob pressão, tem alta permeabilidade às soluções preservantes.

Por ser muito leve, cor clara e baixa resistência mecânica, é indicada para miolo de painéis e portas, brinquedos, saltos para calçados, embalagens leves, etc.

Devido à sua baixa resistência à deterioração biológica, a aplicação em condições adversas deve ser precedida de tratamento preservante.

Com relação à taxonomia:

- ✓ Reino: *Vegetal*;
- ✓ Divisão: *Tracheophyta*;
- ✓ Classe: *Magnoliopsida*;

- ✓ Super-ordem: *Rosanae*;
- ✓ Ordem: *Fabales*;
- ✓ Família: *Fabaceae*;
- ✓ Sub-família: *Caesalpinioideae*;
- ✓ Gênero: *Schizolobium*;
- ✓ Espécie: *Schizolobium parahyba* (Vell.) Brake.

Algumas propriedades físicas são apresentadas a seguir:

- ✓ Massa específica aparente (Densidade) a 15% de umidade (g/cm³) 0,32 → Muito leve
- ✓ Contrações (%) (até 0% de umidade):
 - Radial: 1,8 → Baixa;
 - Tangencial: 5,5 → Baixa;
 - Volumétrica: 8,4 → Baixa;
 - Coeficiente de retratibilidade volumétrica: 0,32 → Baixo.

Sobre sua anatomia, parênquima axial distinto sob lente, vasicêntrico e, eventualmente, em trechos curtos de linhas marginais, de 2 a 4 células de largura; seriado, com 2 a 5 células por série.

Poros/vasos regularmente distribuídos, de secção quase circular, visíveis a olho nu; solitários ligeiramente predominantes (65%) sobre os múltiplos radiais de 2 a 3; muito poucos a pouco numerosos, de 1 a 6 por mm², predominando de 1 a 2 (65%).

Observa-se, ainda campos sem a presença de poros; médios a muito grandes, de 122 a 313, predominando os de 200 a 300 mm de diâmetro tangencial; placa de perfuração simples e área de perfuração horizontal ou ligeiramente oblíqua; pontuações intervasculares, alternas, médias a grandes, 8 a 11 mm de diâmetro; abertura horizontal, larga, guarnecidas; elementos vasculares, de 240 a 610 mm de comprimento, predominando de 300 a 500 mm (67%), óleo-resina escasso.

Linhas vasculares distintas, afastadas, largas, vazias e ligeiramente mais escuras que o tecido fibroso. Raios no topo, irregularmente espaçados, finos, visíveis a olho nu; na face tangencial, irregularmente dispostos, pouco notados a olho nu; contrastados na face radial; homocelulares de células procumbentes; multisseriados, de 2 a 5, predominando de 3 a 4 células de largura; extremamente baixos (98%), de 180 a 610 mm

de altura, com até 32 células de ;altura; muito poucos a pouco numerosos, 1 a 5, maior frequência de 3 a 4 raios por mm (66%).

Pontoações radiovasculares semelhantes às intervasculares; óleo-resina escasso. Fibras muito curtas, de 900 a 1400 mm de comprimento, predominando de 1100 a 1400 mm (80%); de 54 a 37 mm de largura; paredes delgadas a muito delgadas; pontuações simples, muito pequenas. Camadas de crescimento demarcadas pelas faixas do parênquima marginal, ou por zonas fibrosas mais escuras.

2.3.2.3 Pinus

O *Pinus elliottii* popularmente conhecido como pinheiro americano é uma espécie nativa do Canadá e Estados Unidos da América (com exceção das áreas adjacentes à fronteira com o México). [Mainieri e Chimelo, 1989]

O Brasil, na década de 70, fomentou o reflorestamento no país com espécies de *Pinus* provenientes, desta vez, da América do Norte: *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. Os plantios mais extensos foram estabelecidos nas Regiões Sul e Sudeste, com as espécies *Pinus taeda* para produção de matéria-prima para as indústrias de celulose e papel e *Pinus elliottii* para madeira serrada e extração de resina.

Diante da boa adaptação da espécie devido às características edáficas e climáticas do Brasil, iniciou-se investimento no melhoramento genético da espécie, almejando a produção em escala comercial e a redução da exploração de espécies nativas brasileiras, como a *Araucaria angustifolia*.

Atualmente no Brasil a silvicultura da espécie ocorre na região sul e sudeste do país, nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo e, do Mato Grosso do Sul.

A produção de madeira de *Pinus* tornou-se viável em boa parte do Brasil, constituindo uma importante fonte de madeira para usos gerais, englobando a fabricação de celulose e papel, lâminas e chapas de diversos tipos, madeira serrada para fins estruturais, confecção de embalagens, móveis e marcenaria em geral.

O desenvolvimento da tecnologia de utilização da madeira de *Pinus* e a ampliação das alternativas de uso tornaram essas espécies cada vez mais demandadas no setor florestal. Em decorrência disso, vem aumentando o número de produtores,

especialmente pequenos e médios proprietários rurais, interessados no plantio e manejo de *Pinus*.

Com relação a sua taxonomia, a saber:

- ✓ Reino: Vegetal;
- ✓ Divisão: Embryophytae siphonogamae (Spermatophytae);
- ✓ Subdivisão: Gymnospermae;
- ✓ Classe: Coniferopsida;
- ✓ Ordem Coniferae;
- ✓ Família: Pinaceae;
- ✓ Subfamília: Pinoideae;
- ✓ Gênero: *Pinus*;
- ✓ Espécie: *Pinus elliottii*.

As árvores alcançam de 25 a 30 m de altura com 60 a 90 cm de DAP (Diâmetro a altura do peito). A casca, acinzentada e sulcada em indivíduos jovens, modificam-se apresentando placas espessas (2 a 4 cm), marrons-avermelhadas em exemplares adultos.

As folhas tem secção semicircular, reunida em fascículos de 2 a 3 acículas, são longas (12 a 30 cm), flexíveis, cor verde-brilhante e com margem finamente serrilhada. Possuem 2 a 10 canais resiníferos, situados internamente no mesófilo, e bainha persistente.

Produzidos no início da primavera, os estróbilos masculinos concentram-se nas extremidades dos brotos jovens; os cones femininos, pedunculados, têm forma ovóide, ligeiramente, curva e assimétrica. As sementes são aladas (asas) de 2 a 3 cm de comprimento.

Geralmente florescem na primavera, produzindo flores masculinas e femininas. O órgão reprodutivo masculino se chama estróbilo masculino e está disposto junto às brotações. O órgão reprodutivo feminino, mais conhecido como pinha, se encontra geralmente em grupos de 2 a 4 unidades. Demora cerca de dois anos para amadurecer, quando as escamas se entreabrem, pondo em liberdade as sementes para serem disseminadas a cerca de 50 metros da árvore mãe, apenas pela ação do vento.

Esta madeira é considerada leve, cerne e alburno indistintos, bege-clara uniforme, levemente amarelada; textura fina; grã-direita, superfície lisa ao tato e brilho pouco realçado; cheiro e gosto imperceptíveis. Nomes populares: pinus, pinheiro, pinheiro-americano.

Características sensoriais: cerne e alburno indistintos pela cor, branco-amarelado, brilho moderado, cheiro e gosto distintos e característicos (resina), grã direita; textura fina; densidade baixa, macia ao corte.

Com relação à descrição macroscópica da pinus, tem Parêquima axial escasso, disperso, muito pouco visível mesmo sob lente, representado por pontos de óleo-resina; nas seções tangenciais e radiais, geralmente apresentando suas células com abundante óleo-resina, o que lhe dá um maior contraste. Raios no topo, muito numerosos e muito finos, pouco visíveis, mesmo sob lente; homocelulares, unisseriados em quase sua totalidade, raríssimos localmente bisseriados; extremamente baixos, maioria com 1 a 15 células de altura.

Traqueídes axiais maioria de 2000 a 5000 µm de comprimento; paredes delgadas, 3 a 7 µm de espessura; pontuações areoladas de uma única fileira, raramente formando pares nas paredes radiais; diâmetro de 14 a 20 µm; nos campos de cruzamento, as pontuações são arredondadas, do tipo cupressóide; com abertura elíptica e inclusa, aréolas aparentes sendo 1 por campo, ou então 2, o que geralmente ocorre nas células marginais. Camadas de crescimento pouco acentuadas, demarcadas por traqueídes um pouco mais achatadas que as demais e com paredes ligeiramente mais grossas. [Mainieri e Chimelo, 1989]

Trabalhabilidade: é uma madeira fácil de ser trabalhada. É fácil de desdobrar, aplainar, desenrolar, lixar, tornejar, furar, fixar, colar e permite bom acabamento.

Secagem: muito fácil de secar.

Durabilidade natural: Em ensaios de laboratório, a madeira demonstrou ter baixa resistência ao apodrecimento e ao ataque de cupins de madeira seca. Apresenta baixa resistência ao ataque de organismos xilófagos, tais como: fungos emboloradores, manchadores e apodrecedores; brocas de madeira e perfuradores marinhos.

Tratabilidade: é fácil de tratar. Sua aplicação é atualmente na produção de embalagens, molduras, guarnições, ripas, tábuas para forros, brinquedos e outros artefatos de madeira. Além de que com o tratamento através da autoclave com inserção de fungicidas e bactericidas, faz com que a madeira adquira maior resistência e durabilidade.

Sobre os sistemas silviculturais, a operação de plantio é formada de várias ações e constitui uma das Etapas mais importantes para o sucesso do estabelecimento de florestas plantadas. O sistema de plantio mais adequado é definido com base no objetivo do empreendimento e nos usos a que se destinarão os produtos da floresta. O sucesso desse empreendimento depende de decisões e ações cuidadosas nas diversas Etapas de sua

implementação como a escolha e a limpeza da área, o espaçamento, o controle de pragas e doenças, a definição do método de plantio e os tratamentos culturais.

As atividades componentes da operação de plantio são as seguintes:

- ✓ Planejamento;
- ✓ Vias de acesso e dimensionamento dos talhões (área de plantio);
- ✓ Delimitar aceiros;
- ✓ Limpeza da área;
- ✓ Preparo de solo;
- ✓ Plantio;
- ✓ Operações do manejo;
- ✓ Aplicação de adubos e controle de pragas e de ervas daninhas;
- ✓ Desbastes, visando à redução da densidade populacional e disponibilização de mais luz, - nutrientes e água às plantas;
- ✓ Poda, visando ao aprimoramento da qualidade das árvores.

O Pinus, para o uso da madeira, pode ser derrubado, em média, com 20 anos. Adiantando-se este prazo para 12 anos na utilização para o preparo de pasta de celulose.

O espaçamento está incluso no planejamento, este deve ser definido anteriormente ao plantio, de acordo com o objetivo e uso da matéria prima.

No desenvolvimento do presente estudo o espaçamento é de grande importância devido a sua influência na taxa de crescimento, na qualidade da madeira produzida, na idade de corte, nas idades e intensidades de desbaste requeridas, nas práticas de manejo, conseqüentemente, nos custos de produção.

Essa variável é, provavelmente, uma das mais importantes para a qualidade e produtividade da matéria-prima a ser produzida. O espaçamento afeta, fortemente, o crescimento diamétrico do tronco das árvores e como está associado à densidade populacional, afeta, também, a intensidade de uso dos recursos hídricos e nutricionais do solo, bem como da luminosidade disponível na área.

Se a densidade de plantio for demasiadamente elevada (espaçamento restrito entre árvores), tais recursos não serão suficientes para atender a demanda do povoamento, acarretando decréscimo no volume e na qualidade da madeira produzida na área.

Se a densidade for demasiadamente baixa (espaçamento amplo entre árvores), as árvores não aproveitarão todos os recursos disponíveis e haverá menor produção por área. Portanto, o planejamento da densidade de plantio deve ter como base a obtenção do máximo de retorno por área. Normalmente, usam-se espaçamentos variando entre 3 m x 2 m e 3 m x 3 m que possibilitam tratos culturais mecanizados.

Espaçamentos amplos (densidade baixa) possibilitam maior produção volumétrica por árvore e menor custo de implantação, todavia requerem tratos culturais mais frequentes e desbastes tardios, além de produzir árvores com maior conicidade de fuste. Espaçamentos restritos (densidade alta) resultam em maior produção volumétrica por área, mas menor volume por árvore, rápido fechamento do dossel, menor frequência de tratos culturais requerida e exigem desbastes precoces, produzindo árvores com fustes mais cilíndricos. Entre as formas dos espaçamentos, os quadrados ou os retangulares são os mais indicados e usados.

Diante do exposto, entende-se que para esta pesquisa, é necessário ter como elemento filtrante uma madeira leve (pouco densa), grande porosidade, de fácil obtenção e tratabilidade. No caso de estudo os espaçamentos variando entre 3 m x 2 m e 3 m x 3 m, que possuem uma densidade populacional adequada e aplicada no setor florestal é viável para o estudo.

A questão da resina e de nutrientes aderidos no interior da madeira (seiva elaborada, por exemplo) é algo que deverá ser melhor analisado e discutido, pelo fato da possibilidade destas substâncias influenciarem no odor e sabor da água tratada.

Algumas propriedades físicas:

- ✓ Massa específica aparente (Densidade) a 15% de umidade (g/cm^3) 0,40 → leve
- ✓ Contrações (%) (até 0% de umidade):
 - Radial: 3,4 → Baixa;
 - Tangencial: 6,4 → Baixa;
 - Volumétrica: 10,5 → Baixa.

2.3.3 Cor da madeira

A cor na madeira tem origem na composição química das células. A principal importância da cor na prática está ligada ao valor econômico da madeira. Além da composição química, outro elemento que pode originar variações na cor, é o teor de umidade,

além disso, a madeira pode se tornar mais escura, em contato com ar devido à oxidação das substâncias que a compõem. [Moreschi, 2005]

A definição da cor da madeira deve ocorrer logo após o corte, visto que a luz e o ar podem interferir nesta coloração. [Zenid e Ceccantini, 2007]

A descoloração da madeira é realizada geralmente para fins decorativos, esta descoloração pode ser feita com aplicação de ácido oxálico ou solução de peróxido de hidrogênio. [Carrera, 2008]

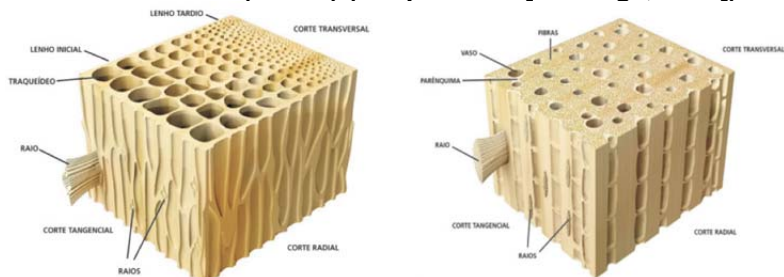
2.3.4 Porosidade da madeira

Segundo DIAS *et al.* [Gonzaga, 2006], diversas variáveis podem interferir na estrutura da madeira, assim como, na densidade e na porosidade. Algumas dessas variáveis são: composição do solo, espaçamento entre as árvores, desbaste e idade de corte da madeira.

No caso da filtração em madeira todos estes vasos compõem a porosidade do elemento filtrante; ou seja, ao efetuar um corte transversal na madeira os vasos são vistos como poros, esses poros serão os responsáveis pela passagem da água. Além disso, o diâmetro dos poros determinará as partículas que ficarão retidas e o que permeará.

As características apresentadas anteriormente refletem na porosidade da madeira, no diâmetro dos poros e na organização dos mesmos (Figura 7). Cada uma pode apresentar determinada distribuição de poros, ou seja, podem apresentar mudanças abruptas de porosidade entre um lenho e outro ou suaves, ou ainda, não apresentar variação. [Klock, 2005, Zenid e Ceccantini, 2007]

Figura 7 - Anatomia de uma conífera não pinácea (esquerda) e de uma folhosa (direita) (Adaptado de [Gonzaga, 2006])



A porosidade está relacionada com o volume de vazios da madeira, e pode ser considerada, o inverso da densidade. [Brisolari, 2008]

A densidade aparente da madeira é a razão entre o peso total e o volume de um determinado bloco, é chamada aparente devido ao fato de a umidade não ser descontada do peso da madeira. [Brisolari, 2008] A densidade pode, na maioria das vezes, indicar a resistência e qualidade da madeira, quanto maior a densidade mais resistente será a madeira. Isso devido ao fato de o cerne, elemento de resistência da madeira, ser mais denso que o alburno, elemento poroso da madeira. [Gonzaga, 2006, Moreschi, 2005] Desta forma pode se concluir que em geral madeiras menos densas são mais porosas.

A permeabilidade da madeira representa a facilidade com que um fluido tem para passar pelos seus poros. [Brisolari, 2008]

Quanto à permeabilidade da madeira, [Silva, 2007] realizou uma pesquisa para verificá-la nas espécies:

- *Eucalyptus citriodora*, no alburno, em sentido longitudinal (CAL);
- *Eucalyptus grandis*, no alburno (GAL) e no cerne (GCL), em sentido longitudinal;
- *Pinus elliottii*, em sentido longitudinal (PL) e transversal (PT).

Na Tabela 3, constam os resultados obtidos nos ensaios realizados por [Silva, 2007].

Tabela 3 – Resultados estatísticos de permeabilidade para as amostras (Adaptado de SILVA, 2007)

| Amostras | Água Destilada | | |
|---|----------------|--------|-------|
| | M | S | CV |
| CAL | 346,86 | 66,89 | 19,28 |
| GAL | 470,57 | 121,89 | 25,90 |
| GCL | 0,42 | 0,257 | 61,14 |
| PL | 5,46 | 2,54 | 46,59 |
| PT | ** | ** | ** |
| **significa amostras que não apresentaram fluxo. M: Média dos valores (cm ³ /cm.atm.s) S: Desvio Padrão CV: Coeficiente de variação | | | |

Desta forma, [Silva, 2007] comprova que a madeira permite o escoamento entre suas células. Além disso, percebe-se que as madeiras pertencentes ao grupo das folhosas (*Eucalyptus sp.*) possuem escoamento considerável pelo alburno e baixo no cerne.

Já a conífera (*Pinus sp.*) não apresentou fluxo no sentido transversal, ou seja, as pontoações não contribuem, para o escoamento.

2.4. Filtração em madeira

A madeira em geral tem inúmeras finalidades e aplicações ao ser humano, sendo que a filtração em madeira é uma nova aplicação. Observou-se que para a água passar através de um meio sólido, este material precisa necessariamente ser poroso e leve, pois caso contrário a filtração será impossibilitada pela grande perda de carga gerada na resistência do material.

A passagem de água através da madeira tem que ser de forma fácil e simples, para proporcionar relevância no momento da adoção desta técnica. Por se tratar de algo diferenciado e ter aplicação para pequenas comunidades ou residências isoladas, um tratamento com pouca manutenção, baixo custo e de fácil manuseio seria o ideal para este público alvo. Para atender todos os quesitos é algo bastante desafiador, pelo fato que quando se estuda uma nova tecnologia, a viabilidade técnica precisa ser comprovada, necessitando de mais atenção nos primeiros trabalhos.

No trabalho de [Corrêa, 2002], foram estudadas as espécies de madeiras: Pinus, Virola e Cedro. Os ensaios realizados tiveram a intenção de reproduzir com a madeira a filtração em membranas tubulares.

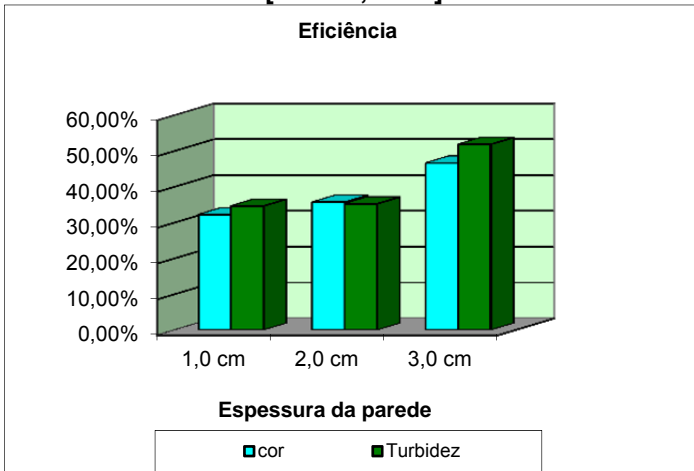
Assim, produziram-se elementos filtrantes com diâmetros variados para a filtração tangencial. As mudanças foram em relação à espessura da parede filtrante, variando em 1,0; 2,0 e 3,0 cm (Figura 8).

Figura 8 – Elementos filtrantes com diferentes espessuras [Corrêa, 2002]



Nestes ensaios testou-se a remoção de cor e turbidez com escoamento no sentido transversal as fibras, e os resultados podem ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Relação entre espessura da parede e eficiência [Corrêa, 2002]



Pode-se dizer que houve pouca diferença, em relação à eficiência, entre os elementos filtrantes com espessura de 1,0 e 2,0 cm. Ambas encontram-se na faixa de 30 a 35 % de eficiência, tanto em relação à cor, como em relação à turbidez.

Já a membrana com espessura de 3,0 cm apresenta melhor desempenho, com eficiência média 50 %, tanto para cor quanto para turbidez, conforme Figura 9.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Considerações iniciais

O estudo foi desenvolvido em duas Etapas, mediante a construção de sistemas pilotos. Etapa I - estudo em escoamento frontal e Etapa II - estudo em escoamento tangencial helicoidal. Ressalta-se que antes de iniciar a Etapa I, realizou-se ensaio preliminar para se ter credibilidade na pesquisa.

A parte experimental da pesquisa foi realizada no Laboratório de Potabilização de Água – LAPOÁ, localizado no prédio do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC.

3.2. Ensaio preliminar

Este ensaio preliminar foi realizado somente para confirmar a passagem da água através da madeira e validar o início da pesquisa. Suspeitava-se que a água na pesquisa anterior [Corrêa, 2002] poderia ter escoado nas junções das peças e não ter apresentado vazão considerável para tratamento de água. Mas este ensaio mostrou que a tecnologia é válida e apresentou a possibilidade da filtração ocorrer com baixa pressão d'água, pois a pressão da mangueira de água bruta tinha apenas 5 mca.

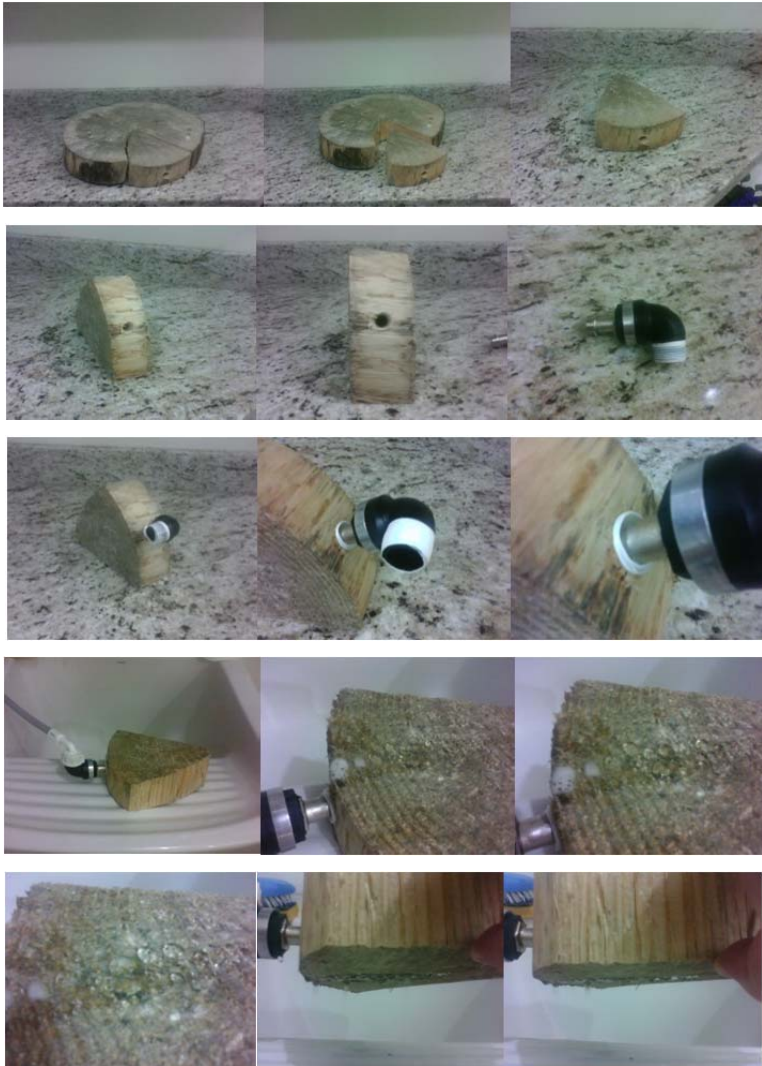
Para este ensaio foi utilizado uma seção transversal ao tronco de árvore da madeira pinus com espessura definida de 6,5 cm. Desta seção transversal, foi retirada sua casca e uma parte da madeira para facilitar o manuseio, proporcionando uma superfície regular e uma forma geométrica favorável.

Foi realizado na parede lateral um furo de 2,0 cm de diâmetro por 10,0 cm de profundidade. A este furo, foram acoplados tubos e conexões hidráulicas para conclusão do sistema piloto.

Ao iniciar a pressurização da mangueira de entrada da água bruta, observou-se que houve um pequeno vazamento de água, mas isso não impossibilitou que o ensaio fosse realizado, pois a quantidade de água que passava através da madeira era superior a do vazamento.

Observou-se também que no momento da filtração da água pela madeira, formou-se gotas d'água e estas unindo-se, formaram um pequeno escoamento d'água. A seguir é apresentada uma sequência de imagens do ensaio (Figura 10) a fim de mostrar mais detalhes do que foi realizado.

Figura 10 – Ensaio preliminar de passagem de água pela madeira



Como pôde ser observada nas últimas imagens, a água filtrada que passou através da madeira, foi produzida por escoamento tangencial sem recirculação e percorreu o sentido paralelo às fibras.

3.3. Estruturação das Etapas da pesquisa

Com já descrito anteriormente, nas considerações iniciais, a pesquisa foi segregada em duas Etapas e cada uma com finalidade própria:

- ✓ Etapa I – Etapa que buscou conhecer as madeiras que foram selecionadas para fins de tratamento de água. Pesquisar qual o sentido mais favorável das fibras para o escoamento de água (paralelo ou transversal às fibras), realizar ensaios de filtração frontal nas 3 madeiras selecionadas, realizar microscopia eletrônica de varredura nas amostras em seu estado natural antes da filtração para se obter medição dos poros, medição de porosidade e densidade de poros;
- ✓ Etapa II – Etapa que analisou a filtração tangencial helicoidal para a madeira que obteve melhor desempenho na Etapa I, em termos de qualidade e quantidade de água tratada. Com isso, realizaram-se ensaios de filtração tangencial e tangencia helicoidal em outro sistema piloto. Após o processo de filtração, realizou-se novamente microscopia eletrônica de varredura para se observar como foi a colmatção do elemento filtrante.

3.3.1. Ensaios realizados

Os ensaios realizados foram:

- ✓ Ensaios laboratoriais antes e depois da filtração para se medir a qualidade da água bruta e tratada. Tanto para a Etapa I quanto para a Etapa II foram realizados ensaios com e sem coagulação utilizando sulfato de alumínio;
- ✓ Ensaios de filtração de água na Etapa I e na Etapa II para se medir a quantidade de água.

Para a etapa I, elaborou-se o fluxograma apresentado na Figura 11 para uma rápida visualização do sistema piloto. Da mesma forma, segue a Figura 12 mostrando o fluxograma para a Etapa II. Estes ensaios serão mais bem detalhados na sequencia desta pesquisa.

Figura 11 – Fluxograma da Etapa I

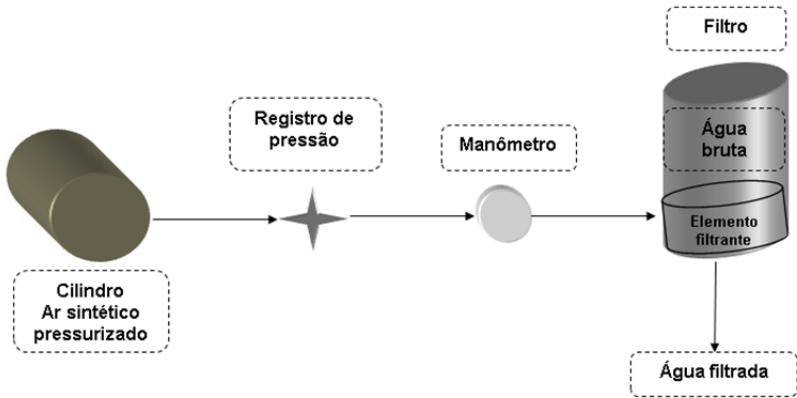
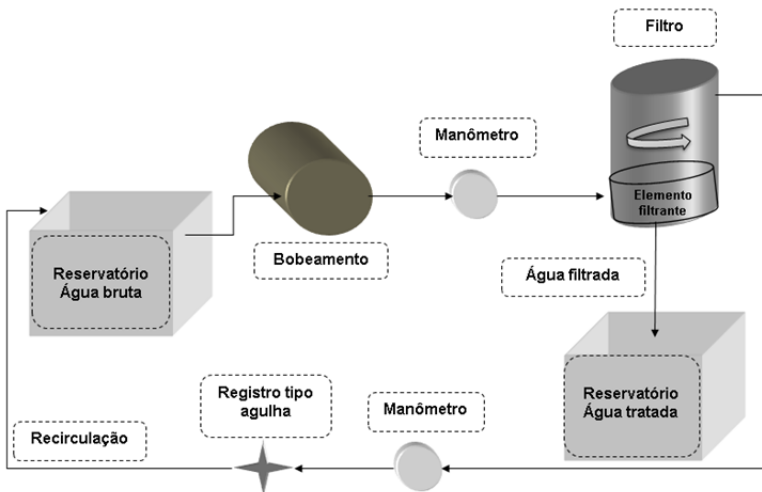


Figura 12 – Fluxograma da Etapa II



3.4. Caracterização das madeiras estudadas

Para a escolha das madeiras, levaram-se em consideração alguns aspectos, tais como: densidade (massa específica) de muito

leve a mediana ou moderadamente pesada (valores entre 0,3 e 0,6 g/cm³), madeira nativa ou de fácil obtenção, ter boa tratabilidade.

Optou-se em escolher madeiras com subdivisões de reinos diferenciadas; ou seja, analisar madeiras angiospermas e gimnospermas.

3.4.1. Madeiras estudadas

As 3 espécies estudadas foram (conforme Figura 13):

- ✓ Caixeta (*Tabebuia cassinoides* Lam. P. DC.);
- ✓ Garapuvu (*Schizolobium parahyba* Vell. Blake);
- ✓ Pinus (*Pinus elliottii*).

Figura 13 – Madeiras estudadas (caixeta, garapuvu e pinus, da esquerda para a direita)



A madeira da pinus é de uma gimnosperma enquanto as demais são angiospermas (caixeta e garapuvu).

A madeira da pinus é uma espécie exótica e utilizada atualmente em florestas plantadas para fins comerciais. A parte do tronco extraída para esta pesquisa teve sua procedência do Alto Vale do Itajaí, região norte do estado de Santa Catarina. A árvore da madeira pinus tinha 12 anos de idade.

Já a madeira da caixeta e a da garapuvu são espécies nativas e também foram extraídas da mesma região que a pinus. A árvore da madeira caixeta tinha 15 anos de idade enquanto a árvore da madeira garapuvu tinha 25 anos.

3.4.2. Limpeza e desinfecção do elemento filtrante

A limpeza nesta pesquisa diz respeito desde a retirada de serragem no momento do corte e preparo dos elementos filtrantes até a passagem de água potável através da madeira para se fazer a limpeza interna da mesma.

Para ambas as etapas, a limpeza com água potável através do elemento filtrante de madeira foi realizada pelo menos 3 vezes ou até que a qualidade da água bruta (entrada) fosse igual ou muito parecida com a água permeada (saída).

Com relação à desinfecção da madeira, neste momento será abordado somente o tratamento químico com hipoclorito de sódio. A autoclavagem e estufa podem ser consideradas também um processo de desinfecção, porém utiliza-se a temperatura.

A utilização de um produto químico na madeira veio com a finalidade de tentar desinfetá-la e também branqueá-la, assim como para fabricação do papel sulfite a partir da celulose.

O processo de desinfecção foi utilizado somente na segunda Etapa da pesquisa, utilizando um recipiente de plástico com uma solução aquosa de hipoclorito de sódio (NaClO) a 10% de uma solução comercial de água sanitária com 2% de cloro ativo.

Após corte e preparo do elemento filtrante de uma das madeiras escolhidas da Etapa I, deixou-se esta peça embebida na solução preparada de hipoclorito de sódio durante 24 h a temperatura ambiente. Como a madeira tem densidade abaixo de 1 g/cm³, foi necessário utilizar um contrapeso sobre a amostra, caso contrário ela iria boiar (Figura 14).

Como dito anteriormente, este processo químico com hipoclorito trouxe dois benefícios: desinfecção e branqueamento. Estes dois aspectos foram observados, comparando o elemento filtrante antes e depois do período que a mesma ficou embebida.

Como já se tinha observado um ganho de qualidade nestes dois aspectos supracitados, optou-se em cessar com este processo, porque um longo período de tempo poderia afetar a integridade da madeira, reduzindo sua resistência.

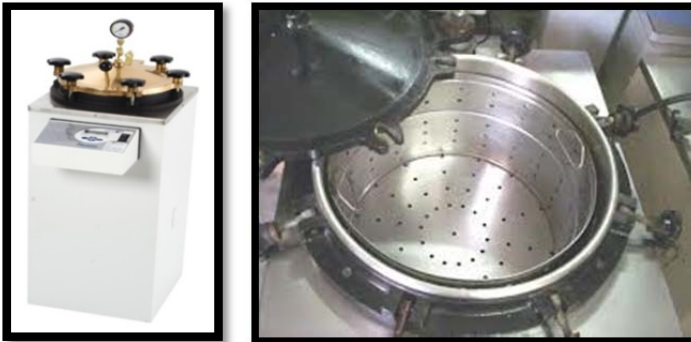
Figura 14 – Desinfecção da madeira com hipoclorito de sódio



3.4.3. Autoclavagem

A autoclavagem é um tratamento térmico bastante utilizado no laboratório para fins de esterilização de vidraria. Equipamento de simples instalação e manuseio. Controle construído com componentes de altíssima qualidade e confiabilidade, com funcionamento por meio de microcontrolador. Permite selecionar a temperatura de trabalho de 120 a 134 °C, conforme Figura 15.

Figura 15 - Autoclave vertical AV SD



O modelo utilizado é AV SD, do tipo vertical e ela está a disposição dos grupos de pesquisa sendo a mesma mantida pelo Laboratório Integrado de Meio Ambiente – LIMA/ENS/UFSC.

O intuito de utilizar a autoclavagem na madeira era fazer com que a mesma pudesse adquirir alguma resistência adicional acelerando o processo de secagem/desidratação através da temperatura. Como a autoclave chega à temperaturas acima de 100°C, algumas resinas aderidas no interior da madeira poderiam se dissolver, desobstruindo seus poros.

O procedimento adotado foi deixar por 45 min as amostras na autoclave, após chegar à temperatura de funcionamento de 120 °C.

3.4.4. Secagem em estufa

Neste caso específico, a estufa foi utilizada apenas para secagem das amostras (Figura 16), a uma temperatura de até 70°C durante 48 h.

Figura 16 – Estufa para secagem das amostras



Ela foi utilizada para as amostras que passaram pela autoclavagem, pois as mesmas saíam úmidas pelo fato que a autoclave utiliza água e aquecimento para chegar a temperatura de 120 °C.

Para as demais amostras, a estufa também foi utilizada para promover a secagem completa das mesmas, preservando-as contra a umidade e proliferação de fungos e bactérias, pois a madeira é uma substância orgânica podendo ser degradada. As amostras secas facilitaram a montagem do sistema piloto, pois quando elas estão úmidas, elas incham, aumentando seu tamanho inicial.

3.5. Etapa I – Filtração frontal

Como descrito na revisão bibliográfica, a filtração frontal (conhecida como filtração convencional) é aquela que o escoamento e a filtração de água ocorrem no mesmo sentido. Isso quer dizer que o escoamento da água juntamente com a filtração são realizados ortogonalmente à superfície que serve como elemento filtrante.

3.5.1. Sistema piloto 1

O sistema piloto utilizado foi elaborado exclusivamente para ensaios laboratoriais de filtração frontal. O mesmo pode ser utilizado para ensaios de membranas de papel ou membranas muito finas com a finalidade de tratamento de água para abastecimento ou de água residuária. O sistema piloto foi emprestado do LARA – Laboratório de Reuso de Água.

Este sistema é composto por peças usinadas em aço inoxidável, elaborado anteriormente através de projeto (desenhos e dimensionamento) do próprio LARA.

Este sistema piloto teve que passar por uma adaptação, pelo fato que o mesmo era utilizado somente para membranas muito finas e o elemento filtrante de madeira teria aproximadamente 1 cm de espessura, com isso realizou-se uma adaptação de PVC para acoplar as amostras. O sistema foi composto por:

- ✓ Cilindro de Ar sintético;
- ✓ Regulador de pressão;
- ✓ Mangueira de entrada de Ar sintético;
- ✓ Mangueira para coleta de água tratada;
- ✓ Adaptação de PVC para acoplamento das amostras de madeira;
- ✓ Inserir a amostra de madeira na adaptação em PVC;
- ✓ Vedação das amostras para evitar vazamentos (borracha e PVC);
- ✓ Acoplar a adaptação em PVC no sistema piloto;
- ✓ Fixação da adaptação em PVC com a amostra no sistema piloto, através de 6 parafusos.

A seguir, é apresentado o sistema piloto (Figura 17), do filtro piloto para escoamento frontal (Figura 18) e detalhes do mesmo (Figura 19).

Figura 17 – Sistema piloto de filtração em escoamento frontal



Figura 18 - Filtro piloto de filtração em escoamento frontal

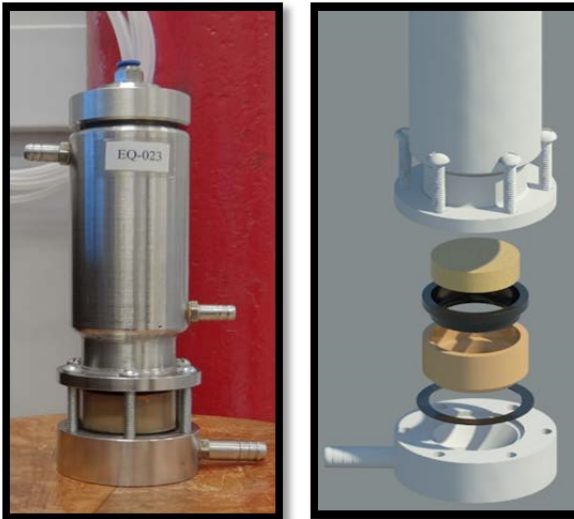


Figura 19 - Detalhes do Filtro piloto de filtração em escoamento frontal



3.5.2. Preparação do elemento filtrante

Para a confecção dos elementos filtrantes de forma cilíndrica, utilizou-se uma ferramenta chamada serra-copo acoplada a uma furadeira (Figura 20). Para cortar a espessura adequada do elemento, utilizaram-se serra circular elétrica e serra manual para metal. As amostras, após o corte, foram somente lavadas. Não se fez qualquer tipo de lixação, pois este procedimento poderia obstruir os poros da madeira.

Figura 20 – Corte dos elementos filtrantes para filtração frontal



Para confeccionar os elementos filtrantes paralelos às fibras, o corte foi realizado na parte superior da seção transversal do tronco e para confeccionar os elementos filtrantes transversais às fibras, o corte foi realizado na lateral do tronco.

Na preparação dos elementos filtrantes, foi levado em consideração a espécie, o sentido das fibras (// = escoamento paralelo as fibras; # = escoamento transversal as fibras) e o pré-tratamento com autoclavagem, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Espécies de madeira, pré-tratamento, sentido do escoamento e massa específica

| Espécie \ Escoamento | Sem Autoclavagem | | Com Autoclavagem | | ρ (g/cm ³) |
|----------------------|------------------|----|------------------|----|--------------------------------|
| | // | # | // | # | |
| Garapuvu | 1G | 2G | 3G | 4G | 0,31 |
| Pinus | 1P | 2P | 3P | 4P | 0,47 |
| Caixeta | 1C | 2C | 3C | 4C | 0,61 |

Como apresentado na Figura 21 e na Tabela 5, foram confeccionadas 12 elementos filtrantes (amostras), 4 amostras para cada espécie de madeira, sendo uma transversal às fibras e outra paralela às fibras. Além disso, para cada amostra em seu estado natural, outra similar foi autoclavada, por 45 min a uma temperatura de 120°C.

Figura 21 - Elementos filtrantes para a filtração frontal



Para calcular a massa específica (densidade) de cada espécie estudada, mediram-se as dimensões de cada elemento filtrante através de um paquímetro, conseguindo calcular seu volume em cm^3 . Para cada espécie de madeira, mediu-se sua massa, através de uma balança de precisão. A massa específica foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (\text{equação 1})$$

Após o processo de autoclavagem das amostras, foram colocadas na estufa por 48 h a temperatura de 70°C para sua desidratação, em seguida, calculou-se a massa específica para cada espécie. Para ter um valor único de massa específica para cada espécie, calculou-se a média aritmética das 4 amostras.

Tabela 5 - Massa específica das madeiras estudadas

| Amostra | Massa (g) | | Altura (mm) | Diâmetro (mm) | Massa específica (g/cm^3) | MÉDIA | Unidade |
|---------|-----------------------|----------------------------|-------------|---------------|--------------------------------------|-------|-----------------|
| | pós secagem na estufa | pós autoclavagem e secagem | | | | | |
| 1P | 7,00 | - | 13,00 | 39,00 | 0,45 | 0,47 | g/cm^3 |
| 2P | 9,13 | - | 13,00 | 41,00 | 0,53 | | |
| 3P | - | 8,26 | 15,00 | 40,00 | 0,44 | | |
| 4P | - | 7,59 | 13,50 | 39,50 | 0,46 | | |
| 1G | 5,04 | - | 14,00 | 39,00 | 0,30 | 0,31 | g/cm^3 |
| 2G | 5,51 | - | 14,00 | 39,50 | 0,32 | | |
| 3G | - | 5,30 | 14,00 | 40,00 | 0,30 | | |
| 4G | - | 6,33 | 14,00 | 41,50 | 0,33 | | |
| 1C | 10,10 | - | 15,00 | 38,00 | 0,59 | 0,61 | g/cm^3 |
| 2C | 9,57 | - | 12,50 | 39,00 | 0,64 | | |
| 3C | - | 9,60 | 15,00 | 37,00 | 0,60 | | |
| 4C | - | 9,36 | 13,00 | 39,00 | 0,60 | | |

3.5.3. Ensaios de filtração frontal em batelada

Os ensaios de filtração frontal foram realizados em todas as 12 amostras, sem coagulação da água bruta. A execução da filtração frontal se deu da seguinte forma:

- ✓ Medição do volume de água bruta a ser tratada (220 mL);
- ✓ Preenchimento do sistema piloto com água bruta;
- ✓ Fechamento do sistema piloto;

- ✓ Abertura do registro do cilindro (Figura 22);
- ✓ Regulagem do medidor de pressão;
- ✓ Cronometragem do tempo de filtração;
- ✓ Coleta da água tratada (Figura 23).

Figura 22 – Medição da pressão de trabalho



Figura 23 – Coleta de água tratada (filtrada)



Foram realizados ensaios de filtração frontal com água bruta sintetizada artificialmente com argila. Escolha do melhor elemento filtrante

Para escolha da melhor madeira, foram estabelecidos os seguintes critérios:

- ✓ Sentido transversal ou paralelo às fibras para o escoamento da água;
- ✓ Melhor qualidade de água;
- ✓ Menor pressão de trabalho;
- ✓ Maior taxa de filtração.

Para se avaliar a taxa de filtração ou velocidade de filtração, foi necessário primeiramente calcular a área de filtração. No caso desta pesquisa, a área de filtração do elemento filtrante foi calculada a partir do diâmetro da superfície da madeira. Para a Etapa I, o elemento filtrante media em torno de 4 cm diâmetro, resultando em uma área aproximada de 12,5 cm² e para a Etapa II, o elemento filtrante media em torno de 11 cm, resultando em uma área aproximada de filtração de 95 cm².

Medindo a vazão do sistema piloto, tem os seguintes cálculos:

$$Q = \frac{V}{T} \text{ (mL)} \quad \text{(equação 2)}$$

A lei da continuidade diz que:

$$Q = A \text{ (cm}^2\text{)} \times v \text{ (cm/s)} \quad \text{(equação 3)}$$

Portanto, igualando as duas equações têm-se que:

$$Q = \frac{V}{T} = A \times v \quad \text{(equação 2 e 3)}$$

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{(equação 4)}$$

Tendo os valores de vazão e área, fazem-se as devidas transformações de unidades e calcula-se a velocidade de filtração que nada mais é a própria taxa de filtração, normalmente evidenciada por m³/m².d.

3.6. Etapa II – Filtração tangencial helicoidal

A Etapa II desta pesquisa buscou estudar com mais detalhes a filtração tangencial e tangencial helicoidal, pois esta é a técnica mais aplicada em membranas e tende ter o mesmo raciocínio para a filtração em madeira.

Para facilitar o entendimento da pesquisa, será fixada algumas nomenclaturas para as partes do sistema piloto construído. O sistema piloto se refere a todos os componentes do sistema de filtração. O equipamento criado para acoplar a madeira e realizar a filtração com escoamento tangencial ou tangencial helicoidal será chamado de filtro piloto. E a madeira utilizada para os testes de filtração poderá ser chamada de elemento filtrante. A seguir serão apresentados todos os componentes citados anteriormente e o funcionamento dos mesmos.

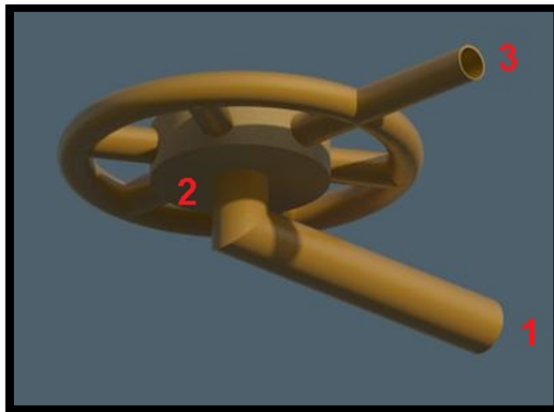
3.6.1. Sistema piloto 2 – Filtração tangencial

A primeira tentativa de se construir o filtro piloto foi selecionar um pedaço de madeira da que foi selecionada na Etapa I e cortar simplesmente um tronco (sem casca), tendo assim o filtro piloto uma forma cilíndrica.

A Figura 24 mostra o desenho esquemático do segundo sistema piloto. Conforme ilustrado nesta figura, o n° 1 mostra a entrada de água bruta que seria bombeada para dentro do filtro piloto, o n° 2 mostra a saída de água filtrada pela madeira que está no centro do sistema piloto acoplada por conexões e rodeada por mangueiras e por fim, n°3 é a circulação ou recirculação da água bruta.

A intenção, nesta configuração de piloto, era fazer com que a água entrasse no centro da madeira e pudesse filtrar em todas as direções. Para a circulação ou recirculação, realizaram-se 4 furos da parede lateral deste cilindro até o centro do filtro piloto.

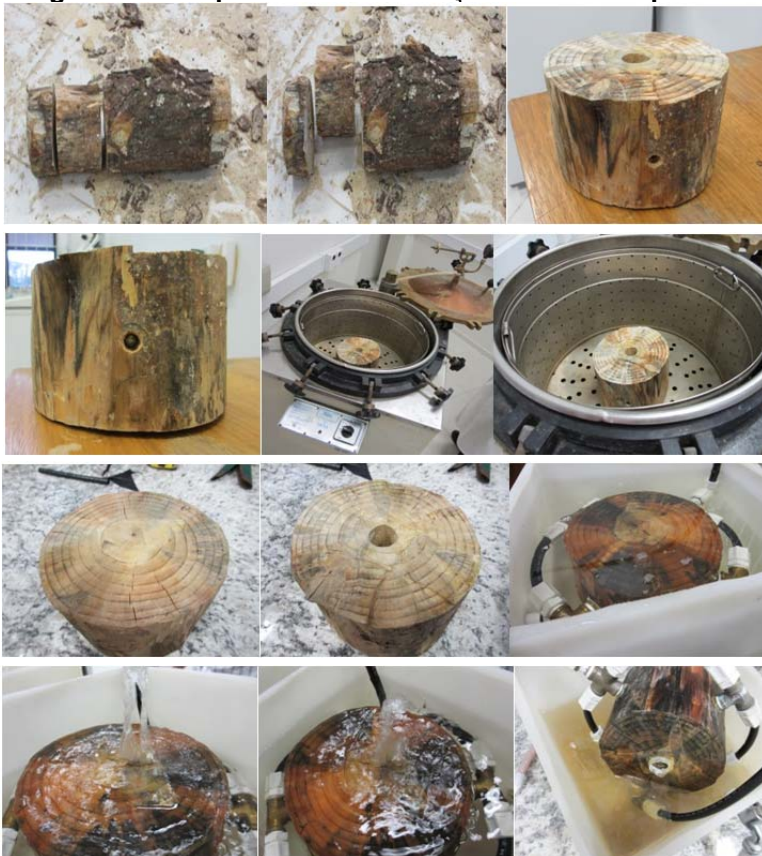
Figura 24 – Sistema piloto 2 – filtração tangencial



Com isso, a madeira constituiria praticamente o todo piloto e as peças/conexões que seriam acopladas na madeira (Figura 25). A ideia por sinal era muito boa, porém ressalta-se que a madeira é um material anisotrópico; isto é, se deforma à medida que as características ambientais que ela se encontram se alteram.

Tendo conhecimento na prática o que esta característica pode acarretar de forma negativa a construção do sistema piloto, causando fissuras por toda a peça e com isso provocando como consequência inúmeros vazamentos sem solução; portanto esta ideia foi abandonada.

Figura 25 – Sequencia da construção do sistema piloto 2



Ressalta-se que, como apresentado nas imagens anteriores, a peça foi autoclavada, ao contrário do que se esperava, contribuiu mais para a aceleração das fissuras e rachaduras.

3.6.2. Sistema piloto 3 – Filtração tangencial helicoidal

Neste terceiro sistema piloto, após ter uma experiência negativa com o sistema piloto 2, tinha-se noção neste momento que a madeira não poderia envolver as peças e conexões por causa de fissuras e rachaduras, mas de forma contrária, ser envolvida por peças que não provoquem tais deformações (Figura 26).

Figura 26 – Construção do filtro piloto para filtração tangencial helicoidal



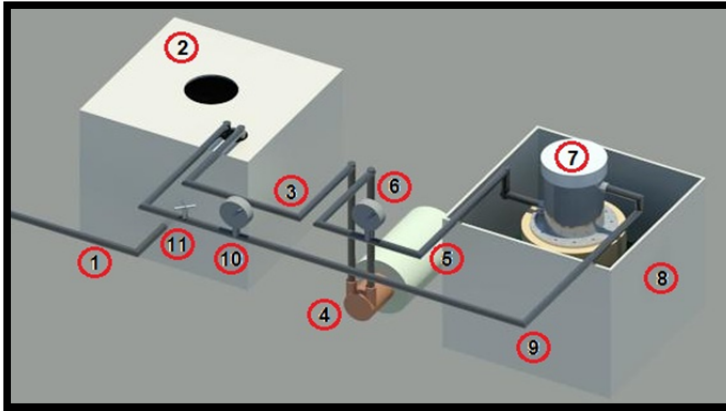
A ideia foi se basear na concepção do primeiro sistema piloto, porém com algumas alterações para promover a fixação do elemento filtrante e a circulação/recirculação através de bombeamento.

O sistema piloto se refere conjunto composto pelo filtro piloto, equipamentos responsáveis pela entrada de água bruta, circulação e coleta de água filtrada, além da bomba e dos equipamentos de medição de pressão. A Figura 27 apresenta a imagem esquemática do mesmo e posteriormente, fotos do sistema piloto montado no laboratório e seus componentes.

Descrição das partes que compõem o sistema piloto 3 da Etapa II, conforme Figura 27: (1) Entrada de água bruta; (2) reservatório de água bruta; (3) Tubo de sucção (10 mm); (4) Bomba de ¼ CV com rotor em carbono e revestimento em teflon; (5) Tubulação de recalque (10 mm); (6) Manômetro de entrada; (7) Filtro (detalhe na figura 11); (8) Reservatório de água filtrada; (9) Tubo de retorno/circulação de água bruta; (10) Manômetro de saída;

(11) Registro agulha para controle da vazão e pressão do escoamento.

Figura 27 – Esquema da montagem do sistema piloto



Grande parte da água de entrada no piloto volta para circular (concentrado) e uma pequena parte passa através do elemento filtrante de madeira (permeado), conforme ilustrado pelas mangueiras na Figura 28. A água que retorna para a caixa d'água de água bruta se mistura com a porção que ainda não passou através da madeira, concentrando muitas vezes as substâncias solúveis e/ou dissolvidas na água bruta.

Figura 28 – Sistema piloto construído em laboratório



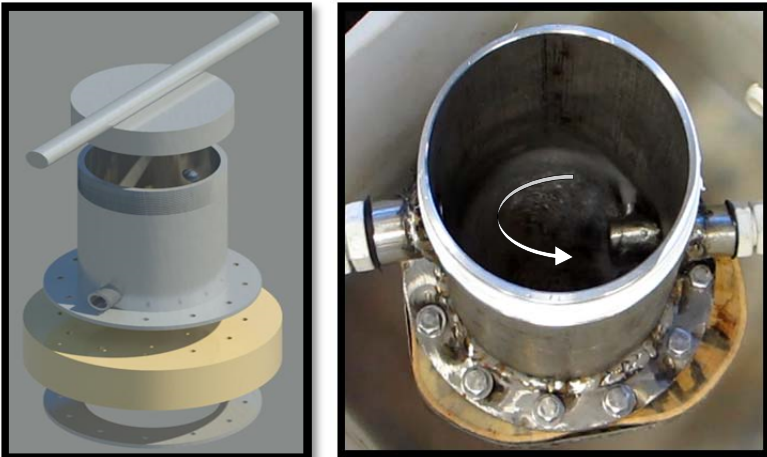
Na tubulação que retorna para o reservatório de água bruta, foi instalado outro manômetro para medir a pressão de saída e com

isso poder calcular a perda de carga no sistema em funcionamento. Para possibilitar a passagem da água através da madeira, foi instalado um registro do tipo agulha após o segundo manômetro. Com a regulagem do mesmo, é possível restringir a passagem de circulação, forçando a passagem de água pela madeira.

A água entra no filtro piloto através da canalização que conecta a bomba (4), responsável pelo escoamento tangencial na superfície da madeira, fazendo com que a passagem da água seja perpendicular ao escoamento produzido. Essa peça possui um Joelho com redução brusca de diâmetro, propiciando escoamento helicoidal que contribui para a limpeza do elemento filtrante, com jato circular ocasionando desprendimento do material aderido a superfície da madeira, podendo aumentar o tempo de filtração (Figura 29).

Como descrito anteriormente, existem duas porções de água: o concentrado e o permeado. O concentrado sairá pela peça localizada na parte superior do filtro piloto (Figura 29), levando as impurezas que não ficaram aderidas à superfície da madeira. O permeado, porção de água que passou através da madeira, coletada no reservatório de água filtrada.

Figura 29 - Detalhe do Filtro Piloto e escoamento tangencial helicoidal



Devido ao controle de pressão entre a tubulação de entrada e de saída, exercido pelo fechamento ou abertura do registro agulha, ocorre o escoamento de água pelo elemento filtrante. A passagem

de água através da madeira depende de vários fatores, a saber: pressão exercida no sistema, espessura do elemento filtrante, densidade da madeira utilizada e características dos poros (porosidade, diâmetro, densidade de poros, etc.), podendo apresentar maior ou menor vazão.

A construção do elemento filtrante deve levar em consideração sua espessura aliada a sua resistência; isto é, o elemento filtrante de madeira deverá ter uma espessura mínima para promover a resistência necessária à execução da carreira de filtração, sendo que quanto menor a espessura menos resistente é o elemento filtrante, por outro lado quanto maior a espessura maior a dificuldade de passagem da água através do elemento filtrante de madeira.

Pelo fato da madeira ser um material anisotrópico; isto é, possui variação de suas características dependendo do sentido que é avaliada, a para execução de uma boa vedação torna-se apreciável observar disposição das fibras. Entre a peça metálica da parte superior e o elemento filtrante de madeira, foi inserido o anel de borracha para ser comprimido evitando assim vazamentos.

3.6.3. Ensaios de filtração tangencial helicoidal em batelada

A filtração tangencial helicoidal foi realizada com a mesma água bruta da Etapa I e na sequencia, realizaram-se ensaios sem e com coagulação. Para os ensaios com coagulação, seguiu-se a mesmo procedimento do teste de jarros, descrito no item 3.7. O pH de coagulação nesta etapa foi de 5,74.

Pelo fato da madeira pinus ser uma madeira intermediária em relação ao tamanho dos poros e também na massa específica (quando comparada com as demais estudadas), esperava-se ter uma água filtrada de qualidade necessitando de uma pressão de trabalho que não ultrapasse 30 mca, decorrente das observações da Etapa I.

3.7. Caracterização da qualidade de água

Os ensaios laboratoriais foram realizados tanto para a Etapa I quanto para a Etapa II desta pesquisa. Estes ensaios serviram para a caracterização da água bruta e filtrada e foi realizada através das análises de: cor aparente, turbidez, pH, sólidos totais dissolvidos e condutividade. Para isso, foram utilizados os seguintes equipamentos de acordo com a Tabela 6.

Todos os aparelhos utilizados nessas análises foram previamente calibrados. Além disso, foram realizadas medições das seguintes variáveis: volume de água tratada, pressão de trabalho do sistema e tempo de filtração; para posterior cálculo de taxa de filtração e elaboração de gráficos e planilhas correlatos.

Tabela 6 - Parâmetros de qualidade de água

| Parâmetro | Unidade | Metodologia | Equipamento |
|---------------|---------|------------------------|--------------------|
| pH | --- | [Andrew e Eaton, 2005] | Orion – modelo 330 |
| Cor aparente | uH | [Andrew e Eaton, 2005] | Hach DR 2800 |
| Turbidez | uT | [Andrew e Eaton, 2005] | Hach 2100P |
| STD | ppm | [Andrew e Eaton, 2005] | Hach STD Tester |
| Condutividade | µS/cm | [Andrew e Eaton, 2005] | Hach STD Tester |
| Absorbância | uA | [Andrew e Eaton, 2005] | Varian Cary 50 Bio |

Nota: STD – Sólidos Totais Dissolvidos

O pHmetro foi calibrado com soluções de pH 4 e pH 7, sendo que esse foi o intervalo esperado nas análises.

O espectrofotômetro foi utilizado para determinação da cor aparente pelo método 8.025, em uH. A unidade uH retrata o padrão de cor Platina Cobalto (faixa de medição do equipamento é de 15 a 500 unidades de Pt-Co). A calibração do equipamento foi realizada com água ultrapura.

O turbidímetro utilizado possui faixa de medição de 0 a 100 uT (Unidades Nefelométricas de Turbidez - NTU).

A análise de sólidos totais dissolvidos (STD) foi realizada utilizando um teste portátil. O aparelho possui faixa de medição de 0 a 9.999 ppm.

Para obtenção da condutividade (C) a partir do valor de sólidos totais dissolvidos (STD) adotou-se a partir de pesquisa bibliográfica APHA [Andrew e Eaton, 2005] a seguinte equação:

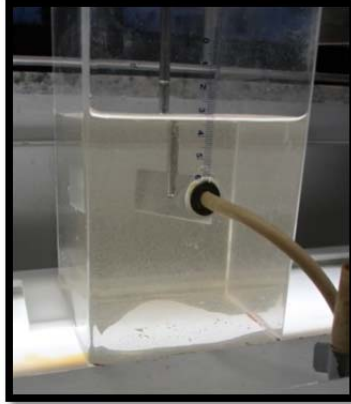
$$C = 2 \cdot STD \quad (\text{equação 5})$$

No início dos ensaios, para a Etapa I, era realizada a caracterização da água bruta e posteriormente, após a filtração de 220 mL, era realizada a coleta de amostras da água filtrada para caracterização. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

Já para a Etapa II, no início dos ensaios era realizada a caracterização da água bruta e posteriormente a cada 30 min era realizada a coleta de amostras da água filtrada para caracterização.

Além desta água bruta, foi produzida água coagulada com sulfato de alumínio (Figura 30) a partir desta água bruta e foram realizados novos ensaios.

Figura 30 - Produção de água coagulada



A água coagulada foi produzida no aparelho de *Jar Test* ou Teste de Jarros, fabricante Nova Ética (modelo 218/6), conforme a Figura 31.

Figura 31 – Aparelho de *Jar Test*



Para a preparação das soluções de sulfato de alumínio e de cal, utilizaram-se vidrarias, tais como: balões volumétricos de 1L e pipetas graduadas de 10 mL. A solução de sulfato de alumínio foi preparada a 1% e a solução de cal a 0,5%.

O procedimento para o teste de jarros foi realizado da seguinte forma:

- ✓ Preencher apenas 1 jarro com a água de estudo (bruta) até a marca de 2 L;
- ✓ Acionar a agitação e controlar 90 s^{-1} ;

- ✓ Adicionar volume de solução coagulante de sulfato de alumínio (1%) e solução de cal a 0,5%;
- ✓ Alterar a agitação de 90 para 1200 s⁻¹, com tempo de mistura de 30 s;
- ✓ Diminuir o gradiente de velocidade para 112 s⁻¹, com tempo de mistura de 60 s;
- ✓ Filtrar no piloto de filtração frontal.

As condições de coagulação anteriormente citadas são parâmetros já utilizados pelo grupo de pesquisa deste laboratório.

Para os ensaios com coagulação, na Etapa I, foram escolhidas apenas as amostras sem autoclavagem e escoamento paralelo as fibras (amostras 1G, 1P e 1C). Para a Etapa II, os ensaios de coagulação foram realizados apenas para a melhor madeira da Etapa I.

Para a Etapa I e Etapa II, a dosagem de sulfato de alumínio (Al₂SO₄) foi de 8 mL, representando uma concentração de 40mg/L e uma adição de 8 mL de cal para ajuste de pH, entre 5,6 e 6,0. A coagulação foi realizada para ajudar na escolha da melhor madeira.

Além dos ensaios acima relacionados para monitoramento da qualidade de água, realizou-se outro ensaio com o parâmetro Absorbância, no espectrofotômetro UV da Varian (Tabela 6), a fim de se observar alguma alteração da água tratada, a passar pela madeira.

Este aparelho possibilita fazer a varredura da absorbância de 200 a 350 nm e caso houvesse algo na madeira que fosse transportado pela água, poderia ser detectado através da alteração nos valores de absorbância.

Figura 32 - Água bruta coagulada e Água filtrada, respectivamente (Etapa II)



A coagulação teve como finalidade principal melhorar a qualidade de água tratada (Figura 32), fazendo com que as impurezas ficassem retidas no elemento filtrante.

3.8. Ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

A microscopia eletrônica é utilizada para diferentes objetivos e finalidades [Amaral, 2011, Basseti, 2002, Carrera, 2008]. Os dois primeiros observaram membranas de filtração e o segundo observou amostras de tronco da espécie *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC. Percebe-se desta forma a importância deste método para caracterização e visualização dos mais diversos objetos.

O princípio de funcionamento do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) se dá através do bombardeamento da amostra com feixe de elétrons que fará uma varredura na superfície do mesmo, causando emissão de radiação pela amostra. Essa radiação será captada pelo computador que irá traduzir e apresentar a imagem na tela do monitor, que poderá ser salva e posteriormente analisada. [Amaral, 2011, Basseti, 2002]

Para realização da microscopia eletrônica é necessário realizar o corte da amostra, a secagem e o recobrimento com ouro, para que a mesma conduza eletricidade. [Amaral, 2011, Basseti, 2002]

Figura 33 - MEV, modelo JEOL JSM-6390LV



A microscopia eletrônica de varredura, conhecido muitas vezes por MEV, é muito utilizada quando é necessário fazer investigações que no microscópio convencional não é possível. Ele tem capacidade de ampliar uma amostra até 20.000 vezes o seu tamanho original. O modelo do MEV utilizado nesta pesquisa foi JEOL JSM-6390LV, conforme Figura 33.

Para utilização do mesmo é necessário submeter o projeto de pesquisa junto ao comitê técnico do Laboratório Central de

Microscopia Eletrônica – LCME/UFSC e no momento da análise, é necessário a presença de um técnico especializado.

Para esta pesquisa, foi estipulado analisar as 3 madeiras da Etapa I, antes de qualquer ensaio e para Etapa II, após o processo de filtração.

Amostras foram extraídas em cubos com dimensões aproximadas de 0,5 cm x 0,5 cm x 0,5 cm (Figura 34), do interior das toras das madeiras selecionadas, com um corte de estilete para não danificar os poros. Após a secção dos cubos, eles foram identificados com o lado correto a ser visto na microscopia e com o tipo da madeira. Para o ressecamento das amostras, elas foram mantidas a 70°C numa estufa por um período de 22 h antes de serem levadas ao cobrimento de ouro. O cobrimento com ouro foi necessário por se tratar de amostras não metálicas.

As amostras foram então levadas ao LCME, em um compartimento fechado e com sílica para evitar ganho de umidade e cobertas com ouro. Após o cobrimento, as amostras foram mantidas novamente em compartimento fechado e sílica até o dia da análise microscópica.

Figura 34 - Amostras das madeiras após corte e cobrimento de ouro



Com o controlador manual foram determinadas imagens na microscopia eletrônica de varredura (MEV), com aproximações iguais para as três amostras no sentido dos poros, paralelo às fibras; e uma aproximação específica para o sentido perpendicular às fibras nos poros menores da espécie *Pinus*.

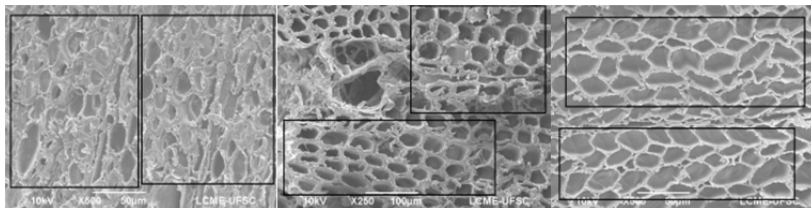
Num total de quatro imagens por amostra, elas foram selecionadas visando ter uma visão geral da estrutura da madeira

(aproximação de 22x); uma aproximação para se ter uma contagem da quantidade de poros numa determinada área (aproximação de 50x); e para se ter a dimensão dos poros grandes e pequenos (aproximações de 250x, 500x e 1000x).

3.8.1.1. Medição de diâmetro de poro

As imagens da Figura 35 propiciaram medir o diâmetro médio dos poros (em milímetros) e sua quantidade em uma determinada área. Para se realizar esta medição, utilizou-se o programa computacional chamado *Image J*, que colocava as imagens em escala. Com isso, foi possível exportar os valores obtidos no programa *Image J* para uma planilha eletrônica tipo Excel e assim obter a área total de poros.

Figura 35 – Contagem de poros (Caixeta, Garapuvu e Pinus (da esquerda para direita))



Antes de fazer a contagem dos poros, é necessário interpretar na imagem o que é poro. Poro é considerado todo e qualquer vazio que contribui para a passagem da água através da madeira.

Os poros podem ser células condutoras (elementos de vaso), células parenquimáticas, fibras, etc.

No caso de madeira do tipo gimnosperma (pinus), têm-se normalmente poros pequenos, pois na sua superfície observam-se somente fibras e células parenquimáticas de menor calibre. O que aparentemente parecia ser grandes poros, na verdade eram dutos de resina e foram desconsiderados na contagem dos poros por estarem obstruídos. Portanto, para a madeira pinus, observaram-se apenas poros pequenos.

Já as madeiras angiospermas (caixeta e garapuvu), observaram-se poros grandes e pequenos, pois nelas havia a presença de células condutoras (de maior calibre) e fibras/células parenquimáticas (de menor calibre).

3.8.1.2. Cálculo de porosidade

A contagem dos números de poros foi realizada através de uma região demarcada para se obter o número de poros por unidade de área. Assim, foi possível medir a porosidade ϵ :

$$\epsilon = \frac{\sum \text{Área dos poros (mm}^2\text{)}}{\text{Área total (mm}^2\text{)}} \quad (\text{equação 6})$$

3.8.1.3. Cálculo de densidade de poros

Diante da quantidade de poros por uma determinada área, foi possível medir a densidade de poros (poro/mm²). Todas as contagens realizadas, medição do diâmetro dos poros, cálculo de porosidade e cálculo de densidade de poros se encontram no APÊNDICE B.

3.8.1.4. Profundidade de colmatção nos poros

Neste momento, para a Etapa II, os ensaios de microscopia eletrônica de varredura foram destinados a outra finalidade, que era analisar a madeira após o processo de filtração.

Figura 36 – Preparação das amostras para MEV – Etapa II



Para tanto, extraiu-se do elemento filtrante amostras de madeira da superfície onde a filtração ocorreu (Figura 37), a 5 mm de profundidade em relação a primeira, depois a 10 mm e por fim a 15 mm.

O procedimento de desidratação por estufa e cobrimento por ouro nas amostras ocorreu da mesma forma, antes da microscopia eletrônica de varredura.

Figura 37 – Desmontagem do filtro piloto e elemento filtrante colmatado



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da madeira

4.1.1. Massas específicas

Comprovaram-se as massas específicas de cada madeira, a saber:

- ✓ Garapuvu: $\rho = 0,31 \text{ g/cm}^3$ (classificação: muito leve);
- ✓ Pinus: $\rho = 0,47 \text{ g/cm}^3$ (classificação: leve);
- ✓ Caixeta: $\rho = 0,61 \text{ g/cm}^3$ (classificação: moderadamente pesada ou mediana).

4.1.2. Ensaios de MEV dos elementos filtrantes

Realizaram-se análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das madeiras garapuvu, caixeta e pinus, em seu estado natural, antes dos ensaios de filtração frontal. A seguir, as imagens obtidas com as respectivas aproximações e escalas, conforme Figura 38, Figura 39, Figura 40 e Figura 41.

Figura 38 - Imagens frontais de MEV da madeira caixeta no sentido paralelo as fibras (LCME)

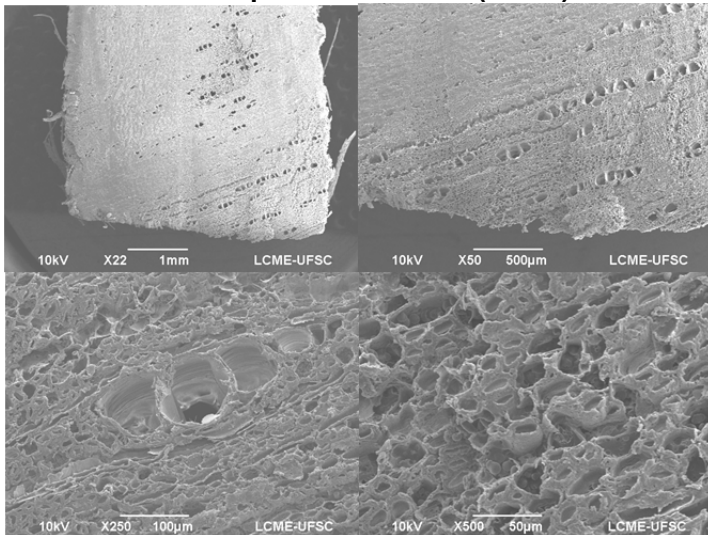


Figura 39 - Imagens frontais de MEV da madeira garapuvu no sentido paralelo as fibras (LCME)

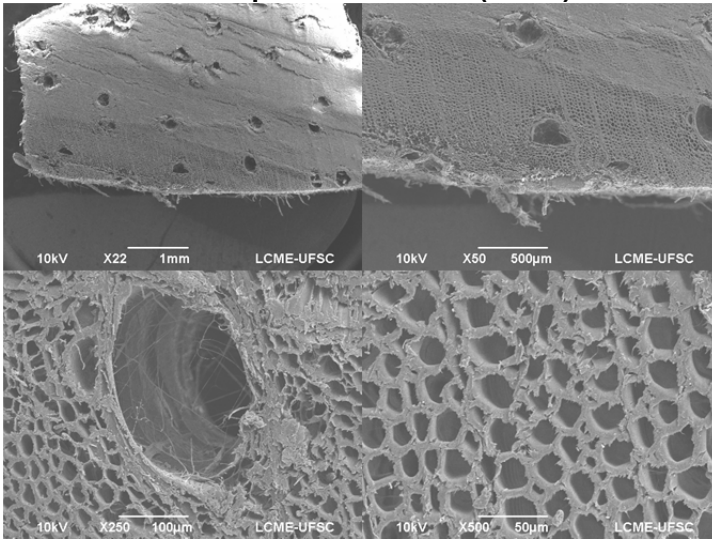


Figura 40 - Imagens frontais de MEV da madeira pinus no sentido paralelo as fibras (LCME)

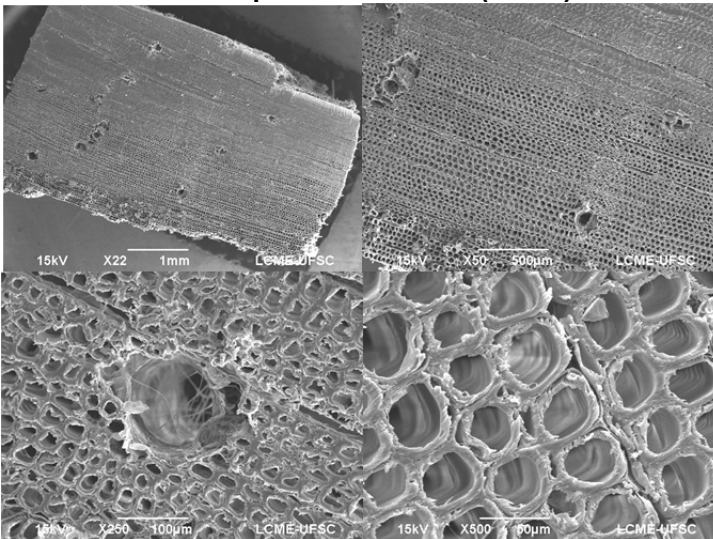
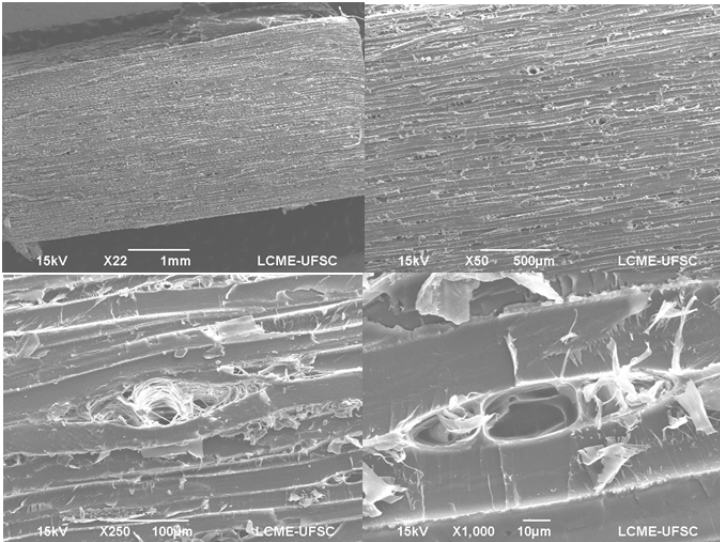


Figura 41 - Imagens frontais de MEV da madeira pinus no sentido transversal as fibras (LCME)



Observa-se nas imagens supracitadas que os poros são encontrados no sentido longitudinal (ou paralelo) às fibras para todas as espécies. Porém, somente na espécie pinus, apresentou também poros no sentido transversal, em menor quantidade.

Com relação à permeabilidade das madeiras estudadas, observou-se que quanto mais porosa for a madeira, maior será sua permeabilidade e menor será sua massa específica. Não foi encontrada metodologia específica para se medir permeabilidade em madeira para tratamento de água.

Com relação ao tamanho dos poros encontrados, os mesmos se aproximavam da faixa da microfiltração que, segundo alguns autores, varia de 0,05 µm a 10 µm [Mierzwa, 2008]. Os valores apresentados na Tabela 7 mostram que os poros medidos variaram de 13 µm a 26 µm.

Tabela 7 – Resultados do diâmetro médio do poro (mm), porosidade (%) e densidade de poros (poro/mm²) nas 3 madeiras estudadas

| | | Poros pequeno | Poros grande |
|----------|---|---------------|--------------|
| PINUS | Diametro médio (mm) | 0,026 | - |
| | porosidade (%) | 41,81 | - |
| | Densidade poros (poro/mm ²) | 784 | - |
| GARAPUVU | Diametro médio (mm) | 0,018 | 0,259 |
| | porosidade (%) | 65,15 | |
| | Densidade poros (poro/mm ²) | 1935 | 2 |
| CAIXETA | Diametro médio (mm) | 0,013 | 0,062 |
| | porosidade (%) | 30,80 | |
| | Densidade poros (poro/mm ²) | 6803 | 228 |

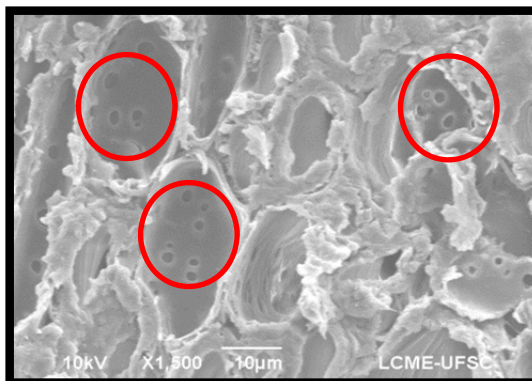
NOTAS: 1) Contagem com repetição de 3x.

2) Faixa da microfiltração (MF): 0,00005 mm < D < 0,010 mm.

Conforme Tabela 7, fica perceptível que os poros pequenos, que são em maior quantidade, vão aumentando de tamanho da caixeta para a garapuvu, variando de 0,013 mm a 0,26 mm, respectivamente.

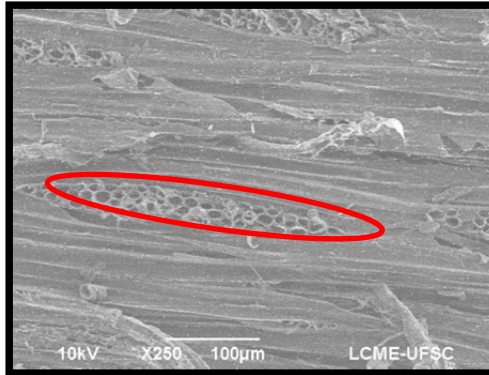
Por outro lado, foram encontrados imperfeições (pequenos orifícios) na parede da fibra conhecidos na literatura como pontoações (ver Figura 42). Tais imperfeições dentro das células condutoras são normais e comumente encontradas em pinus, contribuindo muito pouco para a filtração.

Figura 42 – Pontoações da madeira pinus



A seguir, comprova-se que há poros em madeiras tipo gimnosperma (pinus) no sentido transversal, conforme apresentado na Figura 43; porém foram desconsiderados pelo fato de não ter contribuição relevante no processo de filtração. Já as angiospermas (caixeta e garapuvu) não apresentam esta característica.

Figura 43 – Poros da madeira pinus no sentido transversal ao escoamento

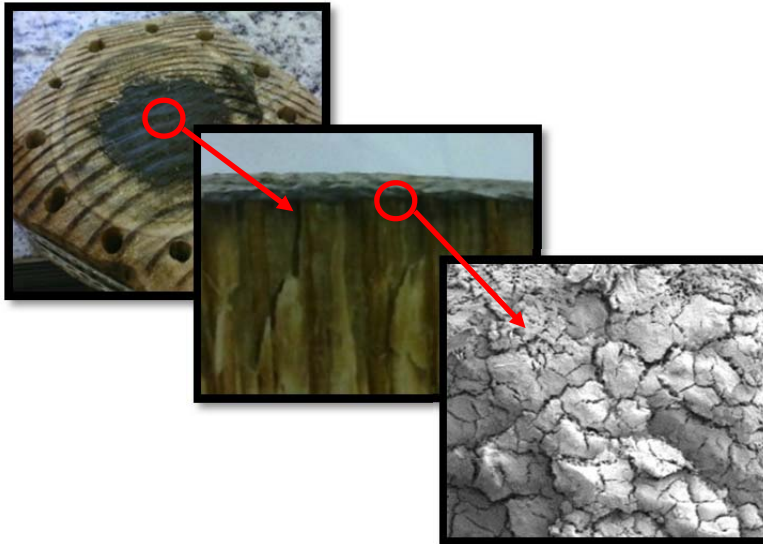


O Estudo da autoclavagem na madeira como preparação da mesma para o tratamento de água não se mostrou eficiente para as madeiras autoclavadas nas condições estudadas; no geral, piorou a qualidade da água. Isso se deve ao fato da autoclavagem causar pequenas fissuras nas madeiras provocando vazamentos (canais preferenciais). Este fato pode ser explicado pela sua anisotropia.

4.1.3. MEV após a carreira de filtração

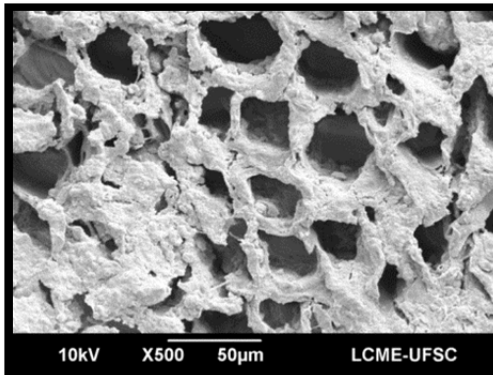
A Figura 44 apresenta uma sequência de imagens para visualizar a colmatagem a olho nu e com microscopia eletrônica de varredura-MEV (aumento de 25x), mostrando os sólidos retidos superficialmente na madeira.

Figura 44 – Colmatação da madeira pinus



A imagem com aumento de 500x no MEV pôde constatar que a colmatação penetrou nos poros da madeira pinus (ver Figura 45).

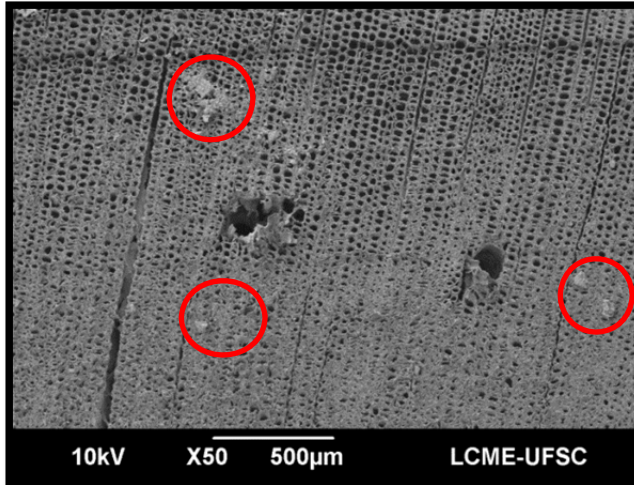
Figura 45 – Colmatação da madeira pinus (500x)



As imagens subsequentes foram extraídas de amostras a 5 mm (Figura 46), 10 mm e 15 mm de profundidade (Figura 47) em relação à superfície da madeira que ficou em contato com a água bruta coagulada, respectivamente. Na imagem com 5 mm de

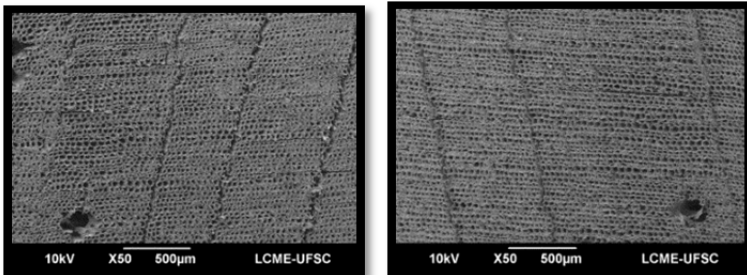
profundidade ainda apresenta alguns resquícios de colmatção, pois observa-se alguns poros obstruídos.

Figura 46 – Colmatção da madeira pinus, a 5 mm de profundidade da superfície de filtração



Observou-se que não houve penetração da colmatção nas profundidades de 10 e 15 mm, respectivamente, conforme Figura 47.

Figura 47 – Colmatção da madeira pinus, a 10 mm e 15 mm de profundidade da superfície de filtração, respectivamente



4.2. Caracterização da Água Bruta

A água bruta foi sintetizada a partir da água da torneira acrescida de argila. Como o foco da pesquisa foi estudar a filtração na madeira; portanto, apenas alguns parâmetros foram realizados para caracterizar a água bruta, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Caracterização da água bruta

| Parâmetros | Água bruta - Etapa I | | Água bruta - Etapa II | |
|---|----------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| | Sem Coag. | Com Coag. | Sem Coag. | Com Coag. |
| Cor aparente (uH) | 12 | 45 | 56 | 64 |
| Turbidez (uT) | 2,7 | 12 | 10,9 | 11,5 |
| pH | 6,81 | 6,77 | 6,84 | 6,95 |
| STD (ppm) | 36 | 35 | 32 | 31 |
| Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 72 | 70 | 64 | 62 |
| Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | 20 | 21 | 25 | 27 |

4.3. Filtração com Escoamento Frontal

As amostras da filtração com escoamento frontal no sentido transversal às fibras foram descartadas para a filtração frontal, pois não foi possível a passagem de água com a pressão aplicada (até 45 mca). As imagens de MEV identificaram a baixa porosidade nas amostras analisadas.

As pressões aplicadas na filtração frontal foram medidas a partir do manômetro conectado ao registro de saída do cilindro pressurizado com ar sintético. O ajuste da vazão foi feita no mesmo registro e os valores de pressão foram os seguintes, conforme descrito na Tabela 9 e na Tabela 10.

Tabela 9 – Pressões de trabalho para a filtração frontal sem Al_2SO_4

| Amostra | Pressão (mca) | Amostra | Pressão (mca) | Amostra | Pressão (mca) |
|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|
| 1G | 2 | 1P | 8 | 1C | 15 |
| 2G | * | 2P | 40 | 2C | * |
| 3G | 2 | 3P | 2 | 3C | 4 |
| 4G | * | 4P | 40 | 4C | * |

NOTA: * = sem escoamento

Tabela 10 – Pressões de trabalho para a filtração frontal com Al_2SO_4

| Amostra | Pressão (mca) | Amostra | Pressão (mca) | Amostra | Pressão (mca) |
|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|
| 1G | 4 | 1P | 6 | 1C | 25 |
| 2G | * | 2P | 45 | 2C | * |
| 3G | * | 3P | * | 3C | * |
| 4G | * | 4P | * | 4C | * |

NOTA: * = amostras descartadas

Salienta-se que, para a filtração frontal com coagulação, as amostras do ensaio anterior que não obtiveram escoamento anterior foram descartadas, bem como as amostras autoclavadas. Observou-se que, em geral, o aumento da pressão de trabalho entre os dois ensaios foi devido à adição de coagulante.

Com relação à qualidade da água filtrada em escoamento frontal sem coagulação, a turbidez de forma geral melhorou; por outro lado, em se tratando de cor aparente, piorou. Neste ensaio, não se teve certeza de qual espécie é melhor.

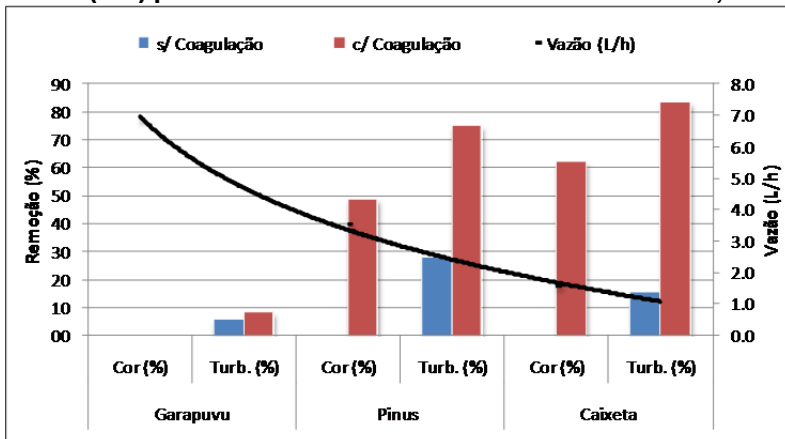
Já com coagulação com sulfato e alumínio (Al_2SO_4), levando em consideração a eficiência de remoção, em termos de cor aparente e turbidez e a produção de água filtrada, a madeira pinus apresentou valores melhores que as madeiras garapuvu e caixeta (ver Tabela 11 e Figura 48, respectivamente).

Tabela 11 – Valores médios dos resultados da filtração frontal com e sem coagulação (Al_2SO_4)

| Madeira | Garapuvu | | Pinus | | Caixeta | |
|-----------------------|----------|-------|-------|-------|---------|-------|
| | Cor | Turb. | Cor | Turb. | Cor | Turb. |
| Remoção s/ Coagulação | * | 6% | * | 28% | * | 16% |
| Remoção c/ Coagulação | * | 8% | 49% | 75% | 62% | 83% |
| Vazão (L/h) | 6,9 | | 3,5 | | 1,6 | |

NOTAS: 1) * - Não houve remoção;
2) Repetição amostras: 3x.

Figura 48 – Remoção de Cor Aparente e Turbidez (%) e vazão média (L/h) para as madeiras analisadas com área de 12,5 cm²



Outra forma de se avaliar que a madeira pinus foi a que obteve melhor desempenho, é expressar os resultados em termos de remoção específica, normalizando a pressão e vazão, resultando na seguinte equação:

$$R = \frac{\%}{Q.P} \quad (\text{equação 7})$$

Sendo que:

- R = Remoção específica (% / L / h.mca);
- % = porcentagem de remoção de cor aparente ou turbidez;
- Q = vazão (L/h);
- P = Pressão (mca).

Desta forma, a partir da equação 7 e dos dados da Tabela 11, elaborou-se a Tabela 12.

Tabela 12 – Remoção específica para a filtração frontal com coagulação

| Madeira | Garapuvu | | Pinus | | Caixeta | |
|--|----------|-------|-------|-------|---------|-------|
| | Cor | Turb. | Cor | Turb. | Cor | Turb. |
| Remoção Específica c/ Coagulação (%/L/h.mca) | * | 14 | 29 | 44 | 4 | 5 |

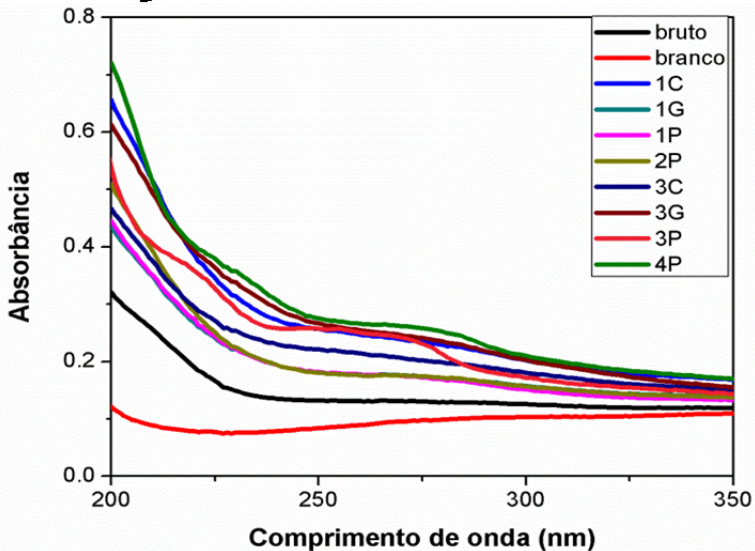
NOTA: * - Não houve remoção

Com isso, pôde conferir que a madeira pinus obteve melhor desempenho perante as demais madeiras analisadas, pois quanto maior o valor da remoção específica (Tabela 12), maior será sua eficiência perante as variáveis avaliadas.

Não houve modificação significativa da água bruta e tratada realizando ensaio de Absorbância, varrendo o comprimento de onda de 200 a 350 nm, conforme Figura 49.

A variação do decaimento das curvas para a análise de Absorbância não mostrou algo esclarecedor que possa identificar que a água filtrada através da madeira tenha substâncias que se dissolveram ou se desprenderam da mesma, contaminando-a. Para tanto, seria conveniente, investigar com mais detalhes quais as consequências que tais variações podem acarretar na qualidade da água tratada.

Figura 49 – Absorbância x Comprimento de onda (nm) para as águas filtradas nas madeiras analisadas



Na Figura 50, observa-se a colmatação na superfície da madeira, utilizando água bruta coagulada.

Figura 50 – Amostras da madeira caixeta antes e depois da filtração frontal



A qualidade da água melhorou mediante a limpeza prévia dos poros da madeira com água da torneira, porque se constatou a olho nu, no início do ensaio de filtração, que a água filtrada continha resíduos de madeira devido ao corte, tais partículas eram pequenos fragmentos de fibras de madeira.

Após 3 lavagens com água abundante, observou-se que esta limpeza prévia era suficiente pelo fato de não haver mais desprendimento destas partículas aderidas. Com isso, este procedimento foi realizado para todas as amostras.

4.4. Filtração com Escoamento Tangencial Helicoidal

Estes ensaios foram aperfeiçoados decorrente à realização da Etapa I, que se objetivou promover um melhor escoamento além de filtrar paralelamente às fibras. Como a madeira pinus apresentou os melhores resultados na Etapa anterior, somente ela foi ensaiada neste momento.

Na carreira de filtração sem coagulação, houve melhoria da qualidade de água, porém os resultados continuaram acima do desejado (valores considerados ruins), a cor aparente na ordem de 37 uH e turbidez na faixa de 3,3 uT, conforme descrito na Figura 51.

Figura 51 – Cor Aparente e Turbidez da água bruta e filtrada, para a madeira pinus ao longo do ensaio de filtração sem coagulação

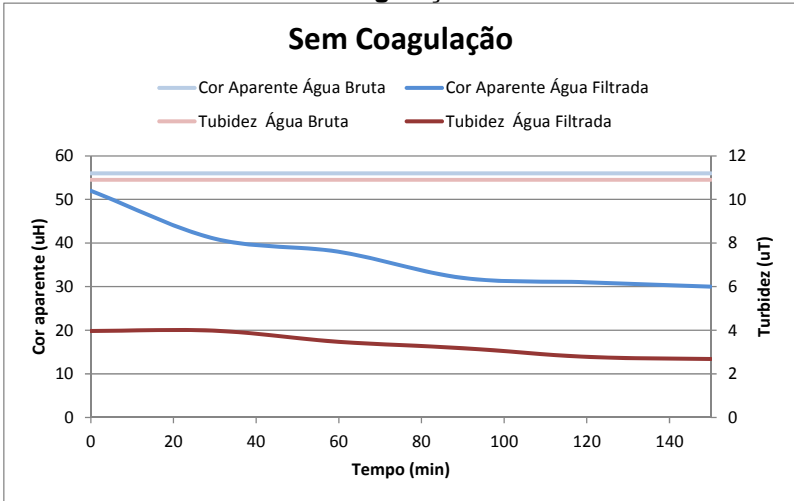
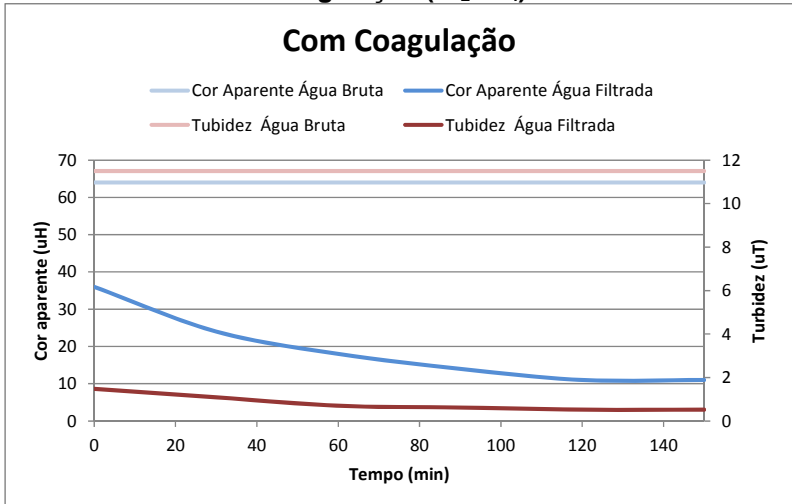
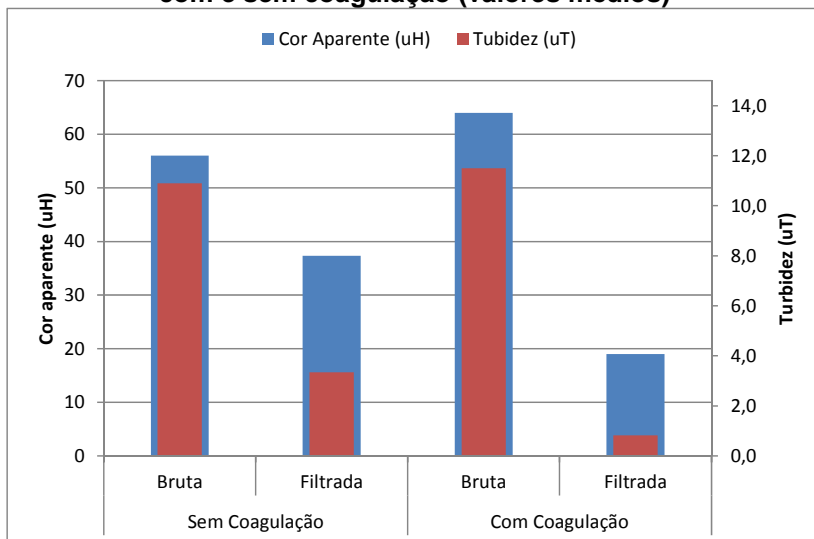


Figura 52 – Cor Aparente e Turbidez da água bruta e filtrada, para a madeira pinus ao longo do ensaio de filtração com coagulação (Al₂SO₄)



Observou-se que com a coagulação, para os parâmetros analisados, a qualidade da água filtrada obteve bons resultados, como pode ser visto na Figura 52, ao longo da carreira de filtração e na Figura 53, seus valores médios.

Figura 53 – Cor Aparente e Turbidez da água bruta e tratada, com e sem coagulação (valores médios)



Pôde-se constatar que houve uma remoção significativa em termos de cor aparente (70%) e de turbidez (93%) para o ensaio com coagulação, conforme Tabela 13.

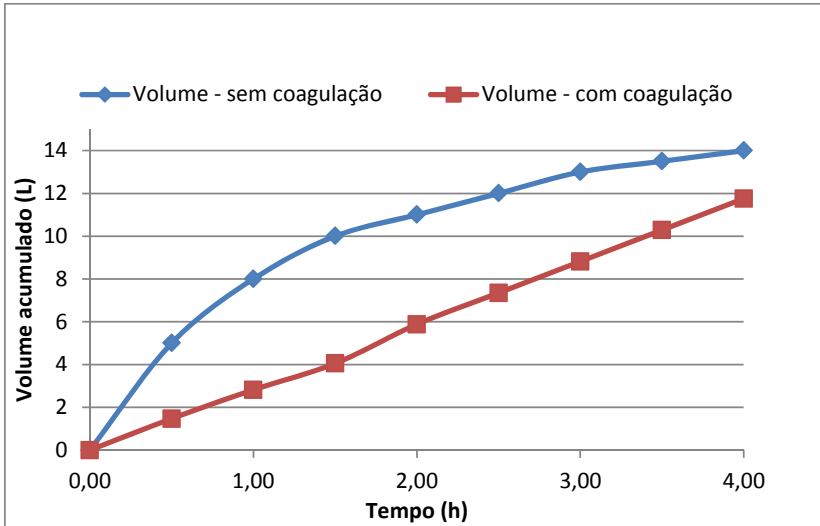
Tabela 13 – Valores médios dos resultados da filtração tangencial helicoidal com e sem coagulação

| Parâmetros | Sem Coagulação | | | Com Coagulação | | |
|-------------------|----------------|----------|-------------|----------------|----------|-------------|
| | Bruta | Filtrada | Remoção (%) | Bruta | Filtrada | Remoção (%) |
| Cor Aparente (uH) | 56 | 37 | 33% | 64 | 19 | 70% |
| Turbidez (uT) | 10,9 | 3,34 | 69% | 11,5 | 0,8 | 93% |

Para fins de produção de água, observou-se que o sistema com coagulação teve uma tendência de colmatar menos, porém o volume final foi menor que sem coagulação, conforme Figura 54. Pode-se também interpretar pela Figura 54 que, caso houvesse um

maior tempo de filtração, haveria uma inversão das curvas passando a filtração com coagulação a ter uma produção maior de água.

Figura 54 – Volume acumulado ao longo do ensaio de filtração com e sem coagulação em 95 cm² de madeira



A equação para a filtração com coagulação é:

$$\text{Vac} = 2,96T - 0,0933 \quad (R^2 = 99,91\%) \quad (\text{equação 8})$$

E a equação para a filtração sem coagulação:

$$\text{Vac} = -0,0004T^6 + 0,0139T^5 - 0,1873T^4 + 1,3024T^3 - 5,098T^2 + 11,861T + 0,0718 \quad (R^2 = 99,94\%) \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

- Vac = Volume acumulado (L);
- T = tempo de filtração (h).

As equações 8 e 9 são válidas para um tempo aproximado de 10 h e a partir de 5,1 h se observa que nesta duração os volumes acumulados se invertem, sendo maior no ensaio com coagulação.

A perda de carga do sistema de filtração foi medida através de manômetros, entre a entrada e saída do filtro piloto. A diferença de pressão entre os manômetros se manteve constante à medida

que foi colmatando o elemento filtrante; isto se deve ao fato que a vazão de entrada ficou constante aumentando a vazão de recirculação e diminuindo a do permeado. Em termos de taxa de filtração, o valor médio obtido através das carreiras foi de 15 m³/m².d.

Esta pesquisa não se preocupou em estudar a variação da espessura do elemento filtrante. O leiaute do terceiro filtro piloto teve seu foco em conceber uma maneira viável de produzir água tratada, sem comprometer a estanqueidade do sistema de filtração e a resistência da madeira, portanto padronizou-se a espessura do mesmo em 7 cm.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pelo fato da pesquisa ser considerada única e original, buscou-se neste momento validar a madeira como elemento filtrante, mesmo que não foi possível encontrar referências específicas na revisão bibliográfica realizada. Ressalta-se que a madeira é um material diferente e se comporta de forma diferente em diversas situações de temperatura, umidade, saturação, etc; a causa disso pode ser explicada pela sua anisotropia.

Desta forma a madeira, quando comparada com materiais manufaturados artificialmente (membranas) ou materiais inorgânicos (areia), ficou impossibilitada de utilizar configurações de sistemas pilotos conhecidos e usados atualmente.

A filtração no sentido transversal das fibras não foi interessante, por apresentar baixíssima taxa de filtração e requerer uma pressão de trabalho alta.

Com relação à filtração com escoamento frontal, considerando ao mesmo tempo qualidade e produção de água, das 3 espécies de madeira analisadas (garapuvu, caixeta e pinus), a madeira pinus foi a melhor opção.

Existe uma correlação entre massa específica da madeira e sua porosidade. Neste trabalho, a massa específica de $0,50 \text{ g/cm}^3$ e uma porosidade na faixa de 40% foram interessantes para o tratamento. Das madeiras estudadas, o diâmetro de poro com maior desempenho foi em torno de 0,02 mm.

Os resultados na filtração com escoamento tangencial helicoidal foram interessantes, mostrando a viabilidade da filtração em madeira, pois se obteve valores de cor aparente próximos a 10 uH (remoção média de 70%) e turbidez na faixa de 0,50 uT (remoção média de 93%).

Com relação à pressão de trabalho, a pressão de entrada foi 40 psi (28 mca) e a pressão de saída foi 26 psi (18 mca), gerando uma perda de carga no sistema de 10 mca, para uma taxa de filtração $15 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$.

Os ensaios de filtração envolvendo coagulação demonstraram melhores resultados e maior eficiência no tempo de filtração.

Na filtração com escoamento tangencial helicoidal, a colmatação sobre a superfície da madeira chegou a uma profundidade de 5 mm, não sendo encontrado em 10 mm.

Este sistema de tratamento trabalhou com baixas pressões, gerando baixo consumo de energia. Outro fator importante foi que a madeira é uma matéria-prima renovável.

Recomenda-se utilizar, de forma a contornar o problema da perda de resistência em espessuras menores a que foi estudada, chapa perfurada abaixo e/ou acima do elemento filtrante a fim garantir resistência necessária ao sistema.

Para que o corte do elemento filtrante tenha bastante precisão e exatidão, os quais exigem alto controle de qualidade na sua confecção, recomenda-se estudar formas de usinagem da madeira ou cortes a laser observando que tais técnicas de corte não venham causar a obstrução dos poros da mesma.

Recomenda-se realizar ensaios com a madeira caixeta para o escoamento tangencial helicoidal, da mesma forma que foi realizado para a pinus na segunda etapa desta pesquisa.

Recomenda-se estudar outras configurações de sistema piloto a fim de simplificar a montagem e desmontagem do mesmo, levando em consideração a anisotropia da madeira.

Recomenda-se avaliar mais parâmetros de qualidade de água para se tomar conhecimento de outras aplicações da filtração em madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Amaral, P.A., *Utilização da flotação por ar dissolvido associada a microfiltração para remoção de cianobactérias em águas de abastecimento*, in *Engenharia Sanitária e Ambiental*.2011, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis.
2. Andrew, D. and M.A.H. Eaton, *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21 ed2005, Washington: American Public Health Association.
3. Basseti, F.J., *Preparação, caracterização e aplicação de membranas poliméricas microporosas assimétricas*, in *Engenharia Química*2002, Universidade Estadual de Campinas: Campinas.
4. Brasil, M.A.M. and M. Ferreira, *Características das fibras de madeira de EucalyptusGrandis Hill exMaiden, aos 3 anos de idade*. . Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), 1979(19): p. 80-97.
5. Brisolari, A., *Estudo da molhabilidade em madeiras tropicais ou de reflorestamento por medidas de ângulo de contato e de permeabilidade*, in *Ciência e Engenharia de Materiais*2008, Universidade de São Paulo: São Carlos.
6. Carrera, U.S., *Varição intra-específica na anatomia da folha e do lenho de Tabebuia cassinoides (Lam.) DC. (Bignoniaceae) em ambientes distintos*, in *Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro*2008, Escola Nacional de Botânica Tropical: Rio de Janeiro.
7. Corrêa, E., *Filtração de água em membranas de madeira*, in *Engenharia Sanitária e Ambiental*2002, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis.

8. Deser. *A seca em Santa Catarina*. 2004 16/10/2008; Available from: http://www.deser.org.br/noticias_read.asp?id=775.
9. Dutka, B.J., *Membrane Filtration : Applications, Techniques, and Problems*. 1ª ed1981, United Kingdom: Marcel Decker, Inc.
10. Funasa, *Manual de Saneamento*. 3ª ed2004, Brasília.
11. Gonzaga, A.L., *Madeira: Uso e Conservação. Programa Monumenta*2006: IPHAN/Monumenta.
12. Klock, U., et al., *Química da Madeira*. 3ª ed2005, Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
13. Kuniyoshi, Y.S., *Aspectos morfo-anatômicos do caule, raiz e folha de Tabebuia cassinoides (Lam.) DC (Bignoniaceae) em diferentes fazes sucessionais no litoral do Paraná*, in *Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias* 1993, Universidade Federal do Paraná: Curitiba.
14. Mainieri, C. and J.P. Chimelo, *Fichas características de madeiras brasileiras*1989, São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas
15. Mallevialle, J.A., P.E.A. Odendaal, and A.W.W. Association, *Tratamiento del agua por procesos de membrana: principios, procesos y aplicaciones*. 5ª ed1998: McGraw-Hill Interamericana de España.
16. Mierzwa, J.C., et al., *Tratamento de água para abastecimento público por ultrafiltração: avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado*. Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2008. 13: p. 78-87.
17. Moreschi, J.C., *Propriedades tecnológicas da madeira - Manual Didático*2005, Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

18. Oliveira, T.F., *Tratamento de água para abastecimento público por sistema de separação por membrana de ultrafiltração: estudo de caso na ETA Alto da Boa Vista*, in *Engenharia Hidráulica*2010, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo: São Paulo.
19. Pádua, V.L.d., *Remoção de Microrganismos Emergentes e Microcontaminantes Orgânicos no Tratamento de Água para Consumo Humano*. 1 ed. Vol. 1. 2009, Rio de Janeiro: ABES.
20. Schneider, R.P. and M.T. Tsutiya, *Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso*2001: ABES.
21. Silva, J.M.d., *Modelagem numérica do escoamento num tubo permeável aplicada ao processo de filtração tangencial*, in *Engenharia Mecânica*, 2008, Escola de Engenharia de São Carlos: São Carlos.
22. Silva, M.R., *Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas*. , in *Ciências de Engenharia de Materiais*2007, Universidade de São Paulo: São Carlos.
23. Von Sperling, M., *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*1996: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais.
24. Zenid, G.J. and G.C.T. Ceccantini, *Identificação macroscópica de madeiras*, 2007, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo: São Paulo.

APÊNDICE A

This article was downloaded by: [177.43.41.92]

On: 13 September 2013, At: 07:15

Publisher: Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



Desalination and Water Treatment

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/tdwt20>

Water filtration through wood with helical cross-flow

Mauricio Luiz Sens^a, Marcelo Luiz Emmendoerfer^a & Laura Cecilia Muller^a

^a Department of Sanitary and Environmental Engineering, Technology Center of Federal University of Santa Catarina, Florianopolis, 88040-970, Brazil Phone: Tel. +55 48 3721-9470

Published online: 13 Sep 2013.

To cite this article: Mauricio Luiz Sens, Marcelo Luiz Emmendoerfer & Laura Cecilia Muller, Desalination and Water Treatment (2013): Water filtration through wood with helical cross-flow, Desalination and Water Treatment, DOI: 10.1080/19443994.2013.837010

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2013.837010>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>



Water filtration through wood with helical cross-flow

Mauricio Luiz Sens*, Marcelo Luiz Emmendoerfer, Laura Cecilia Müller

Department of Sanitary and Environmental Engineering, Technology Center of Federal University of Santa Catarina, Florianópolis 88040-970, Brazil

Tel. +55 48 3721-9470; email: mls@ens.ufsc.br

Received 11 June 2013; Accepted 14 August 2013

ABSTRACT

The use of wood as a filter element for water treatment can be an efficient, low-cost alternative because wood is a renewable material. Therefore, pioneering a study to examine the possibility of filtering water through wood was advantageous. In 2002, the first experiments with wood filtration in the perpendicular direction of fibers were conducted (Correa and Sens [1]). With the continuation of this study, a new research developed as presented in this article. This study was conducted in two steps by the construction of pilot systems. The first step studied dead-end filtration and the second step studied helical cross-flow. The three species of wood studied were: caixeta (*Tabebuia cassinoides* Lam P. DC.), garapuvu (*Schizolobium parahyba* Vell. Blake), and pine (*Pinus elliottii*). The images obtained in the scanning electron microscope had the same approximations for all the three samples in the pores' direction as well as in the direction of fibers. The porosity of the wood fits within the size of the microfiltration. The observation of the wood's permeability revealed that the more porous the wood, the greater the permeability and the smaller the apparent mass. Filtration in the perpendicular direction of the fibers did not prove valuable because of its very low filtration rate and the need for high working pressure. Pine proved to be the superior option when considering the quality and production of water in the dead-end filtration. In this study, the value for wood density which is calculated to be 0.50 g/cm^3 and the porosity in the range of 40% proved to be significant factors for this treatment system. This implied a correlation between wood density and its porosity when choosing wood for water filtration. With respect to the observed wood, the pore diameter with higher performance was approximately 0.02 mm. The results in the helical cross-flow filtration generated an average removal of 70% to apparent color removal and 93% for average turbidity. The working pressure did not exceed 40 psi for a filtration rate of $15 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. The helical cross-flow filtration tests involving coagulation showed enhanced results and higher efficiency. Fouling on the surface of the wood reached a depth of 5 mm, not found in 10 mm. In summary, this treatment system exhibited improved and cost-effective results with minimal power consumption due to low working pressures.

Keywords: Water treatment; Filter element; Helical cross-flow; Water filtration through wood

1. Introduction

The need for potable water for human consumption and other applications in communities and

residences has increased over the years with elevated expense due to the poor conditions of water sources.

The use of wood as a filter element can be efficient and cost effective since wood is a renewable material found in different environments throughout the earth.

*Corresponding author.

Therefore, it was worthwhile to initiate a study examining the possibility of filtering water through wood. This coursework was completed by Correa [1], under the guidance of Sens [1], who carried out the first filtration experiments of wood in the perpendicular direction of fibers.

This research evaluated the performance of the water filtration system in wood with the frontal and helical cross-flow determining the efficiency of the three species of wood. In addition, the best direction of water flow in the filtration process was observed (parallel or perpendicular direction of fibers).

Correa [1] studied the following species of wood: pine, virola, and cedar. The tests intended to reproduce a similar tubular filter with the wood.

Thus, the filter elements produced three diameters for cross-flow filtration. The differences are relative to the filtering wall thickness in the range of 1.0–3.0 cm (Fig. 1).

These experiments tested the removal of color and turbidity with the flow in the perpendicular direction of fibers. Results are shown in Fig. 2.

As observed, there is little difference in respect to the efficiency of membranes with a thickness between 1.0 and 2.0 cm. Both membranes are in the range of 30–35% efficiency for color and turbidity. The membrane with a thickness of 3.0 cm had enhanced performance with a 50% average efficiency for color and turbidity.

The anisotropy of wood can be problematic when deformation occurs with loss or gain of humidity causing cracks during the drying process, with respect to the observed direction. Additionally, bacteria, fungi, insects, etc. can attack a biodegradable organic material. Thus, precautions against rain and sunlight are necessary by paying special attention to the drying process. Drying can cause deformations, which are more severe when the longitudinal tangential



Fig. 1. Filter elements with varying degrees of thickness (source: Correa, 2002 [1]).

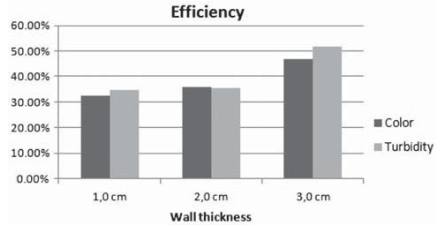


Fig. 2. Relationship between wall thickness and efficiency (Source: Correa, 2002 [1]).

direction of the rings is cut. It averages out when the cut is made in the cross-section and insignificant in the radial longitudinal direction (see Fig. 3) [2].

The use of membrane filters intended for the separation of materials proved to be effective. Several processes are in the initial phase of development, in which the main determining factor is the relationship between filtration and the pore size of the filtered material.

Due to the geometric conformation of membranes, the filtration performed in a conventional manner passes in the cross-flow direction (see Fig. 4). The reason for this is that the flow observed certain turbulence on its surface obtaining results in the dragging of particles that cause incrustations. With cross-flow filtration, it is advisable to apply some pressure to “push” fluid through the pores of the membrane for collection on the other side. The applied pressures must comply with the manufacturer’s recommendations to avoid damaging your own surfaces [3].

The wood is mainly composed of lignin (ranging from 18–35%), hemicelluloses, and cellulose (ranging from 65–75%) polymeric materials which are considered complex, such as polymeric substances

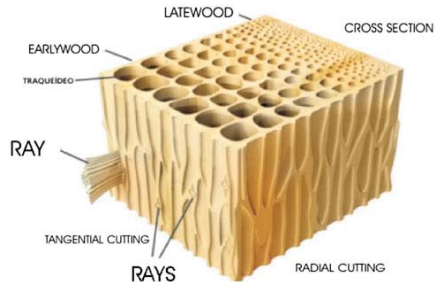


Fig. 3. Schematic drawing of the anatomy of a conifer - not a species of pine (source: Gonzaga, 2006 [2]).

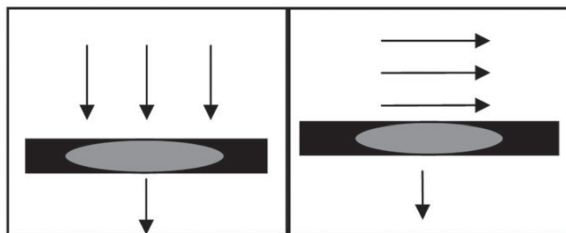


Fig. 4. Conventional filtration (with dead-end filtration) × cross-flow filtration.

and secondary substances of low-molecular weight that can be responsible for taste, odor, and color [4].

To understand how the water will pass through the wood, we have to be familiar with some of its chemical compositions. These compositions vary according to several factors, such as geographic location, climate, and soil type. Therefore, the chemical composition is not accurately defined for a wood species or even for a specific wood.

There are other components that are present mainly in the form of extractable organic and inorganic substances, such as oils, resins, sugars, starches, tannins, nitrogenous substances, organic acids, and organic salts (ranging from 4–10%). These extracts give the organoleptic properties of wood, such as smell, color, taste, and its resistance to fungi and insects. The elements that make up the wood, in general, are carbon (50%), oxygen (44%), hydrogen (5.5%), and traces of many metal ions.

2. Materials and methods

This study was conducted in two steps by the construction of pilot systems. The first step studied the dead-end filtration and the second step studied the helical cross-flow filtration.

The raw water used in this treatment as input for the pilot system was prepared using water provided by the public supply system with the addition of clay to achieve the desired parameters for the tests. As the focus of the research was to study the cross-flow filtration in the wood, only a few parameters [5] were considered to characterize the raw water as shown in Table 1.

2.1. Step 1—Dead-end filtration test

The three species of wood (see Fig. 5) studied were: caixeta (*Tabebuia cassinoides*), garapuvu (*Schizolobium parahyba*), and pine (*Pinus elliottii*).

Table 1
Raw water parameters

| Parameters | Raw water-step 1 | Raw water-step 2 | | |
|--|------------------|------------------|------|------|
| Apparent color (pt-Co unit) | 12 | 45 | 56 | 64 |
| Turbidity (NTU) | 2.7 | 12 | 10.9 | 11.5 |
| pH | 6.81 | 6.77 | 6.84 | 6.95 |
| Total dissolved solids (ppm) | 36 | 35 | 32 | 31 |
| Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 72 | 70 | 64 | 62 |
| Temperature ($^{\circ}\text{C}$) | 20 | 21 | 25 | 27 |



Fig. 5. The three species of wood studied (caixeta, garapuvu, and pine, from left to right).

During the preparation of filter elements, special consideration was taken for the species of wood, the flow direction regarding the fibers (// = parallel or # = perpendicular), and autoclaving as pretreatment (see Table 2 and Fig. 6).

For step 1, the pressures applied in the dead-end filtration were measured from the manometer connected to the output valve in a pressurized synthetic air cylinder. The flow adjustment was made in the same valve.

Table 2
Species of wood, pretreatment, flow direction, and specific mass (dead-end filtration)

| Flow Species | No autoclaving | | With autoclaving | | ρ (g/cm ³) |
|--------------|----------------|----|------------------|----|-----------------------------|
| | // | # | // | # | |
| Garapuvu | 1G | 2G | 3G | 4G | 0.31 |
| Pine | 1P | 2P | 3P | 4P | 0.47 |
| Caixeta | 1C | 2C | 3C | 4C | 0.61 |



Fig. 6. Filter elements for the dead-end filtration.

It is noteworthy that for the dead-end filtration with coagulation, the samples without previous flow test were discarded (Table 3), as well as autoclaved (Table 4). It was observed that, in general, working pressures increased with the addition of a coagulant.

For both steps, the conditions for the jar test were the same:

- Fill the jar (s) with raw water up to the 2 liter mark.
- Adjust control agitation for 90 s⁻¹.
- Add the required amount of coagulant solution of aluminum sulfate Al₂SO₄ at 1% and white-wash.
- solution Ca(OH)₂ at 0.5%.
- Change the agitation from 90 to 1,200 s⁻¹, with a mixing time of 30 s.
- Decrease the velocity gradient to 112 s⁻¹, with a mixing time of 60 s.
- Filter the coagulated water in the pilot system.

For Steps 1 and 2, the dosage of aluminum sulfate (Al₂SO₄) was 8 mL, representing a concentration of 40 mg/L and an addition of 8 mL of whitewash (Ca(OH)₂) to adjust the pH value between 5.6 and 6.0. The coagulation pH for the first step was 5.66 and 5.74 for the second step.

The dead-end filtration study was carried out using a pilot filter system made of stainless steel as shown in Fig. 7.

Table 3
Filtration pressure for step 1 without coagulation (dead-end filtration)

| Sample | Filtration pressure (psi) | Sample | Filtration pressure (psi) | Sample | Filtration pressure (psi) |
|--------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|---------------------------|
| 1G | 3 | 1P | 11 | 1C | 21 |
| 2G | No flow | 2P | 57 | 2C | No flow |
| 3G | 3 | 3P | 3 | 3C | 6 |
| 4G | No flow | 4P | 57 | 4C | No flow |

Table 4
Filtration pressure for step 1 with coagulation (dead-end filtration)

| Sample | Filtration pressure (psi) | Sample | Filtration pressure (psi) | Sample | Filtration pressure (psi) |
|--------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|---------------------------|
| 1G | 6 | 1P | 9 | 1C | 36 |
| 2G | Discarded | 2P | 64 | 2C | Discarded |
| 3G | Discarded | 3P | Discarded | 3C | Discarded |
| 4G | Discarded | 4P | Discarded | 4C | Discarded |



Fig. 7. Filter pilot for the dead-end filtration.

2.2. Step 2—Helical cross-flow filtration

In the second study, to observe the helical cross-flow filtration, another pilot filter system was constructed as shown in Figs. 8 and 9.

The materials used in the second pilot system were: (1) raw water input, (2) raw water tank, (3) suction pipe (10 mm), (4) ¼ hp pump rotor with carbon and Teflon coating, (5) discharge pipe (10 mm), (6) manometer input, (7) filter (Fig. 10), (8) treated water tank, (9) raw water return pipe, (10) manometer output, and (11) needle valve (to control flow and pressure).

The system operated with recirculation. Thus, the water returns to the raw water tank mixing the part that had not passed through the wood, concentrating the soluble and/or dissolved substances.

In the pipe, where the water returns to the raw water tank, another manometer was installed to

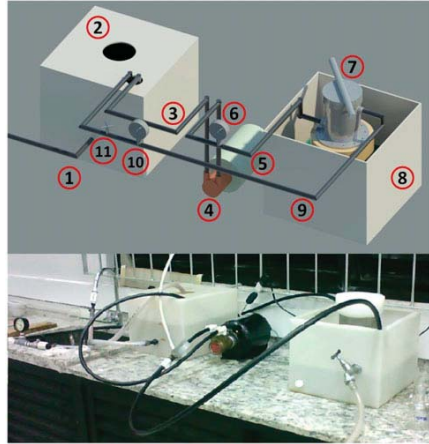


Fig. 9. Pilot system for the helical cross-flow filtration.

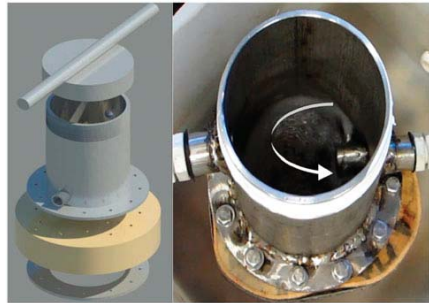


Fig. 10. Details of the filter pilot and the helical cross-flow filtration system.

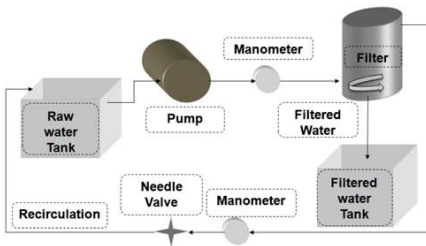


Fig. 8. Diagram of the pilot system for the helical cross-flow filtration.

measure the pressure output allowing the determination of head loss in the system. To allow the passage of water through the wood, a needle valve was installed after the second manometer. Adjusting the valve is possible to restrict the passage flow forcing water to pass through the wood.

The water enters the filter pilot through the input pipe that connects the pump to the filter, which is responsible for the helical cross-flow on the surface of the wood causing the water to pass in the perpendicular direction to the wood's surface. Inside the filter pilot, a small stainless steel pipe reduces the diameter



Fig. 11. Samples of wood during the cutting process and prepared with the gold covering.

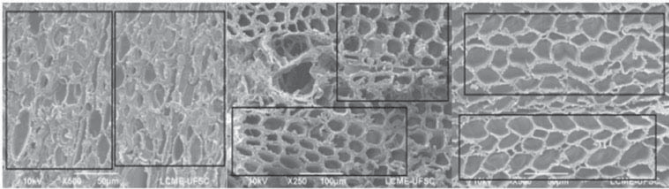


Fig. 12. Images from pore counting of caixeta, garapuvu, and pine wood.

providing helical cross-flow into the pilot wall. That contributes to cleaning the filter element with a circular jet causing the detachment of material adhered to the wood's surface, which can increase the filtration time.

As described above, there are two kinds of water: concentrate and permeate. The concentrate comes out from the top of the pilot at the return pipe (see Fig. 10) collecting the particles that did not adhere to the wood's surface. Permeate is the water that passes through the wood and is collected in the tank of filtered water (treated water).

In sequence, controlling the pressure between the inlet and outlet, exercised by the closing or opening of the needle valve is accomplished through the flow of water passing through the filter element (wood). The passage of water through the wood depends on several factors: the system pressure, filter element thickness, density, and characteristics of the wood's pores (pore diameter, pore density, etc.). These factors promote higher or lower flow.

When designing and building the filter element, its thickness combined with its resistance must be considered. As a result, the filter element must have a minimum thickness to promote the necessary strength for the filtration. By minimizing the thickness of the wood, the filter element becomes less resistant. On the other hand, the greater the thickness, the greater the difficulty of passing water through the filter element.

Even though wood is an anisotropic material, its characteristics can change depending on the direction evaluated (depending on the direction of the cut). Therefore, a good sealing becomes significant. A rubber ring inserted between the filter pilot and the end of the wood for compression prevents leakage.

For step 2, the tests were conducted only in wood of better quality and the pressures of the helical cross-flow filtration, both with and without the coagulation test were:

- Input pressure: 40 psi.
- Output pressure: 26 psi.
- Head loss in the pilot system: 14 psi.

It was noted that throughout the period of filtration, pressure remained constant. It was also observed that the test without coagulation there was a considerable decrease in the flow of filtered water. On the other hand, this decrease was smaller for the coagulation test.

2.3. Scanning electron microscope

Samples of wood were analyzed in a scanning electron microscope (SEM) JEOL JSM-6390LV, at the Central Laboratory for Electron Microscopy (LCME) at UFSC following specific procedures recommended by the LCME.

Preparation of samples: The samples were extracted in cubes with approximate dimensions of $0.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ (see Fig. 11). The extraction of the cubes began with the wood's surface cut without deformity using a blade in order to avoid damaging the pores. After the cut, they were identified by observing the correct side in the microscope and the species of wood. As for drying the samples, they were stored at 70°C in a kiln for a period of 22 h before being taken to the gold overlay (gold pulverization).

The samples were stored in plastic containers with silica to prevent humidity and pulverized with gold for electric conduction.

Analysis: with an adjusted, manual zoom, images were determined by the SEM, with the same approximations for the three samples in the direction of the pores, parallel fibers, and a specific approach to the direction perpendicular to the fibers in the smaller pores of the pine. With four images per sample, they were selected in order to have an overview of the wood's structure (with a zoom of $22 \times s$), an approach counting the number of pores in a given area (with a zoom of $50 \times s$), and to have the dimensions of the small and large pores (with zooms of $250 \times s$, $500 \times s$ and $1000 \times s$).

3. Results and discussion

3.1. Preliminary studies

The natural state of the wood species was observed through SEM (before filtration). Next, the images were obtained by the respective scales and approximations.

As observed in the analysis, there are pores in the parallel direction of fibers in all species (on the surface of cross-section). However, the pine's pores had a perpendicular direction of fibers, but in a lower amount.

3.2. SEM—before filtration

The images of Fig. 12 propitiated the measurement of the pore diameter and its amount in a delimited area, determining the average diameter. Counting the pores was accomplished by the demarcated area to obtain the number of pores per unit area. Thus, it was possible to calculate porosity ε , which shows the pores' areas Σ per total area (see Table 5).

The pores enlarge from caixeta to garapuvu, as shown in Table 5, ranging from 0.013 to 0.26 mm, respectively.

The observation of the wood's permeability revealed that the more porous the wood, the greater the permeability and the smaller the apparent mass. The pore size studied can be considered similar to a microfiltration membrane.

Furthermore, imperfections were discovered in the fiber wall, specifically in the anatomy of the wood (see Fig. 13). These imperfections within the pores are normal and commonly found in pine, also contributing to the filtration process.

As previously stated, there are pores in pine (*gymnosperma*) with fibers in the perpendicular direction (see Fig. 14), but disregarded because they do not have a significant contribution in the filtration process. The angiosperms wood (caixeta and garapuvu) do not have this characteristic feature.

With reference to the study of autoclaving in wood, water treatment was not efficient under the conditions studied, worsening the water quality in most tests. This is because autoclaving produces small cracks in the wood, causing leaks (preferential channels). Therefore, these samples were discarded in the next stage of the research.

3.3. Dead-end filtration

In previous tests, it was not possible to pass water with the applied pressure of up to 60 psi using cut

Table 5
Results of SEM - pore diameter (mm), porosity (%) and pore density (pores/mm²) for pine, garapuvu and caixeta

| | | Small pore | Great pore |
|----------|---------------------------------------|------------|------------|
| PINE | Average diameter (mm) | 0.026 | – |
| | Porosity (%) | 41.81 | – |
| | Pore density (pores/mm ²) | 784 | – |
| GARAPUVU | Average diameter (mm) | 0.018 | 0.0259 |
| | Porosity (%) | 65.15 | |
| | Pore density (pores/mm ²) | 1,935 | 2 |
| CAIXETA | Average diameter (mm) | 0.013 | 0.062 |
| | Porosity (%) | 30.8 | |
| | Pore density (pores/mm ²) | 6,803 | 228 |

NOTE: count repetition: $3 \times s$.

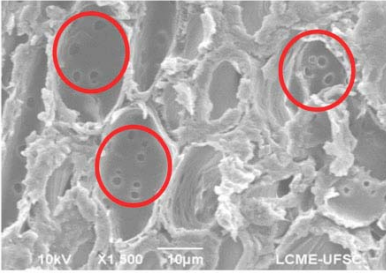


Fig. 13. Imperfections of pine.

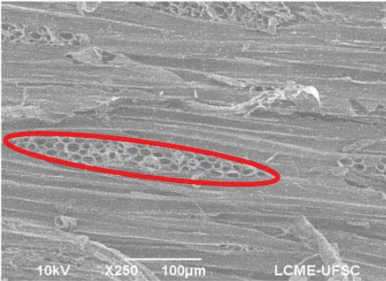


Fig. 14. Pores in pine with fibers in the perpendicular direction.

samples with fibers in the perpendicular direction, except for pine. Therefore, the samples, caixeta and garapuvu, were discarded for the dead-end filtration.

With regard to the quality of the treated water, in the dead-end filtration without coagulation, the parameter turbidity was generally better. On the other hand, the apparent color worsened (see Fig. 15). In this experiment, it was unclear which species was superior.

There was no significant change in the treated and raw water absorbance test by performing wavelength sweeping of 200–350 nm, as shown in Fig. 16.

The test with Al_2SO_4 coagulation, considering removal efficiency in terms of apparent color and turbidity, and volume of filtered water, the values were better in pine than in garapuvu and caixeta (see Fig. 17 and Table 6).

The treated water quality improved, by cleaning the pores of the samples with the water from the public supply system, using the same procedure of dead-end filtration.

In Fig. 17, the difference in samples is the fouling on the wood's surface, which can be explained by the presence of clay in the prepared raw water.

3.4. Helical cross-flow filtration

Following step one, tests were only administered to the pine samples, which obtained better results. Taking into account, the best flow of fibers is in the parallel direction.

In the helical cross-flow filtration without coagulation, there was improvement in the treated water quality, but the results remained outside the required standard, the parameter of apparent color in the order of 37 Pt-Co units and turbidity in the range of 3.3

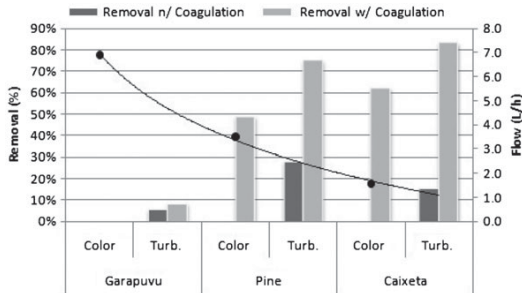


Fig. 15. Removing apparent color and turbidity (%), and average flow rate (L/h) for the analyzed wood (dead-end filtration).

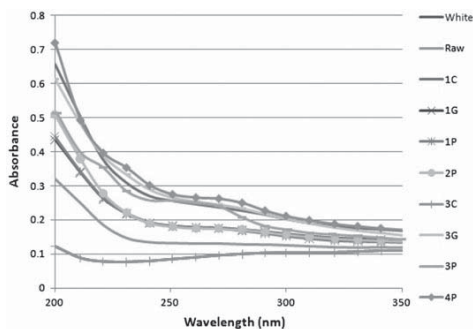


Fig. 16. Absorbance x Wavelength (nm) water samples (without coagulation) in different wood samples.



Fig. 17. Caixeta samples before and after the dead-end filtration.

Table 6
Results of the dead-end filtration with and without coagulation (Al_2SO_4)

| Wood | Garapuvu | | Pine | | Caixeta | |
|-----------------------|----------|-------|-------|-------|---------|-------|
| | Color | Turb. | Color | Turb. | Color | Turb. |
| Removal n/coagulation | * | 6% | * | 28% | * | 16% |
| Removal w/Coagulation | * | 8% | 49% | 75% | 62% | 83% |
| Flow (L/h) | 6.9 | | 3.5 | | 1.6 | |

NOTE: *No removal. Repetition of analysis: 3x [6]

NTU. On observation, the experiment with coagulation obtained positive results for the same parameters, as seen in Fig. 18.

As discovered, there was a significant removal in terms of apparent color (70%) and turbidity (93%) for the filtration with coagulation, confirmed in Table 7.

On observing the treated water, the filtration with coagulation had a tendency to result in less fouling; this is most likely due to the penetration of solids into pores. However, the final volume was lower than the filtration without coagulation, as shown in Fig. 19. If there had been a longer filtration time, it could also be interpreted as an inversion of curves resulting in a

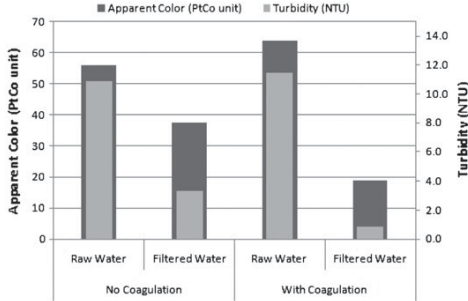


Fig. 18. Comparison between apparent color and turbidity of the raw and treated water, with and without coagulation (average values in helical cross-flow filtration).

Table 7
Removal of turbidity and apparent color, with and without coagulation (helical cross-flow-filtration)

| Parameters | NO coagulation | | | With coagulation | | |
|-----------------------------|----------------|----------|---------|------------------|----------|---------|
| | Raw | Filtered | Removal | Raw | Filtered | Removal |
| Apparent color (Pt-Co unit) | 56.0 | 37 | 33% | 64 | 19 | 70% |
| Turbidity (NTU) | 10.9 | 3.3 | 69% | 11.5 | 0.8 | 93% |

higher water production for the filtration with Al_2SO_4 coagulation.

The equation for the volume of filtration with Al_2SO_4 coagulation: $V_{ac} = 2.96 T - 0.0933$ ($R^2 = 99.91\%$) and the equation for the volume of filtration without coagulation: $V_{ac} = -0.0004 T^6 + 0.0139 T^5 - 0.1873 T^4 + 1.3024 T^3 - 5.098T^2 + 11.861 T + 0.0718$ ($R^2 = 99.94\%$).

Where: V_{ac} = Volume accumulated (L), and T = filtration time (h).

The equations are valid for a time of 10 h. In 5.1 h of filtration, the accumulated volumes are inverted, being higher in filtration with Al_2SO_4 coagulation.

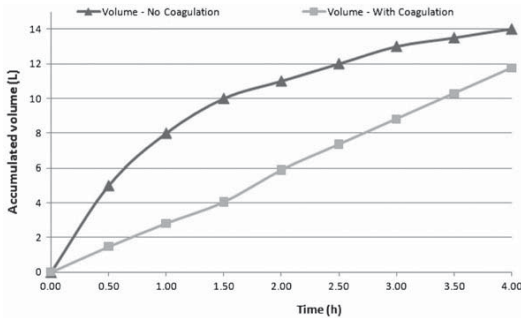


Fig. 19. Accumulated volume during filtration with and without coagulation (helical cross-flow-filtration).

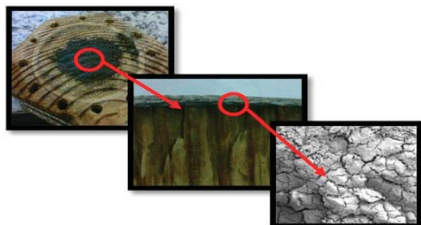


Fig. 20. Fouling of pine surface.

Manometers between the input and output of the filter measured the head loss of the filtration system. The pressure difference of manometers remained constant during fouling of the filter element (wood). The explanation for this is the input flow was constant, increasing the recirculation flow with a decrease of the permeate water.

Within the limits established for the pressure in the experiments, the filtration rate had an average of $15 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$.

3.5. SEM—after filtration

Fig. 20 shows a sequence of images to confirm the fouling without zoom and with SEM (with a magnification of $25 \times$), showing the retained particles on the surface of the wood.

The image with a magnification of $500 \times$ by SEM noted that the fouling penetrated the pores of the pine sample (see Fig. 21).

The next images extracted at a depth of 5 mm (see Fig. 21) and at depths of 10 and 15 mm from the surface of the wood seen in Fig. 21 show that fouling continued at a depth of 5 mm because some of the pores were obstructed. There was no penetration of fouling at the depths of 10 and 15 mm.

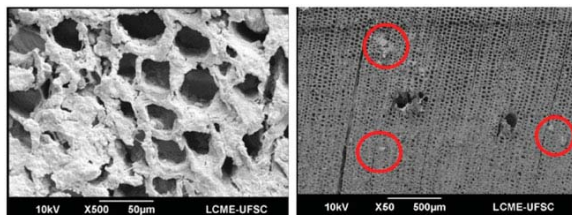


Fig. 21. Fouling in the pores of pine at the surface and at a depth of 5 mm (with zooms of 500 and $50 \times$, respectively).

4. Conclusions

The filtration of fibers in the perpendicular direction proved insignificant because of its extremely low filtration rate, requiring a high working pressure.

In terms of dead-end filtration, pine was confirmed as the most favorable option when considering the quality and production of water.

There is a correlation between wood density and porosity. In this research, the density of $0.50 \text{ g}/\text{cm}^3$ and the porosity in the range of 40% showed significance for the water treatment.

For the analyzed wood, the pore diameter with higher performance was about 0.02 mm. The results in helical cross-flow filtration were noteworthy as it demonstrated the viability of this filtration technology. In terms of quality treatment, the results of apparent color were about 10 Pt-Co units (average removal of 70%) and turbidity in the range of 0.50 NTU (average removal 93%).

Concerning the working pressure, the input pressure was 40 psi and the output pressure was 26 psi. It generated a head loss in the pilot system of 14 psi.

The filtration tests involving coagulation showed improved results and higher efficiency. In the helical cross-flow filtration, the fouling on the surface of the pine reached a depth of 5 mm, not found in 10 mm.

In summary, this treatment system demonstrated enhanced results with minimal cost and low-power consumption working at low pressures. Additionally, this study used only renewable and biodegradable materials, benefiting the environment.

It would be valuable to conduct another research with caixeta (*T. cassinoides*), performing the same tests as this species of wood also displayed satisfactory results in the filtration process.

This research has not studied the possibility of reusing the wood filter. Future research could explore methods of cleaning and/or backwashing using clean

water (public supply system) or a diluted solution of sodium hypochlorite (NaClO).

References

- [1] E. Correa, M.L. Sens, Filtração de água em membranas de madeiram, Trabalho de conclusão de curso [Water filtration in wood membrane, Completion of coursework], UFSC, Florianópolis, SC, 2002, pp. 23–30.
- [2] A.L. Gonzaga, Madeira: Uso e Conservação. Programa Monumenta—Cadernos Técnicos [Wood: Use and conservation. Monumenta program – technical papers], IPHAN, Monumenta, Brasília, 2006, pp. 36–40.
- [3] J. Malevalle et al., Tratamiento del agua por procesos de membrana—Principios, procesos y aplicaciones [Water treatment by membrane processes – Principles, processes and applications], Mc Graw-Hill, Madrid, 1998, pp. 101–110.
- [4] U. Klock, G.I.B. Muniz, J.A. Hernandez, A.S. Andrade, Química da Madeira, Apostila. Universidade Federal do Paraná [Wood chemistry, Handbook. UFPR], Curitiba, 2005, pp. 67–70.
- [5] D. Andrew, M.A.H. Eaton, Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed., American Public Health Association, Washington, DC, 2005.

APÊNDICE B

Primeira contagem – Pinus – poros pequenos

| Contagem 1 | Diametro (mm) | Area (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,03 | 0,00062 |
| 2 | 0,03 | 0,00066 |
| 3 | 0,04 | 0,00113 |
| 4 | 0,02 | 0,00031 |
| 5 | 0,02 | 0,00045 |
| 6 | 0,03 | 0,00057 |
| 7 | 0,03 | 0,00053 |
| 8 | 0,02 | 0,00042 |
| 9 | 0,02 | 0,00045 |
| 10 | 0,02 | 0,00042 |
| 11 | 0,01 | 0,00011 |
| 12 | 0,01 | 0,00013 |
| 13 | 0,02 | 0,00038 |
| 14 | 0,02 | 0,00035 |
| 15 | 0,02 | 0,00045 |
| 16 | 0,03 | 0,00049 |
| 17 | 0,03 | 0,00057 |
| 18 | 0,02 | 0,00023 |
| 19 | 0,03 | 0,00057 |
| 20 | 0,02 | 0,00045 |
| 21 | 0,03 | 0,00049 |
| 22 | 0,03 | 0,00049 |
| 23 | 0,02 | 0,00045 |
| 24 | 0,02 | 0,00045 |
| 25 | 0,02 | 0,00035 |
| 26 | 0,02 | 0,00025 |
| 27 | 0,02 | 0,00038 |
| 28 | 0,02 | 0,00023 |
| 29 | 0,03 | 0,00049 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,02 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,01289 | |
| Área total (mm²) | 0,033 | |
| porosidade (%) | 39 | |
| Densidade poros (poro/mm²) | 879 | |

Segunda contagem – Pinus – poros pequenos

| Contagem 2 | Diametro (mm) | Area (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,035 | 0,00096 |
| 2 | 0,031 | 0,00075 |
| 3 | 0,029 | 0,00066 |
| 4 | 0,028 | 0,00062 |
| 5 | 0,029 | 0,00066 |
| 6 | 0,035 | 0,00096 |
| 7 | 0,03 | 0,00071 |
| 8 | 0,032 | 0,00080 |
| 9 | 0,029 | 0,00066 |
| 10 | 0,031 | 0,00075 |
| 11 | 0,036 | 0,00102 |
| 12 | 0,028 | 0,00062 |
| 13 | 0,028 | 0,00062 |
| 14 | 0,033 | 0,00086 |
| 15 | 0,026 | 0,00053 |
| 16 | 0,036 | 0,00102 |
| 17 | 0,03 | 0,00071 |
| 18 | 0,029 | 0,00066 |
| 19 | 0,028 | 0,00062 |
| 20 | 0,032 | 0,00080 |
| 21 | 0,035 | 0,00096 |
| 22 | 0,033 | 0,00086 |
| 23 | 0,03 | 0,00071 |
| 24 | 0,038 | 0,00113 |
| 25 | 0,03 | 0,00071 |
| 26 | 0,032 | 0,00080 |
| 27 | 0,037 | 0,00108 |
| 28 | 0,033 | 0,00086 |
| 29 | 0,027 | 0,00057 |
| 30 | 0,025 | 0,00049 |
| 31 | 0,029 | 0,00066 |
| 32 | 0,036 | 0,00102 |
| 33 | 0,027 | 0,00057 |
| 34 | 0,021 | 0,00035 |
| 35 | 0,028 | 0,00062 |
| 36 | 0,032 | 0,00080 |
| 37 | 0,033 | 0,00086 |
| 38 | 0,039 | 0,00119 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,03 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,02921 | |
| Área total (mm²) | 0,058 | |
| porosidade (%) | 50 | |
| Densidade poros (poro/mm²) | 655 | |

Terceira contagem – Pinus – poros pequenos

| Contagem 3 | Diametro (mm) | Area (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,029 | 0,00066052 |
| 2 | 0,029 | 0,00066052 |
| 3 | 0,03 | 0,000706858 |
| 4 | 0,028 | 0,000615752 |
| 5 | 0,026 | 0,000530929 |
| 6 | 0,014 | 0,000153938 |
| 7 | 0,016 | 0,000201062 |
| 8 | 0,022 | 0,000380133 |
| 9 | 0,024 | 0,000452389 |
| 10 | 0,027 | 0,000572555 |
| 11 | 0,019 | 0,000283529 |
| 12 | 0,024 | 0,000452389 |
| 13 | 0,018 | 0,000254469 |
| 14 | 0,019 | 0,000283529 |
| 15 | 0,018 | 0,000254469 |
| 16 | 0,014 | 0,000153938 |
| 17 | 0,016 | 0,000201062 |
| 18 | 0,015 | 0,000176715 |
| 19 | 0,02 | 0,000314159 |
| 20 | 0,016 | 0,000201062 |
| 21 | 0,015 | 0,000176715 |
| 22 | 0,022 | 0,000380133 |
| 23 | 0,02 | 0,000314159 |
| 24 | 0,019 | 0,000283529 |
| 25 | 0,013 | 0,000132732 |
| 26 | 0,014 | 0,000153938 |
| 27 | 0,017 | 0,00022698 |
| 28 | 0,014 | 0,000153938 |
| 29 | 0,014 | 0,000153938 |
| 30 | 0,012 | 0,000113097 |
| 31 | 0,014 | 0,000153938 |
| 32 | 0,012 | 0,000113097 |
| 33 | 0,017 | 0,00022698 |
| 34 | 0,016 | 0,000201062 |
| 35 | 0,017 | 0,00022698 |
| 36 | 0,017 | 0,00022698 |
| 37 | 0,016 | 0,000201062 |
| 38 | 0,015 | 0,000176715 |
| 39 | 0,015 | 0,000176715 |
| 40 | 0,017 | 0,00022698 |
| 41 | 0,014 | 0,000153938 |
| 42 | 0,02 | 0,000314159 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,02 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,01200 | |
| Área total (mm²) | 0,041 | |
| porosidade (%) | 29 | |
| Densidade poros (poro/mm²) | 1024 | |

Quarta contagem – Pinus – poros pequenos

| Contagem 4 | Diametro (mm) | Area (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,034 | 0,00091 |
| 2 | 0,038 | 0,00113 |
| 3 | 0,04 | 0,00126 |
| 4 | 0,037 | 0,00108 |
| 5 | 0,042 | 0,00139 |
| 6 | 0,036 | 0,00102 |
| 7 | 0,037 | 0,00108 |
| 8 | 0,043 | 0,00145 |
| 9 | 0,036 | 0,00102 |
| 10 | 0,044 | 0,00152 |
| 11 | 0,034 | 0,00091 |
| 12 | 0,037 | 0,00108 |
| 13 | 0,036 | 0,00102 |
| 14 | 0,039 | 0,00119 |
| 15 | 0,041 | 0,00132 |
| 16 | 0,026 | 0,00053 |
| 17 | 0,018 | 0,00025 |
| 18 | 0,025 | 0,00049 |
| 19 | 0,023 | 0,00042 |
| 20 | 0,021 | 0,00035 |
| 21 | 0,02 | 0,00031 |
| 22 | 0,036 | 0,00102 |
| 23 | 0,021 | 0,00035 |
| 24 | 0,024 | 0,00045 |
| 25 | 0,025 | 0,00049 |
| 26 | 0,026 | 0,00053 |
| 27 | 0,03 | 0,00071 |
| 28 | 0,028 | 0,00062 |
| 29 | 0,032 | 0,00080 |
| 30 | 0,027 | 0,00057 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,03 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,02525 | |
| Área total (mm²) | 0,052 | |
| porosidade (%) | 49 | |
| Densidade poros (poro/mm²) | 577 | |

Primeira contagem – Garapuvu – poros grandes

| Contagem 1 | Diametro (mm) | Area (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,332 | 0,08657 |
| 2 | 0,161 | 0,02036 |
| 3 | 0,187 | 0,02746 |
| 4 | 0,286 | 0,06424 |
| 5 | 0,31 | 0,07548 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,26 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,27411 | |
| Área total (mm²) | 2 | |
| porosidade (%) | 13 | |
| Densidade poros (poro/mm²) | 2 | |

Segunda contagem – Garapuvu – poros grandes

| Contagem 2 | Diametro (mm) | Area (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,302 | 0,07163 |
| 2 | 0,283 | 0,06290 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,29 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,13453 | |
| Área total (mm²) | 0,996 | |
| porosidade (%) | 14 | |
| Densidade poros (poro/mm²) | 2 | |

Terceira contagem – Garapuvu – poros grandes

| Contagem 3 | Diametro (mm) | Area (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,255 | 0,05107 |
| 2 | 0,249 | 0,04870 |
| 3 | 0,331 | 0,08605 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,28 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,18581 | |
| Área total (mm²) | 2 | |
| porosidade (%) | 10 | |
| Densidade poros (poro/mm²) | 2 | |

Quarta contagem – Garapuvu – poros grandes

| Contagem 4 | Diametro (mm) | Area (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,243 | 0,04638 |
| 2 | 0,1 | 0,00785 |
| 3 | 0,29 | 0,06605 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,21 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,12028 | |
| Área total (mm²) | 0,944 | |
| porosidade (%) | 13 | |
| Densidade poros (poro/mm²) | 3 | |

Primeira contagem – Garapuvu – poros pequenos

| Contagem 1 | Diametro | Area (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,018 | 0,00025 |
| 2 | 0,02 | 0,00031 |
| 3 | 0,026 | 0,00053 |
| 4 | 0,022 | 0,00038 |
| 5 | 0,024 | 0,00045 |
| 6 | 0,021 | 0,00035 |
| 7 | 0,018 | 0,00025 |
| 8 | 0,02 | 0,00031 |
| 9 | 0,01 | 0,00008 |
| 10 | 0,016 | 0,00020 |
| 11 | 0,015 | 0,00018 |
| 12 | 0,011 | 0,00010 |
| 13 | 0,015 | 0,00018 |
| 14 | 0,015 | 0,00018 |
| 15 | 0,011 | 0,00010 |
| 16 | 0,017 | 0,00023 |
| 17 | 0,016 | 0,00020 |
| 18 | 0,017 | 0,00023 |
| 19 | 0,017 | 0,00023 |
| 20 | 0,02 | 0,00031 |
| 21 | 0,021 | 0,00035 |
| 22 | 0,02 | 0,00031 |
| 23 | 0,022 | 0,00038 |
| 24 | 0,024 | 0,00045 |
| 25 | 0,019 | 0,00028 |
| 26 | 0,012 | 0,00011 |
| 27 | 0,016 | 0,00020 |
| 28 | 0,016 | 0,00020 |
| 29 | 0,016 | 0,00020 |
| 30 | 0,015 | 0,00018 |
| 31 | 0,018 | 0,00025 |
| 32 | 0,018 | 0,00025 |
| 33 | 0,019 | 0,00028 |
| 34 | 0,016 | 0,00020 |
| 35 | 0,018 | 0,00025 |
| 36 | 0,019 | 0,00028 |
| 37 | 0,018 | 0,00025 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,02 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,00950 | |
| Área total (mm²) | 0,019 | |
| porosidade (%) | 50 | |
| Densidade poros (poro/mm²) | 1947 | |

Segunda contagem – Garapuvu – poros pequenos

| Contagem 2 | Diametro | Area (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,018 | 0,00025 |
| 2 | 0,024 | 0,00045 |
| 3 | 0,023 | 0,00042 |
| 4 | 0,021 | 0,00035 |
| 5 | 0,018 | 0,00025 |
| 6 | 0,022 | 0,00038 |
| 7 | 0,021 | 0,00035 |
| 8 | 0,014 | 0,00015 |
| 9 | 0,026 | 0,00053 |
| 10 | 0,017 | 0,00023 |
| 11 | 0,019 | 0,00028 |
| 12 | 0,018 | 0,00025 |
| 13 | 0,016 | 0,00020 |
| 14 | 0,02 | 0,00031 |
| 15 | 0,018 | 0,00025 |
| 16 | 0,015 | 0,00018 |
| 17 | 0,015 | 0,00018 |
| 18 | 0,021 | 0,00035 |
| 19 | 0,019 | 0,00028 |
| 20 | 0,017 | 0,00023 |
| 21 | 0,022 | 0,00038 |
| 22 | 0,017 | 0,00023 |
| 23 | 0,014 | 0,00015 |
| 24 | 0,026 | 0,00053 |
| 25 | 0,015 | 0,00018 |
| 26 | 0,02 | 0,00031 |
| 27 | 0,021 | 0,00035 |
| 28 | 0,02 | 0,00031 |
| 29 | 0,023 | 0,00042 |
| 30 | 0,021 | 0,00035 |
| 31 | 0,024 | 0,00045 |
| 32 | 0,017 | 0,00023 |
| 33 | 0,022 | 0,00038 |
| 34 | 0,012 | 0,00011 |
| 35 | 0,016 | 0,00020 |
| 36 | 0,017 | 0,00023 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,02 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,01069 | |
| Área total (mm²) | 0,021 | |
| porosidade (%) | 51 | |
| Densidade poros (poro/mm²) | 1714 | |

Terceira contagem – Garapuvu – poros pequenos

| Contagem 3 | Diametro | Area (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,024 | 0,00045 |
| 2 | 0,022 | 0,00038 |
| 3 | 0,025 | 0,00049 |
| 4 | 0,023 | 0,00042 |
| 5 | 0,018 | 0,00025 |
| 6 | 0,016 | 0,00020 |
| 7 | 0,017 | 0,00023 |
| 8 | 0,015 | 0,00018 |
| 9 | 0,018 | 0,00025 |
| 10 | 0,017 | 0,00023 |
| 11 | 0,015 | 0,00018 |
| 12 | 0,014 | 0,00015 |
| 13 | 0,014 | 0,00015 |
| 14 | 0,016 | 0,00020 |
| 15 | 0,013 | 0,00013 |
| 16 | 0,015 | 0,00018 |
| 17 | 0,011 | 0,00010 |
| 18 | 0,015 | 0,00018 |
| 19 | 0,009 | 0,00006 |
| 20 | 0,016 | 0,00020 |
| 21 | 0,016 | 0,00020 |
| 22 | 0,021 | 0,00035 |
| 23 | 0,023 | 0,00042 |
| 24 | 0,018 | 0,00025 |
| 25 | 0,019 | 0,00028 |
| 26 | 0,021 | 0,00035 |
| 27 | 0,023 | 0,00042 |
| 28 | 0,021 | 0,00035 |
| 29 | 0,018 | 0,00025 |
| 30 | 0,014 | 0,00015 |
| 31 | 0,019 | 0,00028 |
| 32 | 0,016 | 0,00020 |
| 33 | 0,012 | 0,00011 |
| 34 | 0,019 | 0,00028 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,02 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,00851 | |
| Área total (mm²) | 0,015 | |
| porosidade (%) | 57 | |
| Densidade poros (poro/mm²) | 2267 | |

Quarta contagem – Garapuvu – poros pequenos

| Contagem 4 | Diametro | Area (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,015 | 0,00018 |
| 2 | 0,02 | 0,00031 |
| 3 | 0,017 | 0,00023 |
| 4 | 0,024 | 0,00045 |
| 5 | 0,021 | 0,00035 |
| 6 | 0,015 | 0,00018 |
| 7 | 0,019 | 0,00028 |
| 8 | 0,019 | 0,00028 |
| 9 | 0,021 | 0,00035 |
| 10 | 0,022 | 0,00038 |
| 11 | 0,018 | 0,00025 |
| 12 | 0,019 | 0,00028 |
| 13 | 0,011 | 0,00010 |
| 14 | 0,021 | 0,00035 |
| 15 | 0,022 | 0,00038 |
| 16 | 0,009 | 0,00006 |
| 17 | 0,017 | 0,00023 |
| 18 | 0,019 | 0,00028 |
| 19 | 0,021 | 0,00035 |
| 20 | 0,021 | 0,00035 |
| 21 | 0,025 | 0,00049 |
| 22 | 0,021 | 0,00035 |
| 23 | 0,023 | 0,00042 |
| 24 | 0,024 | 0,00045 |
| 25 | 0,02 | 0,00031 |
| 26 | 0,022 | 0,00038 |
| 27 | 0,009 | 0,00006 |
| 28 | 0,011 | 0,00010 |
| 29 | 0,021 | 0,00035 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,02 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,00852 | |
| Área total (mm²) | 0,016 | |
| porosidade (%) | 53 | |
| Densidade poros (poro/mm²) | 1813 | |

Primeira contagem – Caixaeta – poros grandes

| Contagem 1 | Diâmetro (mm) | Área (mm²) |
|--|----------------------|------------------------------|
| 1 | 0,063 | 0,00312 |
| 2 | 0,061 | 0,00292 |
| 3 | 0,046 | 0,00166 |
| 4 | 0,069 | 0,00374 |
| 5 | 0,047 | 0,00173 |
| 6 | 0,088 | 0,00608 |
| 7 | 0,084 | 0,00554 |
| 8 | 0,074 | 0,00430 |
| 9 | 0,049 | 0,00189 |
| 10 | 0,065 | 0,00332 |
| 11 | 0,05 | 0,00196 |
| 12 | 0,061 | 0,00292 |
| 13 | 0,069 | 0,00374 |
| 14 | 0,069 | 0,00374 |
| 15 | 0,076 | 0,00454 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,065 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,05121 | |
| Área total (mm²) | 0,615 | |
| porosidade (%) | 8 | |
| densidade (poro/mm²) | 293 | |

Segunda contagem – Caixeta – poros grandes

| Contagem 2 | Diâmetro (mm) | Área (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,072 | 0,00407 |
| 2 | 0,041 | 0,00132 |
| 3 | 0,079 | 0,00490 |
| 4 | 0,047 | 0,00173 |
| 5 | 0,041 | 0,00132 |
| 6 | 0,027 | 0,00057 |
| 7 | 0,082 | 0,00528 |
| 8 | 0,077 | 0,00466 |
| 9 | 0,082 | 0,00528 |
| 10 | 0,085 | 0,00567 |
| 11 | 0,091 | 0,00650 |
| 12 | 0,07 | 0,00385 |
| 13 | 0,059 | 0,00273 |
| 14 | 0,077 | 0,00466 |
| 15 | 0,085 | 0,00567 |
| 16 | 0,057 | 0,00255 |
| 17 | 0,027 | 0,00057 |
| 18 | 0,058 | 0,00264 |
| 19 | 0,055 | 0,00238 |
| 20 | 0,055 | 0,00238 |
| 21 | 0,048 | 0,00181 |
| 22 | 0,084 | 0,00554 |
| 23 | 0,067 | 0,00353 |
| 24 | 0,089 | 0,00622 |
| 25 | 0,075 | 0,00442 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,065 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,09027 | |
| Área total (mm²) | 1,05 | |
| porosidade (%) | 9 | |
| densidade (poro/mm²) | 277 | |

Terceira contagem – Caixaeta – poros grandes

| Contagem 3 | Diâmetro (mm) | Área (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,067 | 0,00353 |
| 2 | 0,04 | 0,00126 |
| 3 | 0,052 | 0,00212 |
| 4 | 0,055 | 0,00238 |
| 5 | 0,055 | 0,00238 |
| 6 | 0,071 | 0,00396 |
| 7 | 0,065 | 0,00332 |
| 8 | 0,077 | 0,00466 |
| 9 | 0,054 | 0,00229 |
| 10 | 0,068 | 0,00363 |
| 11 | 0,064 | 0,00322 |
| 12 | 0,056 | 0,00246 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,060 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,03519 | |
| Área total (mm²) | 0,652 | |
| porosidade (%) | 5 | |
| densidade (poro/mm²) | 341 | |

Quarta contagem – Caixaeta – poros grandes

| Contagem 4 | Diâmetro (mm) | Área (mm ²) |
|--|----------------|-------------------------|
| 1 | 0,083 | 0,00541 |
| 2 | 0,078 | 0,00478 |
| 3 | 0,041 | 0,00132 |
| 4 | 0,027 | 0,00057 |
| 5 | 0,046 | 0,00166 |
| 6 | 0,071 | 0,00396 |
| 7 | 0,06 | 0,00283 |
| 8 | 0,072 | 0,00407 |
| 9 | 0,065 | 0,00332 |
| 10 | 0,031 | 0,00075 |
| 11 | 0,056 | 0,00246 |
| 12 | 0,082 | 0,00528 |
| 13 | 0,083 | 0,00541 |
| 14 | 0,08 | 0,00503 |
| 15 | 0,065 | 0,00332 |
| 16 | 0,071 | 0,00396 |
| 17 | 0,045 | 0,00159 |
| 18 | 0,043 | 0,00145 |
| 19 | 0,038 | 0,00113 |
| 20 | 0,053 | 0,00221 |
| 21 | 0,062 | 0,00302 |
| 22 | 0,066 | 0,00342 |
| 23 | 0,056 | 0,00246 |
| 24 | 0,063 | 0,00312 |
| 25 | 0,046 | 0,00166 |
| 26 | 0,035 | 0,00096 |
| 27 | 0,09 | 0,00636 |
| 28 | 0,057 | 0,00255 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,059 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,08407 | |
| Área total (mm²) | 1,33 | |
| porosidade (%) | 6 | |
| densidade (poro/mm²) | 333 | |

Primeira contagem – Caixaeta – poros pequenos

| Contagem 1 | Diâmetro (mm) | Área (mm ²) |
|--|---------------|-------------------------|
| 1 | 0,023 | 0,00042 |
| 2 | 0,021 | 0,00035 |
| 3 | 0,008 | 0,00005 |
| 4 | 0,019 | 0,00028 |
| 5 | 0,005 | 0,00002 |
| 6 | 0,009 | 0,00006 |
| 7 | 0,026 | 0,00053 |
| 8 | 0,015 | 0,00018 |
| 9 | 0,004 | 0,00001 |
| 10 | 0,01 | 0,00008 |
| 11 | 0,018 | 0,00025 |
| 12 | 0,013 | 0,00013 |
| 13 | 0,006 | 0,00003 |
| 14 | 0,012 | 0,00011 |
| 15 | 0,014 | 0,00015 |
| 16 | 0,015 | 0,00018 |
| 17 | 0,014 | 0,00015 |
| 18 | 0,015 | 0,00018 |
| 19 | 0,019 | 0,00028 |
| 20 | 0,017 | 0,00023 |
| 21 | 0,01 | 0,00008 |
| 22 | 0,016 | 0,00020 |
| 23 | 0,015 | 0,00018 |
| 24 | 0,01 | 0,00008 |
| 25 | 0,013 | 0,00013 |
| 26 | 0,009 | 0,00006 |
| 27 | 0,01 | 0,00008 |
| 28 | 0,007 | 0,00004 |
| 29 | 0,016 | 0,00020 |
| 30 | 0,021 | 0,00035 |
| 31 | 0,01 | 0,00008 |
| 32 | 0,008 | 0,00005 |
| 33 | 0,006 | 0,00003 |
| 34 | 0,009 | 0,00006 |
| 35 | 0,012 | 0,00011 |
| 36 | 0,011 | 0,00010 |
| 37 | 0,018 | 0,00025 |
| 38 | 0,005 | 0,00002 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,013 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,00578 | |
| Área total (mm²) | 0,019 | |
| porosidade (%) | 30 | |
| densidade (poro/mm²) | 6578 | |

Segunda contagem – Caixaeta – poros pequenos

| Contagem 2 | Diâmetro (mm) | Área (mm ²) |
|--|---------------|-------------------------|
| 1 | 0,011 | 0,00010 |
| 2 | 0,011 | 0,00010 |
| 3 | 0,01 | 0,00008 |
| 4 | 0,019 | 0,00028 |
| 5 | 0,01 | 0,00008 |
| 6 | 0,007 | 0,00004 |
| 7 | 0,015 | 0,00018 |
| 8 | 0,018 | 0,00025 |
| 9 | 0,017 | 0,00023 |
| 10 | 0,006 | 0,00003 |
| 11 | 0,021 | 0,00035 |
| 12 | 0,007 | 0,00004 |
| 13 | 0,009 | 0,00006 |
| 14 | 0,011 | 0,00010 |
| 15 | 0,012 | 0,00011 |
| 16 | 0,005 | 0,00002 |
| 17 | 0,011 | 0,00010 |
| 18 | 0,006 | 0,00003 |
| 19 | 0,005 | 0,00002 |
| 20 | 0,012 | 0,00011 |
| 21 | 0,017 | 0,00023 |
| 22 | 0,018 | 0,00025 |
| 23 | 0,015 | 0,00018 |
| 24 | 0,01 | 0,00008 |
| 25 | 0,007 | 0,00004 |
| 26 | 0,008 | 0,00005 |
| 27 | 0,011 | 0,00010 |
| 28 | 0,012 | 0,00011 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,011 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,00332 | |
| Área total (mm²) | 0,020 | |
| porosidade (%) | 17 | |
| densidade (poro/mm²) | 8430 | |

Terceira contagem – Caixaeta – poros pequenos

| Contagem 3 | Diâmetro (mm) | Área (mm ²) |
|--|---------------|-------------------------|
| 1 | 0,015 | 0,00018 |
| 2 | 0,019 | 0,00028 |
| 3 | 0,014 | 0,00015 |
| 4 | 0,005 | 0,00002 |
| 5 | 0,014 | 0,00015 |
| 6 | 0,02 | 0,00031 |
| 7 | 0,009 | 0,00006 |
| 8 | 0,007 | 0,00004 |
| 9 | 0,007 | 0,00004 |
| 10 | 0,015 | 0,00018 |
| 11 | 0,017 | 0,00023 |
| 12 | 0,024 | 0,00045 |
| 13 | 0,018 | 0,00025 |
| 14 | 0,019 | 0,00028 |
| 15 | 0,014 | 0,00015 |
| 16 | 0,013 | 0,00013 |
| 17 | 0,019 | 0,00028 |
| 18 | 0,012 | 0,00011 |
| 19 | 0,011 | 0,00010 |
| 20 | 0,013 | 0,00013 |
| 21 | 0,02 | 0,00031 |
| 22 | 0,014 | 0,00015 |
| 23 | 0,009 | 0,00006 |
| 24 | 0,017 | 0,00023 |
| 25 | 0,011 | 0,00010 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,014 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,00440 | |
| Área total (mm²) | 0,020 | |
| porosidade (%) | 22 | |
| densidade (poro/mm²) | 5680 | |

Quarta contagem – Caixaeta – poros pequenos

| Contagem 4 | Diâmetro (mm) | Área (mm ²) |
|--|---------------|-------------------------|
| 1 | 0,011 | 0,00010 |
| 2 | 0,01 | 0,00008 |
| 3 | 0,013 | 0,00013 |
| 4 | 0,013 | 0,00013 |
| 5 | 0,005 | 0,00002 |
| 6 | 0,021 | 0,00035 |
| 7 | 0,008 | 0,00005 |
| 8 | 0,007 | 0,00004 |
| 9 | 0,007 | 0,00004 |
| 10 | 0,004 | 0,00001 |
| 11 | 0,024 | 0,00045 |
| 12 | 0,01 | 0,00008 |
| 13 | 0,014 | 0,00015 |
| 14 | 0,007 | 0,00004 |
| 15 | 0,016 | 0,00020 |
| 16 | 0,017 | 0,00023 |
| 17 | 0,019 | 0,00028 |
| 18 | 0,011 | 0,00010 |
| 19 | 0,015 | 0,00018 |
| 20 | 0,017 | 0,00023 |
| 21 | 0,01 | 0,00008 |
| 22 | 0,012 | 0,00011 |
| 23 | 0,008 | 0,00005 |
| 24 | 0,008 | 0,00005 |
| 25 | 0,011 | 0,00010 |
| 26 | 0,018 | 0,00025 |
| 27 | 0,025 | 0,00049 |
| 28 | 0,013 | 0,00013 |
| 29 | 0,007 | 0,00004 |
| 30 | 0,023 | 0,00042 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,013 | |
| Área total dos poros (mm²) | 0,00460 | |
| Área total (mm²) | 0,018 | |
| porosidade (%) | 26 | |
| densidade (poro/mm²) | 6525 | |

