



Desenvolvimento de dispositivo para  
intertravamento de unidades de microfiltração  
quando submetidas a picos de sólidos  
suspensos

Robson Rodrigues Mororó

Projeto Final em Engenharia Química

Orientadores:

Prof(a). Suely Freitas, D.Sc.

Roberto Bentes de Carvalho, D.Sc.

Março de 2010

# DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA INTERTRAVAMENTO DE UNIDADES DE MICROFILTRAÇÃO QUANDO SUBMETIDAS A PICOS DE SÓLIDOS SUSPENSOS

*Robson Rodrigues Mororó*

Projeto Final em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

---

Prof(a). Heloísa Lajas Sanches, D.Sc.

---

Lourdes Maria Correa Cabral, D.Sc

---

Gabriela Marques dos Ramos, D.Sc

Orientado por:

---

Prof(a). Suely Pereira Freitas, D.Sc.

---

Roberto Bentes de Carvalho, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Março de 2010

Mororó, Robson Rodrigues.

Desenvolvimento de dispositivo para intertravamento de unidades de microfiltração quando submetidas a picos de sólidos suspensos / Robson Rodrigues Mororó. Rio de Janeiro: UFRJ / EQ, 2010.

xiii, 48.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2010.

Orientador: Prof(a). Suely Pereira Freitas e Roberto Bentes de Carvalho.

1. Dispositivo. 2. Intertravamento. 3. Incrustação. 4. Projeto Final (Graduação – UFRJ / EQ). 5. Suely Freitas. 6. Roberto Bentes de Carvalho. I. Título.

Dedico este trabalho

A Deus primeiramente por ter me concedido a vida e saúde até este momento para  
término de mais uma etapa da minha vida.

Aos meus pais, por terem me dado a base para a formação do meu caráter e suporte  
financeiro para chegar até aqui.

Ao Fluminense Football Club meu eterno amor.

*Preocupe-se mais com a sua consciência do que com sua reputação. Porque sua consciência é o que você é, e a sua reputação é o que os outros pensam de você. E o que os outros pensam, é problema deles.*

Bob Marley

## AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus, dono da minha vida, sem o qual nada posso fazer. Tudo é para honra e glória de Deus e não a minha.
- Agradeço à professora Suely Freitas pela atenção e o desprendimento em me orientar neste trabalho.
- Agradeço ao Roberto Bentes de Carvalho, mais conhecido como Bentes, por me orientar neste trabalho sempre buscando me passar conhecimentos de grande importância não somente para o trabalho em si, mas como também para engrandecimento da minha vida profissional.
- Agradeço meus pais pelo suporte financeiro e pela educação dada que me fez tornar um homem honesto e com grandes sonhos.
- Agradeço a minha irmã, por ter dividido comigo experiências inesquecíveis e pelo carinho pela qual ela sempre teve por mim, apesar das muitas brigas.
- Agradeço aos meus colegas de PAM Membranas que também foram importantes nesta etapa, especialmente ao povo do P&D por ter cedido um espaço no laboratório e ter aguentado o cheiro terrível das minhas leveduras. Não é Luzia?
- Agradeço a minha grande amiga Ana Paula, na qual sempre estive ao meu lado neste período de graduação, seja nos momentos de alegria, seja nos momentos de tristeza.
- Agradeço a todos meus colegas de graduação, em especial a Daniele, Lilian, Soraya e a Vivi.
- Agradeço aos professores da Escola de Química que me transmitiram conhecimento para me tornar Engenheiro Químico, um sonho de infância.
- Agradeço aos funcionários da EQ por sempre atenderem minhas reivindicações com atenção e compreensão.
- Agradeço ao meu amigo Luciano Junior que esteve sempre do meu lado nos meses de realização deste trabalho compartilhando de palavras de incentivo e o lado bom da vida.

*(Robson Rodrigues Mororó)*

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

## **DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA INTERTRAVAMENTO DE UNIDADES DE MICROFILTRAÇÃO QUANDO SUBMETIDAS A PICOS DE SÓLIDOS SUSPENSOS**

Robson Rodrigues Mororó

Março, 2010

Orientador: Prof(a). Suely Freitas, D.Sc.  
Roberto Bentes de Carvalho, D.Sc.

Processos de separação com membranas estão ganhando grande notoriedade, tendo cada vez mais aplicabilidade nos diferentes setores industriais, para as operações de separação, purificação ou concentração. Um desses setores é de tratamento de efluentes líquidos, que utilizam a microfiltração (MF) para polimento. Apesar de ter inúmeras vantagens operacionais e econômicas, a MF em tratamento de efluentes, encontra-se limitada por fenômenos inerentes a seu funcionamento, que provocam queda no fluxo de permeado (perda de produtividade) e podendo inclusive modificar as características de retenção da membrana. Tais fenômenos caracterizam-se primordialmente pela deposição, adsorção e/ou acúmulo de partículas coloidais suspensas sobre a superfície ou interior dos poros da membrana, incluindo interação química entre os solutos e membrana. Estes fenômenos, juntos ou separados, são denominados de incrustação. Em tratamento de efluentes, observou-se que, picos na concentração de sólidos suspensos totais (SST) na alimentação da MF, provocado por diversos problemas no tratamento preliminares, potencializam a incrustação nas membranas.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um dispositivo, de baixo custo, com potencial para proteger as membranas de microfiltração utilizadas em tratamento de efluentes, além de reduzir a necessidade de lavagens das mesmas para recuperação, que são onerosas e nem sempre mostram eficiência de recuperação de 100%. O dispositivo tem como função reconhecer um determinado pico na concentração de SST na corrente de alimentação do módulo de microfiltração e evitar que essa corrente seja levada ao mesmo. Para este fim foi projetado um dispositivo integrado de corpo em PVC, placa porosa interna e pressostato diferencial. Este dispositivo detecta picos na concentração de SST, devido ao diferencial de pressão dado entre a entrada e saída de sua placa porosa comparado ao diferencial de pressão do seu "set-point" e envia um comando elétrico para interromper a alimentação do sistema (intertravamento). Foram testadas diversas placas porosas e entre elas a placa de plástico de 1 micron foi a mais adequada para o uso no dispositivo para intertravamento. Esta decisão se deu com auxílio das curvas de queda de pressão *versus* concentração de SST, no escoamento estacionário com vazão de 3 L/min conduzido em um modelo prévio do dispositivo para intertravamento construído. O dispositivo de intertravamento foi validado experimentalmente em escala de bancada e possui custo 19 vezes mais baixo que o turbidímetro/sensor de turbidez que seria usado para a mesma aplicação.

# ÍNDICE

<b>Capítulo I – INTRODUÇÃO</b> .....	1
I.1 – Motivação .....	1
I.2 – Objetivo geral .....	2
I.3 – Objetivos específicos .....	2
I.4 – Estrutura do trabalho .....	3
<b>Capítulo II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
II.1 – Processos de separação por membranas (PSM) .....	4
II.1.1 – Teoria dos Processos de Separação com Membranas .....	5
II.1.2 – Classificação das membranas .....	7
II.1.3 – Formas de operação nos PSM .....	9
II.1.4 – O Processo de Microfiltração .....	9
II.1.5 – Fenômenos que causam queda no fluxo de permeado na MF ...	11
II.2 – Turbidez e sólidos suspensos totais (SST) .....	13
II.2.1 – Turbidez .....	13
II.2.1.1 – Medidores de turbidez .....	14
II.2.1.1.1 – Nefelômetros .....	14
II.2.1.1.2 – Absorciômetros .....	15
II.2.2 – Sólidos Suspensos Totais .....	16
II.2.3 – Relação entre Concentração de SST e turbidez .....	16
II.3 – Leveduras .....	17
II.4 – Placas porosas .....	18
II.5 – Perda de carga .....	19
II.5.1 – Tipos de perda de carga .....	19
II.5.2 – Perda de carga em meios porosos .....	19
II.6 – Pressostatos .....	20
II.6.1 – Medida de pressão única .....	21
II.6.2 – Diferencial fixo ou ajustável .....	21
<b>Capítulo III – MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	23
III.1 – Montagem do modelo prévio .....	23
III.1.1 – Materiais .....	23
III.1.2 – Procedimento .....	24



III.2 – O sistema de bancada utilizado no teste das placas porosas .....	25
III.3 – Procedimento do teste de levantamento de curvas de queda de pressão <i>versus</i> concentração de SST para as diferentes placas porosas utilizando <i>Saccharomyces cerevisiae</i> seca como sólido de teste .....	26
III.4 – Montagem do dispositivo para intertravamento .....	27
III.5 – Procedimento para validação experimental do funcionamento do dispositivo para intertravamento construído .....	27
III.5.1 – Sistema de bancada utilizado para calibração do pressostato diferencial e validação do dispositivo para intertravamento .....	27
III.5.2 – Calibração do pressostato diferencial .....	28
III.5.3 – Validação do dispositivo para intertravamento .....	29
III.6 – Procedimento para obtenção da curva de calibração da concentração de SST em função da turbidez de cada suspensão e estudo de retenção das placas poliméricas usando <i>Saccharomyces cerevisiae</i> seca como sólido de teste .....	29
III.7 – Procedimento para estimativa dos parâmetros c e k da equação de perda de carga em meios porosos das placas porosas poliméricas .....	30
<b>Capítulo IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>31</b>
IV.1 – Modelo prévio do dispositivo (MPD) .....	31
IV.2 – Curvas de queda de pressão <i>versus</i> concentração de SST para as diferentes placas porosas .....	31
IV.3 – Montagem do dispositivo para intertravamento .....	34
IV.4 – Validação do dispositivo para intertravamento .....	35
IV.5 – Curva de calibração da concentração de SST em função da turbidez de cada suspensão e retenção das placas poliméricas usando <i>Saccharomyces cerevisiae</i> seca como sólido de teste .....	36
IV.6 – Estimativa dos parâmetros c e k da equação de perda de carga de meios porosos nas placas poliméricas .....	39
<b>Capítulo V – ESTIMATIVA DE CUSTO ECÔNOMICO DO DISPOSITIVO .....</b>	<b>41</b>
V.1 – Custo total do dispositivo construído .....	41
V.2 – Comparação econômica entre o custo final do dispositivo para intertravamento e do conjunto turbidímetro/sensor de turbidez usado para a mesma aplicação .....	42

<b>Capítulo VI – CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>43</b>
VI.1– Conclusões .....	43
VI.2 – Sugestões .....	44
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>45</b>
<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>48</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Esquema representando o processo de separação por membranas: força motriz e transporte em membranas densas e porosas .....	4
<b>Figura 2.2.</b> Comparação entre a região de separação dos principais PSM e processos clássicos de separação .....	7
<b>Figura 2.3.</b> Representação esquemática da morfologia das membranas.....	8
<b>Figura 2.4.</b> Comparação entre a filtração convencional (“dead - end”) e filtração tangencial (“cross - flow filtration”) .....	9
<b>Figura 2.5.</b> Processo de microfiltração .....	10
<b>Figura 2.6.</b> (a) Seção transversal do módulo de permeação; (b) Fibras dispostas longitudinalmente no interior da carcaça de PVC – resina epóxi nas extremidades do módulo .....	10
<b>Figura 2.7.</b> Fenômeno da Polarização da Concentração .....	11
<b>Figura 2.8.</b> Queda de fluxo permeado com o tempo de operação. Fenômenos de polarização de concentração e formação de incrustações (“fouling”) .....	13
<b>Figura 2.9.</b> Luz dispersa por partículas suspensas .....	14
<b>Figura 2.10.</b> Princípio de funcionamento do nefelômetro .....	15
<b>Figura 2.11.</b> Princípio de funcionamento do absorciometro .....	15
<b>Figura 2.12.</b> Relação obtida em experimento com água de rio em dia de chuva entre SS e turbidez .....	17
<b>Figura 2.13.</b> Micrografia de uma placa porosa de plástico .....	18
<b>Figura 2.14.</b> Pressostato simples .....	21
<b>Figura 2.15.</b> Pressostato diferencial .....	22
<b>Figura 2.16.</b> Contato elétrico num pressostato .....	22
<b>Figura 3.1.</b> Materiais em PVC soldável para construção do dispositivo de testes. (a) União; (b) “Tê”; (c) Bucha de redução .....	25
<b>Figura 3.2.</b> Conexão de engate rápido .....	25
<b>Figura 3.3.</b> Sistema utilizado nos teste das placas com o modelo prévio .....	25
<b>Figura 3.4.</b> Fluxograma do sistema de bancada utilizado nos testes das placas com o modelo prévio .....	26
<b>Figura 3.5.</b> Tipos de placas porosas testadas no dispositivo de testes: (a) Placa porosa poliméricas e (b) Placa de metal sinterizado .....	27
<b>Figura 3.6.</b> Sistema utilizado para calibração do pressostato e para os testes de	

validação do dispositivo de intertravamento .....	28
<b>Figura 3.7.</b> Interior do pressostato e ligação elétrica feita com a lâmpada incandescente: 1 – Rosca de ajuste do “set-point”; 2 – Ligação elétrica do circuito interno do pressostato; 3 – Lâmpada incandescente .....	29
<b>Figura 3.8.</b> Turbidímetro utilizado .....	30
<b>Figura 4.1.</b> MPD: 1 – Manômetros de 0 a 2 Bar, 2 – Corpo de PVC .....	31
<b>Figura 4.2.</b> Interior do MPD com e sem placa porosa respectivamente .....	31
<b>Figura 4.3.</b> Curvas de queda de pressão através das placas em função das concentrações de SST .....	33
<b>Figura 4.4.</b> Imagem das placas após o termino dos testes. a) 1 $\mu\text{m}$ , b) 15 $\mu\text{m}$ e c) 20 $\mu\text{m}$ .....	33
<b>Figura 4.5.</b> Comparação entre as perdas de carga do escoamento através da placa polimérica ( $d_{\text{poro}} = 1 \mu\text{m}$ ) e da placa de metal sinterizado .....	34
<b>Figura 4.6.</b> Placa de metal sinterizado após os testes .....	34
<b>Figura 4.7.</b> Dispositivo para intertravamento: 1 – Manômetros de 0 a 2,5 bar; 2 – Pressostato diferencial com ajuste de “set-point” até 2 bar; 3 – Corpo do dispositivo .....	35
<b>Figura 4.8.</b> Funcionamento do pressostato no escoamento da suspensão de 5000 mg/L .....	36
<b>Figura 4.9.</b> Gráfico de retenção de turbidez para as placas porosas poliméricas ....	38
<b>Figura 4.10.</b> Curva de calibração para determinar SST em função da turbidez .....	39
<b>Figura 4.11.</b> Ajuste das retas aos pontos manipulados .....	40
<b>Figura A.1.</b> Esquema de funcionamento do dispositivo num processo de microfiltração clássica .....	47

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 2.1:</b> Principais processos de separação com membranas .....	5
<b>Tabela 4.1:</b> Quedas de pressão em função da concentração de SST .....	32
<b>Tabela 4.2:</b> Resultados dos testes de validação do funcionamento do dispositivo para intertravamento .....	36
<b>Tabela 4.3:</b> Turbidez versus concentração de SST antes e após as placas porosas poliméricas .....	37
<b>Tabela 4.4:</b> Retenções de turbidez média para as placas poliméricas .....	38
<b>Tabela 4.5:</b> Perda de carga em função da vazão para escoamento do fluído através das placas porosas poliméricas .....	39
<b>Tabela 4.6:</b> Dados das placas. Porosidade média e dimensões .....	40
<b>Tabela 4.7:</b> Resultado dos ajustes .....	40
<b>Tabela 5.1:</b> Custo total de construção do dispositivo para intertravamento .....	41
<b>Tabela 5.2:</b> Tabela comparativa de custos .....	42

# **CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO**

## **I.1 – Motivação**

A tecnologia de separação por membranas tem se desenvolvido muito nos últimos anos, pois apresenta características únicas em relação aos processos industriais convencionais de separação (destilação, centrifugação, extração com solventes, etc.). Alguns exemplos destas particularidades são os fatos de não necessitarem de mudança de fases para efetuar a separação, contribuindo assim, com a economia de energia; não necessitarem da adição de produtos químicos durante a separação; possibilitarem o processamento de substâncias termolábeis, pois podem operar a temperatura ambiente; apresentarem maior seletividade; facilidade de ampliação de escala, pois são modulares e não extensivos em mão de obra (podem operar durante anos com o mínimo de manutenção), entre outros. Devido a estas características os processos com membranas são considerados uma tecnologia limpa que cada vez mais está ganhando aplicabilidade nos diferentes setores industriais, para as operações de separação, purificação ou concentração.

Esta tecnologia apresenta-se adequada para certas aplicações específicas onde os métodos convencionais de separação mostram-se ineficientes, gerando grande quantidade de efluentes e/ou custo operacional elevado. Além das inerentes vantagens destes processos, o aumento da rigidez imposta pelas regulamentações ambientais nas últimas décadas também contribuiu decisivamente para o crescente emprego da tecnologia de separação por membranas. O aspecto econômico foi outro fator adicional, uma vez que a utilização de membranas possibilita redução dos desperdícios e aumento nas oportunidades de recuperação e reciclagem de substâncias (ATKINSON, 2002).

Os processos de separação por membranas (PSM) encontram-se limitados pelos fenômenos conhecidos como polarização por concentração e incrustação. A polarização por concentração se caracteriza pela formação de uma camada limite de solução concentrada adjacente à superfície da membrana se comparada com a concentração do meio da solução. A incrustação caracteriza-se pela deposição, adsorção e/ou acúmulo de

partículas coloidais suspensas sobre a superfície ou interior dos poros da membrana, incluindo interação química entre os solutos e membrana. Ao contrário da polarização por concentração, a incrustação é geralmente de natureza irreversível. Esses fenômenos causam declínio no fluxo de permeado podendo modificar as características de retenção da membrana.

Em tratamento de efluentes que utilizam microfiltração, como técnica de polimento, são observados picos de concentração de sólidos suspensos totais na alimentação, devido a diversos problemas nos tratamentos preliminares, que levam as membranas dos módulos uma quantidade de sólidos suspensos não suportável para tratamento, provocando incrustações, que podem ser de caráter irreversível. A recuperação das membranas atualmente é feita através de sucessivas lavagens físico-química, que custam tempo, geram uma grande quantidade de material para ser tratado e não são totalmente eficientes.

## **I.2 – Objetivo Geral**

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo de intertravamento, de baixo custo, que tem potencial em proteger as membranas de microfiltração de incrustações causada pelos picos de concentração de sólidos suspensos totais na corrente de alimentação.

## **I.3 – Objetivos específicos**

- i. Obtenção da curvas de calibração relacionando a queda de pressão com a concentração de sólidos suspensos totais (SST) para seleção da placa porosa mais adequada;
- ii. Projetar e montar o dispositivo para intertravamento de fluxo;
- iii. Validação experimental do dispositivo de intertravamento;
- iv. Levantamento da curva de calibração de SST *versus* turbidez;
- v. Estudo de capacidade de retenção e permeabilidade das placas porosas poliméricas;
- vi. Estimativa de custo econômico do dispositivo.

## **I.4 – Estrutura do trabalho presente**

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica dos processos de separação com membranas (PSM), com ênfase para a microfiltração e a problemática do fenômeno de incrustação. São abordados também a turbidez e sua relação com sólidos suspensos totais, a teoria da perda de carga em sistemas diversos, especificamente para os meios porosos, uma breve descrição de leveduras e sua aplicação como sólido suspenso gerador de turbidez, definição de pressostatos segundo tipos e formas de operação, focando nos pressostatos tipo diferencial e suas aplicações. No capítulo 3 é feito um detalhamento dos materiais e métodos utilizados, bem como a metodologia experimental adotada durante os ensaios do sistema como o todo. No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais e suas discussões. O capítulo 5 mostra o levantamento econômico dos materiais usados, custo final de construção e comparativo entre o custo final de construção do dispositivo para intertravamento e o custo do conjunto turbidímetro/sensor de turbidez usado para a mesma aplicação. Finalmente no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as sugestões para futuros trabalhos.

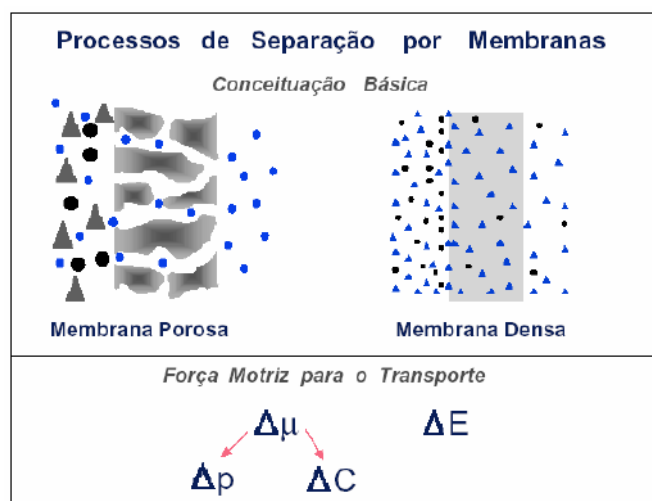


## CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### II.1 – Processos de Separação com Membranas (PSM)

Os PSM são um método alternativo e industrialmente adotado para os processos de separação sólido-líquido, líquido-líquido, líquido-gás e gás-gás (RÄDER, 2003).

Todos os PSM são caracterizados pelo uso de uma membrana para se efetuar a separação. Uma membrana pode ser definida com uma barreira seletiva que separa duas fases e restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nestas fases. Uma representação esquemática de um PSM é apresentada na figura 2.1.



**Figura 2.1.** Esquema representando o processo de separação por membranas: força motriz.

Fonte: NOBREGA *et al.*, 2003.

Os PSM são geralmente diferenciados pela força motriz utilizada no transporte dos componentes através da membrana. As forças motrizes podem ser separadas em dois grupos: diferença de potencial químico, que compreende a diferença de pressão, concentração e/ou temperatura; e diferença de potencial elétrico (BERTOLDO, 2005). A tabela 2.1 apresenta os principais PSM, com suas respectivas forças motrizes, o mecanismo básico de separação das espécies envolvidas e algumas de suas aplicações.

**Tabela 2.1:** Principais processos de separação com membranas.

Processo	Força Motriz	Mecanismo de separação	Aplicação
Microfiltração (MF)	Pressão (0,5 – 2 atm)	Retenção por tamanho	Esterilização bacteriana, clarificação de vinhos e cervejas;
Ultrafiltração (UF)	Pressão (1 – 7 atm)	Retenção por tamanho	Recuperação de pigmentos e óleo, concentração de proteínas;
Nanofiltração (NF)	Pressão (5 – 25 atm)	Retenção por tamanho	Purificação de enzimas;
Osmose inversa (OI)	Pressão (15 – 80 atm)	Retenção por tamanho	Dessalinização de água, concentração de sucos de fruta;
Diálise	Concentração	Retenção por tamanho	Hemodiálise – rim artificial, recuperação de NaOH;
Eletrodíálise	Gradiente do potencial elétrico	Exclusão pela membrana	Concentração de soluções salinas, purificação de água;
Pervaporação	Concentração	Solução / difusão	Desidratação de álcoois, eliminação de VOC da água;
Permeação de gás	Concentração	Solução / difusão	Recuperação de H <sub>2</sub> , separação CO <sub>2</sub> / CH <sub>4</sub> ;

Fonte: CARVALHO, 2005

### II.1.1 – Teoria dos Processos de Separação com Membranas (PSM)

As propriedades de transporte das membranas são de fundamental importância para o destino de sua utilização. Essas propriedades compreendem o fluxo de permeado e a seletividade da membrana a um determinado componente presente na solução de alimentação.

Nos processos que utilizam a diferença de pressão como força motriz (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa), o fluxo permeado ( $J_P$ ) é diretamente proporcional a diferença de pressão efetiva ( $\Delta P - \Delta \pi$ ), conforme apresentado na Equação 2.1.

$$Jp = P_H (\Delta P - \Delta \pi) \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde:

$P_H$  – permeabilidade hidráulica

$\Delta P$  – diferença de pressão aplicada entre os dois lados da membrana

$\Delta \pi$  – diferença de pressão osmótica entre os dois lados da membrana

No caso da microfiltração e ultrafiltração, a diferença de pressão osmótica entre os dois lados da membrana é muito baixa e pode ser negligenciada.

A capacidade seletiva da membrana nos processos pode ser calculada através do coeficiente de rejeição  $R$ , definido como a fração de soluto retida pela membrana, para uma dada concentração de alimentação (eq. 2.2):

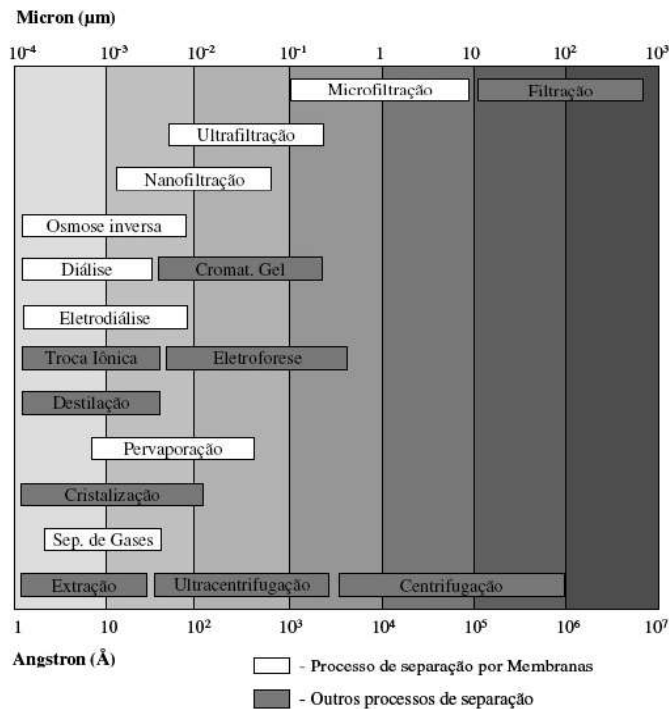
$$R(\%) = \left[ \frac{C_a - C_p}{C_a} \right] \times 100 \quad (\text{Eq. 2.2})$$

onde:

$C_a$  – concentração de soluto na alimentação

$C_p$  – concentração de soluto no permeado

Na Figura 2.2 são apresentadas as faixas de atuação dos PSM, bem como de alguns processos clássicos de separação. Na prática, a utilização de processos híbridos de separação, utilização sequencial de processos com membranas e processos clássicos de separação, tem se mostrado mais eficiente do que a utilização isolada de um desses processos.



**Figura 2.2.** Comparação entre a região de separação dos principais PSM e processos clássicos de separação. Fonte: NOBREGA *et al*, 2005.

### II.1.2. Classificação das membranas

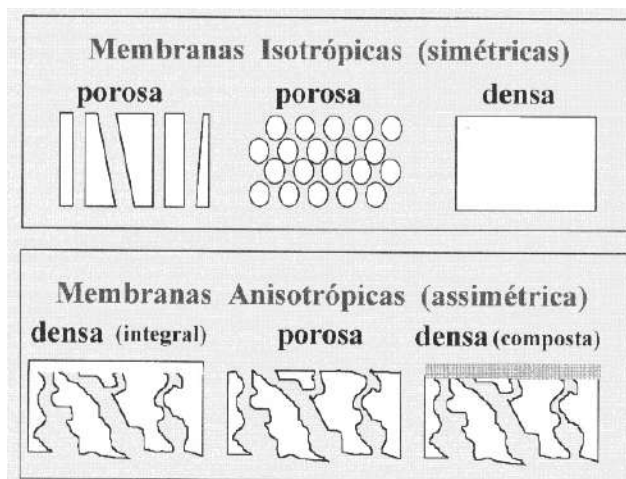
De acordo com a ESMST (European Society of Membrane Science and Technology) as membranas classificam-se em:

As membranas de primeira geração eram membranas isotrópicas ou simétricas com poros regulares, quase cilíndricos, que atravessavam toda a espessura da membrana. Este tipo de membrana possuía varias limitações devido à pressão. São pouco utilizadas em aplicações industriais, pois as perdas de carga são consideráveis. Essas membranas são sensíveis aos ataques de microrganismos. Dos principais inconvenientes são um fraco fluxo do permeado ligado às fortes perdas de carga devido à grande espessura e de uma duração de vida relativamente curta, devido a sua sensibilidade à hidrólise e aos ataques bacterianos (LACOSTE, 1992).

As membranas assimétricas ou anisotrópicas da segunda geração são caracterizadas por um gradiente de porosidade interno onde uma fina película fica situada sobre uma superfície mais grossa. Estas membranas são

constituídas geralmente de um único tipo de polímero. Apresentam boas propriedades mecânicas e proporcionam um melhor fluxo de permeado, resistem bem aos ataques químicos e bacterianos, não suportando, porém, altas temperaturas e valores extremos de pH.

E finalmente, as membranas mais desenvolvidas são as de terceira geração, as membranas compostas. Nesses sistemas, a membrana filtrante é depositada na forma de um filme fino sobre a estrutura de suporte, que geralmente é uma membrana assimétrica. Estas membranas são as mais utilizadas devido à redução do custo operacional que geram. São as mais recentes e que apresentam melhor desempenho como boa resistência aos agentes químicos ( $1 < \text{pH} < 14$ ), aos solventes, aos oxidantes, a fortes pressões e altas temperaturas.



**Figura 2.3.** Representação esquemática da morfologia das membranas. Fonte: HABERT *et al.*, 1997.

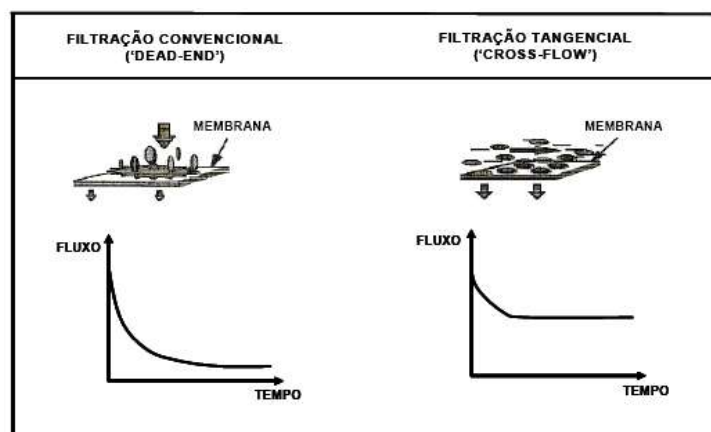
Com relação à geometria, as membranas podem ser planas ou cilíndricas. As primeiras membranas sintetizadas eram planas, porém os módulos de permeação com este tipo de membrana, para algumas aplicações, apresentam custos elevados ou não atendem de forma suficiente alguns requisitos técnicos. As membranas do tipo tubular apresentam facilidades para controle da hidrodinâmica, podendo processar suspensões com elevado teor de sólidos. No caso das fibras ocas, as principais vantagens são: maior relação entre área de membrana e volume do equipamento e por ser auto-sustentável, possibilita trabalhar sob pressão sem a necessidade de suporte adicional (BERTOLDO, 2005).

### II.1.3 – Formas de operação nos PSM

Uma das principais características dos PSM é que eles podem ser operados de duas formas: modo de filtração convencional (“dead-end filtration”) ou em filtração tangencial (“cross-flow filtration”)(SCHULZ, 2005).

No modo “dead-end”, uma suspensão é pressionada contra a membrana. Da mesma maneira que na filtração clássica, ocorre a formação de uma torta. Trata-se de um modo de operação fundamentalmente transiente, uma vez que a torta aumenta com o tempo de filtração, havendo grande variação no fluxo de permeado com o tempo.

Na filtração tangencial, a solução escoia paralelamente à superfície da membrana enquanto o permeado é transportado transversalmente à mesma. A formação de torta continua presente, mas neste caso, é possível minimizar o seu efeito, em particular, alterando a hidrodinâmica de escoamento da corrente de alimentação. O escoamento tangencial arrasta partículas em suspensão, diminuindo o tamanho da torta formada. Na Figura 2.4 são apresentados esquematicamente os dois modos de operação citados, bem como, para cada caso, as curvas típicas de fluxo permeado em função do tempo.

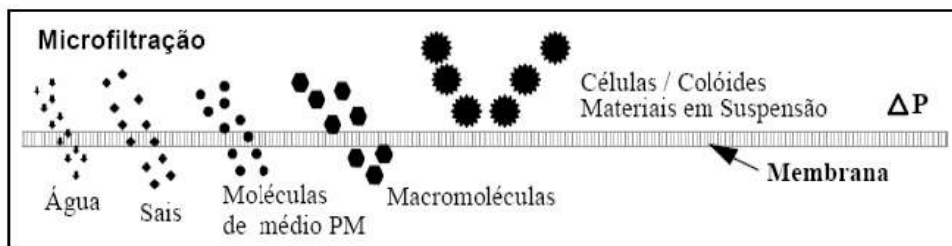


**Figura 2.4.** Comparação entre a filtração convencional (“dead - end”) e filtração tangencial (“cross - flow filtration”). Fonte: NOBREGA *et al*, 2003.

### II. 1. 4 – O Processo de Microfiltração

O processo de microfiltração é utilizado para a retenção de sólidos em suspensão, bactérias e moléculas com massa molar média superior a 500.000

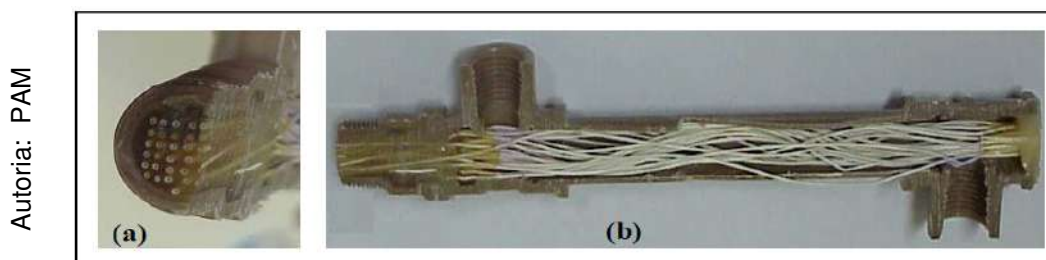
Dalton, tamanho equivalente a 0,1 $\mu$ m, e permite a passagem de água e sólidos dissolvidos. A força motriz na microfiltração é o gradiente de pressão e o diâmetro de poro na região seletiva da membrana varia de 0,1 a 1  $\mu$ m (Figura 2.5) (MULDER, 1996, HABERT *et al*, 2003).



**Figura 2.5.** Processo de microfiltração. Fonte: HABERT *et al*, 2003).

A microfiltração é utilizada em vários setores da indústria. Na indústria alimentícia é utilizada para a clarificação e esterilização a frio de sucos, vinhos e cerveja. Na indústria farmacêutica para a concentração e esterilização de fármacos. Este processo é também utilizado para a purificação de água, tratamento de efluente, fermentação contínua, separação de emulsões água e óleo, tecnologia biomédica entre outros campos da biotecnologia (CHERYAN, 1998, MULDER, 1996).

Um módulo de membrana que utiliza membranas de MF do tipo fibra oca é semelhante a um trocador de calor tipo casco e tubo. As fibras ocas são posicionadas longitudinalmente em uma carcaça de PVC (Figura 2.6).



Autoria: PAM

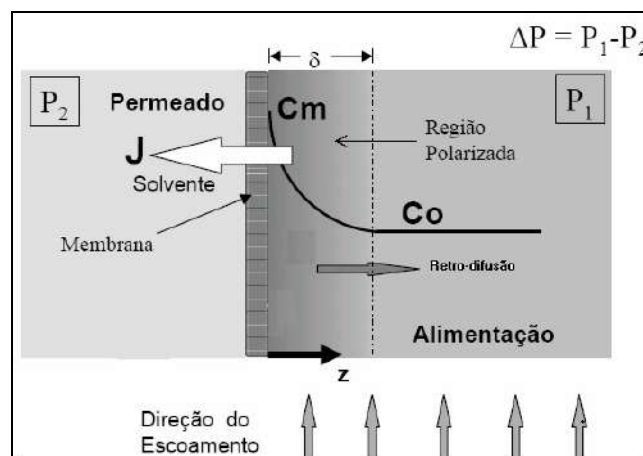
**Figura 2.6.** (a) Seção transversal do módulo de permeação; (b) Fibras dispostas longitudinalmente no interior da carcaça de PVC – resina epóxi nas extremidades do módulo.

As fibras são fixadas no interior da carcaça de PVC mediante utilização de uma resina epóxi comercial. A resina de vedação também serve como uma

barreira que separa a alimentação do permeado. A alimentação dos módulos pode ser realizada pelo interior da carcaça, sendo o permeado coletado no interior das fibras ocas em uma das extremidades do módulo de microfiltração.

### II.1.5 – Fenômenos que causam queda no fluxo de permeado na MF

Quando se processa uma suspensão utilizando membranas de MF, independente de a operação ser do tipo “dead - end” ou tangencial, haverá um aumento da concentração do soluto na região próxima à superfície da membrana, uma vez que a membrana é supostamente seletiva ao soluto (SCHULZ, 2005). Devido ao acúmulo de sólidos na região próxima à superfície da membrana, há a formação de um perfil de concentração entre o seio da solução e a superfície da membrana. Dessa forma, ocorre a retrodifusão deste soluto em direção ao seio da suspensão. Este fenômeno é conhecido como polarização da concentração, e está apresentado esquematicamente na Figura 2.7.



**Figura 2.7.** Fenômeno da Polarização da Concentração. Fonte: NETA, 2005.

A polarização de concentração pode ser fortemente afetada pelas condições de escoamento da solução sobre a superfície da membrana. À medida que se aumenta a velocidade tangencial (aumento do número de Reynolds) da solução sobre a superfície da membrana, a espessura ( $\delta$ ) da região polarizada diminui, reduzindo a resistência ao transporte e aumentando o fluxo permeado (NETA, 2005).



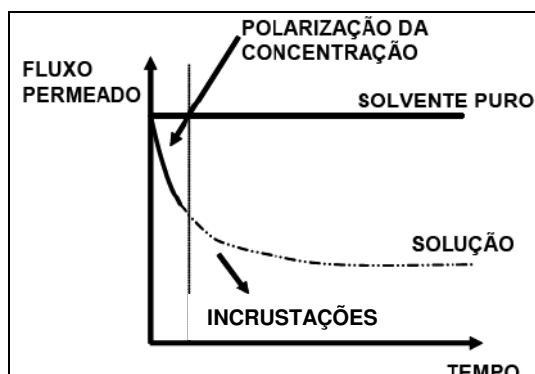
Na filtração tangencial o fenômeno da polarização de concentração se estabelece rapidamente, provocando uma queda inicial acentuada de fluxo permeado. Porém, na maioria dos casos, o que se observa é um decréscimo contínuo de fluxo com o tempo de operação, indicando que outros fenômenos, em adição à inevitável polarização da concentração, estão presentes. Dentre estes fenômenos, destacam-se (RÄDER, 2003):

- adsorção de moléculas de soluto na superfície da membrana e/ou interior de seus poros: as interações físico-químicas entre o soluto e a membrana tornam pouco importantes os efeitos da transferência de massa associados à retrodifusão ou ao arraste promovido pela hidrodinâmica do escoamento;
- entupimento dos poros por moléculas ou partículas em suspensão: trata-se da ação mecânica de bloqueio de poros, que pode ocorrer tanto na superfície da membrana como no seu interior, dependendo da morfologia da membrana;
- depósito de material em suspensão sobre a superfície da membrana com formação de uma espécie de torta: no caso de soluções de macromoléculas, pode-se atingir uma concentração próxima à superfície da membrana suficientemente elevada, de modo a ocorrer gelificação do soluto nesta região.

A todos esses fenômenos dão-se o nome de incrustações (“fouling”). Embora de difícil tradução para o português, “fouling” pode ser entendido como o conjunto de fenômenos capaz de provocar uma queda no fluxo de permeado, quando se trabalha com uma suspensão (SCHULZ *et al*, 2005). A extensão deste fenômeno depende da natureza da solução problema, do tipo de membrana, mas, principalmente das condições de operação do sistema.

A polarização de concentração é um fenômeno totalmente reversível, pois uma vez finalizada a operação de microfiltração e, em seguida, iniciada a limpeza da membrana, observa-se a recuperação da permeabilidade ao solvente puro, já as incrustações são fenômenos que podem ser irreversíveis (LAPOLLI *et al.*, 1999).

A Figura 2.8 mostra a queda no fluxo de permeado causada pelos fenômenos de incrustação e polarização da concentração.



**Figura 2.8.** Queda de fluxo permeado com o tempo de operação. Fenômenos de polarização de concentração e formação de incrustações (“fouling”). Fonte: SCHULZ *et al*, 2005.

Diversas limpeza periódica da membrana para tentativa de restauração do fluxo inicial de alimentação, têm sido utilizadas devido as incrustações, porém são técnicas de difícil realização, demoradas e não são totalmente eficientes.

## II.2 – Turbidez e Sólidos Suspensos Totais (SST)

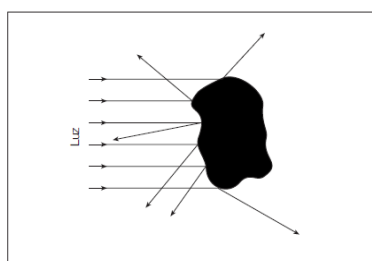
### II.2.1 – Turbidez

A turbidez é uma característica física da água, decorrente da presença de substâncias em suspensão, ou seja, sólidos suspensos, finamente divididos ou em estado coloidal, e de organismos microscópicos que provoca redução de transparência.

O tamanho das partículas em suspensão varia desde grosseiro ao colóide, dependendo do grau de turbulência. A presença destas partículas provoca a dispersão e a absorção da luz, deixando a água com aparência nebulosa, esteticamente indesejável e potencialmente perigosa (Figura 2.9). Atualmente não se utiliza a unidade de turbidez em mg/L de sílica, como uma relação entre a turbidez e o peso da matéria em suspensão, pois, quanto mais subdividida uma quantidade de determinada substância maior será a turbidez. A determinação da turbidez é fundamentada no método de Jackson, que

determina qual a profundidade que pode ser vista a imagem, chamada de “imagem de vela”, através da água colocada em um tubo de vidro. Este valor é limitado entre 25 e 1000 Unidades Jackson de Turbidez (UJT ou JTU na abreviação em inglês). Uma turbidez de 1000 UJT equivale a uma profundidade de apenas 2,3 cm e à profundidade de 72,9 cm é equivalente a uma turbidez de 25 UJT.

Os equipamentos mais utilizados para medir a turbidez são os nefelômetros. Estes aparelhos medem, numa célula fotoelétrica, a quantidade de luz dispersa através da amostra de água, a 90° da luz incidente. A escala de medição é calibrada com padrões conhecidos, geralmente preparados com solução de formazina, e permite medir valores tão baixos como 0,1 UJT, com uma precisão de  $\pm 10\%$ . Não há, entretanto, uma relação direta entre a quantidade de luz dispersa a 90° UJT e a que, como no tubo de Jackson, atravessa diretamente a amostra. Desse modo, não faz sentido calibrar-se os nefelômetros em unidades Jackson e é preferível, neste caso, a denominação de Unidades Nefelométricas de Turbidez - UNT (ou NTU em Inglês) (CATALOGO DE TURBIDÍMETROS DA ABB, 2009).



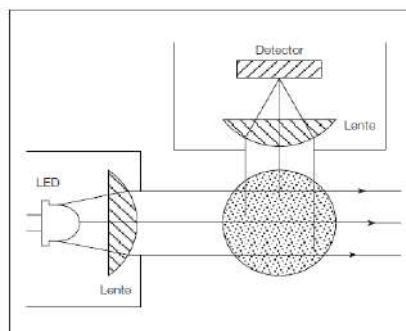
**Figura 2.9.** Luz dispersa por partículas suspensas. Fonte: CATALOGO DE TURBIDÍMETROS DA ABB, 2009.

## II.2.1.1 – Medidores de turbidez

### II.2.1.1.1 – Nefelômetros

Este tipo de medidor de turvação detecta luz dispersa pelas partículas suspensas na amostra. O design óptico mais utilizado para os medidores de turvação de luz dispersa é o nefelômetro de 90° (Figura 2.10). Não deverá confundir-se com instrumentos que têm por base a dispersão frontal ou

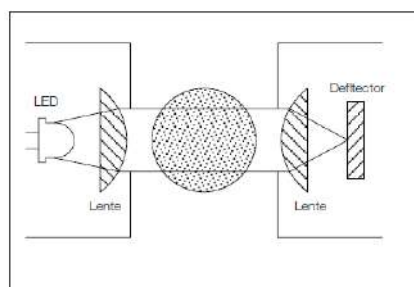
posterior da luz. Os nefelômetros permitem evitar vários problemas, como a cor e a falta de sensibilidade (CATALOGO DE TURBIDÍMETROS DA ABB, 2009).



**Figura 2.10.** Princípio de funcionamento do nefelômetro. Fonte: CATALOGO DE TURBIDÍMETROS DA ABB, 2009.

#### II.2.1.1.2 – Absorciômetros

Provavelmente, é o método mais simples de medição da turvação. Um feixe de luz é transmitido através da amostra, cuja intensidades são medidas por um fotodetector em linha com a fonte de luz (Figura 2.11). As medições efetuadas com absorciômetros podem ser afetadas pela presença de cor dissolvida. No entanto, tais efeitos podem ser minimizados realizando a medição a um comprimento de onda de 880 nm, na região do infravermelho. O sistema poderá ainda relevar-se insensível à turvação, pois as alterações na turvação a níveis baixos apenas se refletem numa alteração muito pequena dos resultados do detector, sendo esta uma situação difícil de contornar. Apesar disso, a níveis médios e altos de turvação, este problema não costuma colocar-se, pelo que esta técnica constitui um método confiável para diversas aplicações.



**Figura 2.11.** Princípio de funcionamento do absorciômetro. FONTE: CATALOGO DE TURBIDÍMETROS DA ABB, 2009.

## II.2.2 – Sólidos Suspensos Totais (SST)

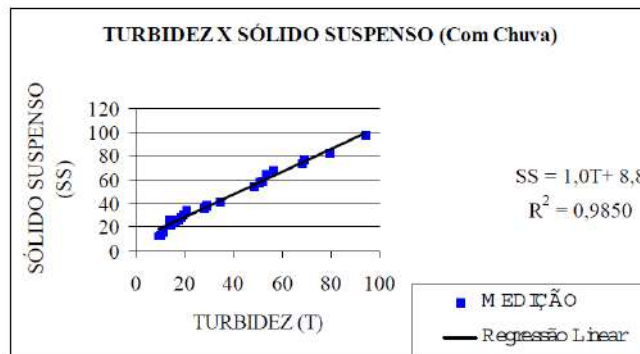
Os SST englobam partículas filtrantes, sobrenadantes e sedimentáveis que podem ser separadas através de filtração em condições definidas por normas padronizadas. São insolúveis em água e representam a parcela de sólidos grosseiros, com partículas de diâmetro maior ou igual a 1  $\mu\text{m}$ , geralmente responsáveis por uma visível turbidez dependendo da concentração. A parcela de sólidos suspensos voláteis se perde após a calcinação a 600°C, restando os sólidos fixos.

O parâmetro “SST” apesar de não aparecer na legislação brasileira, é utilizado em muitos países para o controle da qualidade do efluente descartado.

## II.2.3 – Relação entre Concentração de SST e turbidez

A turbidez representa uma propriedade ótica que mede como a água dispersa a luz. Esta dispersão aumenta com a quantidade de material particulado em suspensão; logo, a turbidez aumenta com a carga de sedimento suspenso. Muitos autores avaliaram o nível de correlação existente entre turbidez e concentração de sólidos suspensos, já que os limites estabelecidos pela Portaria nº 36 do Ministério da Saúde, quanto aos sólidos em suspensão, são feitos através dos valores da turbidez, e a análise deste parâmetro é feita de forma rotineira nas estações de tratamento de água (ETA)(SENHORELO, 2000).

Portanto, o monitoramento da turbidez mostra-se como alternativa interessante, pois sua determinação é muito mais rápida e prática do que a dos sólidos em suspensão. Através de uma curva de calibração da turbidez *versus* concentração de SST pode-se obter a concentração de SST em qualquer faixa de turbidez medida (DA CRUZ, 2005). A figura 2.12 mostra uma dessas curvas nas condições do experimento.



**Figura 2.12.** Relação obtida em experimento com água de rio em dia de chuva entre SST e turbidez. Fonte: DA CRUZ, 2005.

### II.3 – Leveduras

As leveduras constituem um grupo de microrganismos unicelulares, que se reproduzem assexuadamente por brotamento ou por cissiparidade e que desenvolvem a fermentação alcoólica. O conceito de levedura é uma forma primitiva de fungo. São largamente encontradas na natureza: são comuns no solo, nas superfícies de órgãos dos vegetais, principalmente em flores e frutos, no trato intestinal de animais, em líquidos açucarados e etc.(ALTERTHUM & TRABULSI, 2006).

As leveduras *Saccharomyces cerevisiae* e outras leveduras comuns apresentam forma oval ou cilíndrica. Outras formas encontradas no grupo são: apiculada ou em forma de limão, esférica (*Torulopsis*) elíticas, elipsóides ou filamentosas (pseudo-micelio constituído por células unidas entre si). As células vegetativas da maioria das leveduras industriais variam em tamanho, de 4 a 8 micrômetros de largura por 7 a 12 micrômetros de comprimento, havendo, evidentemente, espécies maiores e espécies menores que as citadas. Forma e tamanho das células, mesmo em espécies monomorfas, podem variar de acordo com o nutriente, as condições ambientais, o estado fisiológico ou a idade.

As leveduras apresentam os seguintes pontos de interesse (ALTERTHUM & TRABULSI, 2006):

- são utilizadas na panificação;

- são agentes de fermentação alcoólica, na produção do álcool industrial e de todas as bebidas alcoólicas destiladas ou não destiladas;
- são importantes fontes potenciais de proteína e de fatores de crescimento, passíveis de serem utilizadas na alimentação animal e humana;
- como agentes de fermentação são prejudiciais à conservação de frutos, e de sucos vegetais. Algumas espécies são patogênicas a plantas, animais e ao homem.
- conferem turbidez à água para estudo de eficiência de membranas de microfiltração.

#### II.4 – Placas Porosas

As placas porosas são meios que conferem resistência ao escoamento, e como conseqüência uma perda de carga (EGFILTROS LTDA., 2009). Elas podem ser fabricadas em variados materiais, como polietileno, polipropileno, metais etc. Placas porosas são utilizadas principalmente na sustentação de "leitos fluidizados", quando se deseja uma perda de carga no escoamento ou retenção de partículas (filtração).

As placas porosas de plástico (Figura 2.13) são obtidas através da técnica de moldagem específica, onde o processo controla o tempo, temperatura e pressão. Os grânulos do plástico poroso definem propriedades como porosidade, tamanho médio de poros (MPS) e capacidade de retenção. Valores típicos de poros situam na faixa de 1 a 100  $\mu\text{m}$ .



**Figura 2.13.** Micrografia de uma placa porosa de plástico. Fonte: EGFILTROS, 2009.

## II.5 – Perda de Carga

Quando um fluido escoar de um ponto ao outro no interior de um tubo ocorrerá sempre uma perda de energia, denominada perda de pressão (sistemas de ventilação ou exaustão) ou perda de carga (sistema de bombeamento de fluidos). Esta perda de energia se deve principalmente ao atrito do fluido com a camada estacionária aderida à parede interna do tubo. Em suma a perda de carga é a energia perdida pela unidade de peso do fluido quando este escoar (FOX & MCDONALD, 2005). A carga total diminui de acordo com Bernoulli, conforme a equação abaixo (FOX & MCDONALD, 2005):

$$z_a + \frac{p_a}{\gamma} + \alpha_a \frac{V_a^2}{2g} = z_b + \frac{p_b}{\gamma} + \alpha_b \frac{V_b^2}{2g} + \Delta h \quad (\text{Eq.2.3})$$

O termo  $\Delta h$  recebe a denominação de perda de carga.

### II.5.1 – Tipos de perda de carga

Podemos classificar as perdas de carga em duas formas: Perdas de carga distribuídas e perdas de cargas localizadas. A perda de carga total é a soma das duas.

A perda de carga distribuída se deve aos efeitos do atrito no escoamento completamente desenvolvido em tubos de seção constante, já a perda de carga localizada se deve ao fato dos vários acessórios que uma tubulação deve conter como: válvulas, registros, luvas, joelhos, “tês”, etc.

### II.5.2 – Perda de carga em meios porosos

Quando o fluido percola por um meio poroso ele encontra uma resistência ao escoamento devido à porosidade do meio, ou seja, quanto mais poroso, menor resistência ou maior permeabilidade enquanto que menor porosidade implica em maior resistência e menor permeabilidade.



A maioria dos problemas relativos ao escoamento de fluidos em meio porosos podem ser resolvidos a partir da equação do movimento (Eq. 2.4) e pela da equação da força resistiva de Forchheimer (Eq. 2.5) (MASSARANI, 1984).

$$0 = -\nabla p - m + \rho g \quad (\text{Eq.2.4})$$

$$m = \frac{\mu}{k} \left[ 1 + \frac{c\rho\sqrt{k}\|q\|}{\mu} \right] q \quad (\text{Eq.2.5})$$

onde:

$\nabla p$  é o gradiente de pressão,  $m$  é a força resistiva,  $\mu$  é a viscosidade do fluido,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $g$  é aceleração da gravidade,  $k$  é a permeabilidade do meio,  $c$  é um fator adimensional para o meio poroso e  $q$  é a velocidade superficial do fluido.

No escoamento unidimensional e incompressível as equações acima podem ser combinadas para estabelecer a equação de perda de carga no meio poroso (Eq. 2.6).

$$\frac{-\Delta p}{Lq} = \frac{\mu}{k} + \frac{c\rho q}{\sqrt{k}} \quad (\text{Eq.2.6})$$

Na equação 2.6,  $L$  é a espessura do meio poroso e  $-\Delta p$  é perda de carga expressa em queda de pressão. A equação 2.6 é expressa na forma de equação de uma reta, com  $\frac{\mu}{k}$  sendo o coeficiente linear e  $\frac{c\rho}{\sqrt{k}}$  como coeficiente angular. Portanto com pontos de  $\frac{-\Delta p}{Lq}$  versus  $q$  é possível obter os parâmetros  $c$  e  $k$  do meio poroso.

## II.6 – Pressostatos

Pressostato é um instrumento de medição de pressão utilizado como componente do sistema de proteção de equipamento ou processos industriais.

Sua função básica é de proteger a integridade de equipamentos contra sobrepressão ou subpressão aplicada aos mesmos durante o seu funcionamento. É constituído em geral por um sensor, um mecanismo de ajuste de “set-point” e uma chave de duas posições (aberto ou fechado). Como mecanismo de ajuste de “set-point” utiliza-se na maioria das aplicações uma mola com faixa de ajuste selecionada conforme pressão de trabalho e ajuste, e em oposição à pressão aplicada. Existem dois tipos de pressostatos:

#### II.6.1 – Medida de pressão única

São pressostatos que medem a pressão em somente um ponto no sistema e compara à pressão medida a pressão do seu “set-point” desarmando caso uma condição de superpressão ou subpressão é atingida, dependendo do tipo de proteção que se destina o pressostato (Figura 2.14).



**Figura 2.14.** Pressostato simples. Fonte: CATALOGO DA BIMETAL, 2010.

#### II.6.2 – Diferencial fixo ou ajustável

Os pressostatos diferenciais (Figura 2.15) são equipamentos de proteção que medem pressão em dois pontos simultaneamente, avaliando a diferença entre o lado de alta pressão e de baixa pressão e comparando com o “set-point” para arme ou desarme. Quanto ao intervalo entre atuação e desarme, os pressostatos podem ser fornecidos com diferencial fixo ou ajustável. O primeiro só oferece um ponto de ajuste, o de “set-point”, sendo fixo o intervalo entre os pontos de atuação e desarme. O segundo permite ajuste de

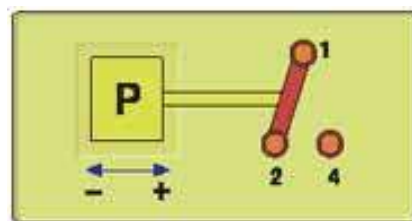
“set-point” e também alteração do intervalo entre o ponto de atuação e o de desarme (Figura 2.15)(SOISSON, 2002).



**Figura 2.15.** Pressostato diferencial. Fonte: CATALOGO DA ZÜRICH, 2009.

### II.6.3 – Funcionamento dos pressostato

Com o aumento da pressão, o pressostato se move no sentido de fechar o contato 1 com 4. Quando a pressão diminui a situação contrária ocorre. A função “ligar” ou “desligar” o equipamento controlado por este pressostato depende da aplicação para o qual está destinado o controlador de pressão e também em função da definição do circuito elétrico como um todo.



**Figura 2.16.** Contato elétrico num pressostato. Fonte: CATALOGO DA FLUID, 2009.

## CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo relata a procedência e a característica dos materiais utilizados, bem como descreve os procedimentos experimentais adotados neste trabalho. Os procedimentos descritos são referentes à construção do modelo prévio do dispositivo, aos ensaios neste modelo para obtenção da curvas de calibração de queda de pressão em função da concentração de sólidos suspensos totais (SST) para escolha da placa porosa a ser usada na operação do dispositivo, construção do dispositivo para intertravamento, teste de validação do seu funcionamento em bancada, obtenção da curva de calibração de turbidez em função da concentração de SST e por último estudo de capacidade de retenção e permeabilidade das placas porosas poliméricas.

### III.1 – Montagem do modelo prévio

O modelo prévio do dispositivo (MPD) é foi construído no intuito de testar as placas porosas e concluir a cerca da mais adequada a uso no dispositivo para intertravamento. No MPD foi possível obtenção das curvas de decaimento de pressão ( $-\Delta P$ ) *versus* concentração de SST das placas porosas testadas.

#### III.1.1 - Materiais

A montagem do MPD foi feita em laboratório utilizando os seguintes materiais:

- 1 União em PVC Soldável de 60 mm de diâmetro (Figura 3.1 (a));
- Buchas de redução em PVC soldável de 60x50, 50x40, 40x32, 32x25 e 25x20 mm (Figura 3.1 (c));
- 2 “Tês” em PVC de 25 mm (Figura 3.1 (b));
- 2 pedaços de canos de PVC de 25 mm;
- 2 Conexões de engate rápido para mangueiras de 10 mm (Figura 3.2);
- Buchas de redução de metal;
- 2 Manômetros de faixa de 0 a 2 bar ou 2 manômetros de 0 a 10 bar;

- Adesivo Plástico para PVC.



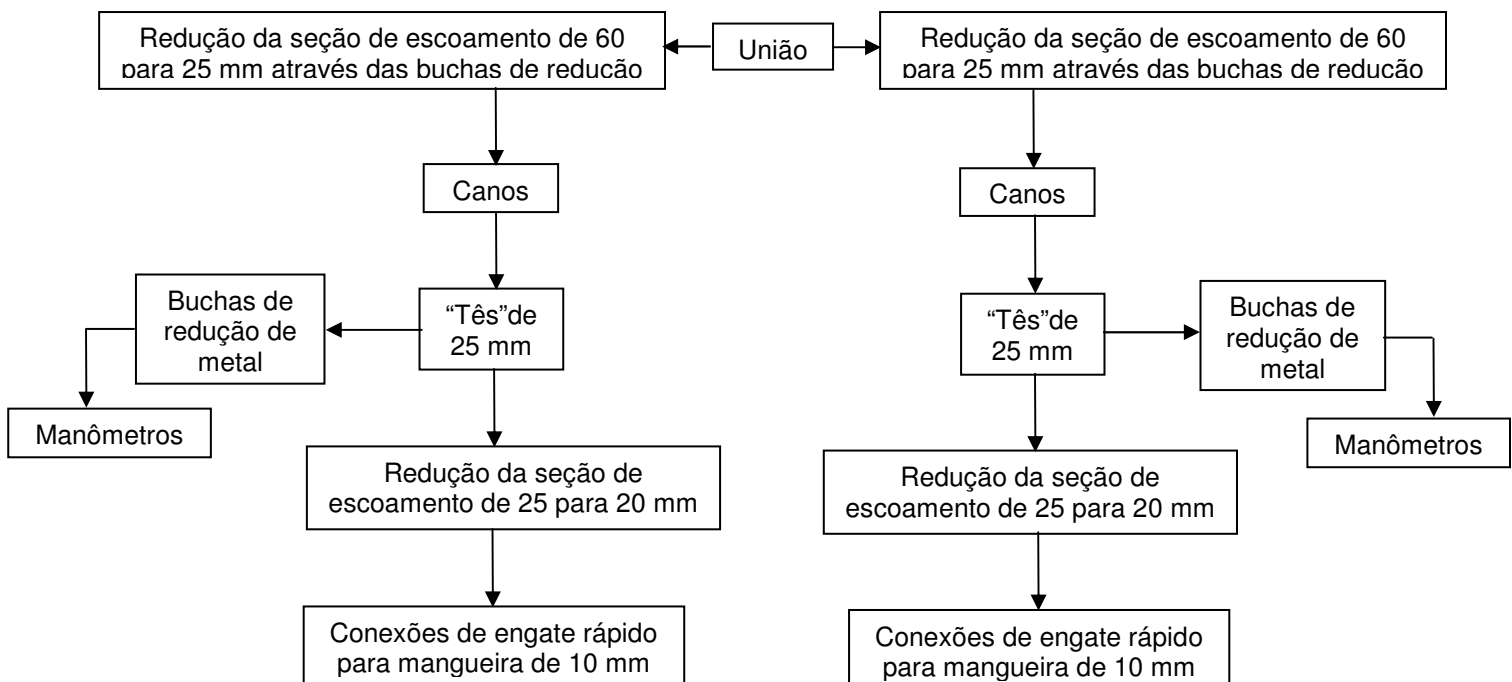
**Figura 3.1.** Materiais em PVC soldável para construção do dispositivo de testes. (a) União; (b) "Tê"; (c) Bucha de redução.



**Figura 3.2.** Conexão de engate rápido.

### III.1.2 – Procedimento

O modelo prévio foi construído conforme fluxograma abaixo:



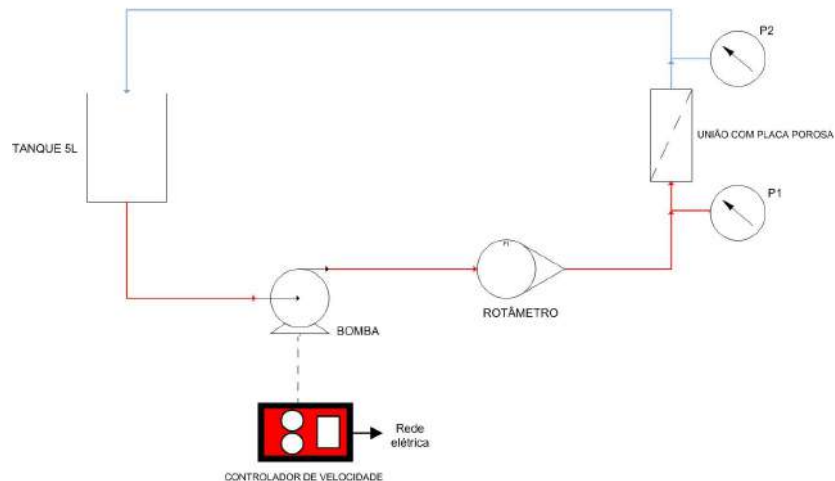
### III.2 – O sistema de bancada utilizado no teste das placas porosas

O MPD foi acoplado em um sistema de bancada contendo os seguintes itens (Figura 3.3):

- Tanque de aço inox de 5000 ml (1);
- Agitador mecânico 50/60 Hz, 72-2400/60-2000 RPM 15 V com pá retangular de 50 x 20 mm (2);
- Mangueiras de polipropileno de 10 mm de diâmetro para as interconexões (3);
- Bomba diafragma para vazão e pressão máxima de 2,0 Gal/min e 6,9 BAR (4);
- Controlador de velocidade do motor da bomba com 10 velocidades e potência de 108 W (5);
- Rotâmetro de faixa de 0 - 8,0 L/min (6);
- MPD (7).



**Figura 3.3.** Sistema utilizado nos teste das placas com o dispositivo de testes.



**Figura 3.4.** Fluxograma do sistema de bancada utilizado nos testes das placas com o dispositivo de testes.

### III.3 – Procedimento do teste de levantamento de curvas de queda de pressão *versus* concentração de SST para as diferentes placas porosas utilizando *Saccharomyces cerevisiae* seca como sólido de teste.

As suspensões utilizadas nos testes foram preparadas a partir de pesagem de diferentes amostras de levedura em balança digital com precisão de 2 casas decimais e mistura no tanque com 4000 mL de água previamente microfiltrada (0 mg/L) com a presença de agitador mecânico.

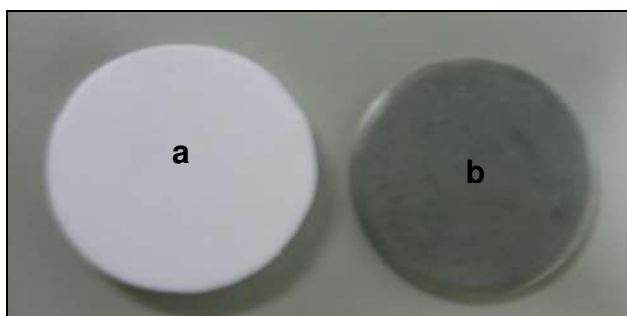
Foi preparada a primeira suspensão contendo 10 mg/L de levedura e sucessivamente adicionou-se a massa necessária para obter suspensões de concentrações pré-definidas. Foram preparadas suspensões de 10, 25, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000 e 40000 mg/L.

Após a homogeneização das suspensões no tanque, a bomba foi ligada e o sistema de bancada posto em funcionamento. Foram lidas nos manômetros as pressões a montante ( $P_1$ ) e a jusante ( $P_2$ ) da placa do dispositivo de testes para uma vazão constante de 3 L/min.

Os resultados obtidos foram colocados em forma de tabela expressando a concentração de SST em mg/L e a diferença de pressão ( $P_1 - P_2$ ) em bar. Para cada placa usada foram plotadas curvas de  $-\Delta P$  contra concentração de SST.

Os testes foram realizados com placas porosas poliméricas de tamanhos médios de poros (MPS) de 1, 5, 10, 15, 20 e 80  $\mu\text{m}$  de 53 mm de diâmetro e 6

mm de espessura e uma placa de metal sinterizado de diâmetro de 53 mm e 2 mm (Figura 3.5).



**Figura 3.5.** Tipos de placas porosas testadas: (a) Placa porosa poliméricas e (b) Placa de metal sinterizado.

#### **III.4 – Montagem do dispositivo para intertravamento**

Uma vez selecionada a placa porosa adequada, o dispositivo de proteção consistiu basicamente na substituição dos manômetros no modelo prévio (item III.1) por um pressostato diferencial com faixa de pressão de 0 a 10 bar e “set-point” ajustável até 2 bar .

#### **III.5 – Procedimento para validação do funcionamento do dispositivo para intertravamento em bancada**

III.5.1 – Sistema de bancada para calibração do pressostato diferencial e validação do dispositivo para intertravamento

O sistema utilizado foi o mesmo utilizado para os testes das placas porosas, exceto pela substituição do modelo prévio pelo dispositivo de intertravamento (Figura 3.6).





**Figura 3.6.** Sistema utilizado para calibração do pressostato e para os testes de validação do dispositivo de intertravamento.

### III.5.2 – Calibração do pressostato diferencial

Para a calibração fez-se a ligação elétrica do pressostato a uma lâmpada incandescente. A ligação elétrica foi feita para o pressostato operar com seu circuito interno normalmente aberto, ou seja, a lâmpada se manteria desligada até o “set-point”.

A calibração se deu pelo escoamento de água microfiltrada no sistema de bancada. Neste caso, a perda de carga no sistema era dada pelo dispositivo quando este usava a placa porosa de metal sinterizado (Figura 3.5 (b)).

O pressostato foi calibrado pelo ajuste de uma rosca interna para fechamento do circuito (lâmpada ligada) em uma queda de pressão especificada. A Figura 3.7 mostra o interior do pressostato utilizado, onde se pode visualizar a rosca de ajuste e a ligação com a lâmpada incandescente.



**Figura 3.7.** Interior do pressostato e ligação elétrica feita com a lâmpada incandescente:  
1 – Rosca de ajuste do “set-point”; 2 – Ligação elétrica do circuito interno do pressostato;  
3 – Lâmpada incandescente.

### III.5.3 - Validação do dispositivo para intertravamento

Foram preparadas suspensões de 5000, 20000 e 40000 mg/L, que corresponderiam aos picos da concentração de SST hipotéticos na linha de alimentação ao módulo de MF.

Foram calibrados no pressostato diferencial do dispositivo “set-points” de 1, 1,3 e 1,5 bar, que com base na curva de queda de pressão em função da concentração de SST para a placa de 1  $\mu\text{m}$ , garantissem atuação do pressostato.

A validação se deu, pela a observação visual da lâmpada acoplada ao dispositivo.

### III.6 – Procedimento para obtenção da curva de calibração da concentração de SST em função da turbidez de cada suspensão e estudo de retenção das placas poliméricas usando *Saccharomyces cerevisiae* seca como sólido de teste

Para diferentes concentrações de levedura (em mg/L) foram medidas a turbidez das suspensões à montante e a jusante da placa porosa do modelo

prévio usando um turbidímetro de bancada digital (Figura 3.8). Determinaram-se a diferença de turbidez nas duas correntes em unidade de NTU e as retenções nas placas em %.



Figura 3.8. Turbidímetro utilizado.

### III.7 – Procedimento para estimativa dos parâmetros $c$ e $k$ da equação de perda de carga em meios porosos das placas porosas poliméricas

Foram medidos os  $\Delta P$ 's do escoamento, nas vazões de 2, 3 e 4 L/min, de água microfiltrada através das placas de 1, 5, 10, 15, 20 e 80  $\mu\text{m}$ . A partir destas medidas foram construídas as curvas de  $\frac{1}{q} \left( \frac{-\Delta P}{L} \right)$  contra  $q$ . Aplicando-se o método de regressão linear foram obtidas as retas que melhores ajustam os dados experimentais. Os coeficientes angular e linear das retas permitem estimar os valores de  $k$  e  $c$ , que são a permeabilidade das placas e o parâmetro adimensional de Forchheimer, respectivamente.

## CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões dos procedimentos adotados no capítulo III.

### IV.1 – Modelo prévio do dispositivo (MPD)

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram o MPD construído.



Figura 4.1. MPD: 1 – Manômetros de 0 a 2 Bar; 2 – Corpo de PVC



Figura 4.2. Interior do MPD com e sem placa porosa respectivamente.

### IV.2 – Curvas de queda de pressão *versus* concentração de SST para as diferentes placas porosas

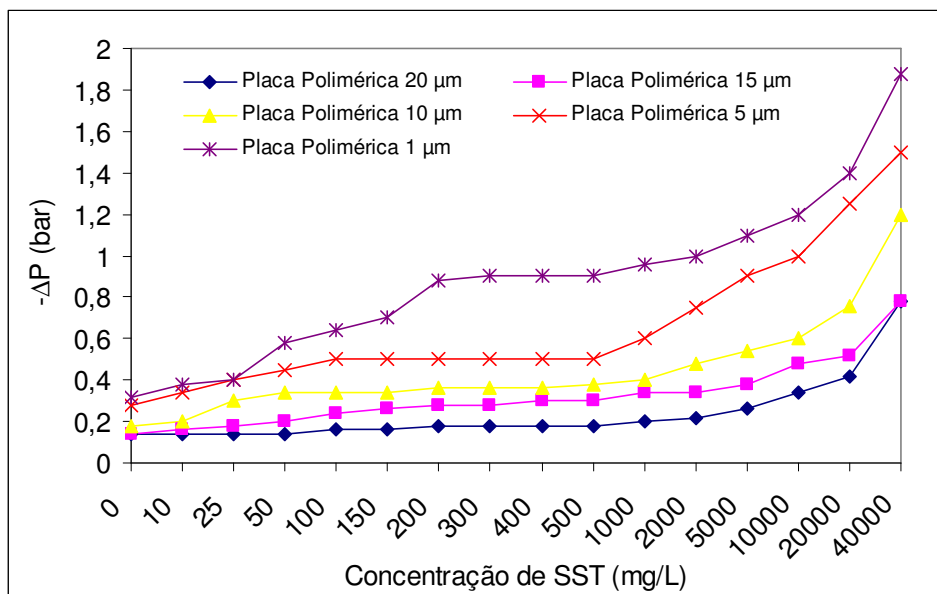
Na Tabela 4.1 estão apresentados os resultados de gradiente de pressão para todas as placas selecionadas e para concentrações de SST variando de 0 a 40000 mg/L.

**Tabela 4.1:** Quedas de pressão em função da concentração de SST.

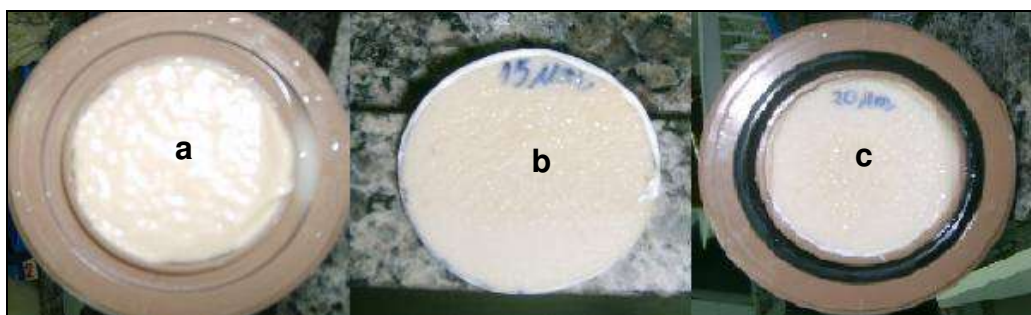
Concentração de SST (mg/L)	- $\Delta P$ (bar)						Metal Sinterizado
	80 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	
0	0,04	0,14	0,14	0,18	0,28	0,32	0,38
10	0,04	0,14	0,16	0,2	0,34	0,38	0,78
25	0,04	0,14	0,18	0,3	0,4	0,4	1,98
50	0,04	0,14	0,2	0,34	0,45	0,58	4,18
100	0,04	0,16	0,24	0,34	0,5	0,64	4,98
150	0,04	0,16	0,26	0,34	0,5	0,7	5,18
200	0,04	0,18	0,28	0,36	0,5	0,88	5,4
300	0,04	0,18	0,28	0,36	0,5	0,9	5,8
400	0,04	0,18	0,3	0,36	0,5	0,9	5,8
500	0,04	0,18	0,3	0,38	0,5	0,9	5,8
1000	0,04	0,2	0,34	0,4	0,6	0,96	6
2000	0,04	0,22	0,34	0,48	0,75	1	6
5000	0,04	0,26	0,38	0,54	0,9	1,1	6
10000	0,04	0,34	0,48	0,6	1	1,2	6
20000	0,04	0,42	0,52	0,76	1,25	1,4	6
40000	0,04	0,78	0,78	1,2	1,5	1,88	6

Na Figura 4.3 pode-se observar que a perda de carga aumenta quando a concentração de SST aumenta. Isto ocorre devido ao aumento da espessura da torta, que se forma na superfície da placa, com conseqüente aumento na perda de carga e possivelmente devido à compressibilidade da mesma.

Como esperado, pelo seu menor tamanho de poros, a placa de 1  $\mu\text{m}$  é a que ofereceu maior resistência ao escoamento. Essa placa retém maior quantidade do material em suspensão e aumenta a resistência pelo entupimento de seus poros e pela formação de uma torta mais espessa e menos porosa que as demais. Pode-se também observar na Figura 4.4 que esta placa foi a única a formar uma torta bem compacta.



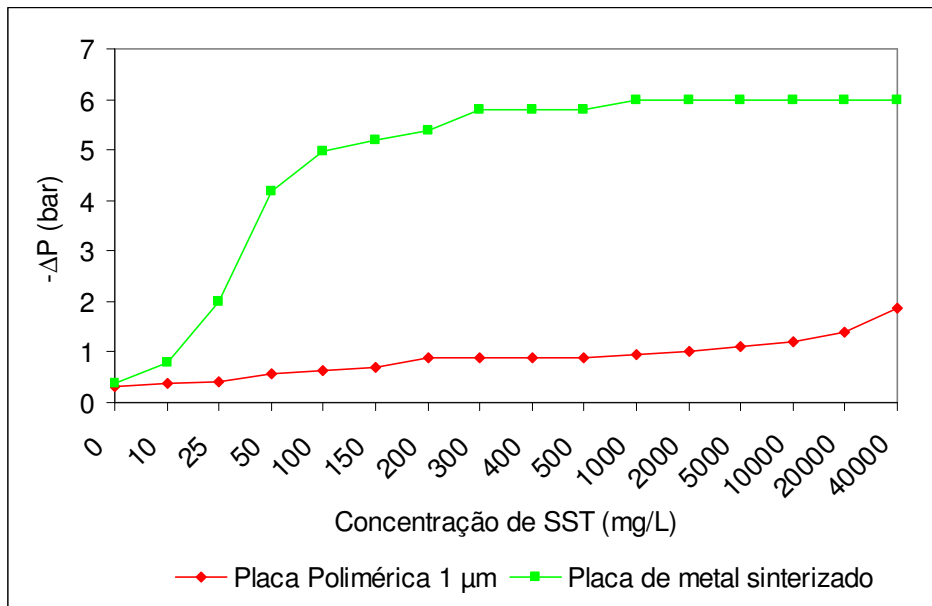
**Figura 4.3.** Curvas de queda de pressão através das placas em função das concentrações de SST.



**Figura 4.4.** Imagem das placas após o término dos testes. a) 1 μm , b) 15 μm e c) 20 μm.

A Figura 4.5 mostra o resultado comparativo dos testes usando a placa porosa de plástico que ofereceu maior resistência (1 μm) e uma placa de metal sinterizado de 2 mm de espessura. A partir deste gráfico é possível observar que a placa de metal sinterizado oferece resistência muito maior se comparada à de plástico de 1 μm. Pode-se observar também que a placa de metal sinterizado apresentou uma queda de pressão alta em baixas concentrações de levedura suspensa e estabilizou-se próximo à concentração de 300 mg/L. Isto possivelmente pode ser explicado pelo fato de que a placa sinterizada aumentou sua resistência ao escoamento, com aumento da espessura da torta e compressibilidade da mesma na placa, até que a mesma ficasse tão grande que provocou turbulência a montante da placa sinterizada e então impediu a formação de torta e manteve a resistência ao escoamento constante dada pela

própria placa. A Figura 4.6 mostra como ficou a placa de metal sinterizado após os testes.



**Figura 4.5.** Comparação entre as perdas de carga do escoamento através da placa polimérica ( $d_{\text{poro}} = 1 \mu\text{m}$ ) e da placa de metal sinterizado.



**Figura 4.6.** Placa de metal sinterizado após os testes.

### IV.3 – Montagem do dispositivo para intertravamento

A Figura 4.7, abaixo, mostra a configuração final do dispositivo para intertravamento conforme descrito no item III.6.





**Figura 4.7.** Dispositivo para intertravamento: 1 – Manômetros de 0 a 2,5 bar; 2 – Pressostato diferencial com ajuste de “set-point” até 2 bar; 3 – Corpo do dispositivo.

#### **IV.4 – Validação do dispositivo para intertravamento**

O dispositivo para intertravamento foi projetado e construído para proteção dos módulos de membranas de microfiltração contra o pico de concentrações de SST na alimentação em tratamento de efluentes líquidos. Na Figura 4.8 pode-se visualizar o funcionamento do pressostato para o escoamento da suspensão de 5000 mg/L.

Em todas as concentrações analisadas, o pressostato diferencial atuou como sensor indireto da concentração de sólidos suspensos, através da medida do diferencial de pressão entre montante e jusante da placa porosa e enviou um sinal elétrico quando este diferencial foi maior que o seu “set-point”. Na Tabela 4.2 estão apresentados os resultados validados.





**Figura 4.8.** Funcionamento do pressostato no escoamento da suspensão de 5000 mg/L.

**Tabela 4.2:** Resultados dos testes de validação do funcionamento do dispositivo para intertravamento.

Concentração de SST (mg/L)	$(-\Delta P)$ na curva de calibração	$(-\Delta P)$ medido na validação	Set-point calibrado	Atuação do pressostato
5000	1,1	1,2	1,0	OK
20000	1,4	1,5	1,3	OK
40000	1,88	1,9	1,5	OK

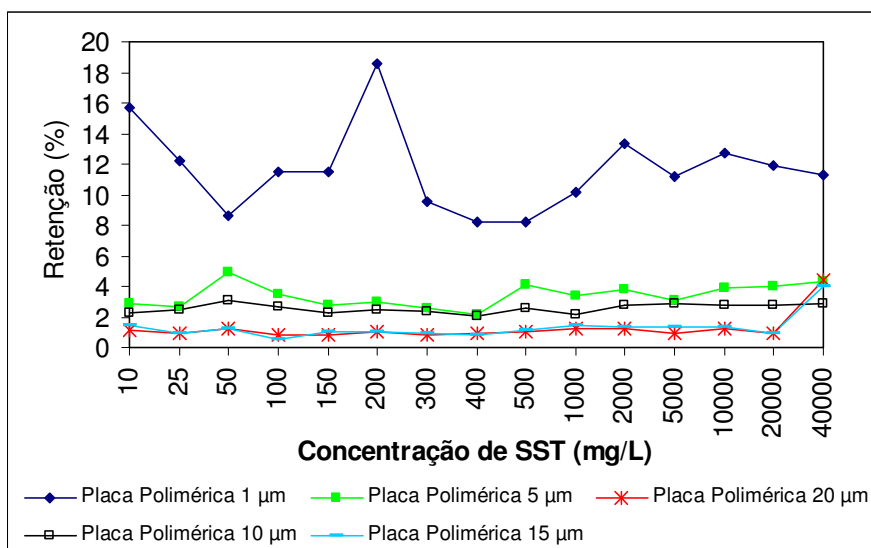
#### **IV.5 – Curva de calibração da concentração de SST em função da turbidez de cada suspensão e retenção das placas poliméricas usando *Saccharomyces cerevisiae* seca como sólido de teste**

A Tabela 4.3 mostra os valores obtidos no laboratório, para turbidez das suspensões no tanque, a montante, e a jusante da placa porosa.

**Tabela 4.3:** Turbidez versus concentração de SST antes e após as placas porosas poliméricas.

Concentração de SST (mg/L)	Turbidez da suspensão no tanque (NTU)	1 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$
		Turbidez da suspensão após a placa porosa (NTU)					
0	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
10	3,51	2,96	3,41	3,43	3,47	3,47	3,52
25	8,28	7,27	8,06	8,08	8,18	8,2	8,26
50	16,2	14,8	15,4	15,7	15,9	16	16,1
100	37,3	33	36	36,3	37,1	37	37,3
150	61	54	59,3	59,6	60,4	60,5	61
200	80,3	65,4	77,9	78,3	79,4	79,5	80,2
300	115	104	112	112,3	112,9	114	114
400	147	135	143,9	144	145,8	145,7	147
500	195	179	187	190	192,9	193	195
1000	500	449	483	489	491	494	498
2000	901	781	867	876	888	890	900
5000	2240	1990	2170	2175	2207	2220	2237
10000	5420	4733	5211	5270	5340	5356	5415
20000	10400	9166	9980	10111	10302	10300	10402
40000	20300	18000	19424	19722	19502	19400	20307

Quanto menor a porosidade da placa maior a sua capacidade de retenção de sólidos suspensos totais, como pode ser visualizada no gráfico de retenção de turbidez (Figura 4.9). A oscilação dos pontos deveu-se a medida imprecisa do turbidímetro de bancada, pois o mesmo se mostrou suscetível a fatores experimentais externos.



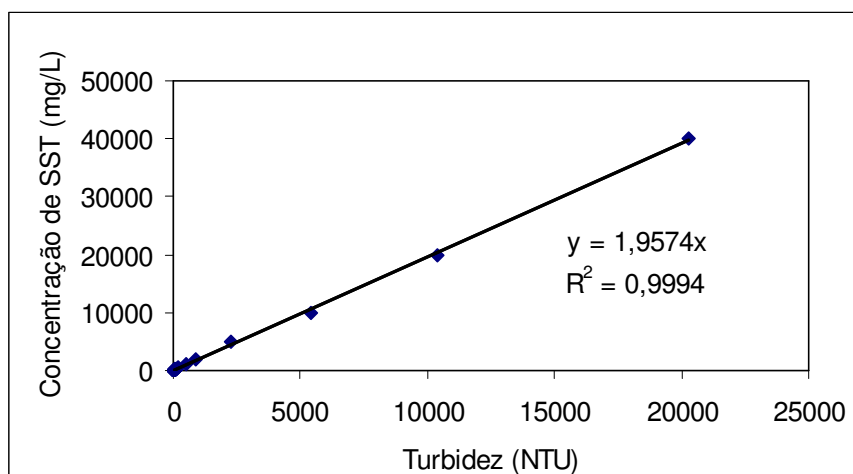
**Figura 4.9.** Gráfico de retenção de turbidez para as placas porosas poliméricas.

A placa de 1 µm apresentou uma retenção de sólidos bem maior que as outras placas. A tabela 4.4 mostra as retenções médias das placas porosas poliméricas testadas.

**Tabela 4.4:** Retenções de turbidez média para as placas porosas poliméricas.

Placas Poliméricas - MPS (µm)	Retenção de turbidez média (%)
1	11,6
5	3,4
10	2,6
15	1,3
20	1,2
80	0

A figura 4.10 mostra a curva de calibração da concentração de SST em função da turbidez das suspensões testadas nos experimentos de testes das placas porosas.



**Figura 4.10.** Curva de calibração para determinar SST em função da turbidez.

#### IV.6 – Estimativa dos parâmetros $c$ e $k$ da equação de perda de carga de meios porosos nas placas poliméricas

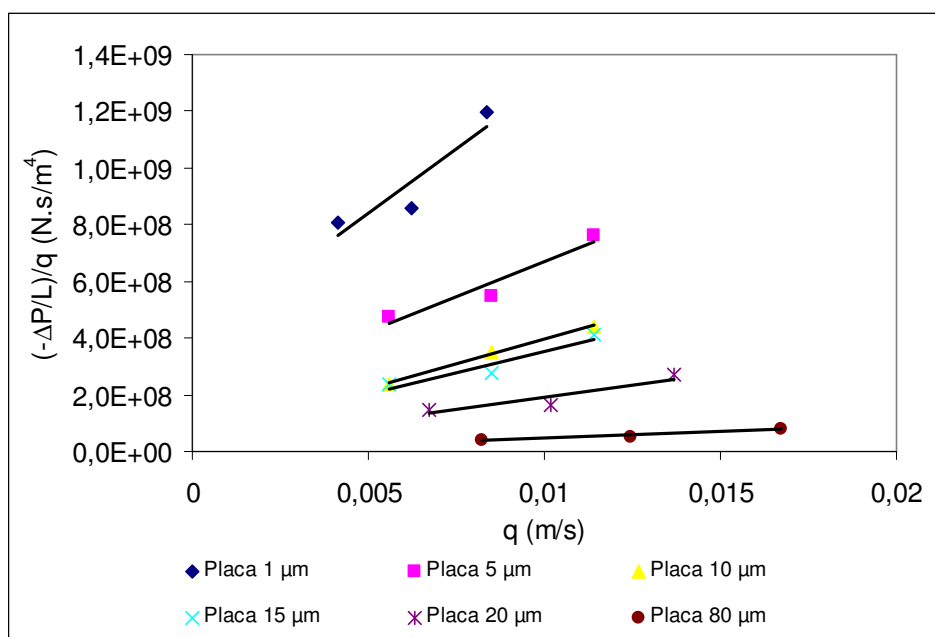
Foram medidos os valores de  $-\Delta P$  e vazão, conforme mostrados na Tabela 4.5, para o escoamento da água microfiltrada através das placas. Com estes dados estimou-se os parâmetros  $c$  e  $k$  do meio poroso (placas de plástico) usando a equação (eq. 2.6) pelo ajuste de retas.

**Tabela 4.5:** Perda de carga em função da vazão para escoamento do fluido através das placas porosas poliméricas.

<b>Placa com MPS</b>						
<b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>1</b>		<b>5</b>		<b>10</b>	
	<b><math>-\Delta P</math> (bar)</b>	<b>Vazão (L/min)</b>	<b><math>-\Delta P</math> (bar)</b>	<b>Vazão (L/min)</b>	<b><math>-\Delta P</math> (bar)</b>	<b>Vazão (L/min)</b>
	0,2	2	0,16	2	0,08	2
	0,32	3	0,28	3	0,18	3
	0,6	4	0,52	4	0,3	4
<b>Placa com MPS</b>						
<b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>15</b>		<b>20</b>		<b>80</b>	
	<b><math>-\Delta P</math> (bar)</b>	<b>Vazão (L/min)</b>	<b><math>-\Delta P</math> (bar)</b>	<b>Vazão (L/min)</b>	<b><math>-\Delta P</math> (bar)</b>	<b>Vazão (L/min)</b>
	0,08	2	0,08	2	0,02	2
	0,14	3	0,14	3	0,04	3
	0,28	4	0,2	4	0,08	4

**Tabela 4.6:** Dados das placas. Porosidade média e dimensões. Fonte: EGFILTROS LTDA.

Placas ( $\mu\text{m}$ )	1	5	10	15	20	80
Porosidade média (%)	27,5	37,5	37,5	37,5	45	55
Diâmetro (mm)	53	53	53	53	53	53
Espessura (mm)	6	6	6	6	6	6



**Figura 4.11.** Ajuste das retas aos pontos manipulados.

**Tabela 4.7:** Resultado dos ajustes.

Placa com MPS ( $\mu\text{m}$ )	1	5	10	15	20	80
Coefficiente linear	$4,0 \times 10^8$	$2,0 \times 10^8$	$5,0 \times 10^7$	$5,0 \times 10^7$	$2,0 \times 10^7$	$1,4 \times 10^5$
Coefficiente angular	$9,0 \times 10^{10}$	$5,0 \times 10^{10}$	$3,0 \times 10^{10}$	$3,0 \times 10^{10}$	$2,0 \times 10^{10}$	$5,0 \times 10^9$
$k$ ( $\text{m}^2$ )	$2,5 \times 10^{-12}$	$5,0 \times 10^{-12}$	$2,0 \times 10^{-11}$	$2,0 \times 10^{-11}$	$5,0 \times 10^{-11}$	$7,3 \times 10^{-9}$
$c$	$1,4 \times 10^2$	$1,1 \times 10^2$	$1,3 \times 10^2$	$1,3 \times 10^2$	$1,4 \times 10^2$	$4,3 \times 10^2$
$R^2$	0,8366	0,9276	0,993	0,907	0,8414	0,9628

A partir dos dados apresentados na Tabela 4.7 é possível observar que as placas porosas possuem valores de permeabilidade crescentes para o aumento do tamanho médio de poros (MPS). Como esperado, a placa de 80  $\mu\text{m}$  apresentou um valor bem mais elevado que as demais.

## CAPÍTULO V – ESTIMATIVA DO CUSTO ECONÔMICO DO DISPOSITIVO PARA INTERTRAVAMENTO

Neste capítulo foi feito um levantamento econômico dos materiais usados para a construção do dispositivo para intertravamento e o seu custo final de construção e fez-se uma comparação com o custo do conjunto turbidímetro/sensor de turbidez que é usado para a mesma aplicação.

### V.1 – Custo total do dispositivo construído

A Tabela 5.1 mostra a quantidade, o preço unitário e o preço total de cada material usado na construção do dispositivo de proteção e o custo final da sua construção.

**Tabela 5.1:** Custo total de construção do dispositivo para intertravamento.

Peça	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
União de 60 mm PVC Soldável	1	30,00	30,00
Bucha de redução 60 x 50 mm PVC Soldável	2	5,00	10,00
Bucha de redução 50 x 40 mm PVC Soldável	2	2,50	5,00
Bucha de redução 40 x 32 mm PVC Soldável	2	2,00	4,00
Bucha de redução 32 x 25 mm PVC Soldável	2	1,50	3,00
Bucha de redução 25 x 20 mm PVC Soldável	2	0,50	1,00
"Tê" 25 mm PVC Soldável	2	1,00	2,00
Adesivo plástico para PVC	1	2,00	2,00
Conexão de engate rápido 1/4" x 10 mm	2	2,50	5,00
Manômetros 0 a 2,5 bar	2	40,00	80,00
Pressostato diferencial	1	500,00	500,00
Placa porosa polimérica de 1 micrômetro	1	50,00	50,00
		<b>Custo final (R\$)</b>	<b>692,00</b>

O custo final do dispositivo para intertravamento pode variar de R\$ 600 a 800 no máximo.

## V.2 – Comparação econômica entre o custo final do dispositivo para intertravamento e do conjunto turbidímetro/sensor de turbidez usado para a mesma aplicação

A Tabela 5.2 mostra o comparativo de custos entre o dispositivo para intertravamento construído e o conjunto turbidímetro/sensor de turbidez que é usado comumente para a proteção das membranas de MF.

**Tabela 5.2:** Tabela comparativa de custos.

<b>Equipamento</b>	<b>Custo (R\$)</b>
Dispositivo para intertravamento	692,00
Turbidímetro e sensor de turbidez	13.000,00

Pela tabela é possível observar que o custo final da construção do dispositivo para intertravamento é quase 19 vezes menor que o custo do conjunto turbidímetro e sensor de turbidez.

## CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### VI.1 – Conclusões

- A partir do teste de bancada, pode-se concluir que o dispositivo para intertravamento tem potencial para proteção de membranas de microfiltração contra a incrustação causada por picos de elevada concentração de SST em tratamento de efluentes;
- A placa porosa de plástico foi a mais adequada ao uso no dispositivo que a placa de metal sinterizado, pois esta, além do maior custo, não foi sensível as variações de concentração de SST acima de 300 mg/L;
- A placa porosa de plástico de 1  $\mu\text{m}$  foi a mais sensível às variações de concentração. Neste caso, o controle da concentração de SST será conduzido com mais segurança e confiabilidade;
- Além da flexibilidade de operação, o dispositivo é de fácil operação e desmonte para limpeza;
- As principais desvantagens associadas ao uso do dispositivo são: placa porosa usada no dispositivo deve ser calibrada para diferente condição de escoamento quando o dispositivo tiver de ser operado na vazão diferente da testada neste trabalho (3 L/min) e a placa mais adequada deve ser avaliada para o sólido suspenso em questão, pois o teste neste trabalho se ateve a uso de levedura como sólido suspenso;
- O dispositivo para intertravamento é viável economicamente em comparação com o conjunto turbidímetro/sensor de turbidez usado para a mesma aplicação.



## **VI.2 – Sugestões**

- Estudo mais detalhado das placas em outras condições de escoamento, como calibração das placas em outras vazões;
- Teste do dispositivo em uma unidade de microfiltração no tratamento de efluentes de campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTERTHUM, F., TRABULSI, L. R., *Microbiologia*, 5ª edição, editora atheneu, 2006.

BERTOLDO, Leonardo Caliman: *Desenvolvimento de membranas de fibras ocas para ultrafiltração e nanofiltração utilizando imersão em banho duplo de precipitação*. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro, 2005.

CARVALHO, Roberto Bentes de: *Fibras ocas compostas para nanofiltração e osmose inversa preparadas pela técnica de precipitação por imersão de duas soluções poliméricas extrusadas simultaneamente*. Dissertação de doutorado. Rio de Janeiro, 2005.

CHERYAN, M.: *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*, Technomic Publishing Co., Lancaster, PA (1998).

DA CRUZ, Roberto Tomazoni: *Efeito da calagem da superfície na atividade de herbicidas aplicados ao solo*. Dissertação de mestrado. Maringá, 2005.

FOX, Robert W., MCDONALD, Alan T.: *Introdução a mecânica dos fluidos*, 6ª edição, editora LTC, 2005.

LAPOLLI, Flávio R., BERGAMASCO, Rosângela, CAMPOS, José R.: O problema da colmatação de membranas de microfiltração de esgotos sanitários, 20º congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, 1999.

LACOSTE, B.: *Étude d'un Procédé de Traitement des Eaux Usées sur Membranes Minérales par Couplage Microfiltration ou Ultrafiltration Tangentielles et Systèmes biologiques em Aerobiose*. Dissertação de doutorado, Universidade de Montpellier, Montpellier, França, 1992.

HABERT, A. C., BORGES, C. P., NOBREGA, R., *Processos de Separação por*

*Membranas*, In: Apostila do Programa de Engenharia Química da COPPE/UFRJ, 2003.

HABERT, A. C., BORGES, C. P., NOBREGA, R., *Processos de Separação por Membranas*, ed. e-papers, Rio de Janeiro-Brasil, 2006.

MASSARANI, Giulio: *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. 2ª edição, e-papers, Rio da Janeiro. Editora da UFRJ, 2002.

MULDER, Marcel: *Basic Principles of Membrane Technology*. Kluwer Academic Pub, 1996.

NETA, Luzia Sergina de França, *Clarificação de bebidas fermentadas utilizando o processo de microfiltração*. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro, 2005.

RÄDER, Arlindo Soares: *Estudo Teórico-Experimental do Processo de Microfiltração de Partículas de Sílica em suspensão aquosa*. Dissertação de mestrado, Porto Alegre, 2003.

SENHORELO, Adriano Posse: *Inter-relações entre Bacias Hidrográficas com Diferenciados Solos, Características Físicas, Uso/Ocupação da Terra e Perda de Solos por Erosão Laminar e Aporte de Sedimentos*. Dissertação de mestrado. Espírito Santo, 2000.

SCHULZ, Cintia Kuhn: *Tratamento de Efluentes Oleosos Utilizando o Processo de Separação por Membranas*. Dissertação de Doutorado. Rio de Janeiro, 2005.

SOISSON, H., *Instrumentação industrial*, editora Hemus, 2002.

CHERYAN, M.: *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*, Technomic Publishing Co., Lancaster, PA (1998).

**Outras referências:**

CATALOGO DE TURBIDÍMETROS DA ABB LTDA, 2009

CATALOGO DE PRESSOSTATOS DA BIMETAL, 2009

CATALOGO DE PRESSOSTATOS DA ZURICH, 2010

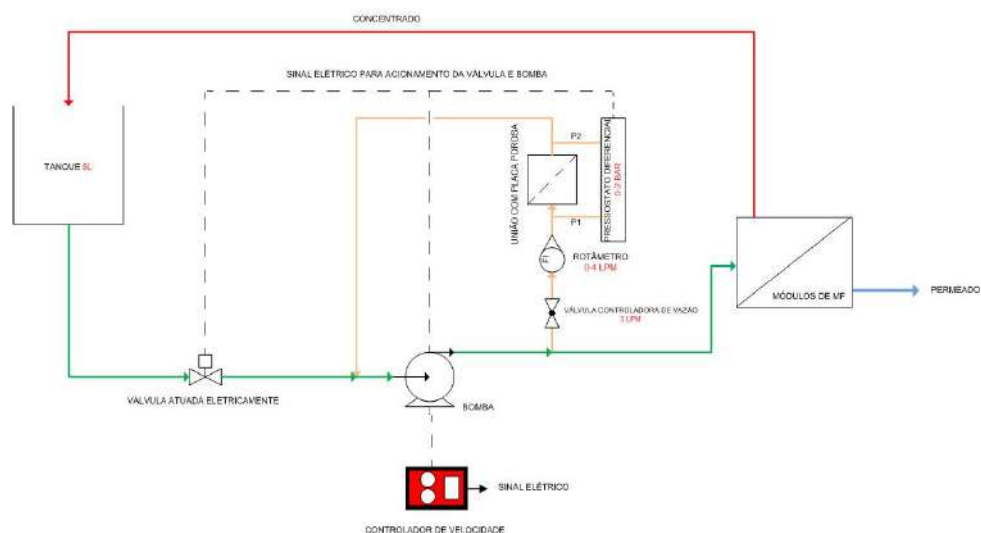
CATALOGO DE PLACAS POROSAS DA EGFILTROS, 2005

CATALOGO DA FLUID, 2009

## APÊNDICE I

### Recomendações para uso do dispositivo de intertravamento

O esquema abaixo mostra um dos sistemas no qual o dispositivo de intertravamento poderia ser usado quando se deseja prevenir picos de concentração em um sistema de membranas. O sinal elétrico enviado pelo pressostato diferencial comanda por exemplo o desligamento de uma bomba de alimentação e/ou ligamento de uma válvula atuada (solenóide normalmente aberta), impedindo que a corrente alcance as membranas



**Figura A.1.** Esquema de funcionamento do dispositivo num processo de microfiltração clássica.

A instalação deste dispositivo de intertravamento em um sistema como mostrado na Figura A.1 necessita de um quadro elétrico para controle das principais ações do mesmo como desligar uma bomba ou fechar uma válvula atuada. O processo deve ser conectado diretamente ao dispositivo por mangueiras de 10 mm. Faz-se necessário controlar a vazão no dispositivo já que a placa porosa foi escolhida com bases em condições de escoamento específicas. O controle da vazão poderia ser feito através de uma válvula globo na entrada do dispositivo e um rotâmetro. Recomenda-se a instalação do dispositivo numa linha de “by-pass” do processo principal para evitar interferência do mesmo.