

## Proposta de um modelo de projeto de filtro rápido bifluxo para tratamento de água de abastecimento

Diego Brunelli Ghisi



Diego Brunelli Ghisi

**PROPOSTA DE UM MODELO DE PROJETO DE FILTRO  
RÁPIDO BIFLUXO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA DE  
ABASTECIMENTO**

Trabalho apresentado à Universidade  
Federal de Santa Catarina para a  
Conclusão do Curso de Graduação em  
Engenharia Sanitária e Ambiental.  
Orientador: Prof. Dr. Maurício Luiz  
Sens

Florianópolis  
2016

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

Ghisi, Diego Brunelli

Proposta de um modelo de projeto de filtro rápido  
bifluxe para tratamento de água de abastecimento / Diego  
Brunelli Ghisi ; orientador, Maurício Luiz Sens -  
Florianópolis, SC, 2016.  
79 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

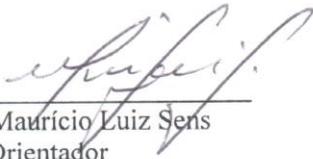
1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Filtro rápido  
bifluxe. 3. Filtração de água. 4. Tratamento de água. I.  
Sens, Maurício Luiz. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.  
III. Título.

Diego Brunelli Ghisi

**PROPOSTA DE UM MODELO DE PROJETO DE FILTRO  
RÁPIDO BIFLUXO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA DE  
ABASTECIMENTO**

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II.

Florianópolis, 02 de dezembro de 2016.



---

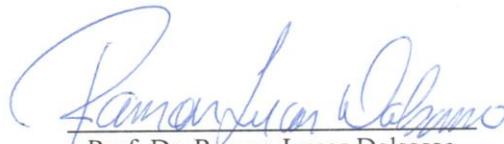
Prof. Dr. Maurício Luiz Sens  
Orientador

**Banca Examinadora:**



---

Prof. Dr. Paulo Belli Filho  
Membro da banca



---

Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso  
Membro da banca



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar força e sabedoria para encarar os desafios da vida, tão presentes no período da graduação; e por colocar no meu caminho tantas pessoas boas, dispostas a ajudar, muitas vezes de forma gratuita.

Um agradecimento especial aos meus pais, Pedro e Alecir, por todo o amor e por não terem medido esforços para que seus filhos pudessem ir mais longe, na perspectiva acadêmica, do que os mesmos puderam chegar. Também compreenderam, assim como minha irmã, Adriana, e minhas sobrinhas, Luana e Leticia, minhas decisões profissionais, ainda que tais escolhas me levassem para mais longe deles.

Minha gratidão ao Professor Maurício Luiz Sens, por sempre tratar seus alunos de forma tão humana, por ter aceitado me orientar no presente trabalho, por estar sempre disposto a auxiliar e pelos valiosos ensinamentos. Também a Sérgio Luiz Belló, pelo apoio durante a construção deste trabalho, e a Tiago da Silva, por revisá-lo.

Muito obrigado aos meus colegas, que comigo estudaram e passaram noites e finais de semana fazendo trabalhos acadêmicos, deram apoio nas etapas difíceis, e possibilitaram os muitos momentos de descontração.

Agradeço aos meus amigos, por torcerem pelo meu sucesso e darem seu apoio, assim como compreenderem a minha ausência, em tantos momentos, por questões acadêmicas.

Também sou grato aos colegas de trabalho, de estágio, de monitoria e de iniciação científica, pois tais experiências contribuíram muito na minha formação profissional.

Minha gratidão, ainda, aos amigos que comigo estiveram durante os dois semestres de intercâmbio acadêmico, por fazerem desse período um dos mais especiais da minha vida.

Por fim, agradeço imensamente a todos que contribuíram de alguma maneira para a minha formação e realização deste trabalho.



## RESUMO

A filtração constitui um dos principais processos do tratamento de água e o estudo da modalidade de filtros a serem empregados deve ser realizado de forma criteriosa pelo projetista. Este trabalho pretende propor um modelo de projeto de filtro rápido bifluxo que potencialmente seja uma opção mais interessante em relação a outros modelos do mesmo tipo de filtro relatadas na literatura. Procedeu-se com uma análise dos parâmetros de projeto desses filtros descritos na revisão bibliográfica, evidenciando-se que o sistema de coleta de água filtrada por meio de tubos plásticos perfurados foi largamente citado como problemático pela sua frequente obstrução e que unidades com emprego de dupla camada filtrante, com antracito e areia, são recomendadas. O projeto proposto por este trabalho emprega, como alternativa para o sistema de coleta do filtrado, um sistema composto por crepinas desencaixáveis acopladas a tubos de PVC, formando um sistema que potencialmente apresente menos problemas relativos à obstrução e que poderá ser retirado do interior da camada filtrante caso haja necessidade. Outros critérios de projeto relatados como vantajosos foram mantidos. Foi projetado, então, um filtro de dupla camada filtrante, com taxa de filtração constante de  $500 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ , área de 10 metros quadrados e capacidade de filtrar 58 L/s de água. O leito filtrante, concebido de forma a operar por filtração direta, possui uma profundidade total de 2,55 metros, sendo que pode ser reduzido caso opere em estação de tratamento convencional. Percebeu-se uma baixa disponibilidade de trabalhos publicados específicos sobre a filtração bifluxo, principalmente sobre critérios de projeto empregados, provavelmente porque não houve um uso difundido no exterior do território russo. Observa-se, ainda, que tal modalidade de filtração apresenta grande potencialidade de uso, sendo uma alternativa interessante, principalmente no aspecto econômico. Recomenda-se que o projeto proposto por este trabalho seja executado e estudado em escala piloto para sua validação e para um maior aprofundamento sobre o seu funcionamento.

**Palavras-chave:** filtro rápido bifluxo, filtração de água, tratamento de água.



## ABSTRACT

Filtration is one of the main processes of water treatment and the study of the type of filters to be used must be carried out carefully by the designer. This paperwork intends to propose a rapid biflow filter design model that is potentially a more interesting option in relation to other models of the same type of filter reported in literature. The literature review showed that the filtrate collection system by slotted plastic tubes was widely cited as problematic due to its frequent obstruction, as well as dual-media units, with anthracite and sand, are recommended. As an alternative to the filtrate collection system, this paperwork proposes a system composed by crepines coupled with PVC pipes, forming a system that potentially presents fewer problems related to the obstruction and which can be removed from the interior of the filtration media if necessary. Other design criteria reported as advantageous were retained. A dual-media filter was then designed, with a constant filtration rate of  $500 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}$ , internal area of 10 square meters and capacity to filter 58 L/s of water. The filter bed, designed to operate by direct filtration, has a total depth of 2.55 meters, which can be reduced if it is operated in a conventional treatment plant. There was a low availability of specific published works on biflow filtration, mainly on design criteria employed, probably because there was no widespread use outside the Russian territory. It is also observed that this type of filtration presents great potential of use, being an interesting alternative, especially on economic view. It is recommended that the project proposed by this work be executed and studied on a pilot scale plant for its validation and for a deeper understanding of its operation.

**Keywords:** rapid biflow filter, water filtration, water treatment.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição da camada suporte proposta por Baylis.....	25
Figura 2 - Corte ilustrativo de vigas californianas .....	27
Figura 3 - Bocais simples .....	28
Figura 4 - Bocal especial, para lavagem com ar e água. ....	28
Figura 5 - Bloco de polietileno tipo Leopold, empregado para lavagem com ar e água.....	29
Figura 6 - Esquema da distribuição de água e ar juntamente com água no bloco universal .....	29
Figura 7 - Princípio básico de um filtro bifluxo .....	35
Figura 8 - Proposta de Filtro Bifluxo com dupla camada filtrante .....	42
Figura 9 - Exemplos de tubo circular ranhurado .....	48
Figura 10 - Crepina plástica em sua forma encaixada.....	49
Figura 11 - Crepina em sua forma desencaixada.....	50
Figura 12 - Elemento rosqueável junto à base da crepina .....	50
Figura 13 - Aberturas drenantes junto aos anéis ranhurados.....	51
Figura 14 - Vista lateral de duas peças individuais de tubos de material plástico conectados, com crepinas fixadas .....	51
Figura 15 - Vista superior de duas peças individuais de tubos de material plástico conectados, com crepinas encaixadas .....	52
Figura 16 - Malhas de tubos drenantes com suas respectivas crepinas .	53
Figura 17 - Esquema de fixação dos cabos de aço à rede de drenagem do filtrado .....	55



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do carvão antracitoso brasileiro .....	24
Tabela 2 - Aspectos de projeto do filtro bifluxo, por Hamman e Mckinney (1968).....	36
Tabela 3 - Aspectos de projeto do Filtro Bifluxo, conforme Ray (1974) .....	37
Tabela 4 - Critérios de projeto de Filtro Bifluxo, por Vignesan et al. (1983).....	37
Tabela 5 - Comparação de critérios de projeto de filtros descendentes convencionais, filtros ascendentes de camada profunda e filtros bifluxos, de acordo com Vignesan et al. (1983) .....	38
Tabela 6 - Principais aspectos de projeto considerados vantajosos ou problemáticos em filtros bifluxos.....	44
Tabela 7 - Outros critérios de projeto relatados .....	45
Tabela 8 - Parâmetros relativos à camada filtrante .....	60
Tabela 9 - Configuração da camada suporte do modelo de filtro bifluxo proposto.....	62
Tabela 10: Síntese do dimensionamento do filtro .....	70



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivos específicos .....	18
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>19</b>
2.1 TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO .....	19
2.2 PROCESSO DE FILTRAÇÃO .....	20
2.3 MATERIAL FILTRANTE .....	23
2.4 CAMADA SUPORTE .....	24
2.5 FUNDO DE FILTROS .....	26
2.5.1 Tubulações perfuradas .....	26
2.5.2 Fundo falso com vigas em V.....	26
2.5.3 Fundo falso com bocais.....	27
2.5.4 Blocos distribuidores .....	28
2.6 LAVAGEM DOS FILTROS.....	30
2.7 FILTROS DE FLUXO DESCENDENTE .....	31
2.8 FILTROS DE FLUXO ASCENDENTE.....	32
2.9 FILTROS BIFLUXOS .....	34
2.9.1 Descrição básica de funcionamento .....	34
2.9.2 Aspectos de projeto.....	35

2.9.3 Filtro bifluxo de dupla camada filtrante .....	40
2.9.4 Perspectivas, vantagens e desvantagens .....	42
2.9.5 Abordagem dos principais critérios de projeto de filtros rápidos bifluxos .....	43
2.9.5.1 Critérios vantajosos e não vantajosos relatados .....	44
2.9.5.2 Outros critérios de projeto abordados .....	44
<b>3. PROPOSTA DO PROJETO DE FILTRO RÁPIDO BIFLUXO</b> .....	<b>47</b>
3.1 SISTEMA DE COLETA DO FILTRADO .....	48
3.1.1 Elevação do sistema drenante do filtrado .....	54
3.1.2 Dimensionamento das tubulações de drenagem do filtrado.	55
3.1.3 Incremento da perda de carga hidráulica devido ao sistema de coleta do filtrado .....	56
3.2 TUBULAÇÕES DE ÁGUA A SER FILTRADA .....	59
3.3 CAMADAS FILTRANTES E GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS FILTRANTES.....	59
3.4 FUNDO DO FILTRO .....	61
3.5 CAMADA SUPORTE.....	61
3.6 TAXA DE FILTRAÇÃO.....	62
3.7 RETROLAVAGEM .....	63
3.8 TABELA RESUMO DO DIMENSIONAMENTO DO FILTRO .....	69
<b>4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>71</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
---	-----------



## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, praticamente toda água que se encontra na natureza, principalmente em corpos de água superficiais, demanda tratamento para ser utilizada no abastecimento público. Isso se deve à grande variedade e volume de contaminantes liberados pelas atividades antrópicas, e, por vezes, mesmo processos naturais (RICHTER E AZEVEDO NETTO, 1991).

O projetista de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) deve definir as etapas de tratamento, suas modalidades e dimensionamento, de acordo com a água a ser tratada, assim como considerar, minimamente, aspectos técnicos, econômicos e ambientais. A filtração é uma das unidades componentes do tratamento de água mais antigas e largamente utilizadas nos dias atuais, sendo que os filtros podem ser classificados como: descendentes ou ascendentes, de acordo com o sentido do fluxo da água; e em lentos ou rápidos, dependendo da faixa de taxa de filtração em que as unidades operam. Ainda, podem ser classificados de acordo com a disposição e composição da camada filtrante e conforme a pressão existente (LEME, 1990).

Entre as modalidades de filtros mais empregadas está o filtro rápido ascendente, em que a água entra na unidade pela parte inferior, passando pelo leito de material filtrante, como a areia, e a água filtrada é coletada na parte superior. Esse é um tipo de filtro muito usual, com a vantagem de a água a ser tratada passar primeiramente por grãos maiores do leito filtrante, que vão diminuindo ao longo do caminho que ela percorre (DI BERNARDO, 2003). Isso ocorre porque naturalmente os grãos de areia maiores ficam na parte de baixo do filtro, diminuindo de tamanho continuamente até a sua porção superior. Assim, as impurezas maiores são retidas logo que entram em contato com o filtro e as menores são retidas ao longo da camada filtrante, melhorando a qualidade da água filtrada e aumentando o tempo de filtração até que seja necessário lavar o filtro.

A sua desvantagem é a consequente expansão do material filtrante enquanto o filtro opera, causada pelo próprio fluxo da água, o que provoca a liberação de impurezas, reduzindo a qualidade da água filtrada. Uma das formas de se evitar essa expansão é o desvio de parte da vazão da água a ser filtrada para a parte superior do filtro, constituindo então um fluxo duplo da água no filtro, parte descendente, parte ascendente. Dessa forma, a coleta da água filtrada deixa de ser acima da camada filtrante e passa a ser no interior dela. Essa alternativa consiste no denominado filtro bifluxo (RICHTER E AZEVEDO

NETTO, 1991).

O filtro bifluxo tem como vantagens a maior vazão de água filtrada - por meio da utilização de ambos os fluxos ascendente e descendente, o controle da expansão do meio filtrante e a economia nos custos de implantação. Um problema relativamente comum em sua operação é o entupimento da canalização de coleta da água filtrada, realizado geralmente via tubos plásticos perfurados.

Diante da carência de estudos sobre filtros bifluxos, este trabalho pretende compreender a configuração das unidades desse tipo de filtro, na modalidade de filtros rápidos, já estudadas e descritas na literatura, de forma a ampliar o conhecimento sobre suas potencialidades e desvantagens. Ainda, após serem correlacionados esses pontos fortes e fracos relatados, será proposto um modelo de projeto de filtro rápido bifluxo com uma configuração que potencialize ou mantenha suas vantagens conhecidas e restrinja seus pontos fracos. Em trabalhos posteriores, esse projeto poderá ser executado e estudado em escala piloto pelo LAPOA – Laboratório de Potabilização das Águas, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Assim, será possível elucidar a aplicação desse tipo de filtro e potencializar o seu uso em Estações de Tratamento de Água para abastecimento público.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Propor um modelo de projeto de filtro rápido bifluxo com uma configuração tal que o mesmo possa ser uma opção atrativa na aplicação em Estações de Tratamento de Água.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Compreender as potencialidades e problemas relatados na aplicação do filtro rápido bifluxo;
- Estudar meios, no que se refere à configuração do filtro, de solucionar problemas identificados e manter suas potencialidades no uso em Estações de Tratamento de Água;
- Conceber um projeto de filtro rápido bifluxo que, de acordo com a bibliografia pesquisada e proposições do autor, seja potencialmente eficiente no tratamento de águas de abastecimento.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre filtros bifluxos, focando-se em seus aspectos de projeto, vantagens e desvantagens relatadas. Tais informações foram buscadas em artigos científicos, livros e outras fontes bibliográficas fundamentadas, em diferentes bases de dados, como *ScienceDirect*, *WebScience* e *Scopus*.

Em se tratando de uma proposta de projeto, a fundamentação teórica não se ateu às referências que tratam apenas de filtros bifluxos, até pela sua baixa disponibilidade de abordagem quanto a aspectos de projeto. Dessa forma, neste item se abordam, entre outros assuntos, critérios de projeto de filtros rápidos em geral, com o intuito de se embasar os critérios adotados no modelo proposto.

Ao final deste capítulo, são elencados os principais itens de projeto relatados e direcionados especificamente a filtros bifluxos.

### 2.1 TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO

De acordo com Richter e Azevedo Netto (1991), a água se trata de um ótimo solvente, não sendo encontrada em estado de absoluta pureza, portando impurezas de variados tipos. O gás carbônico, ao se dissolver na água, torna-a um solvente ainda melhor. A natureza e a composição do solo pelo qual a água escoar determinam as substâncias adicionais que a mesma contém. A impureza das águas é acentuada pela expansão demográfica e atividades econômicas, tornando praticamente impossível se considerar segura qualquer fonte de água superficial, de forma que anteriormente ao consumo a água deve passar por algum tipo de tratamento.

Sob o ponto de vista tecnológico, água de qualquer qualidade pode ser, teoricamente, transformada em água com padrões adequados de potabilidade. Porém, os custos e a confiabilidade na operação e manutenção do sistema de tratamento podem inviabilizar totalmente o uso de determinado curso d'água como fonte de abastecimento. Existe uma relação intrínseca entre o meio ambiente e as tecnologias de tratamento, ou seja, em função da qualidade da água de determinado manancial e suas relações com o meio ambiente, há tecnologias específicas para que o tratamento seja realizado de forma eficiente (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Pelo ponto de vista do usuário, o termo “qualidade da água” é usado para se referir às características químicas, físicas, biológicas e radiológicas da água relacionadas à sua aceitabilidade para o referido

uso. O tratamento de água para abastecimento público se originou na Escócia, onde John Gibb desenvolveu o primeiro filtro lento. Já a filtração rápida foi iniciada na cidade de Campos, Rio de Janeiro, em 1880 (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991).

Os sistemas públicos de abastecimento de água têm como finalidade tornar a água bruta captada no corpo d'água em água potável e distribuí-la à população dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação, através de operações que envolvem a adição de produtos químicos e processos físicos (ANDREOLI et al., 2006). Conforme Richter e Azevedo Netto (1991), os serviços públicos de abastecimento de água devem fornecer continuamente água que atenda às seguintes finalidades:

- Higiênicas: remoção de microrganismos, substâncias nocivas ou venenosas, redução do excesso de impurezas e dos teores elevados de substâncias orgânicas;
- Estéticas: correção de odor, cor e sabor; e
- Econômicas: redução de dureza, corrosividade, turbidez, cor, ferro, manganês, sabor e odor.

No caso do abastecimento público de água em território brasileiro, a Portaria N° 2.914, de 12 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde, dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água e seus padrões de potabilidade, incluindo parâmetros de controle de eficiência de filtros, dada a importância dessas unidades no tratamento de água de abastecimento (BRASIL, 2011). De acordo com as propriedades da água bruta e os parâmetros constantes na referida portaria, o projetista planejará os processos e operações unitárias que devem compor a Estação de Tratamento de Água (ETA), considerando no mínimo, aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

## 2.2 PROCESSO DE FILTRAÇÃO

Segundo a *American Water Works Association – AWWA* (1971), filtração é o processo de passagem de um fluido através de um meio poroso para remoção de matéria em suspensão. No processo de tratamento de água, a matéria a ser removida inclui sedimentos em suspensão, argila, coloides, além de microrganismos, como algas, bactérias e vírus. Além da filtração, de acordo com Ahsan (1995), a floculação e a sedimentação podem ocorrer simultaneamente durante o fluxo da água através de um meio granular e dessa combinação resulta o

desempenho do meio filtrante nessa etapa.

No que se refere ao tratamento de água para abastecimento, a filtração se constitui na etapa que tem como função primordial a remoção das partículas responsáveis pela cor e turbidez, cuja presença reduziria a eficácia da etapa de desinfecção, que por sua vez tem a função de inativação dos micro-organismos patogênicos. Em estações de tratamento de água convencionais, cabe à filtração provavelmente o papel mais relevante, por se constituir na etapa em que as falhas – eventualmente ocorridas na coagulação, floculação e sedimentação/flotação – podem ser corrigidas, assegurando a qualidade da água tratada (LIBÂNIO, 2008). Moran et al. (1993) afirmam que é necessário submeter a água a um processo de filtração eficiente para a remoção de contaminantes biológicos que são resistentes à desinfecção, tais como cistos de *Giardia*, oocistos de *Cryptosporidium* e vírus entéricos.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a descrição quantitativa da filtração abrange formulações matemáticas dos mecanismos envolvidos na retenção de partículas no meio granular. Esses modelos têm sido aplicados sem eficácia no que se refere à previsão do comportamento da filtração, motivo pelo qual, hoje, é necessária a combinação da análise teórica com os resultados de pesquisas para o projeto e operação de filtros de uma estação de tratamento de água.

Na filtração ocorre não somente uma ação mecânica de coar a água, mas também processos químicos de oxidação, ações biológicas e de ordem bioquímica. O cascalho fino e a areia, dispostos em camadas conforme granulação minuciosamente estabelecida, compõem o material majoritariamente utilizado, por ser eficiente e de baixo custo. Empregam-se também filtros de antracito e areia e, em alguns casos, filtros de carvão ativado, que potencializam a eliminação de odor, cor, cloro, entre outros (MACINTYRE, 1991).

A eficiência da filtração está relacionada às características da suspensão (tipo, tamanho e massa específica das partículas, resistência das partículas às forças de cisalhamento, temperatura da água, concentração de partículas, potencial Zeta, pH da água), às características do meio filtrante (tipo de material granular, tamanho efetivo, tamanho do maior e menor grão, coeficiente de desuniformidade, massa específica do material granular, espessura da camada filtrante) e características hidráulicas (taxa de filtração, carga hidráulica disponível, método de controle) (DI BERNARDO, 1993).

Segundo Di Bernardo et al. (2003), a retenção de impurezas no processo de filtração é considerada o resultado de dois mecanismos

distintos e complementares: o transporte e a aderência. Primeiramente, as partículas devem se aproximar das superfícies dos grãos do leito filtrante e, após, têm de permanecer aderidas a esses de forma a resistir às forças de cisalhamento ocasionadas pelas características hidrodinâmicas do fluxo ao longo da camada filtrante. Os mecanismos de transporte sofrem influência, majoritariamente, das características físicas e químicas do afluente, do pré-tratamento químico, da taxa de filtração, do leito filtrante e do método de operação. Tem-se, entre os mecanismos de transporte geralmente apontado para explicar a aproximação das impurezas aos grãos do leito filtrante, os seguintes: impacto inercial, interceptação, sedimentação, difusão e ação hidrodinâmica.

Se próximas à superfície dos grãos (coletores) da camada filtrante, as partículas são retidas e aderem-se a esses por intermédio de mecanismos de aderência. A eficiência da aderência entre impurezas transportadas e grãos depende especialmente das propriedades das superfícies de ambos. Podem as partículas aderir propriamente às superfícies dos grãos ou a partículas anteriormente aderidas. Atribui-se a aderência a duas categorias de fenômenos: interação entre as forças elétricas e as de Van der Waals, e interação superficial de origem química (DI BERNARDO, 1993).

Macintyre (1991) destaca que no projeto de filtros em uma estação de tratamento de água, deve-se atentar ainda às condições hidráulicas previstas no dimensionamento dos mesmos, envolvendo a carga hidráulica disponível e a taxa de filtração de forma que resultem carreiras de filtração com duração aceitável e produção de água com pequena quantidade de impurezas, com o objetivo de que a desinfecção final seja realizada de forma satisfatória.

Segundo Leme (1990), os filtros se classificam da seguinte forma:

a) De acordo com o tipo de material do meio filtrante:

- Areia;
- Carvão ou antracito;
- Carvão e areia;
- Carvão, areia e granada;
- Terra diatomácea.

b) Conforme a disposição do material filtrante no leito:

- Em camadas superiores de areia com granulometrias diferentes (um só meio filtrante);

- Em camadas superpostas de areia e carvão, com granulometrias diferentes;
  - Em camadas de areia, carvão e granada com granulometrias diferentes (meio de múltiplas camadas);
  - De carvão, areia e granada misturados (meio misturado).
- c) De acordo com o sentido do escoamento da água:
- Escoamento descendente;
  - Escoamento ascendente;
  - Escoamento nos dois sentidos (bifluxo).
- d) De acordo com a taxa ou velocidade de filtração:
- Lentos (menores valores de vazão de água tratada por unidade de área de filtro, em geral até  $6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ );
  - Rápidos (com taxa de filtração acima de  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ );
  - De taxas elevadas (superiores às do filtro rápido).
- e) Conforme a pressão existente:
- Depressão ou com a superfície sob pressão;
  - De gravidade ou com a superfície livre.

## 2.3 MATERIAL FILTRANTE

O meio filtrante e a taxa de filtração guardam entre si relação intrínseca. Definindo-se um desses, estabelece-se o outro. Provavelmente, a característica proeminente dos meios filtrantes relaciona-se ao tamanho e distribuição dos grãos e dois parâmetros são comumente utilizados para caracterizar o conjunto dos mesmos: o tamanho efetivo e o coeficiente de desuniformidade (ou uniformidade, segundo alguns autores). O primeiro se refere ao diâmetro da peneira que permite a passagem de 10% em peso de uma amostra de grãos. O segundo é composto pelo quociente entre o diâmetro da peneira que admite a passagem de 60% em peso da mesma amostra e o seu tamanho efetivo ( $C_d=d_{60}/d_{10}$ ), ou seja, é adimensional e indica o quão desuniforme é o meio filtrante (LIBÂNIO, 2008).

A areia, os seixos e o antracito são especificados de acordo com suas características granulométricas. A areia deve ser constituída essencialmente de quartzo, resultantes da desagregação ou decomposição de rochas que possuam em sua composição em torno de 99% de sílica, e apresentar massa específica de 2,5 a 2,7  $\text{t}/\text{m}^3$ . Deve ser

fornecida em sacos de cerca de 50 kg, resistentes ao manuseio, transporte e armazenamento. A inspeção do material é realizada no local de produção, sendo o número de sacos examinados dependente da quantidade a ser adquirida. Quanto ao tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade, são admitidos, na prática, desvios máximos de 5% em relação ao especificado pelo projetista. Já os seixos são fragmentos de rochas, arredondados, encontrados em leitos de rios ou em jazidas, cujos tamanhos variam na faixa de 2 a 50 mm. Geralmente são fornecidos em sacos de 50 kg, os quais devem ter resistência ao manuseio, transporte e armazenamento, além de possuir a indicação de seus tamanhos. Sua massa específica deve ser maior ou igual a 2,5 t/m<sup>3</sup> e no máximo 8%, em massa, pode ter tamanho maior ou menor que os limites especificados (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

O antracito nacional, geralmente, provém do Estado de Santa Catarina, e possui propriedades com valores diferentes dos importados e encontrados em algumas estações de tratamento de água no Brasil. A Tabela 1 apresenta algumas das principais características do carvão antracitoso produzido no Brasil. Atenção especial deve ser dada ao parâmetro dureza, já que uma menor resistência dos grãos aos efeitos abrasivos durante a lavagem dos filtros provoca problemas como perda de material fino durante a lavagem, passagem desse junto ao filtrado, redução da granulometria da camada de carvão e redução da duração da carreira de filtração, entre outros (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Tabela 1 - Características do carvão antracitoso brasileiro

<b>Característica</b>	<b>Faixa de valores</b>
Umidade (%)	2 a 5
Massa específica dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	1,4 a 1,7
Massa específica aparente ou do meio granular (g/cm <sup>3</sup> )	0,8 a 0,9
Porosidade do meio filtrante limpo (%)	45 a 55
Coeficiente de desuniformidade	1,5 a 2,0
Tamanho efetivo (mm)	0,9 a 1,2
Coeficiente de esfericidade	0,55 a 0,70
Dureza na Escala Mohs	> 2,5

Fonte: Adaptado de Di Bernardo e Dantas (2005).

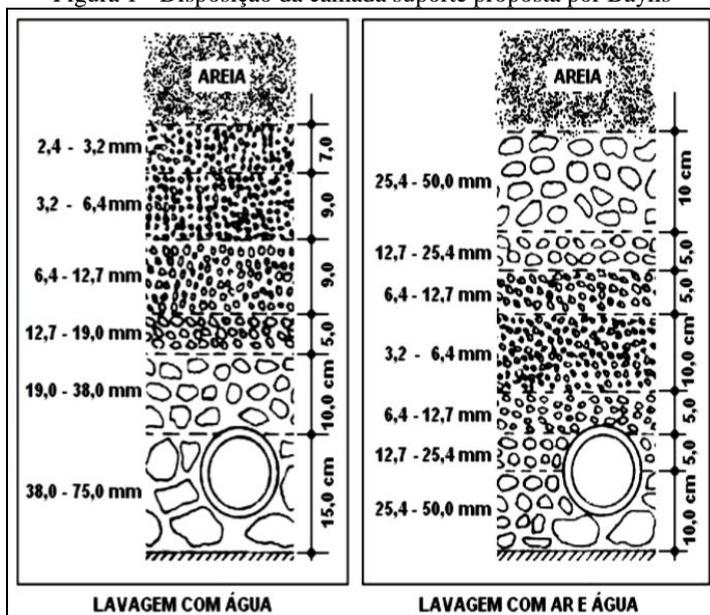
## 2.4 CAMADA SUPORTE

A principal função da camada suporte está em evitar que grãos do meio filtrante passem através dos orifícios dos dispositivos de coleta de

água filtrada e sejam carreadas junto ao efluente. Somam-se a essa função, no caso de filtros rápidos, a adequada distribuição da água e lavagem e, para unidades de escoamento ascendente, ainda, a retenção de partículas (LIBÂNIO, 2008).

A camada suporte é em geral constituída de seixos rolados ou pedregulhos. Há uma relação entre o tamanho dos seixos e a espessura da subcamada em questão, cujos tamanhos comumente diminuem a partir do fundo, configuração que pode gerar caminhos preferenciais e desarranjo das camadas superiores, além da formação de bolas de lodo (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Para se evitar tais problemas, Baylis (1959) sugeriu que os tamanhos dos seixos diminuam a partir do fundo e, em seguida, aumentem de tamanho. A Figura 1 ilustra tal configuração, no caso de lavagem apenas com água e de lavagem com ar e água. O objetivo é evitar problemas relacionados à mistura do pedregulho mais fino com a areia ou até mesmo o carreamento de pedregulho para o topo da camada filtrante.

Figura 1 - Disposição da camada suporte proposta por Baylis



Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005).

A camada suporte, no caso de filtros ascendentes, é a região do filtro onde se inicia a retenção das impurezas. Estudos recentes têm

mostrado sua importância no prolongamento da duração das carreiras quando são realizadas descargas de fundo intermediárias. Tem-se constatado que a perda de carga nessa região atinge valores da ordem de 30% a 70% da perda de carga total no filtro. Portanto, a camada suporte desempenha papel semelhante à de um pré-filtro. Portanto, com a adequada escolha granulométrica para essa camada pode-se proporcionar ganhos significativos em termos de duração das carreiras de filtração, principalmente com a realização de descargas de fundo intermediárias (DI BERNARDO, 2003).

## 2.5 FUNDO DE FILTROS

Os fundos de filtros são classificados em três grupos: tubulações perfuradas, fundos falsos e placas porosas. Entre os fundos falsos, destacam-se as vigas tipo Californiana ou em forma de V invertido, com bocais e blocos especiais de polietileno. As placas porosas raramente são utilizadas no Brasil, por apresentarem facilmente problemas de colmatação (DI BERNARDO, 2003).

### 2.5.1 Tubulações perfuradas

Os tubos perfurados, geralmente em PVC, predominam em unidades de filtração lenta e nas estações de menor porte, pelo menor custo e simplicidade de construção (LIBÂNIO, 2008).

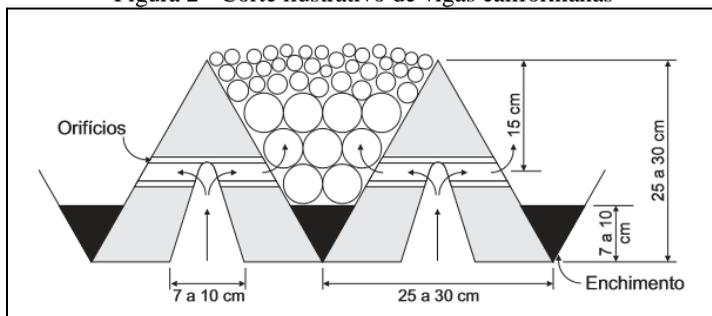
Esse sistema é composto de um duto principal do qual partem tubulações secundárias (laterais). A camada suporte pode ser configurada de maneira semelhante ao mostrado na Figura 1. Os orifícios dos tubos laterais e principal têm diâmetro entre 6,4 e 19,0 mm, sendo espaçados de 5 a 20 cm e devem ser projetados em função da perda de carga durante a lavagem com água, de forma a resultar entre 0,6 e 1,0 m em cada lateral, de forma a distribuir uniformemente a água para lavagem, o somatório da área dos orifícios deve ser inferior a cerca de 40% da área de sua seção transversal (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

### 2.5.2 Fundo falso com vigas em V

Este tipo de fundo é constituído de vigas em forma de V invertido, também chamado de fundo Californiano. Tem-se observado atualmente modificações dessas vigas (no formato, altura e largura), porém as mesmas devem sempre suportar seu peso e o do material

granular. Impede-se a permanência de ar sob as vigas com orifícios na parte superior de seus vãos, enquanto orifícios em posições inferiores têm a função de distribuir água para lavagem e de coletar água filtrada, conforme o caso (DI BERNARDO E DANTAS, 2005). O preenchimento de concreto entre vigas deve ser muito bem feito, de forma a evitar possíveis passagens de água ou ar, o que pode provocar o rompimento do fundo falso (DI BERNARDO, 2003). Este tipo de fundo de filtro é normalmente pré-fabricado e instalado conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Corte ilustrativo de vigas californianas



Fonte: Di Bernardo (2003).

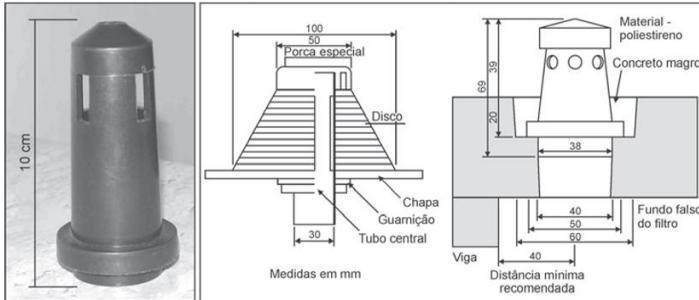
### 2.5.3 Fundo falso com bocais

O fundo falso com bocais consiste em uma laje assentada 30 a 60 cm acima do fundo do filtro e podem também ser utilizados para lavagem auxiliar com ar. Os bocais, geralmente em PVC ou nylon, podem possuir orifícios ou ranhuras, no último caso, com dimensões tão reduzidas que podem tornar a camada suporte um item prescindível (LIBÂNIO, 2008).

De acordo com o método de lavagem, os bocais podem ser simples, quando se tem lavagem apenas com água, ou especiais, quando distribuem ar e água. Os bocais simples são geralmente dispostos a cerca de 20 cm de distância entre si, decorrendo em, aproximadamente, 20 a 26 unidades por metro quadrado. No caso de bocais especiais, os mesmos são distribuídos com uma distância entre si de 10 a 12 cm, resultando em cerca de 50 a 60 unidades por metro quadrado (DI BERNARDO E DANTAS, 2005). O fundo falso de filtros que possuem bocais especiais deve ser provido de inspeção e, nestes casos, a altura do fundo falso geralmente é maior que aquela dos bocais simples, já que

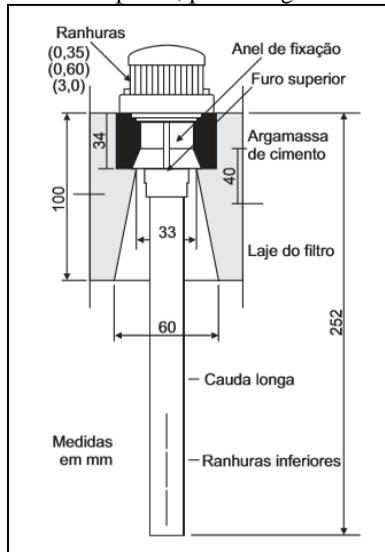
são dotados de um pequeno tubo que desce certa distância abaixo da laje do fundo falso. Nesse pequeno tubo há ranhuras, ou furos, por onde o ar pode entrar (DI BERNARDO, 2003). Na Figura 03 são mostrados dois modelos de bocais simples, um com ranhuras e outro com orifícios. A Figura 04 apresenta o desenho de um bocal especial.

Figura 3 - Bocais simples



Fonte: Di Bernardo (2003).

Figura 4 - Bocal especial, para lavagem com ar e água.



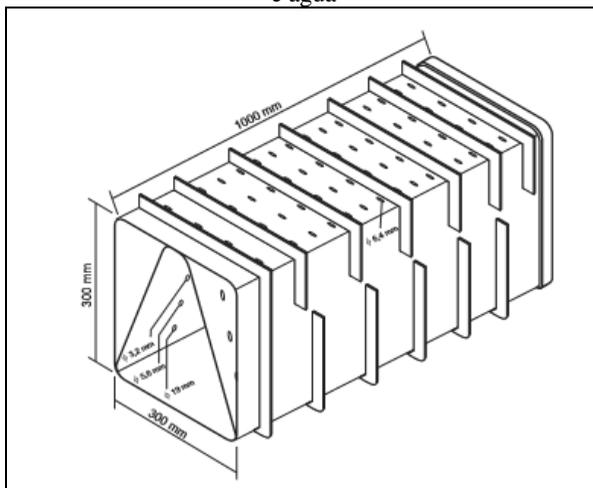
Fonte: Di Bernardo (2003).

#### 2.5.4 Blocos distribuidores

Blocos distribuidores são constituídos por dutos paralelos com o

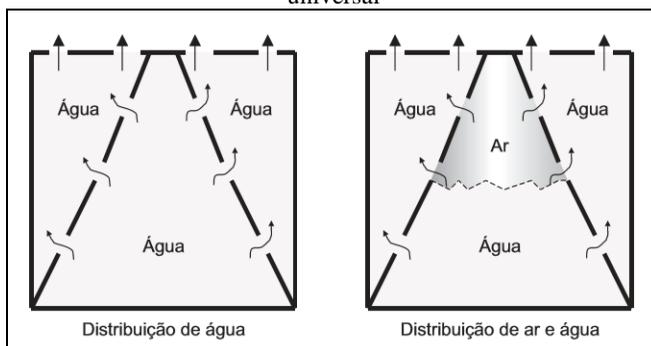
objetivo de aprimorar as condições de distribuição da água de lavagem. Há dois tipos básicos empregados no Brasil: a) bloco de cerâmica, destinado à lavagem somente com água; b) bloco de polietileno, também chamado de bloco universal ou tipo *Leopold*, utilizado para lavagem com ar e água ou apenas com água (DI BERNARDO E DANTAS, 2005). A Figura 5 ilustra o bloco tipo *Leopold* e a Figura 6 ilustra os esquemas do escoamento do bloco funcionando somente com água e com ar e água.

Figura 5 - Bloco de polietileno tipo *Leopold*, empregado para lavagem com ar e água



Fonte: Di Bernardo, 2003.

Figura 6 - Esquema da distribuição de água e ar juntamente com água no bloco universal



Fonte: Di Bernardo, 2003.

## 2.6 LAVAGEM DOS FILTROS

Conforme Richter e Azevedo Neto (1991), um ciclo de operação do filtro finaliza-se devido à perda de carga se elevar de modo que o mesmo perde a capacidade de produzir água na taxa almejada, ou em razão de, em virtude da ocorrência de rompimentos de flocos, a sua eficiência quanto à qualidade da água filtrada se reduz. Então, o filtro necessita ser lavado. Di Bernardo e Dantas (2005) ressaltam que a lavagem inapropriada dos filtros apresenta problemas diversos, como: desenvolvimento de bolas de lodo no interior do meio filtrante; menor volume de água produzido por carreira de filtração; filtrado de pior qualidade; e aumento da perda de carga no leito filtrante.

De acordo com Richter e Azevedo Netto (1991), em geral os filtros rápidos são lavados por fluxo no sentido ascendente, com uma vazão capaz de assegurar uma expansão adequada do leito filtrante. Essa expansão não deve ser baixa e nem elevada para não reduzir o orçamento dos grãos e aumentar a perda de material. Geralmente se consideram expansões entre 25 e 50% como satisfatórias, sendo 40% um valor comum. A velocidade ascensional da água para lavagem deve ser determinada através da granulometria do material filtrante empregado e da temperatura da água. Não se recomenda atualmente velocidades inferiores a 0,80 m/min, embora os filtros possam ser lavados com velocidades menores. Após o cálculo da velocidade ascensional calcula-se a vazão necessária tomando-se para isso a área do filtro a ser lavado e então com esta vazão calcula-se o tamanho do reservatório que será a quantidade de água necessária com esta vazão em um tempo de 6,5 minutos.

A drenagem da água de lavagem dos filtros é realizada por meio de calhas que devem ter sua altura definida em projeto de modo que se evite fuga do material filtrante durante a lavagem e para uma apropriada remoção das impurezas retidas. Sua altura é calculada dependendo da expansão que se definiu para o meio filtrante e recomenda-se uma altura mínima de 60 cm do leito filtrante para o fundo da calha de coleta (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991). Geralmente, a coleta de água de lavagem é efetuada por meio de calhas que descarregam livremente em um canal frontal, lateral ou central, onde há a comporta de descarga. Tais calhas podem ser de concreto, executadas no local ou pré-moldadas, ou feitas de resinas, com diferentes seções transversais (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A lavagem com água e ar é uma opção e tem sido empregada por propiciar uma lavagem mais uniforme; completa, com conservação do

meio filtrante; menor consumo de água para lavagem; eliminação do problema de localização ou de duplicidade de lavagem superficial nos filtros de dupla camada; eliminação dos problemas mecânicos da lavagem superficial com torniquetes e dos problemas de travancamento que ocorrem no caso de sistema fixo; redução da altura da camada suporte quando existente (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991). Di Bernardo e Dantas (2005) ressaltam que a lavagem com ar e água é, indubitavelmente, a mais eficiente, devendo sempre que possível ser adotada nos filtros.

No caso da filtração ascendente, principalmente se for filtração direta, o filtro deve ter fundo e sistema de drenagem apropriada, camada de pedregulho adequada e meio filtrante constituído unicamente de areia. Na camada de pedregulho já ocorre processo de filtração e há formação intensa de flocos, removendo boa parte das impurezas. Devido às dificuldades na retirada das impurezas do interior da camada de pedregulho, torna-se fundamental a execução de descarga de fundo intermediária antes da lavagem do filtro (DI BERNARDO, 2003).

## 2.7 FILTROS DE FLUXO DESCENDENTE

Filtros descendentes de camada simples foram os primeiros a serem utilizados em estações para abastecimento público. Hoje, quase que exclusivamente são empregados em estações convencionais e constituem o tipo de unidade filtrante mais utilizado no país, mesmo que o volume de água produzido por filtros de camada dupla deva ser superior, pela prevalência em estações de médio e grande porte. Em idênticas condições de operação, essas unidades apresentam carreiras de filtração menores se comparadas a filtros de camada dupla ou de escoamento ascendente. Isso ocorre, pois, como a água a ser filtrada escoar primeiramente através das partículas menores do leito filtrante, as impurezas tendem a ser retidas logo no topo do mesmo, colmatando o filtro de maneira mais rápida (LIBÂNIO, 2008).

Em filtros de escoamento descendente, a pressão em qualquer ponto do meio filtrante será a altura da água até a superfície livre (a parcela dessa altura relativa ao sobrenadante eleva-se com o evoluir da carreira) subtraída da perda de carga. Caso a perda de carga seja maior que essa altura d'água, ocorrerá pressão negativa no interior da camada filtrante. Se a pressão absoluta nesse ponto for inferior à pressão de vapor da água, haverá desprendimento do ar dissolvido formando bolhas que irão favorecer o desenvolvimento de caminhos preferenciais no interior do meio filtrante, pelo aumento da velocidade intersticial na

vizinhança, e a consequente ocorrência do transpasse. Tal fenômeno pode ser evitado pelo encerramento da carreira antes de elevação tão significativa da perda de carga e com a construção de um vertedor na saída do filtrado cuja crista seja locada acima do topo da camada filtrante, assegurando a submergência dessa última (LIBÂNIO, 2008).

No filtro descendente, todas as partículas removidas da água ficam retidas no meio filtrante (a água não passa pela camada suporte anteriormente), assim, é muito importante que as impurezas sejam distribuídas em profundidade, com o objetivo de obter carreira de filtração com duração razoável. Por isso, principalmente na filtração direta descendente (FDD), são empregadas unidades de dupla ou mesmo tripla camada filtrante, de forma a possibilitar a filtração em profundidade (DI BERNARDO, 2003).

## 2.8 FILTROS DE FLUXO ASCENDENTE

A ideia da filtração ascendente não é tão nova. Segundo Hamann e Mckinney (1968), em 1827 em Greenock, Escócia, foi construída a primeira instalação municipal utilizando a filtração ascendente. Mas conforme Calise e Homer (1958), foi a partir da metade do século XX que um grande impulso foi dado pelos soviéticos, que desenvolveram os chamados “clarificadores de contato”, ou filtros russos, atingindo qualidade do filtrado similar à de estações de ciclo completo. No Brasil, a primeira experiência com esse filtro foi realizada em 1971, por Grinplasht, na cidade de Colatina (ES), onde o afluyente ao filtro com escoamento ascendente podia ser água coagulada ou decantada, em função da turbidez da água bruta. As pesquisas sobre a filtração direta ascendente (FDA) iniciaram, no Brasil, somente em 1977, especialmente na ESSC-USP (Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo), com o objetivo de estudar aspectos teóricos e práticos e aprimorar essa tecnologia (DI BERNARDO, 1993).

Richter e Azevedo Netto (1991) afirmam que, também conhecidos como filtros russos ou clarificadores de contato, os filtros de regime ascendente foram largamente utilizados na antiga União Soviética, com a função de clarificar águas de baixa turbidez e matéria mineral. Essa variação de filtro fora originalmente utilizada como unidade completa de clarificação, isto é, recebendo água bruta coagulada, sem passar por floculadores ou decantadores. O efluente obtido é diretamente enviado para a desinfecção e reservação/distribuição. Enquanto a água coagulada atravessa a camada filtrante, as impurezas passam a ser em parte retidas e em parte

deslocadas na forma de flocos, de uma subcamada para a subsequente, o que acarreta uma retenção e uma nova locomoção parcial. Na camada filtrante ocorrem dois processos ao mesmo tempo:

- A remoção de impurezas da água e sua aderência aos grãos do meio poroso, por efeito de forças moleculares de adesão; e
- Desprendimento de partículas previamente presas (fracamente aderidas) e sua locomoção, causado pelas forças hidrodinâmicas de escoamento pelo aumento de velocidade.

Ao predominar o primeiro processo, a água é clarificada (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991).

Observa-se, então, que no filtro ascendente, toda a camada filtrante trabalha no processo de clarificação e que a acumulação de impurezas não acontece apenas na primeira porção do leito filtrante em contato com a água a ser filtrada (subcamada inferior). Com tal disposição do meio filtrante relativa ao sentido do fluxo da água, a mesma passa primeiramente pelo material mais grosseiro, de maior porosidade. Conforme a água se livra das impurezas, no seu movimento de baixo pra cima, vai passando por meios cada vez mais finos e de menor porosidade (DI BERNARDO, 2003).

O emprego da filtração direta ascendente (FDA) foi bem-sucedido em vários países, destacando-se entre eles a ex-União Soviética, Inglaterra e Holanda, e nos últimos 20 anos vem sendo utilizada principalmente no Brasil. Nos anos 80 e 90, vários estudos foram desenvolvidos pelo prof. Luiz Di Bernardo e colaboradores, de forma a tornar essa tecnologia ainda mais promissora pela técnica de descargas de fundo intermediárias. Na filtração direta, 100% dos sólidos removidos são retidos no filtro e, assim, para proporcionar carreira de filtração adequada ( $\geq 24$  horas), a camada filtrante deve ser bastante espessa (de 1,6 a 2,0 m) (DI BERNARDO, 2003).

Segundo Richter e Azevedo Netto (1991), os filtros de fluxo ascendente têm como desvantagem o fato de que quando a perda de carga, em um nível qualquer do meio filtrante, ultrapassa o peso da camada submergida acima desse nível, o meio se fluidifica e permite que flocos anteriormente depositados saiam junto ao efluente. Devido ao fato descrito, tem-se buscado alternativas para assegurar melhores resultados no uso dos filtros de fluxo ascendentes, ou seja, evitar a fluidificação da camada filtrante. Para prevenir tal inconveniente, foram sugeridas duas soluções, além da limitação e controle da perda de carga:

- Na Holanda foi desenvolvido o filtro chamado Immedium, que conta com uma grelha junto ao topo do material filtrante, com o objetivo

de mantê-lo em posição;

- Na extinta URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas) foi adotado, em alguns casos, o sistema A.K.X., em que uma parcela da vazão é aplicada acima da camada filtrante, e a água clarificada é drenada no interior dessa camada, pouco abaixo da superfície. A.K.X. é como também se denomina o filtro bifluxo.

## 2.9 FILTROS BIFLUXOS

### 2.9.1 Descrição básica de funcionamento

Assim como em filtros convencionais, no filtro bifluxo o meio filtrante é disposto com material de granulação maior na sua porção inferior. O processo de filtração ocorre em fluxo ascendente, o que proporciona uma remoção progressiva das impurezas e um emprego total da camada filtrante. Partículas anteriormente adsorvidas e que eventualmente se locomovem de baixo para cima pela corrente de água são retidas nas subcamadas superiores, de material menos poroso, o que possibilita uma alta taxa de percolação. No filtro bifluxo, a compactação da camada filtrante durante sua operação se dá pela aplicação de uma parcela da vazão no sentido descendente. A coleta da água filtrada é realizada no interior do meio filtrante de menor granulação, por meio de drenos projetados para esse fim. A camada sobre os drenos de água filtrada opera como um filtro convencional, de fluxo descendente, mas sua atribuição principal é a de manter a espessa camada filtrante inferior, a qual opera em fluxo ascendente, compactada. A lavagem do filtro pode ocorrer de modo convencional, utilizando fluxo ascendente, fluidizando o leito filtrante e fazendo com que as partículas retidas no meio poroso se desprendam e saiam junto à água de lavagem (MACINTYRE, 1991).

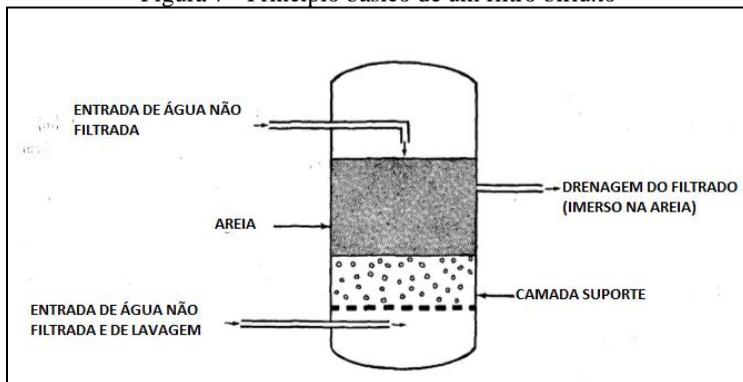
Segundo Leme (1990), quando a água não filtrada é proveniente da mesma fonte, a perda de carga existente através das seções superior e inferior é a mesma. Conseqüentemente, as vazões existentes através das duas seções são diferentes, embora se consiga manter uma vazão total constante para o dreno da água filtrada. Conforme os poros são obstruídos, iguais perdas de carga se mantêm através das duas seções, em virtude do autoajustamento da vazão entre essas seções. Se, por exemplo, a camada superior mais fina tende a se tornar obstruída mais rapidamente, ocorre automaticamente uma redução na sua vazão de escoamento e um conseqüente aumento de carga para a seção inferior, cujo escoamento é ascendente. Acrescenta-se que, em essência, as partes inferior e do topo do filtro constituem dois filtros independentes,

possibilitando uma economia na estrutura e sistema de drenagem.

No caso de se usar apenas areia como material filtrante, a taxa de filtração descendente no início de uma carreira de filtração bifluxo é relativamente alta. Conforme a carreira progride, no entanto, o fluxo via sentido descendente passa a diminuir à medida que a porção de areia fina torna-se obstruída. Se o fluxo total ocorre a uma taxa constante, a quantidade de água que é filtrada por fluxo ascendente através da porção inferior do filtro aumenta com o tempo. Entupimento não afeta tanto a perda de carga nesta parte do filtro como na parte superior (fluxo descendente). A uma dada perda de carga, uma quantidade maior de água pode ser filtrada através do filtro de fundo (fluxo ascendente). A média de saída do filtrado pela parte superior do filtro é normalmente de 20 a 30 por cento do total (HAMANN; MCKINNEY, 1968)

Um esquema básico de operação de um filtro bifluxo pode ser visualizado na Figura 7 na seqüência:

Figura 7 - Princípio básico de um filtro bifluxo



Fonte: Ray, 1974 (adaptado).

A literatura indica que a filtragem bifluxo foi patenteada por uma indústria de filtros britânica em 1918, mas foi a partir de 1950 que essa modalidade de filtração passou a ser utilizada para tratamento de água municipal e industrial (HAMANN; MCKINNEY, 1968).

### 2.9.2 Aspectos de projeto

Hamann e Mckinney (1968) especificaram alguns critérios de projeto dos filtros bifluxo empregados na extinta URSS à época, conforme a Tabela 2:

Tabela 2 - Aspectos de projeto do filtro bifluxo, por Hamman e Mckinney (1968)

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição ou Faixa de Valores</b>
Material filtrante	Areia
Profundidade do leito filtrante	1,50 a 1,65 m
Taxa de filtração do fluxo descendente	120 a 150 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia
Taxa de filtração do fluxo ascendente	180 a 210 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia
Taxa de filtração total	300 a 360 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia
Localização do sistema de coleta do filtrado	0,45 a 0,60 m abaixo do limite superior da areia
Composição do sistema de coleta do filtrado	Tubos de plástico vinílico com fendas
Operação da retrolavagem	Água em fluxo ascendente a uma taxa de 47,5 a 55 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h por 5 a 6 min.

Fonte: Adaptado de Hamman e Mckinney (1968).

Hamann e Mckinney (1968) ressaltaram, ainda, que experiências com filtros tubulares de fluxo ascendente pareceram indicar que uma combinação de ar e água é necessária para limpar a camada filtrante completamente, e que tal fato pode se aplicar a filtros bifluxos.

Arboleda (1973) também elencou algumas especificações dos filtros A.K.X, como tem sido conhecido na Rússia os filtros bifluxos. A maioria dos critérios de projeto descritos é idêntica ao citado por Hamman e Mckinney (1968), exceto a profundidade da camada de areia, que varia de 1,50 a 1,60 m.

Segundo Ray (1974), a retrolavagem no filtro bifluxo é efetuada pela passagem de água de lavagem através da entrada de fluxo ascendente, ou por meio de bicos espaçados na área de fundo, como em geral ocorre em um filtro de gravidade rápido convencional. O meio filtrante no regime de fluxo ascendente se regrada adequadamente durante a retrolavagem; enquanto que no regime de fluxo descendente isso não ocorre de forma tão efetiva. Por esta razão, procura-se filtrar a maior parcela possível da vazão de água não filtrada pelo fluxo ascendente, sem que se prejudique a qualidade do filtrado e o grau de expansão do leito filtrante. É importante que o meio filtrante de fluxo ascendente seja cuidadosamente graduado para assegurar que não ocorra o levantamento de camada prematuramente devido a obstruções localizadas. A prática normal é ter duas ou mais camadas no regime de

fluxo ascendente, graduado de mais graúdo ao mais fino na direção do fluxo. A camada superior do regime de fluxo ascendente é continuada na seção de fluxo descendente para que problemas de mistura não surjam durante a retrolavagem. Ray (1974) também descreve alguns parâmetros importantes de projeto, conforme apresenta a Tabela 3:

Tabela 3 - Aspectos de projeto do Filtro Bifluxo, conforme Ray (1974)

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição ou Faixa de Valores</b>
Tamanho do grão mínimo	0,5 mm
Tamanho do grão máximo	1,5 mm
Tamanho efetivo do grão	0,9 mm
Taxa de filtração	288 – 360 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia
Altura da camada	1,45 – 1,65 m
Relação entre profundidade da porção de fluxo ascendente pela profundidade da porção descendente	Aprox. 3:1

Fonte: Adaptado de Ray (1974).

Vignesan et al. (1983), por fim, também destacam alguns critérios de projeto conforme Tabela 4. Ainda, relacionam e comparam aspectos de projeto e financeiros de filtros convencionais, filtros ascendentes de camada profunda e filtros bifluxos, conforme consta na Tabela 5.

Tabela 4 - Critérios de projeto de Filtro Bifluxo, por Vignesan et al. (1983)

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição ou Faixa de Valores</b>
1. Meio filtrante	
Composição	Areia
Granulometria	0,9 – 1,2 mm
Profundidade	1,5 – 1,7 m
(Filtro de dupla camada com antracito e areia verificado como opção mais recomendada)	
2. Taxa de filtração	
Fluxo descendente	120 – 150 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia
Fluxo ascendente	180 – 210 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia
(Taxa total de filtração pode ser elevada para até 480 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /dia se usada dupla camada filtrante)	
3. Sistema de coleta do filtrado	Localizado entre 0,5 e 0,6 m abaixo do topo da camada
4. Taxa de retrolavagem	47,5 a 55 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h por 5 a 6 min
(Sistema com água e ar é recomendado no caso de emprego de	

dupla camada filtrante)
-------------------------

Fonte: Adaptado de Vignesan et al. (1983).

Tabela 5 - Comparação de critérios de projeto de filtros descendentes convencionais, filtros ascendentes de camada profunda e filtros bifluxos, de acordo com Vignesan et al. (1983)

<b>Parâmetro</b>	<b>Filtro Convencional</b>	<b>Filtro Ascendente de camada profunda</b>	<b>Filtro Bifluxo</b>
1. Taxa de filtração	120 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia	120 – 150 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia	300 – 360 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia
2. Meio filtrante			
- Material	Areia	Areia	Areia/Antracito (recomendado)
- Granulometria	Geralmente Tamanho efetivo: 0,6 mm Coeficiente de Uniformidade: 1,5  (Depende das características da água bruta e qualidade do filtrado)	Areia grossa de 0,9 – 11 mm	Areia: Tamanho efetivo: 0,6 mm Coeficiente de Unif.: 1,5 Antracito: Tamanho efetivo: 0,9 mm Coeficiente de Unif.: 1,5
- Profundidade	Geralmente 1 m (depende da água bruta e da qualidade do filtrado)	2 – 2,5 m	Depende da granulometria, da qualidade da água bruta e do filtrado
- Procedimento de limpeza	Contra fluxo em alta taxa, de água ou água e ar	Contra fluxo em alta taxa, de água ou água e ar	Contra fluxo em alta taxa, de água ou água e ar
3. Lâmina de água sobre o meio filtrante	0,8 – 1,0 m	1,0 m	Sistema de coleta abaixo do topo da camada

<b>Parâmetro</b>	<b>Filtro Convencional</b>	<b>Filtro Ascendente de camada profunda</b>	<b>Filtro Bifluxo</b>
4. Turbidez da água bruta	10 NTU	<80NTU	<80NTU
5. Camada ativa do meio filtrante	Alguns centímetros ao topo da camada	Toda a profundidade da camada	Toda a profundidade da camada
6. Carreira de filtração	Geralmente 24 horas	Acima de 24 horas	Acima de 24 horas
7. Porcentagem da água tratada usada na retrolavagem	3%	Acima do filtro convencional, cerca de 5%	3% ou menos
8. Equipamentos especiais necessários		Aqueles relacionados à retrolavagem com água e ar	Válvulas de controle mais sofisticadas
9. Mão de obra qualificada	Para a operação de retrolavagem	Para a operação de retrolavagem	Para o controle de fluxo e para a operação de retrolavagem
<b>10. Custos de operação e manutenção</b>			
a) Consumo de energia por volume de filtrado	Alto	Baixo (carreira de filtração mais longa)	Mais baixo (carreira de filtração mais longa e taxa de filtração mais elevada)
b) Manutenção de equipamento		Alto	Alto

<b>Parâmetro</b>	<b>Filtro Convencional</b>	<b>Filtro Ascendente de camada profunda</b>	<b>Filtro Bifluxo</b>
c) Custos de operação e manutenção relacionados à retrolavagem		Alto	Igual ou mais baixo
11. Custo de implantação		Pode ser ligeiramente maior que no caso de filtros convencionais, mas o uso de unidades de tratamento antecedentes podem ser eliminadas	15 – 30% menor que em filtros convencionais
12. Custo com produtos químicos		Mesmo do caso de filtros convencionais	

Fonte: Adaptado de Vignesani et al. (1983).

### **2.9.3 Filtro bifluxo de dupla camada filtrante**

A maioria dos filtros bifluxos utiliza apenas areia em ambos os fluxos. Hamann e McKinney (1968) sugeriram a utilização de uma camada de antracito sobre a areia para a parte de escoamento descendente do filtro, de modo a melhorar o filtrado desta parte da unidade.

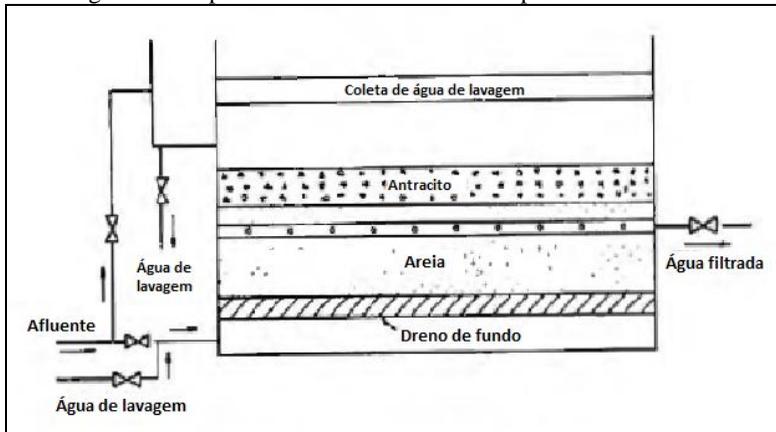
Hamann e McKinney (1968) completam que ao fornecer uma camada de antracito na parte superior do leito filtrante, e mantendo o sistema de coleta de filtrado a certa distância abaixo do topo da camada de areia, o filtro superior pode ser operado como um filtro de dupla camada, com o fluxo passando por material mais poroso primeiramente. Esta inovação tende a proporcionar um melhor equilíbrio de fluxo entre as partes superior e inferior do filtro e deve resultar numa melhoria da qualidade do filtrado.

O emprego da dupla camada filtrante deve também aumentar substancialmente a taxa de filtração total da unidade. O uso de polímeros auxiliares à filtração seria útil em determinados casos e pode ser uma necessidade para se operar a taxas elevadas de filtração. Com condicionamento adequado da água bruta, acredita-se que um filtro bifluxo de dupla camada poderia ser operado a taxas de filtração de 480 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia ou superior, com a mesma margem de segurança tal como existe em filtros de gravidade de dupla camada em uso (HAMANN; MCKINNEY, 1968).

Ray (1974) relata que testes na então U.R.S.S. com o objetivo de aumentar a taxa de filtração viável em filtros bifluxo acrescentando à parte superior da camada de escoamento descendente uma camada de antracito foram efetuados com sucesso, e tais filtros foram aplicados na prática. Verificou-se, ainda, ser possível alcançar aceitavelmente uma taxa de filtração de 360 a 430 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia, mantendo-se os padrões de qualidade do filtrado na faixa de valores aceitáveis. Em tais instalações, a força descendente que resiste à fluidificação é reduzida porque em primeiro lugar o antracito é mais leve do que a areia substituída, e em segundo lugar o arraste para baixo é menor. Por conseguinte, é possível e necessário aumentar a taxa de filtração no regime de fluxo descendente, apesar de que o aumento do rendimento global é pequeno uma vez que o regime de fluxo ascendente executa a maior contribuição.

Vignesan et al. (1983) afirmam que se apenas areia compõe a camada filtrante do filtro bifluxo, a taxa do fluxo descendente decresceria mais rapidamente conforme a carreira de filtração decorre, devido à obstrução localizada junto aos grãos mais finos do material. Para contornar esse problema, o autor também sugere o uso de uma camada de antracito sobre a areia da camada de fluxo descendente. Essa modificação melhoraria o filtrado da camada superior da unidade. Um esquema do filtro bifluxo de dupla camada é mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Proposta de Filtro Bifluxo com dupla camada filtrante



Fonte: Adaptado de Vignesan et al. (1983).

#### 2.9.4 Perspectivas, vantagens e desvantagens

Alpe e Barrett (1971) relatam que à época, cerca de 14.000 L/s de água eram purificados por filtros bifluxos para uso em sistemas de abastecimento municipal em território soviético.

Hamann e McKinney (1968) afirmam que apesar de não terem realizado experiências com tal modalidade de filtração, consideram que o processo definitivamente parece ter potencial. Ressaltam, ainda, que o filtro bifluxo apresenta como vantagem sua maior capacidade de filtração. Dessa forma, por exemplo, o mesmo poderia ser operado com a mesma taxa de um filtro convencional, resultando em carreiras mais longas, ou ser operado a taxas mais elevadas, requerendo menor área do que com a filtração convencional. Os custos iniciais de tais filtros são estimados em 15 a 30 por cento menos do que para os filtros convencionais na União Soviética, apesar de tubulações, válvulas e controles serem considerados mais complexos. Uma análise criteriosa, sem dúvida, deve ser voltada à configuração do sistema de drenagem de filtrado e ao processo de lavagem do filtro. Experiências com os filtros piloto de fluxo ascendente parecem indicar que uma combinação de ar e água é necessária para limpar a camada filtrante completamente. Os autores concluem que o processo de filtração bifluxo parece combinar as vantagens de ambos o fluxo ascendente e o de gravidade convencional e que mais pesquisas são necessárias para demonstrar as vantagens desse processo.

Ray (1974) também menciona ser possível, com a utilização de filtros bifluxos, operar a taxas que fornecem uma economia de 15 a 30% em custos de implantação, assim como há possibilidade de se reduzir a dose de coagulante em comparação ao caso do emprego de filtros descendentes convencionais.

Vignesan et al. (1983) destacaram, além da mesma faixa de economia nos custos iniciais supracitados, a vantagem dos filtros bifluxos operarem a uma elevada taxa de filtração, reduzindo a área necessária para as unidades de filtração, especialmente quando opera com dupla camada e quando recebe água não filtrada com condições próprias. Os autores salientaram como desvantagens do uso do filtro bifluxo o fato de que seu sistema de coleta do filtrado, o qual consiste em geral em tubos perfurados de plástico de vinil, vinha sendo problemático e estando sujeito à obstrução. Além disso, seu sistema mais sofisticado de válvulas e controles poderia limitar seu uso em países em desenvolvimento.

Como conclusão em seu trabalho, Vignesan et al. (1983) alegam que as aplicações de filtros bifluxo na Holanda, Reino Unido e União Soviética, além de duas instalações em Cingapura, indicavam ser este tipo de filtro uma solução econômica, podendo ser uma opção efetiva nos casos em que custo é um fator importante.

Di Bernardo e Dantas (2005), ao tecerem algumas considerações sobre o filtro A.K.X., ou bifluxo, ressaltam que a maior dificuldade apresentada pelo sistema é de caráter operacional, em razão da obstrução nos bocais de coleta do filtrado, fato constatado pela sua aplicação em várias cidades soviéticas.

Como perspectiva, conforme descrito no item anterior, Hamann e Mckinney (1968), Ray (1974) e Vignesan et al. (1983) recomendam o emprego de uma camada de antracito sobre a camada de areia, fazendo com que a porção superior do filtro opere como filtro de dupla camada. Tal configuração deve aumentar a taxa de filtração da unidade como um todo e melhorar a qualidade do filtrado da fração da unidade que efetua a filtração descendente.

### **2.9.5 Abordagem dos principais critérios de projeto de filtros rápidos bifluxos**

Relacionam-se no item 2.9.5.1 os principais critérios considerados convenientes ou desfavoráveis, de acordo com a revisão bibliográfica. No item 2.9.5.2 são elencadas considerações de projeto de acordo com as descrições dos três principais trabalhos consultados

voltados especificamente para filtros rápidos bifluxos, com exceção dos já destacados no item antecedente.

### 2.9.5.1 Critérios vantajosos e não vantajosos relatados

De acordo com as descrições encontradas em literatura, elaborou-se a Tabela 6, contendo os principais pontos fortes e aspectos desfavoráveis, no que tange a aspectos de projeto do filtro. Tais informações foram utilizadas como ponto de partida para o projeto que esse trabalho se propõe a conceber.

Tabela 6 - Principais aspectos de projeto considerados vantajosos ou problemáticos em filtros bifluxos

<b>Aspecto/Parâmetro</b>	<b>Vantagem</b>	<b>Desvantagem</b>
Areia como único material filtrante		Colmatção mais acelerada da porção superior do filtro e taxa de filtração limitada
Areia e antracito formando uma dupla camada filtrante	Eleva a qualidade do filtrado do filtro descendente e possibilita o aumento da taxa de filtração total	
Sistema de coleta do filtrado composto por tubos de material plástico ranhurados ou perfurados		Relatado como problemático devido à sua obstrução

Fontes: Adaptado de Hamann e Mckinney (1968); Ray (1974); Vignesan et al. (1983); Di Bernardo e Dantas (2005).

### 2.9.5.2 Outros critérios de projeto abordados

Foram relatados outros aspectos de projeto utilizados na prática que os autores não destacaram mudanças ou ajustes necessários. Foram elencados os principais critérios de projeto segundo os três autores mais representativos estudados nesse trabalho, conforme a Tabela 7:

Tabela 7 - Outros critérios de projeto relatados

<b>Aspecto ou critério</b>	<b>Hamann e Mckinney (1968)</b>	<b>Ray (1974)</b>	<b>Vignesan et al. (1983)</b>
Profundidade do leito filtrante (areia)	1,50 – 1,65 m	1,45 – 1,65 m	1,5 – 1,7 m
Localização do sistema de coleta do filtrado	0,45 – 0,60 m abaixo do limite superior da areia	Relação de 3:1 entre a profundidade do filtro inferior e do superior	Localizado entre 0,5 e 0,6 m abaixo do topo da camada
Granulometria da areia		Tamanho do grão mínimo: 0,5 mm Tamanho do grão máximo: 1,5 mm Tamanho efetivo do grão: 0,9 mm	Caso de camada única: 0,9 – 1,2 mm  Caso de dupla camada: Tamanho efetivo: 0,6 mm Coeficiente de Unif.: 1,5
Granulometria do antracito			Tamanho efetivo: 0,9 mm Coeficiente de Unif.: 1,5
Taxa de filtração (areia empregada)	300 a 360 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia	288 – 360 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia	300 a 360 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia
Taxa de filtração (areia e antracito empregados)		360 – 430 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /dia	Até 480 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /dia

<b>Aspecto ou critério</b>	<b>Hamann e Mckinney (1968)</b>	<b>Ray (1974)</b>	<b>Vignesan et al. (1983)</b>
Operação de retrolavagem	47,5 – 55,0 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .hora por 5 a 6 minutos, em fluxo ascendente com água. Indicação de uso de ar e água.		47,5 – 55,0 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .hora por 5 a 6 minutos. Sistema com água e ar é indicado no caso de emprego de dupla camada filtrante

Fontes: Adaptado de Hamann e Mckinney (1968); Ray (1974); Vignesan et al. (1983).

Ressalta-se que os três trabalhos retrataram configuração de filtro bifluxo de dupla camada filtrante como vantajosa.

Sobre a camada suporte, Di Bernardo (2002) recomenda que em um filtro ascendente, a camada filtrante possua fundo e sistema de drenagem apropriados, assim como camada de pedregulho adequada sob a camada de areia. Nesses filtros, a camada suporte também retém impurezas e há dificuldade na retirada das mesmas apenas com retrolavagem de fluxo ascendente, tornando-se imperiosa a execução de descarga de fundo intermediária antes da lavagem do filtro. Como a porção inferior de um filtro bifluxo opera como um filtro de fluxo ascendente, o critério de projeto mencionado também se aplica neste trabalho.

### **3. PROPOSTA DO PROJETO DE FILTRO RÁPIDO BIFLUXO**

De acordo com o levantamento bibliográfico e com a análise de aspectos de projeto de filtros rápidos bifluxo, ambos realizados neste trabalho, procedeu-se com a escolha de parâmetros a serem adotados para o modelo de projeto do filtro a ser proposto.

Richter e Azevedo Netto (1991) sugerem o seguinte roteiro para o cálculo de uma instalação de filtração rápida:

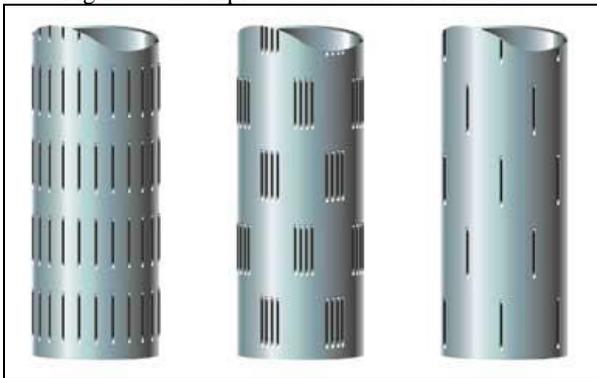
- Selecionar o tipo de filtro e o número de camadas empregadas;
- Especificar a taxa nominal de filtração;
- Estabelecer o número de filtros;
- Calcular a área de um filtro;
- Adotar o tipo de fundo de filtro;
- Estabelecer as dimensões do filtro em planta e em corte;
- Especificar a granulometria dos materiais filtrantes;
- Caracterizar a camada suporte, se existir;
- Fixar a expansão desejada para o leito filtrante;
- Determinar a velocidade ascensional da água de lavagem;
- Calcular a vazão da água de lavagem;
- Especificar o equipamento de controle dos filtros
- Dimensionar as tubulações imediatas do filtro;
- Estabelecer o tempo nominal de lavagem;
- Calcular o volume de água para lavagem de um filtro;
- Locar e dimensionar a calha de coleta da água de lavagem;
- Estabelecer o volume desejável para o reservatório de água de lavagem;
- Calcular as perdas de carga do meio filtrante e demais componentes, conforme o caso.

Anteriormente ao roteiro básico de projeto do filtro rápido bifluxo conforme os autores supracitados, descrevem-se as partes do filtro destacadas em literatura, no que se refere a aspectos de projeto. Conforme o item 2.9.5, os fatores limitantes ao uso mais difundido de filtros bifluxos têm sido: o sistema de coleta do filtrado via tubos plásticos perfurados. Além disso, destaca-se a recomendação pelo uso de dupla camada filtrante, composta por areia e carvão antracito, de forma a aprimorar vantagens apresentadas.

### 3.1 SISTEMA DE COLETA DO FILTRADO

Conforme visto no capítulo anterior, o uso de tubulações de material plástico com fendas ou perfurações para a coleta da água filtrado em filtros bifluxos não se mostrou adequado devido a problemas de obstrução. Dessa forma, buscou-se uma alternativa de coleta do filtrado que potencialmente não apresente problemas de obstrução e que, caso tal inconveniente ocorra, haja um meio de se promover sua desobstrução de maneira viável. Para compreensão, a Figura 9 ilustra tubos com diferentes tipos de ranhuras.

Figura 9 - Exemplos de tubo circular ranhurado



Fonte: TIETCA (2016)

Uma forma de se possibilitar o procedimento de desobstrução do sistema, caso seja necessário, é sua retirada do interior da camada filtrante. Torna-se importante, portanto, que a retirada do sistema de coleta do filtrado e sua desobstrução sejam tarefas factíveis e descomplicadas, além de seguras para o operador, para a estrutura do filtro e à qualidade da água filtrada.

Nesse sentido, considerou-se a utilização de um sistema de drenagem geralmente empregado ao fundo de filtros descendentes, composto por crepinas conectadas a tubos circulares. As crepinas propostas possuem corpo composto por nylon e fibra de vidro, e seus discos sulcados em polipropileno. Por já possuírem um uso no mercado que inclui seu contato direto como material filtrante (areia, em geral), podem ter chances reduzidas de sofrerem obstrução no caso de uso em filtros bifluxos. Além disso, os sulcos por onde o filtrado entra no corpo da crepina possuem diâmetro menor que 0,4 mm, valor abaixo do

tamanho efetivo dos materiais filtrantes geralmente empregados. Diferentemente de outras crepinas, as desse tipo são desmontáveis. Tais peças podem ser conectadas a tubos de material plástico, como PVC (policloreto de polivinila), conferindo ao sistema uma boa resistência, sem que a massa de sua estrutura seja elevada. A Figura 10 ilustra a crepina descrita, na sua forma encaixada:

Figura 10 - Crepina plástica em sua forma encaixada



Fonte: O autor.

Suas partes inferior e superior são rosqueáveis, ambas mantendo os discos comprimidos e encaixados na sua porção intermediária. Tais peças são facilmente desencaixadas, permitindo uma rápida limpeza e retorno às suas posições. A Figura 11 exibe as partes da crepina separadamente: discos sulcados, parte inferior e parte superior, da esquerda para a direita.

Figura 11 - Crepina em sua forma desencaixada



Fonte: O autor.

O elemento de sua parte interior apresenta quatro aberturas em contato com os sulcos dos discos, que levam a água para seu orifício central, o qual continua até a extremidade inferior da crepina. Essa parte do elemento central pode se prolongar, no caso de uso dessas peças para lavagem com ar e água, ou pode se encerrar no elemento rosqueável. Esse rosqueamento abaixo da base para os discos possibilita seu encaixe em tubos para drenagem do filtrado. A Figura 12 demonstra tal detalhe rosqueável de uma crepina com elemento inferior prolongado e a Figura 13 ilustra as aberturas da peça em contato com os discos.

Figura 12 - Elemento rosqueável junto à base da crepina



Fonte: O autor.

Figura 13 - Aberturas drenantes junto aos anéis ranhurados



Fonte: o autor.

Os tubos aos quais as crepinas são fixadas servem para recolher a água filtrada da unidade e conduzi-la a um ou mais drenos principais de saída do filtro, de forma a encaminhar o filtrado para a unidade de tratamento subsequente da Estação de Tratamento de Água. Considerou-se a utilização de tubulações de PVC, de forma que não tenham um peso expressivo e que possuam uma resistência adequada aos esforços aos quais serão submetidos. Tais esforços incluem os relativos à massa da camada de material filtrante sobre o mesmo, o fluxo durante a operação de retrolavagem e o esforço referente à sua eventual retirada do interior do meio filtrante. As Figuras 14 e 15 ilustram tais tubos secundários.

Figura 14 - Vista lateral de duas peças individuais de tubos de material plástico conectados, com crepinas fixadas



Fonte: O autor.

Figura 15 - Vista superior de duas peças individuais de tubos de material plástico conectados, com crepinas encaixadas

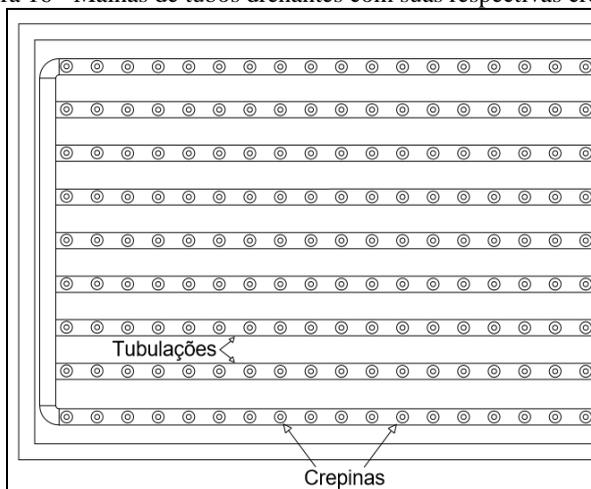


Fonte: O autor

Como visualizado, tais tubos são compostos por peças individuais encaixáveis, contendo cada uma dois segmentos de tubo paralelos entre si unidos por duas barras retas do mesmo material. Cada peça possui dois encaixes para crepinas, sendo um encaixe em cada fração de tubo. Tais peças ser fixadas umas às outras, assim como a outra tubulação de diâmetro maior, por exemplo, por meio do uso de selante apropriado.

O acoplamento de tais peças de formam malhas de drenos com suas respectivas crepinas fixadas, conforme pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 - Malhas de tubos drenantes com suas respectivas crepinas



Fonte: o autor.

Neste trabalho, em uma das duas extremidades opostas da área do filtro o filtrado é encaminhado a um dreno principal através dos drenos secundários (aqueles que possuem as crepinas fixadas), empregando-se uma tubulação de PVC de maior diâmetro para a coleta da água. O dreno principal também é instalado na posição horizontal, com eixo perpendicular aos eixos dos secundários. O encaminhamento para o exterior da unidade filtrante se dá por uma derivação na posição intermediária do comprimento do dreno principal. Tal saída ocorre por meio de uma tubulação na posição vertical que se estende até 10 cm acima da superfície da camada filtrante, onde é conectada uma curva e, na sequência, uma união, ambas na porção do interior do filtro. Após a união há uma curva e um registro de gaveta e a tubulação encaminha a água filtrada para uma calha externa ao filtro.

O encaminhamento do filtrado por uma tubulação vertical anteriormente à saída do filtro é realizado para se evitar a formação de pressão negativa, conforme explicado no item 2.7, referente a filtros descendentes.

Por meio do emprego de uma união no interior do filtro, o sistema de coleta do filtrado pode ser desconectado da tubulação de saída do filtrado, assim possibilitando sua elevação dentro da área do filtro. A operação do filtro é parada e espera-se até que a camada filtrante não possua sobrenadante. Então o operador pode acessar a superfície do leito filtrante após a parada da operação do filtro, e assim

desconectar a união.

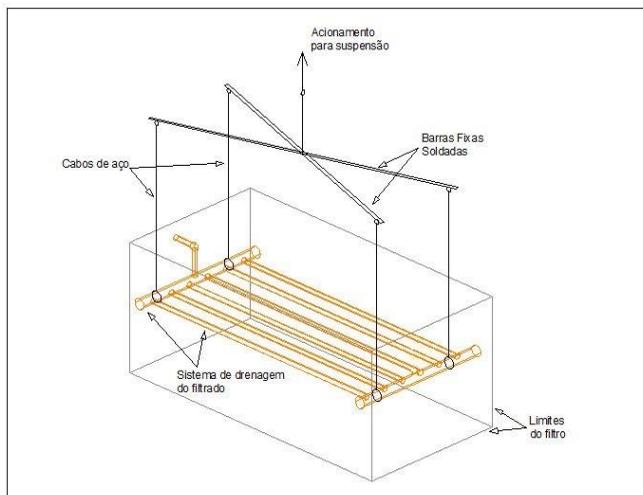
Além da união, se previu o uso de um registro de gaveta na saída do filtrado, de forma a evitar que a água de lavagem seja drenada pelo sistema proposto.

### **3.1.1 Elevação do sistema drenante do filtrado**

Conforme comentado, pretende-se possibilitar a elevação do sistema de drenagem do filtrado para o exterior da camada filtrante para eventuais operações de desobstrução/manutenção. A suspensão do sistema de drenagem para fora da camada filtrante pode ser realizada por cabos de aço fixados aos tubos em posições próximas aos quatro vértices internos do filtro, que possui formato retangular visto em planta. Ao ser içado para cima da superfície da camada filtrante em repouso, o sistema de drenagem fica em posição acessível ao operador, que pode realizar sua desobstrução.

Anteriormente à elevação dessa malha drenante, inicia-se a operação de retrolavagem, procedimento que deve durar até que a malha esteja completamente ao exterior da camada filtrante. Essa etapa é importante, pois com a camada filtrante fluidificada, facilita-se a suspensão da malha e reduz os esforços aos quais a mesma estará submetida. Içado o sistema de drenagem do filtrado até acima do leito filtrante, encerra-se a operação de retrolavagem e espera-se até a secagem parcial do leito filtrante, de forma a permitir o acesso do operador e a manutenção do sistema. Um esquema da operação de içamento do sistema de coleta de água filtrada pode ser visualizado na Figura 17 e uma visão lateral do filtro, incluindo a posição da união em relação ao sistema de coleta do filtrado é dada no Apêndice B.

Figura 17 - Esquema de fixação dos cabos de aço à rede de drenagem do filtrado



Fonte: O autor.

### 3.1.2 Dimensionamento das tubulações de drenagem do filtrado

O filtro a ser dimensionado é um filtro rápido bifluxo, com dupla camada filtrante (antracito e areia). Pretende-se projetar um filtro com capacidade de filtração de  $500 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ , portanto essa é a taxa nominal de filtração, sendo  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  no fluxo descendente e  $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  no fluxo ascendente.

Como não se trata de um dimensionamento de filtros para uma vazão afluyente específica, adota-se uma unidade filtrante com  $10 \text{ m}^2$  de área. Dessa forma, o filtro é capaz de filtrar a seguinte vazão:

$$\frac{500 \text{ m}^3}{\text{m}^2.\text{dia}} \times 10 \text{ m}^2 = 5000 \text{ m}^3/\text{dia} \text{ ou } 57,9 \text{ L/s}$$

As dimensões internas seguem uma relação retangular, adotando-se largura de 2,5 m e comprimento de 4 m.

Richter e Azevedo Netto (1991) estabelecem os diâmetros comerciais de acordo com a vazão escoada e com a velocidade máxima recomendada em cada trecho de tubulação imediata. Para a tubulação que conduz o efluente do filtro, é recomendada uma velocidade máxima de 1,25 m/s, indicando-se o diâmetro de 250 mm para vazões entre 40 e

62 L/s. Dessa forma, esse é o diâmetro adotado para a tubulação que transporta a água filtrada para o exterior do filtro. Também é o diâmetro adotado para o dreno principal, o qual recebe a água filtrada dos tubos secundários. Dessa forma, tem-se a velocidade máxima de 1,18 m/s no interior de tais canalizações.

Para os tubos secundários, onde estão fixadas as crepinas, considera-se um espaçamento de 25 cm entre eixos de trechos subsequentes, os quais são paralelos às paredes relativas ao comprimento do filtro (4 metros). Admite-se um espaçamento nos extremos na largura do filtro entre as paredes internas do mesmo e os eixos desses tubos de 12,5 cm. Assim, tem-se a seguinte quantidade de tubulações secundárias no filtro:

$$\frac{(2,50 - 2 \times 0,125) \text{ m}}{0,25 \text{ m}} = 9 \text{ tubulações secundárias}$$

Sendo tais tubulações que captam o filtrado e o transportam para o dreno principal, cada um desses 9 trechos recebe 1/9 da vazão filtrada, ou seja:

$$\frac{57,9 \text{ L/s}}{9} = 6,45 \text{ L/s}$$

Para tal vazão, de forma a não extrapolar a velocidade máxima de 1,25 m/s, os autores recomendam o emprego de tubos de 100 mm de diâmetro. Dessa forma, tem-se a velocidade máxima de 0,83 m/s no interior de tais canalizações.

### 3.1.3 Incremento da perda de carga hidráulica devido ao sistema de coleta do filtrado

Para previsão do incremento da perda de carga hidráulica imposta pelos ramais do sistema de coleta do filtrado proposto, utilizou-se a Equação (1), considerando-se o caminhar mais desfavorável do filtrado quanto à perda de carga, ou seja, da crepina mais distante do dreno principal até a sua saída para a calha externa.

$$J = \frac{10,641 \times Q^{1,85}}{C^{1,85} \times D^{4,87}} \quad (1)$$

A Equação (2) é a Fórmula de Hazen-Willians, usada para

escoamento de água à temperatura ambiente e para diâmetros iguais ou superiores a 50 mm. J é a perda de carga unitária, dada por m/m; Q é a vazão dada em m<sup>3</sup>/s; C é um coeficiente adimensional que depende da natureza e estado de conservação das paredes internas da tubulação (atribui-se 145 ou 150 para PVC); e D é o diâmetro da canalização, dado em metros.

Calcula-se a perda de carga unitária ao longo do ramal secundário:

$$J = \frac{10,641 \times (0,00645)^{1,85}}{145^{1,85} \times 0,100^{4,87}} = 0,00702 \text{ m/m}$$

Dado que a água percorre 4,0 metros até chegar ao ramal principal, para se calcular a perda de carga, faz-se o uso da Equação (2), onde  $\Delta h$  é a perda de carga em metros de cluna de água e L é o comprimento de tubulação, dado em metros:

$$\Delta h = J \times L = 0,00702 \text{ m/m} \times 4,0 \text{ m} = 0,028 \text{ m}$$

Procede-se para a obtenção da perda de carga ao longo do ramal principal, sabendo-se que o filtrado percorre metade do seu comprimento (2,50 m), já que no meio do mesmo há a tubulação vertical que encaminha a água em direção ao exterior do filtro. Tem-se, portanto:

$$J = \frac{10,641 \times (0,0579 / 2)^{1,85}}{145^{1,85} \times 0,250^{4,87}} = 0,0013 \text{ m/m}$$

$$\Delta h = J \times L = 0,0013 \text{ m/m} \times 1,25 \text{ m} = 0,0016 \text{ m}$$

Ao longo da derivação junto ao ramal principal percorre toda a vazão de filtrado, ao longo de 1,5 metros de tubulação, portanto a perda de carga distribuída é calculada como segue:

$$J = \frac{10,641 \times (0,0579)^{1,85}}{145^{1,85} \times 0,250^{4,87}} = 0,0047 \text{ m/m}$$

$$\Delta h = J \times L = 0,0047 \text{ m/m} \times 1,50 \text{ m} = 0,007 \text{ m}$$

Já para o cálculo das perdas de carga localizadas, segundo Porto (2006), utiliza-se a Equação (2).

$$\Delta h = \frac{K \times V^2}{2g} \quad (2)$$

Onde  $\Delta h$  é a perda de carga, dada em metros de coluna de água;  $K$  é um coeficiente adimensional que depende da geometria da conexão;  $V$  é a velocidade de referência do escoamento; e  $g$  é a aceleração da gravidade.

O filtrado, através desse caminho mais desfavorável, percorre as seguintes singularidades: um tê de passagem lateral na saída do ramal secundário; um tê de passagem lateral entre o ramal primário e sua derivação de mesmo diâmetro; duas curvas de 90° e um registro de gaveta aberto antes da saída para a calha de água filtrada.

De acordo com a velocidade de escoamento de cada trecho, as perdas de carga localizadas são calculadas na sequência:

Um tê de passagem lateral do ramal secundário para o primário e um tê de passagem lateral do ramal primário para sua derivação vertical ( $K = 2,0$ ):

$$\Delta h = \frac{2 \times K \times V^2}{2g} = \frac{2 \times 2,0 \times 1,18^2}{2 \times 9,81} = 0,28 \text{ m}$$

Dois curvas de 90° ( $K = 0,4$ ):

$$\Delta h = \frac{2 \times K \times V^2}{2g} = \frac{2 \times 0,4 \times 1,18^2}{2 \times 9,81} = 0,057 \text{ m}$$

Um registro de gaveta aberto ( $K = 0,2$ ):

$$\Delta h = \frac{K \times V^2}{2g} = \frac{0,2 \times 1,18^2}{2 \times 9,81} = 0,014 \text{ m}$$

Há, ainda, a perda de carga localizada devida à entrada da água filtrada na crepina. Considerando-se a distribuição das crepinas espaçadas 20 cm entre si, sendo 9 tubos secundários ao longo do filtro, e reservando-se 0,40 m do comprimento total do filtro para o ramal principal, tem-se:

$$\frac{(4 - 0,40) \text{ m}}{0,20 \text{ m}} = \frac{18 \text{ crepinas}}{\text{tubo secundário}} \times 9 \text{ tubos secundários} = 162 \text{ crepinas}$$

Com esse total de crepinas, tem-se que cada uma delas promove a drenagem de 1/162 do filtrado, ou seja, 1,28 m<sup>3</sup>/h.

De acordo com um dos fabricantes, a vazão que adentra uma crepina pode chegar a 1,5 m<sup>3</sup>/h e as perdas de carga devido a tal peça dependem de seu diâmetro interno e da existência ou não de tubo para ar, para diferentes vazões dadas em m<sup>3</sup>/h. Para crepinas de 25 mm e sem tubo para ar (não há intenção neste projeto em usá-las em retrolavagem), como se pretende utilizar neste trabalho, e uma vazão de 1,28 m<sup>3</sup>/h, a perda de carga localizada vale cerca de 0,16 mca.

Portanto, a perda de carga máxima relativa à drenagem do filtrado pelo sistema proposto equivale a 0,55 metros.

O sistema de coleta do filtrado e o sistema para suspendê-lo podem ser melhor visualizados nos Apêndices A e B.

### 3.2 TUBULAÇÕES DE ÁGUA A SER FILTRADA

Para as tubulações afluentes, Richter e Azevedo Netto (1991) recomendam velocidade máxima de 0,60 m/s, sendo dessa forma o diâmetro de 250 mm aplicável para vazões até 30 L/s e 300 mm para vazões até 42 L/s. O filtro bifluxo proposto apresenta duas tubulações afluentes, uma para o fluxo descendente e uma para o fluxo ascendente. O primeiro deve receber 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia, ou seja, uma vazão de 23,2 L/s e o segundo, 34,8 L/s. Assim, adota-se para a canalização que transporta a água a filtrar para a parte superior do filtro bifluxo o diâmetro de 250 mm e para a canalização que se dirige ao fluxo ascendente, o diâmetro de 300 mm (Apêndice B).

### 3.3 CAMADAS FILTRANTES E GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS FILTRANTES

Conforme recomendado em literatura, adota-se no projeto em questão uma camada dupla para a unidade de filtração em sua porção acima do sistema de coleta do filtrado, composta por areia e antracito. A porção inferior é composta apenas por areia.

Di Bernardo (1993) esclarece que em filtros de dupla camada, de antracito e areia, são recomendadas as seguintes profundidades: 0,20 a 0,30 m para a areia, e 0,45 a 0,60 m para o antracito.

Portanto, para a porção superior do filtro bifluxo, que se comporta como um filtro descendente, adota-se 0,25 m como profundidade da areia e 0,60 m de espessura da camada de antracito. A

parcela da camada filtrante que opera como filtro ascendente, ou seja, que recebe a maior parcela de água não filtrada, possui 1,70 m. Tal critério de projeto vai ao encontro da concepção da filtração direta, com camadas filtrantes mais espessas e com carreira de filtração adequada mesmo que o filtro retire a totalidade de sólidos da água não filtrada.

Richter e Azevedo Netto (1991) explicam que para se evitar a mescla excessiva das camadas de antracito e areia, o tamanho efetivo do primeiro deve estar entre 1,8 e 2,1 vezes o tamanho efetivo da última. Dessa forma, empregam-se areia de tamanho efetivo de 0,60 mm, antracito com 1,05 mm de tamanho efetivo. Além desses materiais, emprega-se na porção de 30 cm superior do filtro ascendente a mesma granulometria da areia empregada no filtro descendente (0,15 mm mais fina que a supracitada), de forma a manter uma camada uniforme ao redor do sistema de coleta do filtrado e evitar qualquer acúmulo de sólidos próximo às entradas das crepinas, em interfaces de materiais filtrantes de granulometria diferente. De acordo com Vignesan et al. (1983), o tamanho efetivo dos materiais filtrantes é de 1,5. A Tabela 8 ilustra a relação de parâmetros adotados relativos à camada filtrante.

Tabela 8 - Parâmetros relativos à camada filtrante

<b>Parâmetro</b>		<b>Valor/Descrição</b>
Porção superior do filtro (fluxo descendente)	Profundidade da camada de antracito	0,60 m
	Profundidade da camada de areia	0,25 m
	Caracterização do antracito a ser usado	Tamanho efetivo: 1,05 mm Coeficiente de Uniformidade: 1,5
	Caracterização da areia a ser usada	Tamanho efetivo: 0,45 mm Coeficiente de Unif.: 1,5
Porção inferior do filtro (fluxo ascendente)	Profundidade da camada de areia	1,70 m
	Caracterização da areia a ser usada nos últimos 0,30 m, próximo ao sistema de coleta do filtrado	Igual à areia usada no filtro descendente: Tamanho efetivo: 0,45 mm Coeficiente de Unif.: 1,5
	Caracterização da areia a ser usada nos 1,40 m inferiores	Tamanho efetivo: 0,6 mm

		Coeficiente de Unif.: 1,5
--	--	---------------------------

Fonte: o autor.

O detalhe da camada filtrante pode ser melhor visualizado no Apêndice C.

### 3.4 FUNDO DO FILTRO

Como se pretende usar sistema de retrolavagem com água e ar e descarga de fundo intermediária, uma opção adequada para esse caso é o emprego de blocos universais de polietileno, também chamados de blocos tipo *Leopold*. Dessa forma, ao longo da face superior da laje de fundo do filtro e abaixo da camada suporte, formam-se fileiras lado a lado desses blocos, cobrindo toda a área do filtro.

Há blocos universais tipo calha, os quais são dispostos em uma das fileiras, sobre o canal de distribuição de água para lavagem.

### 3.5 CAMADA SUPORTE

No caso de filtros ascendentes, como é o caso da porção em contato com a camada suporte no filtro bifluxo, a camada suporte tem funções bastante importantes, participando na retenção de impurezas, especialmente no caso da filtração direta.

Na escolha da camada suporte para o presente modelo de projeto, atentou-se para a observação de Di Bernardo e Dantas (2005), de que quando os tamanhos dos seixos são reduzidos a partir do fundo, podem-se gerar caminhos preferenciais e desarranjo das camadas superiores, além da formação de bolas de lodo. Emprega-se, então, uma camada suporte em que os tamanhos dos seixos diminuam a partir do fundo e, em seguida, aumentem de tamanho.

Neste modelo de projeto se utilizam as mesmas granulometrias destacadas na Figura 01, para o caso de lavagem com ar e água. Quanto à espessura das subcamadas, as mesmas foram mantidas, exceto as de granulometria de 12,7 a 25,4 mm, que foram aumentadas de 5 para 10 cm. Justifica-se tal mudança devido ao fato de que filtros bifluxos tem uma profundidade maior de leito filtrante a ser sustentada, além de que se elevou a taxa de filtração com relação às citadas pelos estudos dos autores neste trabalho analisados. Dessa forma, a camada suporte terá a composição conforme apresentado na tabela 9, somando 60 cm de espessura:

Tabela 9 - Configuração da camada suporte do modelo de filtro bifluxo proposto

Subcamada	Tamanho dos grãos (mm)	Espessura (cm)
1	25,4 – 50,0	10
2	12,7 – 25,4	10
3	6,4 – 12,7	5
4	3,2 – 6,4	10
5	6,4 – 12,7	5
6	12,7 – 25,4	10
7 (fundo)	25,4 – 50,0	10

Fonte: o autor.

O detalhe da camada suporte pode ser melhor visualizado no Apêndice C.

### 3.6 TAXA DE FILTRAÇÃO

Segundo Richter e Azevedo Netto (1991), a taxa de filtração é um parâmetro bastante relevante e deve ser cuidadosamente fixada pelo projetista, tendo em vista as condições locais (qualidade da água não filtrada, qualidade requerida da água filtrada, habilidade de operação, entre outros); as características do meio filtrante (materiais e granulometria) e a carga hidráulica. A taxa de filtração a ser adotada em um projeto, assim como as características granulométricas ideais do leito filtrante, devem ser, sempre que possível, estabelecidas por meio de filtro piloto. De modo geral, a taxa nominal de filtração fica compreendida entre os seguintes limites:

- Filtro de camada única: 120 a 360 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia;
- Filtro de camada dupla: 240 a 600 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia.

Como neste trabalho não se utilizou de ensaios em filtros pilotos, a taxa de filtração é convencionada de acordo com demais critérios de projeto adotados.

Com a especificação da dupla camada na porção do filtro bifluxo que opera com escoamento descendente, com 60 cm de profundidade de antracito e 25 cm de areia, com as granulometrias descritas, uma taxa de filtração de 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia deve ser viável.

A porção do filtro que opera em escoamento ascendente, com uma profundidade total de 1,70 m de areia, além de contar com uma camada suporte de 60 cm, deve operar de maneira eficiente sob uma taxa de filtração de 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia.

Dessa forma, tem-se que um filtro que utilize os critérios de projeto adotados neste trabalho possa operar a uma taxa de filtração total de 500 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia.

### 3.7 RETROLAVAGEM

#### 3.7.1 Expansão desejada do leito filtrante e velocidade ascensional da água de lavagem

Os filtros rápidos são lavados por contracorrente de água ou ar e água, com uma vazão capaz de promover uma expansão adequada do leito filtrante. Expansões muito baixas não possibilitam uma boa limpeza e valores acima de 50% também são indesejáveis, por reduzirem o roçamento dos grãos e permitirem a perda de material. Na prática são consideradas expansões entre 25 e 50%, sendo 40% um valor comumente empregado (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991). Neste projeto, que possui um leito filtrante bastante profundo, e com o objetivo de se evitar uma altura total muito elevada do filtro, é adotada uma expansão de 30% da porção do leito filtrante composta pela areia mais grossa (0,60 mm), que dentre os materiais empregados, é o que exige maior velocidade ascensional para expandir.

Richter e Azevedo Netto (1991) indicam que para promover tal expansão de areia com tamanho efetivo de 0,60 mm, a faixa de velocidade ascensional é de 0,85 a 1,05 m/min. Adotando-se uma velocidade durante a lavagem de 0,85 m/min, atinge-se uma expansão de 45% da camada de areia mais fina (0,45 mm) e de 50% do antracito. Dessa forma, todos os valores de expansão permanecem na faixa recomendada.

Portanto, durante a retrolavagem, a fluidificação dos materiais filtrantes chegará à seguinte altura calculada sobre a superfície da camada filtrante quando na disposição de operação do filtro:

$$H = 1,70 \text{ m} \times 0,30 + 0,55 \text{ m} \times 0,45 + 0,60 \text{ m} \times 0,50 = 1,06 \text{ m.}$$

A velocidade ascensional de lavagem adotada, equivalente a 51 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h, ainda está compreendida na faixa recomendada por Hamann e McKinney (1968) e Vignesan et al. (1983) para lavagem de filtros bifluxos, 47,5 a 55 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h.

### 3.7.2 Vazão de água para lavagem

O produto da supracitada velocidade ascensional na lavagem do filtro pela sua área resulta na vazão de água de lavagem, conforme o cálculo abaixo:

$$\frac{0,85 \text{ m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{min}} \times 10 \text{ m}^2 = 8,5 \text{ m}^3/\text{min} \text{ ou } 192 \text{ L/s.}$$

### 3.7.3 Dimensionamento da tubulação de água para lavagem

Para a tubulação que transporta água para lavagem, Richter e Azevedo Netto (1991) indicam uma velocidade máxima mais elevada, de 3,60 m/s. A vazão de água de lavagem já calculada no item anterior é de 192 L/s, sendo recomendado pelos autores o diâmetro de 300 mm. Com esse diâmetro, a velocidade no interior da tubulação é de 2,8 m/s.

Para a descarga de água de lavagem, os autores citam como velocidade máxima 1,80 m/s, sendo o diâmetro de 400 mm o apropriado para essa condição (Apêndice B).

### 3.7.4 Tempo nominal e volume de água de lavagem

Richter e Azevedo Netto (1991) recomendam um tempo nominal de 6,5 minutos para lavagem dos filtros, mesmo que geralmente tal operação seja um pouco mais curta, de 3,5 a 5,5 minutos. Portanto, adota-se o tempo nominal de 6,5 minutos para lavagem do filtro. Tendo-se esse tempo estabelecido e a vazão de lavagem calculada, calcula-se o volume de lavagem do filtro:

$$8,5 \text{ m}^3/\text{min} \times 6,5 \text{ min} = 55,25 \text{ m}^3 \text{ de água para lavagem do filtro}$$

Para determinação do volume do reservatório de lavagem, Richter e Azevedo Netto (1991), citando Azevedo Netto (1972), recomendam que tal volume, no caso de existência de até 6 filtros, seja igual ao volume correspondente à lavagem de um filtro, durante 6,5 minutos. Esse volume já foi calculado anteriormente, e é igual a 55,25 m<sup>3</sup>.

### 3.7.5 Locação e dimensionamento das calhas de coleta de água para lavagem

Richter e Azevedo Netto (1991) indicam que a altura mínima da extremidade inferior das calhas, sobre a superfície do leito filtrante em repouso, depende da expansão máxima prevista para o material durante a sua lavagem. Essa altura foi calculada anteriormente e vale 1,06 m, que somada aos cerca de 0,15 m de folga recomendados, passa a 1,20 m, sendo este então o valor adotado.

Adota-se no Brasil a prática norte-americana de colocação de calhas com espaçamento máximo de 2,10 m entre bordos e de 1,05 m entre os bordos das calhas extremas e as paredes do filtro. Adotando-se duas calhas, a vazão de lavagem do filtro é dividida por dois, e dessa forma cada calha escoar 96 L/s. Os autores apresentam relações entre vazão máxima escoada pela calha, sua largura e sua altura. Uma calha de 0,35 m de altura por 0,35 m de largura interna pode escoar até 115 L/s, atendendo com segurança ao calculado e mantendo uma altura livre de cerca de 5 cm.

Tais calhas, executadas em concreto, são locadas de forma a manter uma distância de 0,50 m das paredes e 0,60 m entre si, considerando uma espessura de 5 cm de concreto armado (Apêndice A).

### 3.7.6 Fixação da altura do reservatório de água para lavagem

Para a fixação dessa cota, é necessário calcular as perdas de carga existentes desde a saída do reservatório até os bordos das calhas do filtro, sendo consideradas:

a) Perda de carga em singularidades:

Para o cálculo da perda de carga em acessórios hidráulicos, segundo Porto (2006), utiliza-se a Equação (2), já apresentada:

$$\Delta h = \frac{K_x V^2}{2g} \quad (2)$$

Para a velocidade de 2,8 m/s, que é o caso do caminhamento da água de lavagem até chegar ao fundo do filtro, Richter e Azevedo Netto (1991) indicam como valores tabelados as seguintes respectivas perdas de carga para as singularidades existentes entre o fundo do reservatório e o fundo do filtro:

- Válvula de gaveta aberta: 0,08 m

- Junção: 0,16 m
- Curva de 90°: 0,16 m
- Entrada na tubulação: 0,20 m
- Controlador de vazão: 1,00 m

A soma de tais perdas de carga localizadas é de 1,60 m.

b) Perda de carga no fundo do filtro:

No caso de blocos tipo Leopold, Richter e Azevedo Netto (1991) indicam a perda de carga em metros de acordo com a dimensão dos filtros no sentido do escoamento para os blocos (m) e a taxa de lavagem. Para o comprimento de 4 metros de filtro no sentido dos blocos e com a taxa de lavagem de 0,85 m/min, encontra-se a perda de carga tabelada de 0,93 m.

c) Perda de carga na camada de pedregulho;

Para uma camada de pedregulho de 0,60 m, e uma velocidade ascensional de 0,85 m/min, encontra-se uma perda de 0,18 m (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991).

d) Perdas na passagem pelo material filtrante fluidificado, segundo Richter e Azevedo Netto (1991):

- Perda de carga na areia:  $\Delta h = 0,9 \times (\text{altura da camada}) = 0,9 \times 1,95 = 1,76 \text{ m}$
- Perda de carga no antracito:  $\Delta h = 0,25 (\text{altura da camada}) = 0,25 \times 0,60 = 0,15 \text{ m}$ .

e) Perda de carga nos bordos da calha vertedora.

Como há duas calhas de coleta de água para lavagem, em cada uma é escoada uma vazão de 96 L/s. Para essa vazão, a perda corresponde a 0,14 m por metro de calha (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991). Como cada calha possui 4 metros de comprimento, a perda nos bordos da calha vertedora corresponde a 0,56 m.

Dessa forma, antes de se calcular as perdas relacionadas ao comprimento de tubulação que escoam a água para lavagem, que depende da altura do reservatório, somam-se as perdas de carga que dela independem:

Perdas localizadas: 1,60 m

Perda do fundo do filtro: 0,93 m

Perda na camada suporte: 0,18 m

Perda na passagem pelo material filtrante fluidificado: 1,91 m

Perda nos bordos da calha vertedora: 0,56

Altura entre a superfície da camada filtrante até a entrada das calhas vertedoras: 1,20 m + 0,35 m (altura interna da calha) + 0,05 m (espessura do concreto) = 1,60 m

Total: 6,78 m

Dessa forma, sabe-se que a cota do reservatório deve estar, no mínimo, a 6,80 m acima da entrada da água de lavagem no fundo do filtro, para que a água chegue às calhas. Considerando-se tubulação em PVC de 300 mm de diâmetro, calcula-se a perda de carga devido ao caminhamento da água pela canalização, pela equação (1)

$$J = \frac{10,641 \times Q^{1,85}}{C^{1,85} \times D^{4,87}} \quad (1)$$

Perda de carga ao longo da tubulação:

$$J = \frac{10,641 \times (0,192)^{1,85}}{145^{1,85} \times 0,300^{4,87}} = 0,018 \text{ m/m}$$

Pretende-se obter uma folga aproximada de carga hidráulica na lavagem de 0,5 metros de coluna de água. Dessa forma, estando a saída de água de lavagem no reservatório a uma altura de 7,6 metros da cota do fundo do filtro e a 5 metros da entrada no fundo do filtro visto em planta, tem-se a seguinte perda de carga devido ao escoamento da água pela tubulação:

$$0,018 \text{ m/m} \times (7,6 + 5) \text{ m} = 0,23 \text{ m de perda de carga}$$

Dessa forma, assegura-se uma carga hidráulica suficiente para a lavagem do filtro, com folga de 0,59 mca, já que se dispõe de uma coluna de água de 7,60 m e a soma das perdas é igual a 7,01 m.

### 3.7.7 Descarga de fundo intermediária

De acordo com Di Bernardo (2003), no caso da filtração ascendente a camada de pedregulho participa do processo de filtração e há formação intensa de flocos, removendo boa parte das impurezas. Devido às dificuldades na retirada das impurezas do interior da camada de pedregulho, torna-se essencial a execução de descarga de fundo

intermediária previamente à lavagem do filtro.

Previu-se, dessa forma, neste modelo de projeto, a operação de descarga de fundo intermediária antes da aplicação da retrolavagem da unidade filtrante. Portanto, são previstas derivações da tubulação de fornecimento de água de lavagem ao fundo do filtro, passando ao longo da interface entre a subcamada 1 da camada suporte e o fundo da camada de areia mais grossa, porção inferior do leito filtrante. A drenagem dessa porção de água que realiza a lavagem da camada suporte ocorre por um dreno de fundo, localizado na laje de fundo do filtro (Apêndice B).

### **3.7.8 Determinação da necessidade de lavagem**

Neste projeto é adotado o regime de taxa de filtração constante, ou seja, a taxa nominal, assim como a vazão de água a ser filtrada, não se altera ao longo da operação do filtro.

Conforme descrito no item 2.9.1, Leme (1990) destaca que em casos onde a água a ser filtrada, tanto em fluxo descendente como ascendente, provém da mesma fonte, a perda de carga existente através das seções superior e inferior do filtro é a mesma. Dessa forma, conforme os poros são obstruídos, iguais perdas de carga se mantêm através das duas seções, em virtude do autoajustamento da vazão entre essas seções. Quando uma das porções tende a se tornar obstruída mais rapidamente, ocorre automaticamente uma redução na sua vazão de escoamento e um conseqüente aumento de carga para a outra porção do filtro.

Dessa forma, estabelece-se no projeto proposto que a necessidade de lavagem do filtro é verificada de acordo com a perda de carga promovida no fluxo descendente. Para a determinação da máxima coluna de sobrenadante, somam-se a perda de carga provocada pelo sistema de drenagem do filtrado, o desnível geométrico para a saída e a perda promovida pelo fluxo da água no filtro descendente quando o leito se encontra limpo.

O primeiro valor foi calculado no item 4.1.3 e vale 0,55 mca. O desnível é dado por:

$0,25 \text{ m (areia fina)} + 0,60 \text{ m (antracito)} + 0,10 \text{ m (a saída fica 10 cm acima da superfície do leito filtrante)} = 0,95 \text{ m}$

O terceiro valor é calculado, conforme Richter e Azevedo Netto (1991), pelas Equações (3) e (4):

$$\Delta h (\text{areia}) = 0,005 \times V \times L \quad (3)$$

$$\Delta h (\text{antracito}) = 0,0009 \times V \times L \quad (4)$$

Em que, em ambas as equações,  $\Delta h$  é a perda de carga, em centímetros;  $V$  é a taxa de filtração, dada em  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ ; e  $L$  é a altura da respectiva camada em centímetros.

Para a subcamada de areia, tem-se:

$$\Delta h (\text{areia}) = 0,005 \times 200 \times 25 = 25 \text{ cm.}$$

Para a subcamada de antracito, tem-se:

$$\Delta h (\text{antracito}) = 0,0009 \times 200 \times 60 = 10,8 \text{ cm.}$$

Dessa forma, o total da perda de carga no fluxo descendente durante sua operação tem o seguinte valor:

$$0,55 + 0,95 + 0,25 + 0,11 = 1,86 \text{ m.}$$

Adota-se, então, que o filtro deverá ser lavado quando a perda de carga total chegar a 3,0 metros, coluna de água essa que pode ser verificada na porção superior do filtro, acima da camada de antracito.

Com esse parâmetro, pode-se estabelecer a altura total do filtro, somando-se a altura do fundo do filtro, da camada suporte, do leito filtrante, da perda de carga máxima e uma folga de 0,50 m, adotada:

$$0,30 (\text{fundo}) + 0,60 + 2,55 + 3,00 + 0,50 = 6,95 \text{ metros (Apêndice B).}$$

### 3.8 TABELA RESUMO DO DIMENSIONAMENTO DO FILTRO

A tabela 10 apresenta em suma os itens do dimensionamento do filtro. Outros detalhes podem ser visualizados nos Apêndices A, B e C, conforme a relação:

Apêndice A – Vista superior do sistema de coleta do filtrado, seu içamento e das calhas coletoras de água de lavagem

Apêndice B – Corte Longitudinal do filtro proposto

Apêndice C – Detalhe da camada filtrante, camada suporte e

fundo do filtro

Tabela 10: Síntese do dimensionamento do filtro

<b>Item</b>	<b>Valor(es)</b>
Taxa de filtração total	500 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia
Vazão filtrada	57,9 L/s
Área do filtro	10,0 m <sup>2</sup>
Largura do filtro	2,5 m
Comprimento do filtro	4,0 m
Dreno principal de drenagem do filtrado	Ø 250 mm
Derivação do dreno principal de drenagem do filtrado	Ø 250 mm
Tubos secundários	Ø 100 mm
Tubo do afluente para fluxo descendente	Ø 250 mm
Tubo do afluente para fluxo ascendente	Ø 300 mm
Tubo de água para lavagem	Ø 300 mm
Volume do reservatório de lavagem	55,25 m <sup>3</sup>
Cota do reservatório de lavagem em relação ao fundo do filtro	7,60 m
Dimensões internas das calhas de lavagem (largura x altura)	0,35 m x 0,35 m

Fonte: o autor.

#### 4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi observada a baixa disponibilidade de trabalhos com maiores informações sobre filtros bifluxos, sendo que a maior parte dos autores apenas o citam como uma das variações dos filtros ascendentes. Provavelmente isso se deve ao fato de que, apesar de suas vantagens, a filtração bifluxo apresentou comumente problemas de obstrução do sistema de coleta do filtrado e não teve seu uso muito difundido externamente às fronteiras da extinta União Soviética, o que afetou também a publicação de trabalhos.

Diante da questão supracitada, foi necessária a consulta de referências não específicas ao tipo de filtro estudado para a explanação e escolha de critérios de projeto para o modelo proposto, como a camada suporte e o fundo de filtro, além do seu dimensionamento.

Sua alta taxa de filtração, reduzidos custos de implantação e relativamente longas carreiras de filtração tornam a filtração bifluxo uma opção interessante, principalmente no aspecto econômico, conforme os trabalhos consultados.

Tendo sido o sistema de drenagem do filtrado o fator mais comumente relatado como desvantajoso na literatura, foi esse o componente do filtro sobre o qual mais se analisaram alternativas, culminando no sistema com uso de crepinas desencaixáveis, uso de uma união e cabos de aço, conforme descrito.

O modelo de projeto proposto possui uma profundidade total de material filtrante relativamente alta (6,95 metros), já que se considerou o modelo de tratamento de água de filtração direta. No caso de o modelo ser empregado numa estação de tratamento de água de ciclo completo, contando com unidade de decantação ou flotação, o leito filtrante pode ter sua profundidade reduzida, de acordo com a qualidade da água e taxa de filtração, mantendo uma carreira de filtração adequada.

É recomendado um estudo voltado aos esforços ao qual o sistema de coleta da água filtrada proposto está sujeito, como os relativos ao empuxo causado pela operação de retrolavagem. Tal aspecto pode constituir uma limitação do sistema proposto.

Recomenda-se que o modelo de projeto proposto seja executado em escala piloto para validação de sua eficácia, principalmente no que tange à duração da carreira de filtração e ao aspecto operacional do seu sistema de coleta de água filtrada.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALPE, G.; BARRETT, A. D. **Developments in Upflow Filtration**. Australian Water Works Association. 1971.

AHSAN, T. (1995). **Process analysis and optimization of direct horizontal-flow roughing filtration**. Delft. 193p. Tese (Doutorado) – Delft University of Technology e International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering.

American Water Works Association. **Water quality and treatment: a handbook of public water supplies**. New York; McGrawHill; 1971.654p.

ANDREOLI, Cleverson V.; PEGORINI, Eduardo S.; HOPPEN, Cinthya; TAMANINI, Cristina R.; NEVES, Paulo S. Produção, composição e constituição de lodo de estação de tratamento de água (ETA). In: ANDREOLI, Cleverson V. **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006, p. 29-48.

ARBOLEDA VALENCIA, J. **Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua**. Lima, CEPIS, 1973.

BAYLIS, J. R. **Variable rate filtration**. *Pure Water*, v. XI, n. 5, p. 86-114, May 1959.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria 2914 de 12 de dezembro de 2011**. Brasília, DF, 2011.

CALISE, V. J; HOMER, W. A. (1958). **Russian and Eastern European water treatment practices**. In: ANNUAL CONFERENCE OF ENGINEERS – Society of Western Pennsylvania, USA.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro, ABES. 1993

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. Ed. São Carlos: Rima, 2005. 1656 p. 2 v.

Di Bernardo L, Di Bernardo A, Centurione Filho PL. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: RIMA; 2002.

DI BERNARDO, L. (Coord.); MENDES, C. G. N.; BRANDÃO, C. C. S.; SENS, M. L. & PÁDUA, V. L. **Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta**. Rio de Janeiro, ABES, 498p., 2003.

HAMANN, C. L.; MCKINNEY, R. E. **Upflow filtration process**. American Water Works Association, v. 60, p. 1023-1039, 1968.

LEME, F. P. **Teoria e técnicas de tratamento de água**. 2. Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1990.

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

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Instalações hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1991.

MORAN, D.; MORAN, M.; CUSHING, R.; LAWLER, D. (1993). **Particle behavior in deep-bed filtration: part 1 – ripening and breakthrough**. *Journal American Water Works Association*, v. 85, n. 12, p. 69-81, dec.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 4 ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

RAY, W. J. F. **Recent advances in methods of filtration**. In: INTERNATIONAL WATER SUPPLY ASSOCIATION CONGRESS, 10, 1974. Brighton. *Anais...* Brighton: Association Internationale des Distributions d'Eau, 1974. 388p.

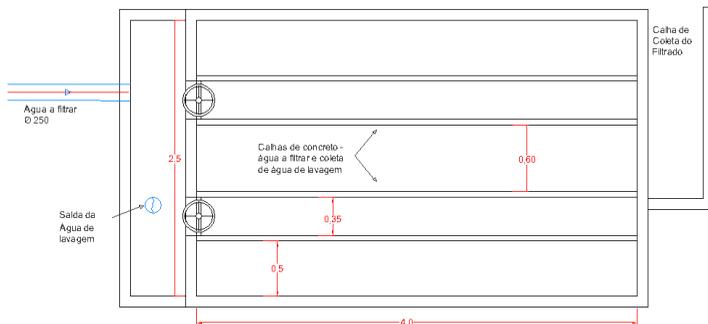
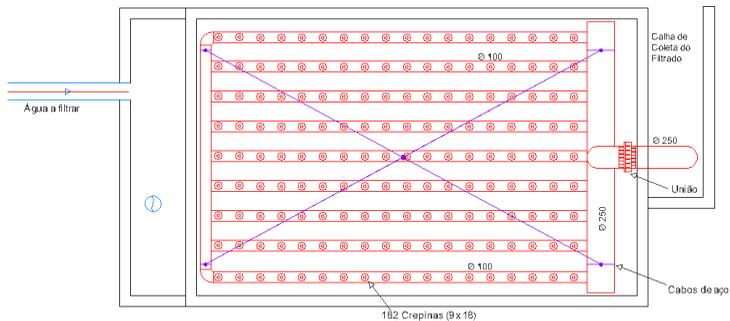
RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: E. Blücher, 1991.

TIETCA. **“Ranurado de tuberia: tipos de ranurado”**. 2016. Disponível em: < <http://www.tietca.com/files/0201.htm> >. Acesso em: 30 setembro 2016.

VIGNESAN, S.; TAM, D. M.; VISVANATHAN, C.; THANH, N. C.; SCHULZ, C. R. **Enviromental sanitation reviews**. Water filtration technologies for developing countries. Bangkok: Enviromental Sanitation Information Center, 1983. 110p.



APÊNDICE A - VISTA SUPERIOR DO SISTEMA DE COLETA DO FILTRADO, SEU IÇAMENTO E DAS CALHAS COLETORAS DE ÁGUA DE LAVAGEM



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

Referência: Proposta de um modelo de projeto de filtro rápido bifluxo para tratamento de água de abastecimento - VISTA SUPERIOR DO SISTEMA DE COLETA DO FILTRADO E SEU IÇAMENTO

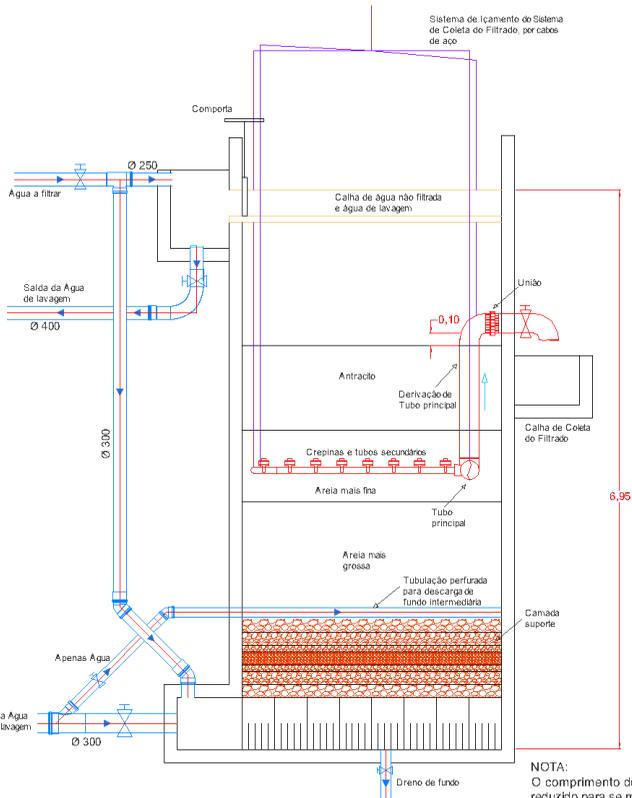
Data:  
DEZEMBRO/2016

Autor e Desenhista:  
DIEGO BRUNELLIGHISI

Escola:  
S/ Esc

Folha:  
APÊNDICE A

APÊNDICE B - CORTE LONGITUDINAL DO FILTRO PROPOSTO



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
 UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

Referência: Proposta de um modelo de projeto de filtro rápido bifluxo para tratamento de água de abastecimento -  
 CORTE LONGITUDINAL DO FILTRO PROPOSTO

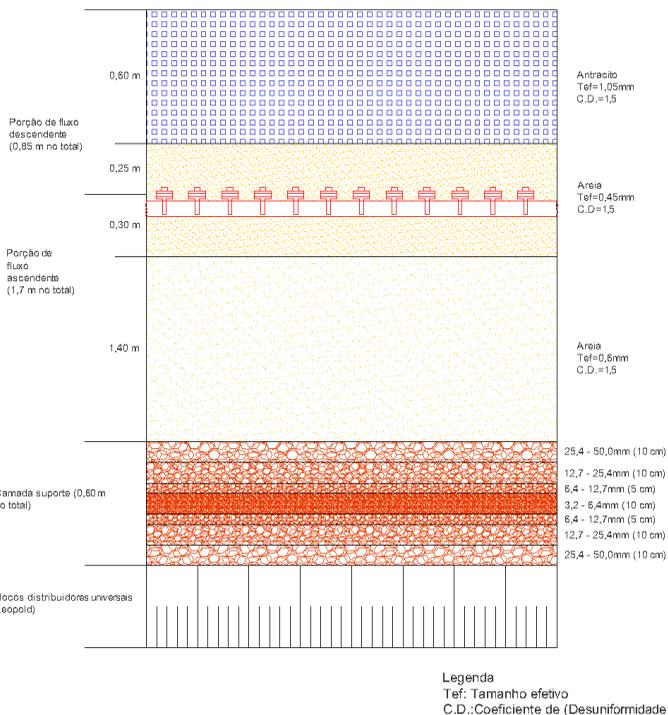
Data:  
 DEZEMBRO/2016

Autor e Desenhista:  
 DIEGO BRUNELLI GHISI

Escala:  
 S/ Esc

Folha:  
 APÊNDICE B

APÊNDICE C - DETALHE DA CAMADA FILTRANTE, CAMADA SUPORTE E FUNDO DO FILTRO



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
 UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

Referência: Proposta de um modelo de projeto de filtro rápido biflúxo para tratamento de água de abastecimento -  
 DETALHE DA CAMADA FILTRANTE, CAMADA SUPORTE E FUNDO DO FILTRO

Data: <b>DEZEMBRO/2016</b>	Autor e Desenhista: <b>DIEGO BRUNELIGHISI</b>	Escala: <b>S/ Esc</b>	Folha: <b>Apêndice C</b>
-------------------------------	--	--------------------------	-----------------------------