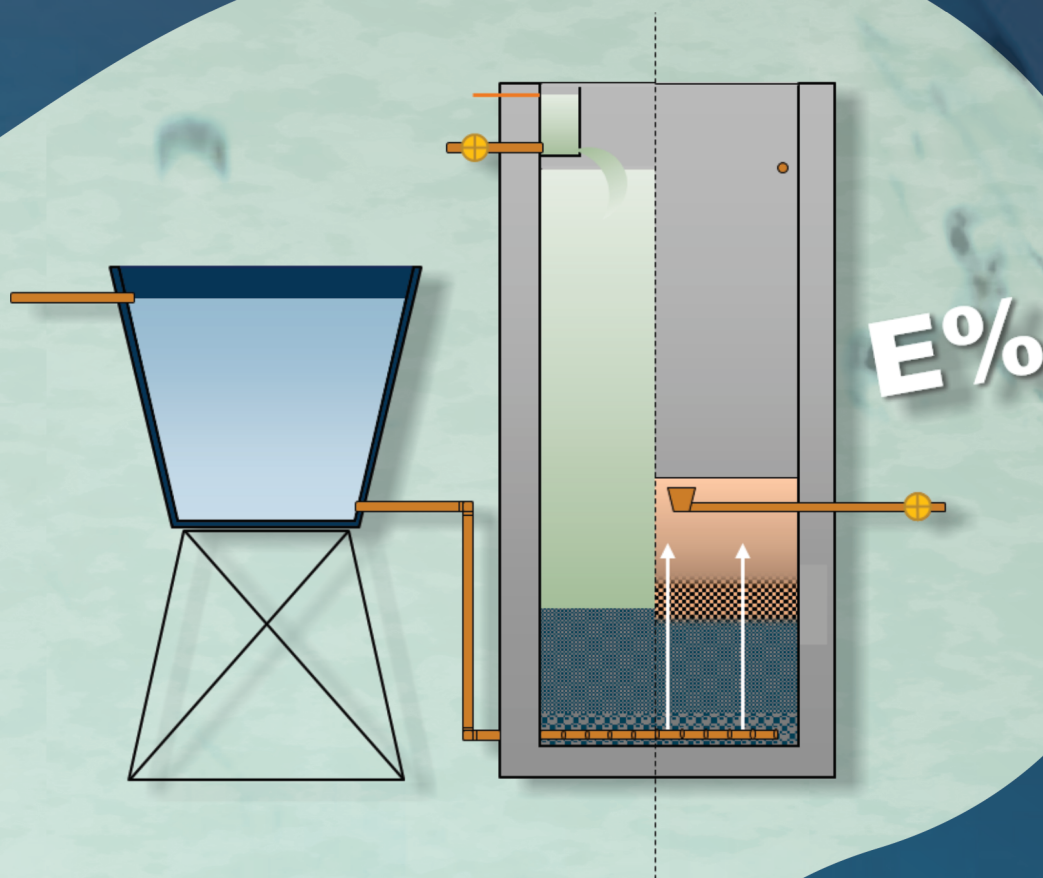




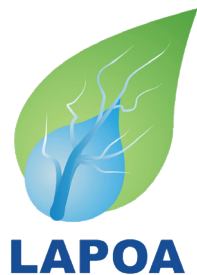
Projeto e Operação de Filtros Lentos Retrolaváveis para o Tratamento de Água para Abastecimento



FERNANDO HYMNÔ DE SOUZA
MAURÍCIO LUIZ SENS
Organizadores

CADERNO TÉCNICO

Projeto e Operação de Filtros Lentos Retrolaváveis para o Tratamento de Água para Abastecimento



FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE

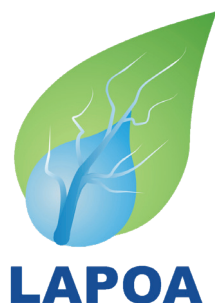
CADERNO TÉCNICO

Projeto e Operação de Filtros Lentos Retrolaváveis para o Tratamento de Água para Abastecimento

FERNANDO HYMNÔ DE SOUZA

MAURÍCIO LUIZ SENS

Organizadores



Copiart

Tubarão-SC, 2019



2019. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde.

Essa obra é disponibilizada nos termos da Licença Creative Commons – Atribuição – Não Comercial – Compartilhamento pela mesma licença 4.0 Internacional. É permitida a reprodução parcial ou total dessa obra, desde que citada a fonte.

A coleção institucional do Ministério da Saúde pode ser acessada, na íntegra, na Biblioteca Virtual em Saúde do Ministério da Saúde: <<http://www.saude.gov.br/bvs>>; e no Site da Fundação Nacional de Saúde: <<http://www.funasa.gov.br/site/publicacoes>>

Tiragem: 1ª edição - 2019 - 500 exemplares

Elaboração, distribuição e informações:

MINISTÉRIO DA SAÚDE
Fundação Nacional de Saúde
Departamento de Engenharia de Saúde Pública (Densp)
Coordenação Geral de Cooperação Técnica em Saneamento (Cgcot)
Coordenação de Informação e Tecnologia em Saneamento (Codet)
Edifício PO 700 – Setor de Rádio e Televisão Norte (SRTVN) – Quadra
701 – Lote D – 2º andar
CEP: 70.719 - 040, Brasília – DF
Tel: (61) 3314-6233
Home page: <http://www.funasa.gov.br>

Universidade Federal de Santa Catarina

Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima, s/n
Florianópolis-SC, CEP: 88040-900

Elaboração de texto

Fernando Hymnô de Souza
Maurício Luiz Sens

Apoio

Esta publicação é um dos produtos da pesquisa, “Avaliação da eficiência da filtração lenta com retrolavagem, na remoção de protozoários (Giardia e Cryptosporidium), como tratamento de água para consumo humano”, desenvolvida com recursos do Programa de Pesquisa em Saúde e Saneamento da Funasa.

Ilustrações

Fernando Hymnô de Souza

Capa, projeto gráfico e diagramação

Rita Motta, sob coordenação da Gráfica e Editora Copiart

Ficha Catalográfica

Brasil. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde.

Caderno técnico: projeto e operação de filtros lentos retrolaváveis para o tratamento de água para abastecimento / Fundação Nacional de Saúde. – Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
64 p. : il.

ISBN 978-85-8388-146-9

1. Purificação da Água. 2. Desinfecção da Água. 3. Água Potável. 4. Qualidade da Água. I. Título.

CDU.628.1

Catalogação na fonte – Divisão de Museu e Biblioteca – Funasa

Títulos para indexação

Em inglês: Technical notebook: design and operation of backwash slow sand filters for drinking water treatment

Em espanhol: Cuaderno técnico: diseño y operación de filtros lentos retrolavables para el tratamiento de agua de abastecimiento

APRESENTAÇÃO

O presente caderno técnico trata-se da apresentação da tecnologia de filtração lenta com retrolavagem, uma alternativa para a limpeza de filtros lentos. Essa concepção de filtros lentos é resultado de anos de pesquisa desenvolvida na **Universidade Federal de Santa Catarina** pelo **Grupo de Pesquisa em Tratamento de Água** no **Laboratório de Potabilização das Águas**.

Em parceria com a **Fundação Nacional de Saúde, por meio do Programa de Pesquisa em Saúde e Saneamento**, foi realizado um projeto sobre a remoção de protozoárias em filtros lentos retrolaváveis onde também foram avaliados seus custos e propostas de aplicação que, somado aos 15 anos de pesquisa anteriores, resultaram nesse caderno.

Espera-se que a tecnologia possa ser esclarecida e disseminada com o objetivo de facilitar a operação de filtros lentos em diversas escalas de aplicação, melhorando o acesso a água de boa qualidade aos usuários por meio de um sistema de tratamento simples, de fácil replicação, operação e manutenção.

Portanto, primeiramente apresenta-se a filtração lenta de maneira geral e resumida como embasamento à técnica. Em sequência é discutida a filtração lenta com retrolavagem (foco do caderno), seus avanços e sugestões de aplicação, acompanhadas de roteiros de cálculos e parâmetros ideais de projeto.



Maurício Luiz Sens

Professor titular do **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental** da **Universidade Federal de Santa Catarina**. É **Engenheiro Sanitarista** com vasta experiência em projetos para **Tratamento de Águas para Abastecimento**. **Doutor** em tratamento de água pela **Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes, da Université de Rennes I**, é pesquisador desde 1983, tendo desenvolvidos diversos projetos na área, além da orientação de projetos de iniciação científica, trabalhos de conclusão de curso, mestrados e doutorados.

Participou e coordenou projetos de pesquisas como Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), dentre outros financiados pela Financiadora de Produtos e Projetos (FINEP), Fundação Nacional da Saúde (FUNASA) e a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI). Ainda participou do projeto de extensão financiado pela Petrobras, o Tecnologias Sociais Para a Gestão da Água (TSGA), em que palestrou sobre saneamento a produtores rurais e assessorou a instalação de filtros lentos em escolas no estado. Além da filtração lenta especificamente, tem vasto conhecimento e histórico em pesquisas em tratamento de água no desenvolvimento de tecnologias para pequenas comunidades, otimização dos processos e sistemas, desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento, tecnologias avançadas, tratamento de água em emergências e tratamento de efluentes de estações de tratamento de água.



Fernando Hymnô de Souza

Engenheiro Sanitarista e Ambiental, doutorando pelo **Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental**. Estuda filtração lenta desde 2009 em projetos de iniciação científica, mestrado e atualmente doutorado. Especializou-se na operação de filtros lentos, sendo um grande entusiasta da tecnologia, participando de estudos do filtro retrolavável e testando pela primeira vez um sistema em fluxo ascendente. Em 2015 teve a oportunidade de visitar as estações de tratamento de água com filtração lenta em Santa Catarina em projeto em parceria com a Fundação Nacional da Saúde, onde pôde fazer um diagnóstico do uso da tecnologia no estado, adquirindo e compartilhando informações com engenheiros e técnicos responsáveis pelos sistemas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Purificação da água em filtros lentos	17
Figura 2 – Filtro lento com nível constante de água sobrenadante e taxa declinante	19
Figura 3 – Filtro lento com nível variável de água sobrenadante	19
Figura 4 – Classificação de águas naturais para abastecimento público segundo ABNT NBR 12216/92	
Figura 5 – Fluxograma de estações de tratamento de água com filtração lenta apenas	23
Figura 6 – Fluxograma da filtração em múltiplas etapas	23
Figura 7 – Fluxograma da filtração lenta com o uso de pré-filtros	24
Figura 8 – Fluxograma de tratamento com aerador e filtro lento	24
Figura 9 – Fluxograma de tratamento com coagulação e filtro lento	25
Figura 10 – Filtro lento retrolavável de escala domiciliar ou coletiva durante a filtração	27
Figura 11 – Filtro lento retrolavável de escala domiciliar ou coletiva durante a retrolavagem	27
Figura 12 – Filtro lento retrolavável com água bruta de escala domiciliar ou coletiva durante a filtração	28
Figura 13 – Filtro lento retrolavável com água bruta de escala domiciliar ou coletiva durante a retrolavagem	28
Figura 14 – Água sobrenadante dos filtros lentos alimentando a retrolavagem	31
Figura 15 – Reservatório elevado fornecendo água para a retrolavagem	32
Figura 16 – Reservatório fornecendo água para a retrolavagem por bombeamento	32
Figura 17 – Filtro com limpeza por ligação direta da água bruta ao fundo	33
Figura 18 – Instalação de calhas nos filtros lentos	34
Figura 19 – Comportamento da turbidez da água filtrada nas primeiras horas de operação de filtros lentos	35
Figura 20 – Filtro lento retrolavável de fluxo ascendente filtrando	36
Figura 21 – Filtro lento retrolavável de fluxo ascendente durante descarga de fundo com entrada de água na interface	37
Figura 22 – Filtro lento retrolavável de fluxo ascendente durante retrolavagem	38
Figura 23 – Posicionamento e dimensão das calhas	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores máximos de parâmetros selecionados de qualidade de águas doces classe I, segundo o CONAMA	22
Tabela 2 – Parâmetros de projeto recomendados para filtros lentos retrolaváveis	39
Tabela 3 – Parâmetros recomendados para o cálculo do número de Reynolds	45

LISTA DE EXEMPLOS DE CÁLCULOS

Exemplo 5.1 – Estimativa do número de filtros lentos	41
Exemplo 5.2 – Perda de carga no meio fluidificado	43
Exemplo 5.3 – Cálculo da velocidade de aproximação durante a retrolavagem	46
Exemplo 5.5 – Cálculo das dimensões e posicionamento de calhas	50
Exemplo 5.6 – Cálculo da altura mínima do reservatório	52
Exemplo 5.7 – Altura do filtro lento independente do sistema de retrolavagem	53
Exemplo 5.8 – Altura do filtro lento retrolavável com água filtrada com reservatório acoplado (filtro em escala comunitária)	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
CU	Coeficiente de Uniformidade
DBO₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias
ETA	Estação de Tratamento de Água
FIME	Filtração em Múltiplas Etapas
FL	Filtração Lenta
FLA	Filtro Lento Ascendente
FLC	Filtro Lento Convencional
FLR	Filtro Lento Retrolavável
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
LAPOA	Laboratório de Potabilização das Águas (pronuncia-se Lapoá)
MF	Meio Filtrante
MS	Ministério da Saúde
NBR	Norma Brasileira aprovada pela ABNT
OD	Oxigênio Dissolvido
OMS/WHO	Organização Mundial da Saúde / <i>World Health Organization</i> (inglês)
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para a Infância

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
" (in)	Polegada(s)
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
μg	Micrograma(s)
A_f	Área do filtro
A_t	Área total de filtração
b	Largura útil da calha
C	Comprimento do filtro
cm	Centímetro(s)
d	Dia(s)
d	Diâmetro dos grãos
E	Expansão do meio filtrante
e	Espaçamento entre calhas
g	Aceleração da gravidade
H	Altura máxima de água na calha
H_c	Altura do fundo da calha em relação ao meio filtrante
H_{cs}	Altura da camada suporte
h_f	Perda de carga total no meio filtrante fluidificado
$h_{\text{mín R}}$	Altura mínima do reservatório em relação ao topo das calhas
h_p	Perdas de carga no sistema
H_r	Altura do fundo da calha em relação ao meio filtrante
H_s	Altura da coluna d'água sobrenadante
H_t	Altura do filtro
l_E	Profundidade do meio filtrante expandido
k_e	Coefficiente de perda de carga devido à forças estáticas
Kg	Quilograma(s)

k_v	Coefficiente de perda de carga devido às forças de viscosidade
L	Litro(s)
L	Largura do filtro
l_0	Espessura do meio filtrante em repouso
m	Metro(s)
m^2	Metro(s) quadrado(s)
m^3	Metro(s) cúbico(s)
mg	Miligramma(s)
min	Minuto(s)
mL	Mililitro(s)
mm	Milímetro(s)
N_f	Número de filtros
NMP	Número mais provável
N-NO₂	Nitrogênio como nitrito
N-NO₃	Nitrogênio como nitrato
P	Fósforo
p_0	Porosidade do meio filtrante
pH	Potencial hidrogeniônico
Q_c	Vazão na calha
Q_t	Vazão total de filtração
Re	Número de Reynolds para o fluxo entorno do grão de areia
s	Segundo(s), unidade de tempo
s^2	Segundo(s) quadrado(s)
S_a	Densidade relativa da areia à água
T	Taxa de filtração
t	Tempo de limpeza do filtro
$T_{máx}$	Taxa máxima
uT	Unidade(s) de turbidez
v_a	Velocidade de aproximação
V_r	Volume do reservatório de água para retrolavagem
β	Fator de cálculo da retrolavagem
ϵ_E	Porosidade do meio expandido
ϵ_r	Porosidade do meio em repouso
ρ_a	Densidade da água
ρ_p	Densidade da areia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. FILTRAÇÃO LENTA	16
2.1 Filtros de nível constante	18
2.2 Filtros de nível variável	19
2.3 Filtros de fluxo contínuo	20
2.4 Filtros de fluxo intermitentes	20
3. SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA COM FILTRAÇÃO LENTA	21
3.1 Estações de tratamento de água com filtração lenta	22
3.2 Filtração em múltiplas etapas	23
3.3 Sistemas com pré-filtros	23
3.4 Sistemas com aeradores	24
3.5 Sistemas com coagulação	24
4. FILTRO LENTO COM RETROLAVAGEM	26
4.1 Meio Filtrante	29
4.2 Limpeza dos Filtros Retrolaváveis	29
4.3 Água de Lavagem	30
4.3.1 Água sobrenadante proveniente de outras unidades de filtração	31
4.3.2 Água de lavagem proveniente de reservatório elevado	31
4.3.3 Limpeza por bombeamento ou ligação direta da água bruta	32
4.4 Instalação de Calhas	33
4.5 Período de Recuperação dos Filtros e Carreira de Filtração	34
4.6 Filtros Lentos Ascendentes com Retrolavagem	35
5. PROJETO DE FILTROS LENTOS RETROLAVÁVEIS	39
5.1 Resumo das principais características recomendadas	39

5.2	Área de filtração e número de filtros	40
5.3	Perda de carga na camada filtrante limpa	42
5.4	Perda de carga no meio fluidificado	42
5.5	Velocidade de lavagem e Expansão do meio filtrante	43
5.6	Volume de água para lavagem	47
5.7	Calhas dos filtros	48
5.8	Altura do reservatório dos filtros	51
5.9	Água sobrenadante	53
5.10	Altura dos filtros	53
GLOSSÁRIO		57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		60

1

INTRODUÇÃO

O acesso à água potável é essencial à saúde. Água sem tratamento pode servir como vetor de doenças, tendo como maior vítima a população infantil e idosa. A Organização Mundial da Saúde (OMS) e o Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) estimam que 748 milhões de pessoas não têm acesso a uma fonte de água tratada, sendo que 1,8 bilhão tem, como sua principal fonte, água contaminada com material fecal (WHO; UNICEF, 2014). No Brasil, 17,5% da população não é atendida por redes ligadas a sistemas de abastecimento, sendo fontes alternativas (poços, nascentes, cisternas, carro pipa etc.) a solução para seu abastecimento (BRASIL; 2014).

Dependendo da qualidade da água a ser tratada e a qualidade desejada, tecnologias simples podem ser empregadas para seu tratamento. Entretanto, é essencial o acesso da população à água de boa qualidade, como a fornecida pelos sistemas públicos de abastecimento. No entanto essa ainda não é a realidade dos brasileiros, sendo a população rural a mais afetada. Segundo a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) nessas áreas, que são mais remotas, apenas 33,2% dos domicílios estão ligados à rede de abastecimento (FUNASA, 2012).

A filtração lenta é uma tecnologia considerada eficiente, de simples construção e manutenção, podendo ser utilizados recursos locais e sem dosagem de produtos químicos em sua operação (GIMBEL; GRAHAM; COLLINS, 2006). Assim, são excelentes alternativas para o abastecimento de água em áreas rurais em escala domiciliar ou para pequenas comunidades (LOGSDON; KOHNE; ABEL, 2002).

A raspagem da areia na superfície do filtro é o método de limpeza mais usual. No entanto, propõe-se a retrolavagem como uma técnica eficiente para a limpeza dos filtros (PIZZOLATTI, 2010, 2014; PIZZOLATTI et al., 2010, 2014; MICHELAN et al., 2011; DE SOUZA, 2013, 2015). A retrolavagem é uma operação simples para sistemas com filtração lenta que poderiam ser facilmente automatizados em sistemas em grande escala ou, em escala domiciliar, poderia ser facilmente operado pelo usuário.

2

FILTRAÇÃO LENTA

A filtração lenta (FL) é possivelmente uma das técnicas mais antigas para o tratamento de água em sistemas públicos e, ainda assim, é amplamente utilizada ao redor de todo o mundo (NAKAMOTO et al., 2014). Sistemas de FL são conhecidos por sua simplicidade na construção e operação.

Em filtros lentos a água é introduzida no filtro com baixas taxas de filtração (entre 3 e 12 m³/m².d). A taxa de filtração é definida pela razão entre a vazão aplicada e a área de filtração (Equação 2.1). Baixas taxas permitem a remoção de material suspenso na superfície do meio filtrante por mecanismos físicos e a remoção de patógenos principalmente por meio da atividade biológica (Figura 1).

Equação 2.1

$$A_t = \frac{Q_t}{T}$$

Onde:

- A_t – Área total de filtração (m²);
- T – Taxa de filtração (m³/m².d);
- Q_t – Vazão total de filtração (m³/d).

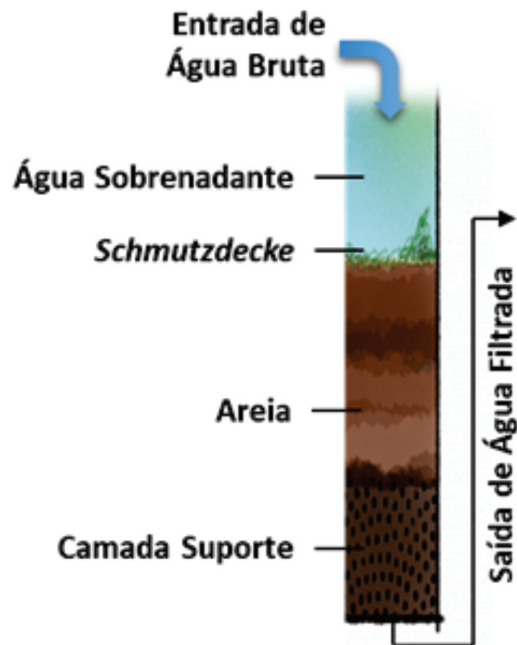


Figura 1 – Purificação da água em filtros lentos.
Fonte: os autores.

Recursos locais podem ser utilizados em sua construção, não há a necessidade de tratamento químico prévio ao filtro e, devido à isso, mão de obra especializada necessária na operação geralmente pode ser dispensada (GIMBEL; GRAHAM; COLLINS, 2006; SÁ, 2006; LANGENBACH et al., 2010; DE SOUZA et al., 2018).

Com a deterioração dos mananciais, o aumento da demanda e o desenvolvimento e a disseminação do sistema convencional com coagulação, floculação seguida de decantação e filtração rápida a FL passou a ser menos usada, pois necessita de maiores áreas para implantação e são aplicáveis a água de boa qualidade (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999). Contudo, há situações em que sistemas simples de pré-tratamento podem ser empregados para a adequação da água aos filtros lentos.

Filtros lentos são considerados mais naturais por não serem utilizados produtos químicos e dependerem das interações biológicas que acontecem dentro deles. Ainda é uma simples alternativa para o controle de microrganismos patógenos, subprodutos da desinfecção e recrescimento de microrganismos em redes de abastecimento

(GIMBEL; GRAHAM; COLLINS, 2006; NAKAMOTO et al., 2014). Por fim, recentemente a FL vem sendo reconhecida por sua capacidade na remoção de contaminantes emergentes como agrotóxicos e produtos farmacêuticos e de cuidados e higiene pessoal (SUMMERS, 2014).

No Brasil é utilizada principalmente para a potabilização de água onde a instalação e operação de Estação de Tratamento de Água (ETA) convencional com coagulação, floculação e decantação é algo inviável devido à ausência de mão de obra especializada ou de recursos econômicos compatíveis (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999). De Souza et al. (2018) relatam que 6% dos municípios de Santa Catarina utilizam a FL como forma de tratamento em seu sistema de abastecimento público, sendo que em metade deles é o único processo (além de desinfecção) utilizado nas ETAs.

Os filtros lentos podem ser classificados de acordo com sua operação, que é influenciada por características fundamentais de projeto. Podem ser de escoamento descendente ou ascendente, com fluxo contínuo ou intermitente, de nível constante ou variável.

2.1 Filtros de nível constante

Filtros de nível constante são aqueles em que o nível de água sobrenadante permanece constante no decorrer da operação. Podem operar em taxa declinante (mais comum) ou taxa constante. Ao longo da carreira de filtração o meio filtrante tende a ficar obstruído, dificultando a passagem da água devido ao aumento da perda de carga no meio filtrante e a carga hidráulica disponível permanecer constante. Assim, cada vez menos água passa pelo filtro, diminuindo a taxa de filtração. Por isso a taxa é chamada de declinante. Filtros de nível constante podem operar com taxa constante, contudo, a obstrução do meio filtrante deve ser compensada facilitando a saída da água, dessa maneira controla-se continuamente a saída de água compensando a perda de carga desenvolvida no meio filtrante e mantendo a taxa constante.

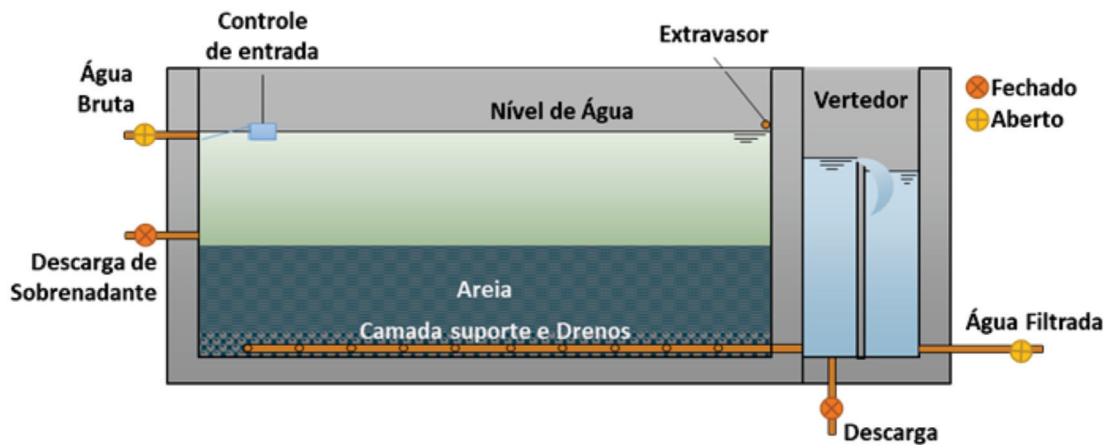


Figura 2 – Filtro lento com nível constante de água sobrenadante e taxa declinante.
Fonte: os autores.

2.2 Filtros de nível variável

Filtros de nível variável possuem altura disponível para o aumento da coluna d'água acima do meio filtrante ao longo do tempo. A taxa mantém-se constante por meio da elevação da altura da coluna d'água, compensando a perda de carga desenvolvida pela obstrução do meio filtrante.

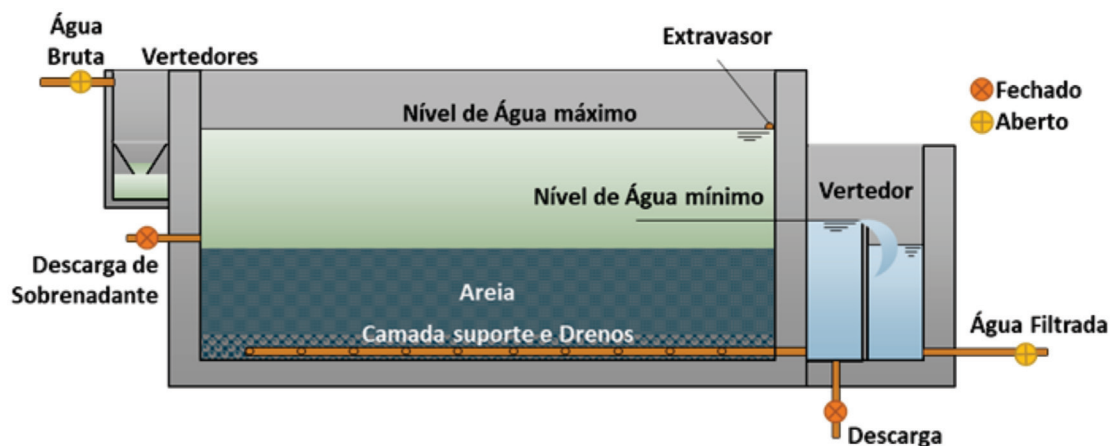


Figura 3 – Filtro lento com nível variável de água sobrenadante.
Fonte: os autores.

2.3 Filtros de fluxo contínuo

Filtros de fluxo contínuo são aqueles que operam sem variação no fluxo ao longo da operação diária. Ou seja, não há interrupção da vazão aplicada no filtro. O fluxo contínuo garante um aporte contínuo de oxigênio e nutrientes para o sistema, o que é interessante para as atividades biológicas.

2.4 Filtros de fluxo intermitentes

Filtros de fluxo intermitente são aqueles em que o fluxo não é constante, ou seja, há pausas no abastecimento do filtro. Longas pausas não são recomendadas, uma vez que para a eficiência da atividade biológica no filtro há necessidade de circulação da água, trazendo oxigênio e nutrientes utilizado pelos organismos.

3

SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA COM FILTRAÇÃO LENTA

A filtração lenta é recomendada para o tratamento de águas de boa qualidade de maneira que não seja prejudicada a eficiência do tratamento pelo filtro e sua operação, com sobrecargas resultando o rápido aumento de perda de carga. Por isso seu uso é recomendado pela **ABNT NBR 12216/92 sobre Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento** para águas classificadas como **tipo B** pela mesma norma (Figura 4) (ABNT, 1992). Autores recomendam que a turbidez de águas utilizadas para filtração lenta não ultrapasse 10 uT (HUISMAN; WOOD, 1974; DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999).

Parâmetro	Água tipo B
DBO ₅ média (mg/L)	1,5 – 2,5
DBO ₅ máxima (mg/L)	3 – 4
Média mensal de Coliformes (NMP/100 mL)	100 – 5000
Máximo de Coliformes (NMP/100 mL)	>5000 em menos de 20% das amostras
pH	5 – 9
Cloretos	50 – 250
Fluoretos	1,5 – 3,0

Figura 4 – Classificação de águas naturais para abastecimento público segundo ABNT NBR 12216/92.

Fonte: os autores.

Além disso, o **Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA)**, por meio de sua **resolução nº357/05** classifica os corpos d'água de água doce e estabelece valores máximos de seus parâmetros de qualidade de água e tipos de uso. Águas doce de **classe I** podem ser destinadas ao abastecimento público com tratamento simplificado

(BRASIL, 2005). São apresentados na Tabela 1 parâmetros selecionados abordados na norma.

Tabela 1 – Valores máximos de parâmetros selecionados de qualidade de águas doces classe I, segundo o CONAMA.

Parâmetro	Concentração
Turbidez	40 uT
pH	6 - 9
Nitrato	10 mg N-NO ₃ ⁻ /L
Nitrito	1 mg N-NO ₂ ⁻ /L
Fósforo total	0,025 mg P/L
Ferro dissolvido	0,3 mg/L
Clorofila- <i>a</i>	10 µg/L
Densidade de Cianobactérias	20000 células/mL

Fonte: os autores.

Dessa maneira presume-se a eficiência do tratamento e água tratada dentro dos padrões estabelecidos pela **Portaria de Consolidação nº5 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde (MS)**. A portaria exige que a água tenha um **máximo de 2 uT na saída dos filtros lentos**, sendo que deve ser menor que **1 uT em 95% das amostras** (BRASIL, 2017).

Pré-tratamentos podem ser utilizados para a adequação da água aos filtros lentos, como: a redução de material em suspensão, constantemente ou amortecendo picos causados por precipitações; aeração para redução de ferro e manganês; e, menos comum, a coagulação.

3.1 Estações de tratamento de água com filtração lenta

Os sistemas mais comuns utilizam a filtração lenta como principal tratamento (Figura 5), sem a necessidade de adequação da água aos parâmetros adequados para o bom funcionamento dos filtros. Exigem-se apenas desinfecção e fluoretação antes da distribuição.

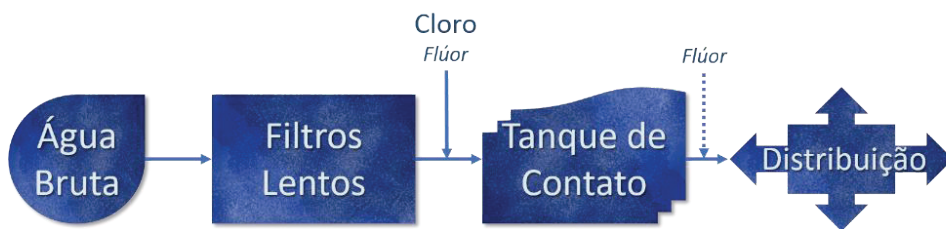


Figura 5 – Fluxograma de estações de tratamento de água com filtração lenta apenas.
Fonte: os autores.

3.2 Filtração em múltiplas etapas

A filtração em múltiplas etapas (FiME) é uma combinação de pré-filtros dinâmicos e pré-filtros grosseiros seguidos por filtros lentos (Figura 6). É recomendada quando a quantidade de sólidos em suspensão (turbidez) é acima da recomendada para filtros lentos (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999). Também pode ser utilizada em casos onde a água é adequada à filtração lenta ou para amortecer picos de turbidez contantes causados por precipitação. Tal alternativa pode eliminar o uso de coagulação.



Figura 6 – Fluxograma da filtração em múltiplas etapas.
Fonte: os autores.

3.3 Sistemas com pré-filtros

Ainda pode ser aplicada uma configuração mais simples com o uso de pré-filtros apenas, quando há necessidade de adequação da água para o uso da filtração lenta. Tal arranjo é reportado por Sens et al. (2017) e de Souza et al. (2018) em estações de tratamento de água no estado de Santa Catarina, onde os

pré-filtros foram usados para o amortecimento de picos de turbidez na água bruta causado por precipitações.

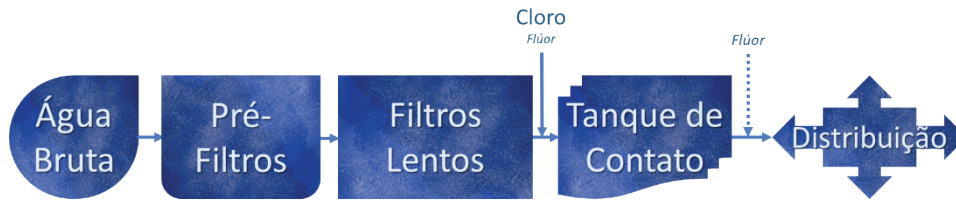


Figura 7 – Fluxograma da filtração lenta com o uso de pré-filtros.

Fonte: os autores.

3.4 Sistemas com aeradores

Aeradores podem ser adotados anteriormente aos filtros lentos para auxiliar a precipitação de manganês e ferro principalmente (Figura 8). São geralmente utilizados para águas subterrâneas que contenham esses metais dissolvidos e que precisam ser removidos antes do consumo. Em contato com o oxigênio do ar o ferro oxida, precipitando e ficando retido no filtro.

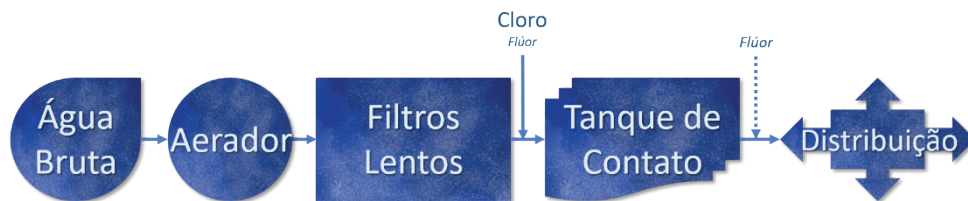


Figura 8 – Fluxograma de tratamento com aerador e filtro lento.

Fonte: os autores.

3.5 Sistemas com coagulação

Existem ainda os sistemas com coagulação, que são menos comuns. Nesse sistema um coagulante é adicionado à água em uma unidade de mistura rápida para desestabilizar as partículas em suspensão que ficarão mais facilmente retidas no filtro (Figura 9).

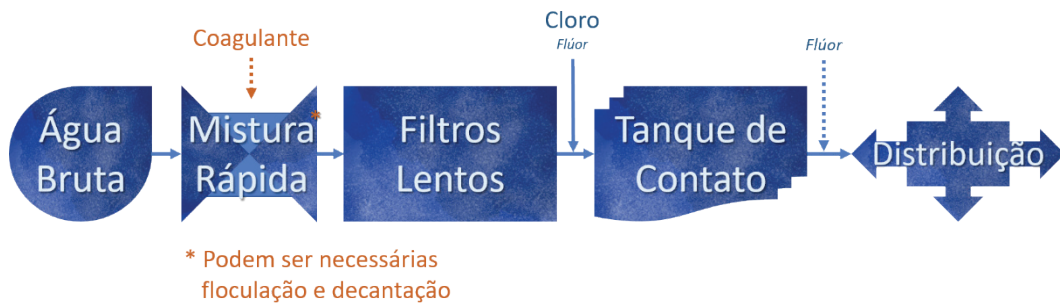


Figura 9 – Fluxograma de tratamento com coagulação e filtro lento.
Fonte: os autores.

4

FILTRO LENTO COM RETROLAVAGEM

A retrolavagem como alternativa à raspagem de filtros lentos é estudada há mais de quinze anos no Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Diversos estudos foram realizados, coordenados pelo professor Dr. Maurício Luiz Sens, para o desenvolvimento e aperfeiçoamento do filtro lento com retrolavagem (FLR) até que se chegasse ao modelo aplicado nos estudos atuais. O modelo foi recentemente descrito por PIZZOLATTI et al. (2014) que aconselha a sua aplicação em filtros de menor escala, uma vez que a retrolavagem é mais bem aplicada a sistemas desse tipo, ao mesmo tempo em que a raspagem é trabalhosa (Figura 10 e Figura 11). Pizzolatti (2010) também apresentou um filtro retrolavável que utiliza água bruta para a limpeza (Figura 12 e Figura 13).

Evidências de seu uso foram relatadas por De Souza et al. (2018) no estado de Santa Catarina. Um sistema utilizava a retrolavagem para a limpeza dos filtros e alguns outros apenas para desprender a sujeira da superfície do filtro, sem expansão do meio filtrante.

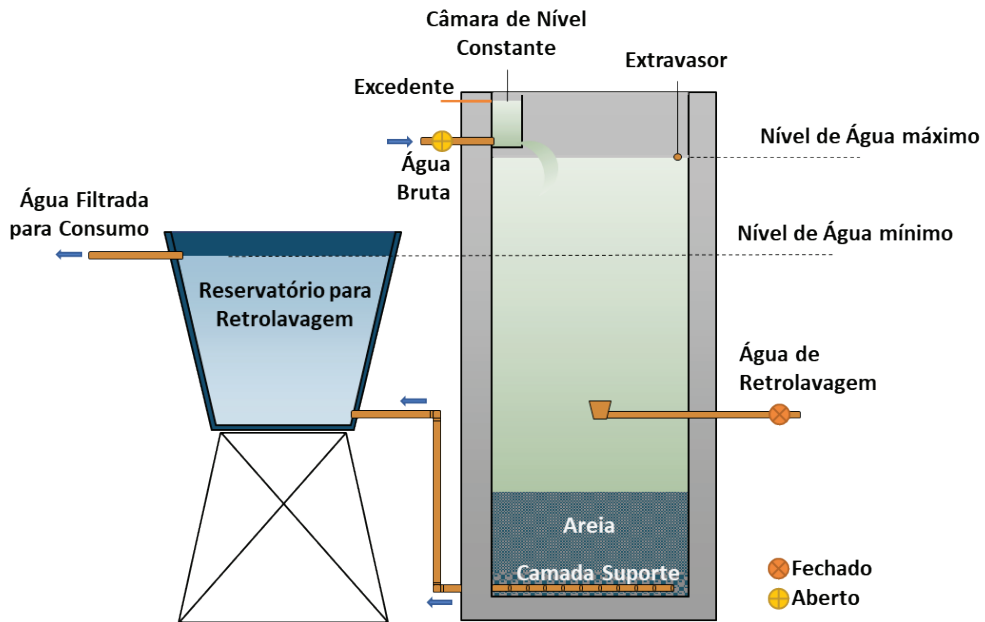


Figura 10 – Filtro lento retrolavável de escala domiciliar ou coletiva durante a filtração.
 Fonte: os autores.

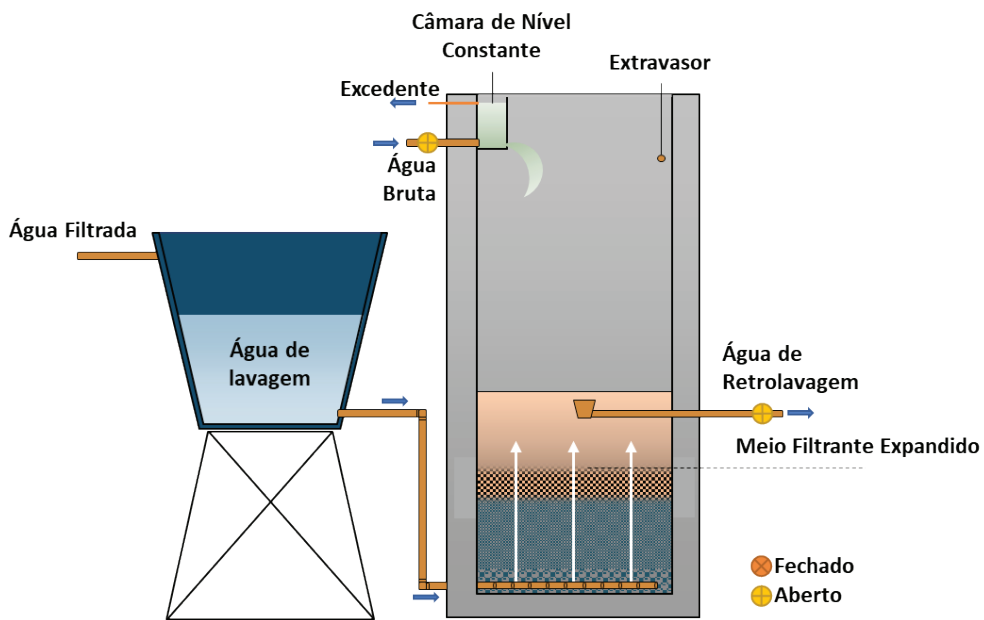


Figura 11 – Filtro lento retrolavável de escala domiciliar ou coletiva durante a retrolavagem.
 Fonte: os autores.

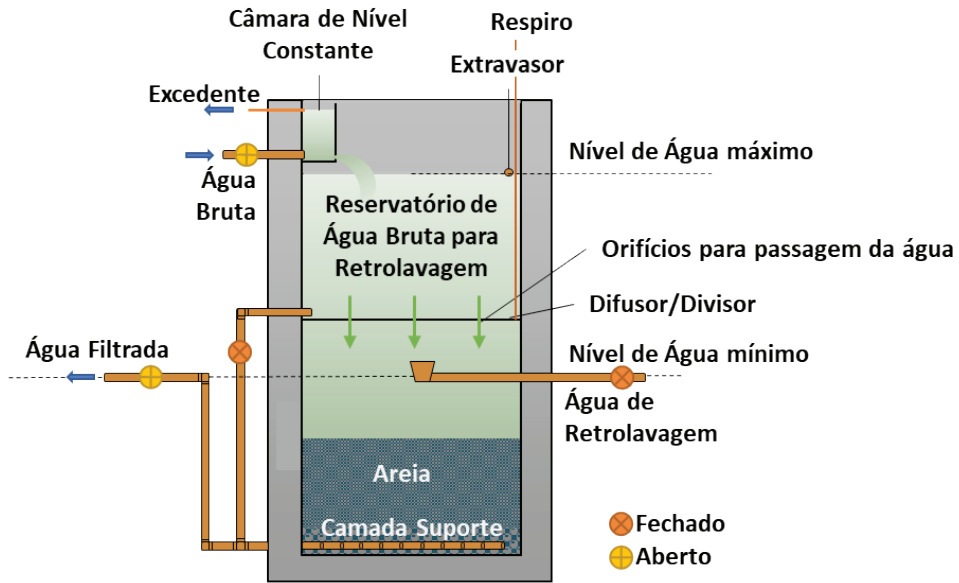


Figura 12 – Filtro lento retrolavável com água bruta de escala domiciliar ou coletiva durante a filtração.
 Fonte: os autores.

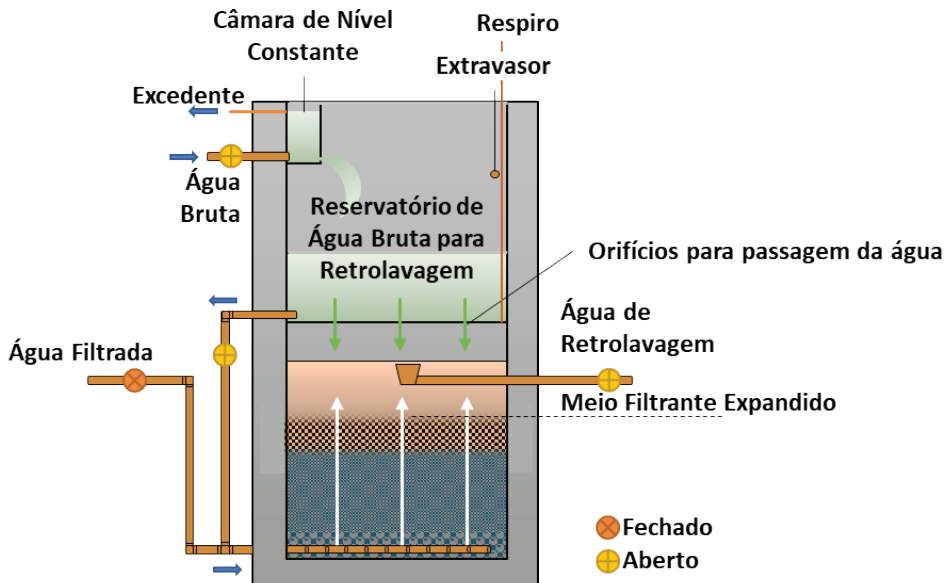


Figura 13 – Filtro lento retrolavável com água bruta de escala domiciliar ou coletiva durante a retrolavagem.
 Fonte: os autores.

4.1 Meio Filtrante

As características do meio filtrante têm relação com os mecanismos de filtração, sendo os menores diâmetros efetivos os mais eficientes na remoção de turbidez, no entanto, isso influencia diretamente no desenvolvimento da perda de carga (DE SOUZA, 2013; PIZZOLATTI, 2014). Assim, os dois parâmetros devem ser balanceados para uma melhor operação dos filtros.

Um fator influente é o coeficiente de uniformidade (CU), sendo os coeficientes maiores aqueles mais fáceis de serem adquiridos e os menores os que mais inibem a penetração de impurezas. Para a filtração lenta recomenda-se coeficiente de uniformidade até 3, no entanto, para retrolavagens de filtros rápidos recomendam-se até 1,7 pela possibilidade de estratificação do meio, o que não é interessante para filtros descendentes.

Em filtros ascendentes di Bernardo e Dantas (2005a) recomendam coeficiente de uniformidade entre 1,5 e 1,8, uma vez que certa estratificação é interessante quando o fluxo é ascendente. Com a estratificação a filtração ocorreria em maior profundidade no sentido de diminuição dos grãos, aumentando a duração da carreira de filtração.

De Souza (2015) analisou a capacidade do meio suporte em reter impurezas e apresenta evidências de que há atividade biológica na camada. Geralmente essa camada tem apenas função drenante. Essa capacidade de tratamento da camada suporte é interessante na operação do filtro, uma vez que pode atuar como pré-filtro no próprio filtro, amenizando picos de turbidez devido à variação da qualidade de água a ser tratada ou poupando o meio filtrante, aumentando as carreiras de filtração (MURTHA, 1998; DE SOUZA, 2015).

4.2 Limpeza dos Filtros Retrolaváveis

Na retrolavagem é feita a passagem de água em velocidade suficiente para expandir, fluidificar e limpar o meio filtrante. Geralmente a água utilizada é filtrada pelo próprio sistema, entretanto, existem estudos de sistemas de limpeza com água bruta (PIZZOLATTI, 2010; ISHII, 2013; DE SOUZA, 2015).

A fluidificação é atingida quando a resultante das forças peso e empuxo é reduzida durante a retrolavagem devido às forças de arraste que agem sobre os grãos

de areia. Ao atingir-se uma velocidade mínima de fluidificação, as pressões entre os grãos devido a essas forças tornam-se zero. A partir disso a fluidificação é iminente. A qualquer velocidade acima dessa o meio manter-se-á fluidificado e a perda de carga será constante (HENDRICKS, 2011).

Considera-se que para uma boa limpeza o meio filtrante (MF) deve estar parcialmente ou totalmente fluidificado, dessa maneira é necessária uma velocidade mínima de fluidificação para que todo o MF se encontre fluidificado.

Outro fator importante na fluidificação é a velocidade de aproximação da água expandindo o meio. Essa velocidade está diretamente relacionada ao volume de água utilizado para a retrolavagem, o que implica na sua renovação no filtro durante a limpeza. Maiores velocidades implicam numa maior renovação o que pode ser uma desvantagem em sistemas em que velocidades menores são utilizadas para a fluidificação, pois, mesmo com o seu desprendimento, a sujeira não será arrastada para fora do filtro (SCHÖNTAG, 2015).

As consequências disso em FLRs não foram estudadas e podem ser variadas. Estudos apontam que essa limpeza ineficiente pode estar relacionada à eficácia do tratamento (MARNOTO, 2008; DE SOUZA et al., 2016; SENS et al., 2017).

4.3 Água de Lavagem

A água recomendada para filtros lentos usualmente possui relativamente boa qualidade (turbidez abaixo de 10 uT). Tal fato sugere que a água bruta poderia ser utilizada para a limpeza nos filtros, desde que com devido tratamento prévio para remoção de sólidos grosseiros. Estudos com água bruta para a retrolavagem apresentaram bons resultados (PIZZO LATTI, 2010, 2014; ISHII, 2013; DE SOUZA, 2015). Em alguns casos os resultados são até melhores que os filtros limpos com água filtrada (PIZZOLATTI, 2010, 2014; ISHII, 2013). Dessa maneira, recomenda-se o uso de água bruta, que não tenha materiais flutuantes grosseiros, ou filtrada (sem desinfecção) para a limpeza de FLRs.

A seguir são apresentadas sugestões de aproveitamento da estrutura de filtros convencionais para a aplicação da retrolavagem.

4.3.1 Água sobrenadante proveniente de outras unidades de filtração

Nessa concepção a água proveniente para a limpeza do filtro seria aquela sobrenadante dos demais ou seções dos mesmos. Devido à redução da camada filtrante, a quantidade de água sobrenadante torna-se maior e com maior carga hidráulica em relação ao meio filtrante a ser lavado. A carga hidráulica disponível para a retrolavagem, nesse caso, depende diretamente da altura do filtro, profundidade do meio filtrante, posicionamento das calhas de coleta da água sobrenadante/lavagem e perdas de carga no sistema.

Assim, a água utilizada para a retrolavagem seria água bruta pré-decantada no próprio filtro.

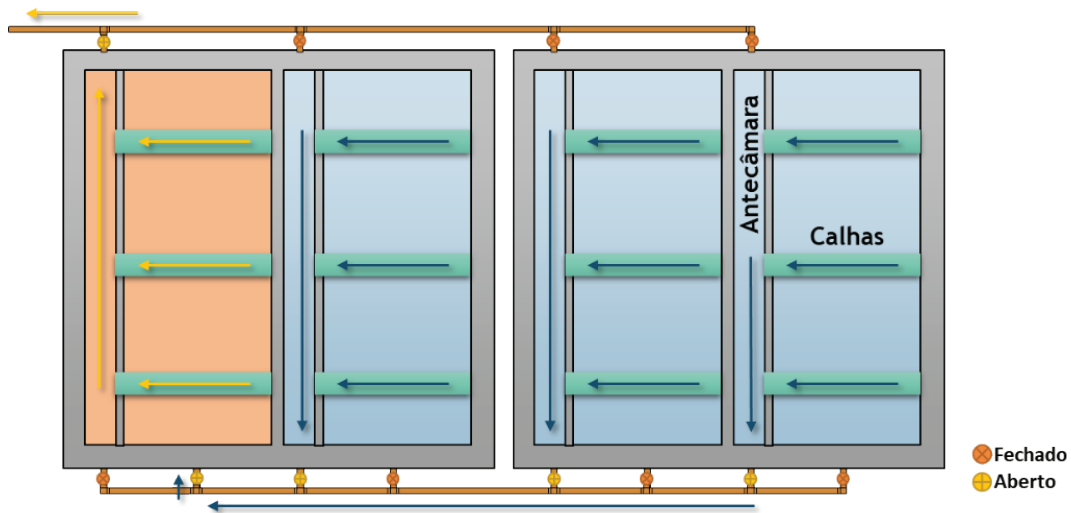


Figura 14 – Água sobrenadante dos filtros lentos alimentando a retrolavagem.
Fonte: os autores.

4.3.2 Água de lavagem proveniente de reservatório elevado

A água de um reservatório elevado também pode ser utilizada para a limpeza do filtro (Figura 15). Nessa concepção, a altura do reservatório determinaria a carga hidráulica disponível para a retrolavagem, eliminando-se as perdas no sistema.

A água para a retrolavagem, nesse caso, poderia ser proveniente diretamente da captação, após tratamento prévio para remoção de sólidos grosseiros, ou água

filtrada. Contudo, pode fazer-se necessário o uso de bombas para o recalque da água até o reservatório. No caso da água bruta, outra vantagem em relação à água filtrada seria a dispensa desse recalque, uma vez que a água bruta pode chegar à ETA com carga hidráulica suficiente para encher o reservatório elevado.

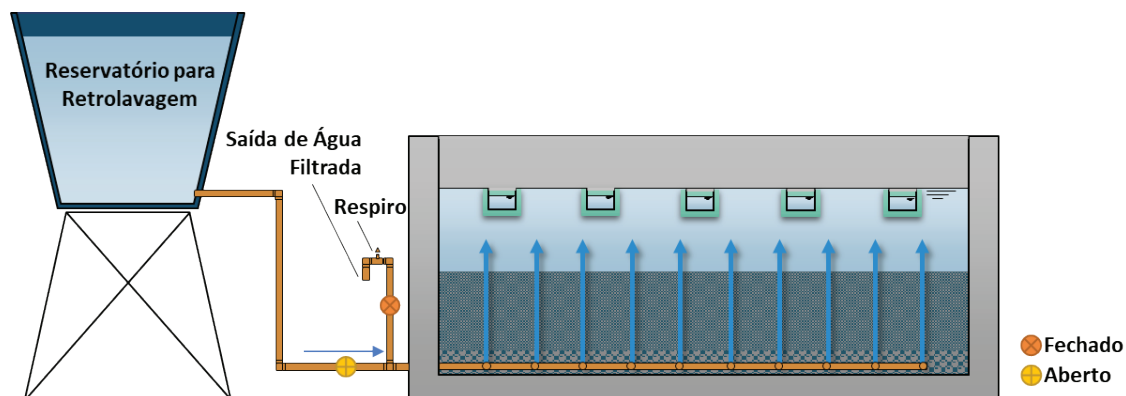


Figura 15 – Reservatório elevado fornecendo água para a retrolavagem.
Fonte: os autores.

4.3.3 Limpeza por bombeamento ou ligação direta da água bruta

A limpeza também pode ser feita com a carga hidráulica disponibilizada por bombeamento. Assim, seria necessário instalar um reservatório com volume de água suficiente para a limpeza do filtro, a ser bombeada para a realização da retrolavagem, seja água bruta ou filtrada (Figura 16).

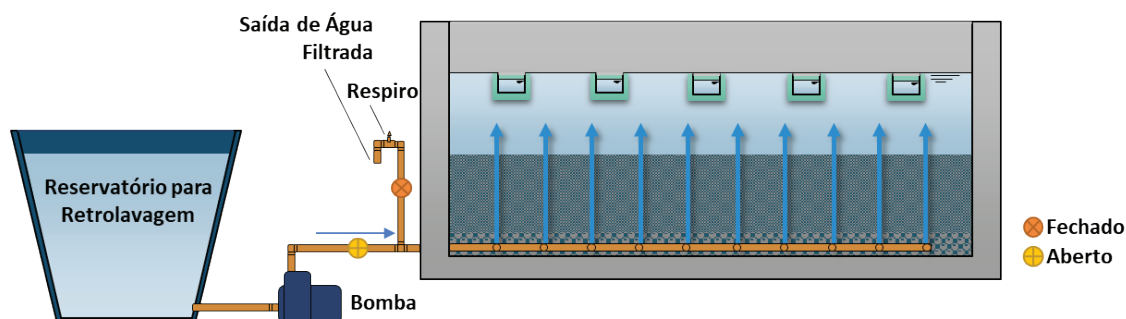


Figura 16 – Reservatório fornecendo água para a retrolavagem por bombeamento.
Fonte: os autores.

Caso a carga hidráulica seja suficiente, a água para a limpeza pode ser bruta, proveniente diretamente do abastecimento para a ETA. Podem ser utilizadas válvulas reguladoras de pressão para garantir-se a expansão desejada no filtro, sem perda de areia (Figura 17). Isso economizaria a instalação de um sistema de bombeamento.

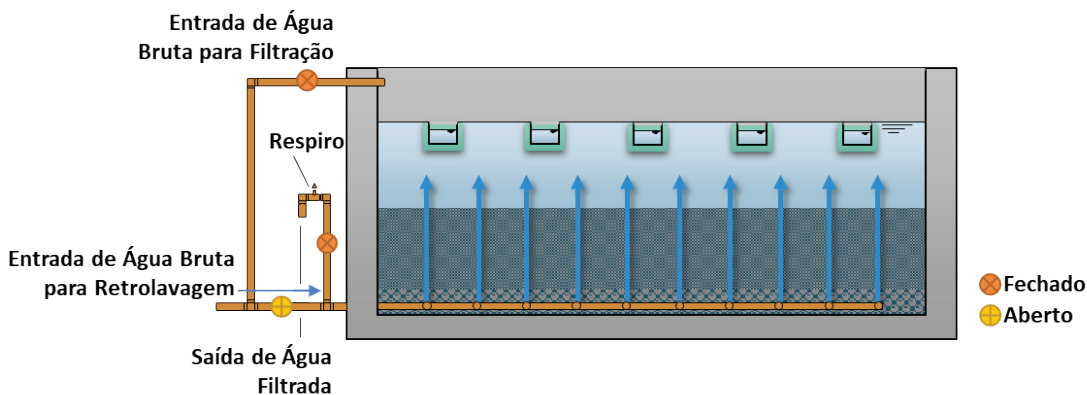


Figura 17 – Filtro com limpeza por ligação direta da água bruta ao fundo.
Fonte: os autores.

4.4 Instalação de Calhas

Para a retrolavagem, faz-se necessária a instalação de calhas coletoras para direcionamento da água de lavagem para fora do filtro. Recomenda-se que as calhas estejam distribuídas ao longo do filtro de maneira que se equalize o fluxo de lavagem, supram a necessidade de escoamento da água de lavagem e possibilitem o acesso ao meio filtrante (Figura 18). A instalação deve ser em altura suficiente a não permitir saída de material filtrante durante a retrolavagem.

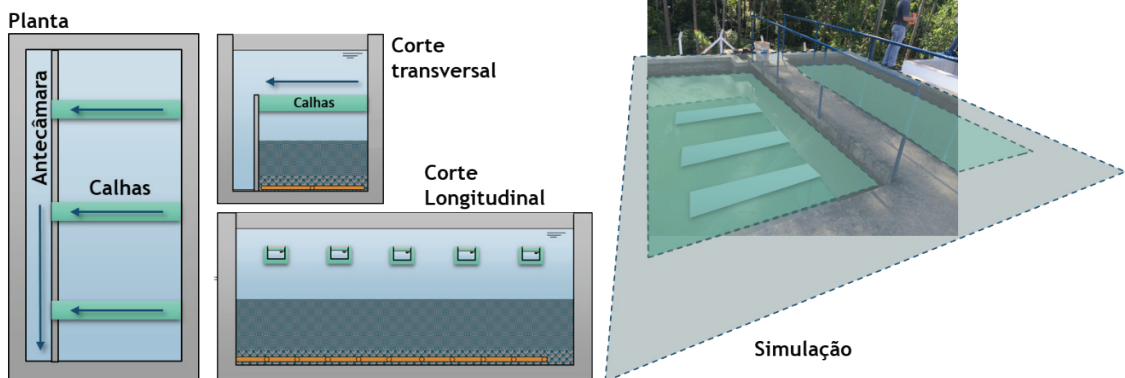


Figura 18 – Instalação de calhas nos filtros lentos.
 Fonte: os autores.

4.5 Período de Recuperação dos Filtros e Carreira de Filtração

Durante as primeiras horas de filtração a qualidade da água filtrada pode não ser adequada ao consumo, melhorando com o decorrer do tempo (Figura 19). Esse tempo em que o filtro apresenta melhora contínua em sua performance até o tratamento adequado é denominado período de recuperação. Aconselha-se que a água produzida nesse período seja descartada.

O comportamento da turbidez nas primeiras horas de filtração é diferenciado entre os FLRs e FLCs. Nos FLRs o decaimento da turbidez nas primeiras horas de filtração é suave, enquanto nos FLCs há um pico seguido de queda acentuada de turbidez (Figura 19). Contudo, após algumas horas o comportamento em ambos os tipos de filtros é semelhante.

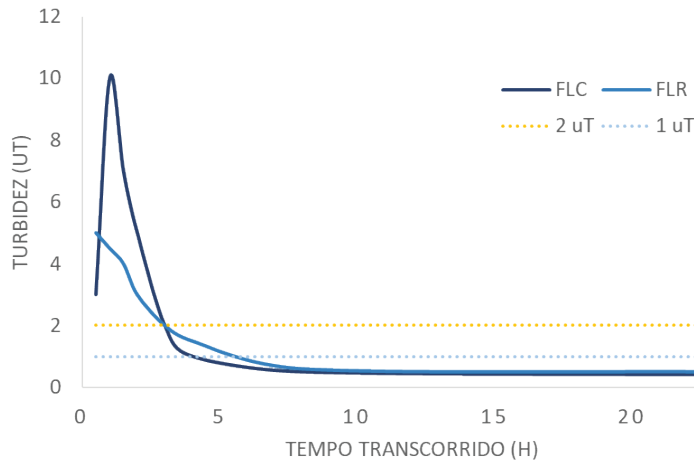


Figura 19 – Comportamento da turbidez da água filtrada nas primeiras horas de operação de filtros lentos.
Fonte: os autores.

Observação importante: aconselha-se o acompanhamento da qualidade de água no filtro após a sua limpeza, antes que a água filtrada seja liberada para consumo.

4.6 Filtros Lentos Ascendentes com Retrolavagem

Filtros lentos ascendentes com retrolavagem foram propostos por M. L. Sens e estudados por De Souza (DE SOUZA, 2015). A partir de então foi proposto um modelo de filtro lento ascendente retrolavável com descarga de fundo e entrada de água na interface entre meio filtrante e camada suporte (Figura 20, Figura 21 e Figura 22).

Em filtros lentos ascendentes a água entra por baixo do filtro, passando primeiramente pela camada suporte e em seguida pelo meio filtrante. Devido a isso, estudos consideram que não há formação do *schmutzdecke* em filtros lentos ascendentes (COSTA, 1980; MURTHA, 1998). Esse tipo de filtro não é usual devido às dificuldades de sua limpeza. Ainda, os filtros com fluxo ascendente necessitam de câmara de carga para propiciar a passagem da água pelo meio filtrante e por isso não há decantação na superfície da camada filtrante.

A descarga com entrada de água na interface é utilizada, pois a descarga de fundo apenas não é eficiente na retirada de material retido no meio filtrante e na camada suporte. Isso se deve à elevada perda de carga no meio filtrante devido à sua granulometria (OLIVEIRA, 2017). Ainda, a descarga desobstrui a camada suporte, facilitando a retrolavagem que, por sua vez, limpa o meio filtrante. Os dois processos de limpeza combinados são essenciais para uma eficiente limpeza do filtro (DE SOUZA, 2015).

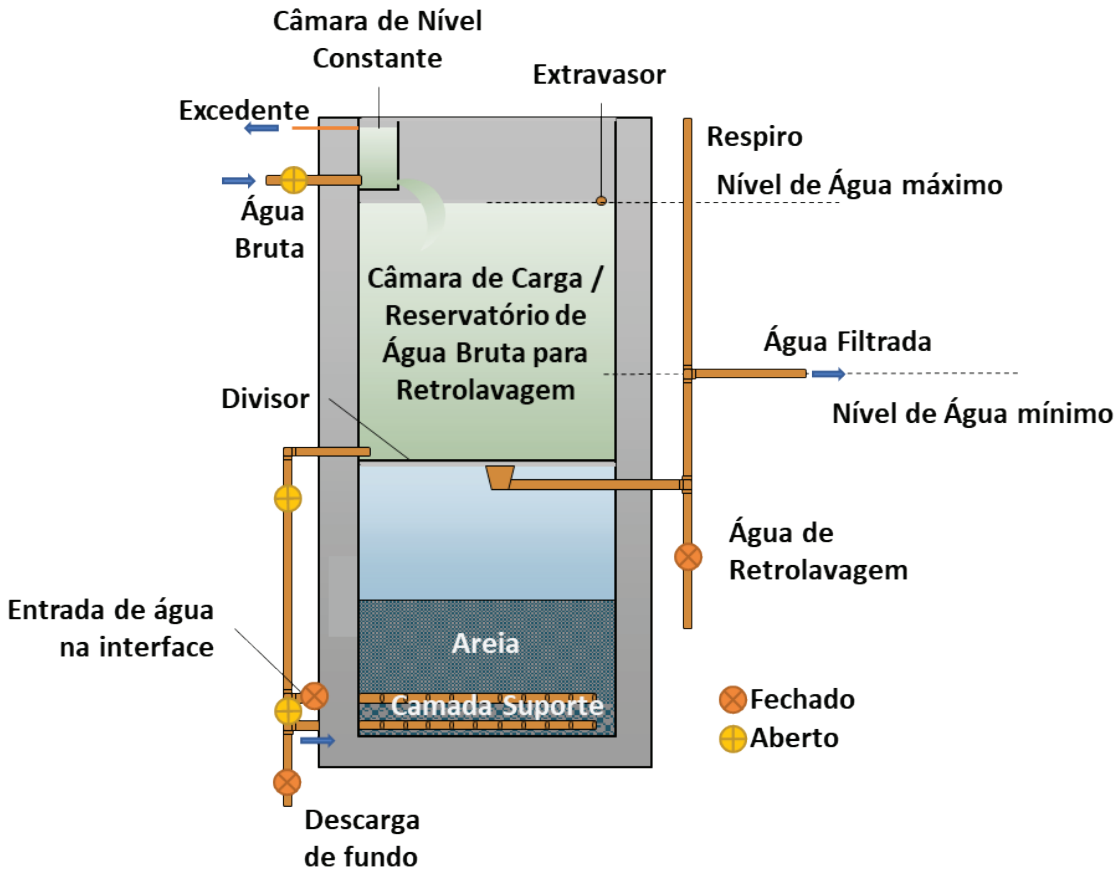


Figura 20 – Filtro lento retrolavável de fluxo ascendente filtrando.
Fonte: os autores.

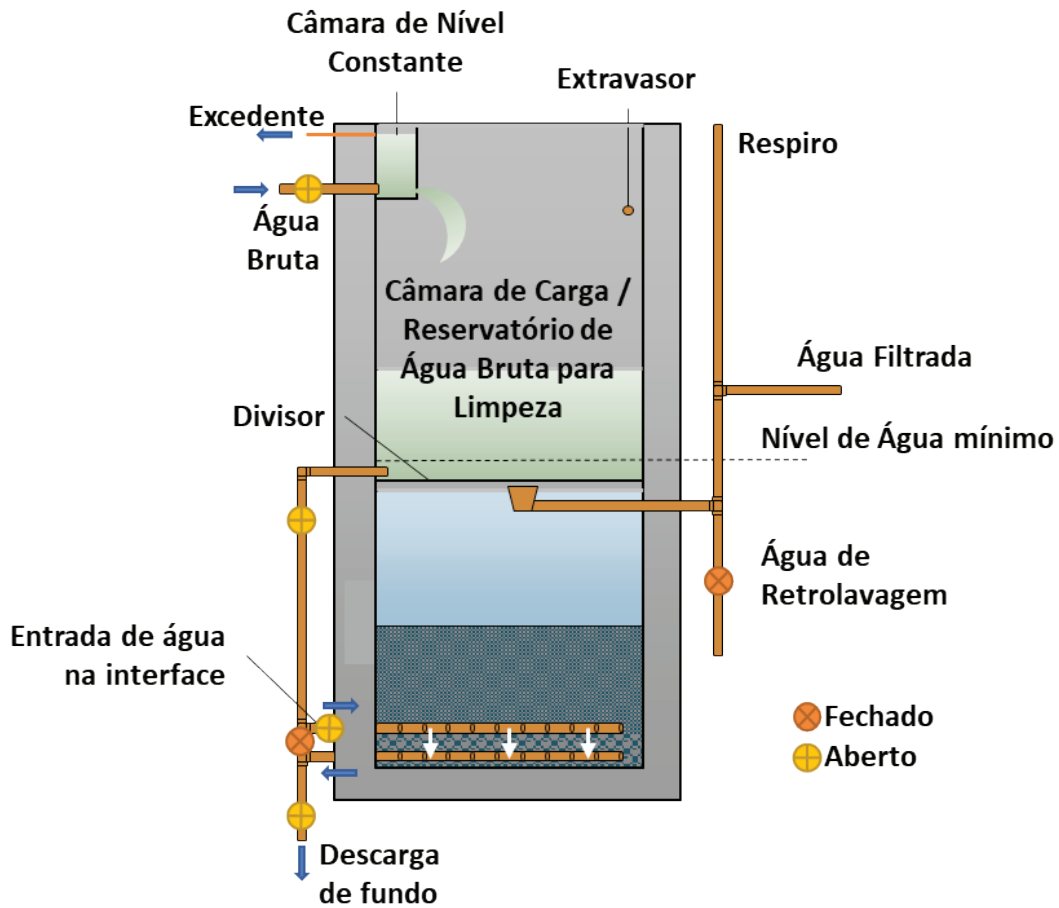


Figura 21 – Filtro lento retrolavável de fluxo ascendente durante descarga de fundo com entrada de água na interface.

Fonte: os autores.

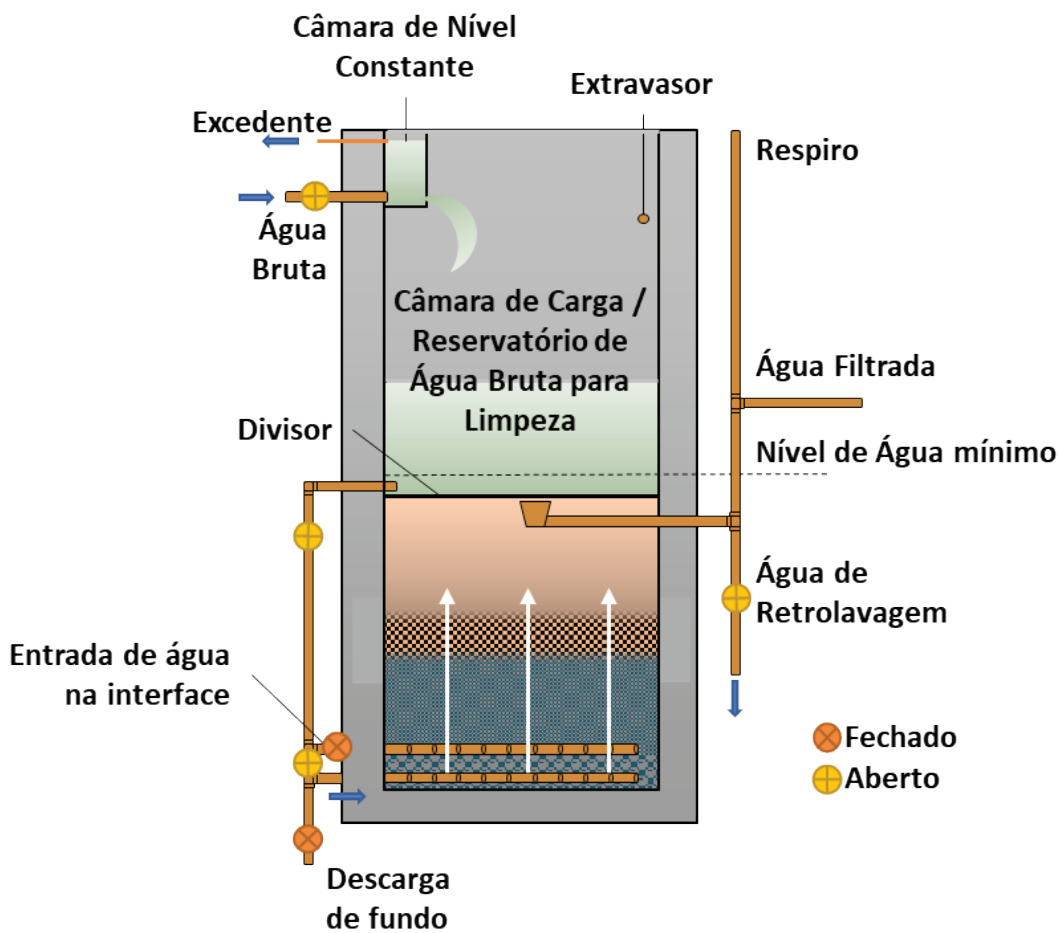


Figura 22 – Filtro lento retrolavável de fluxo ascendente durante retrolavagem.
 Fonte: os autores.

5

PROJETO DE FILTROS LENTOS RETROLAVÁVEIS

5.1 Resumo das principais características recomendadas

A seguir são resumidos os principais parâmetros sugeridos para filtros lentos retrolaváveis (Tabela 2):

Tabela 2 – Parâmetros de projeto recomendados para filtros lentos retrolaváveis.

Área de filtração	$\leq 20 \text{ m}^2$
Taxa de filtração	$\leq 6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$
Diâmetro efetivo	0,25 a 0,35 mm
Coefficiente de Uniformidade	$< 1,6$
Lâmina d'água mínima acima do meio filtrante	10 cm
Perda de carga máxima no meio filtrante	80 a 120 cm
Espessura da camada filtrante	40 a 60 cm

Fonte: os autores.

Observação importante: A NBR 12216 aborda filtros lentos, não filtros lentos com retrolavagem. Assim, para a aplicação dessa nova tecnologia, apenas partes pertinentes da norma são aplicadas, como por exemplo a taxa de filtração.

5.2 Área de filtração e número de filtros

A área de filtros lentos é calculada em função da vazão e da taxa de filtração adotadas (Equação 2.1). Recomenda que filtros lentos retrolaváveis não tenham mais que 20 m² a evitar-se má distribuição do fluxo de água durante a limpeza. Dessa maneira o número de filtros pode ser estimado ou estipulado de acordo com dimensões desejadas (Equação 5.1).

Equação 5.1

$$N_f = \frac{A_t}{A_f}$$

Onde:

N_f – Número de filtros;

A_t – Área total de filtração;

A_f – Área do filtro.

Considera-se que para uma estação de tratamento comunitário ao menos dois filtros são necessários, dessa maneira o fluxo de água pode ser direcionado a outro filtro durante momentos de manutenção ou limpeza. Para sistemas em escala comunitária ou domiciliar devem ser ponderadas as melhores opções operacionais e econômicas para a escolha do número de filtros, de acordo com a necessidade.

Observação importante: No caso de sistemas unifamiliares apenas um filtro é considerado suficiente.

Durante a manutenção recomenda-se que não haja sobrecarga dos filtros devido ao redirecionamento da vazão, dessa maneira a taxa de filtração não deve

ultrapassar o máximo recomendado para a filtração lenta ($T_{m\acute{a}x}$). Caso ocorra, o número de filtros deve ser aumentado.

Equação 5.2

$$\frac{Q_t}{A_t - A_f} \leq T_{m\acute{a}x} \approx 6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$$

O cálculo para a estimativa de número de filtros é apresentado no **Exemplo 5.1**.

Exemplo 5.1: Estimativa do número de filtros lentos.

Pretende-se estimar o número de filtros lentos retrolaváveis em uma ETA. A vazão nominal do sistema é de 4 L/s. Adotam-se uma taxa de 4 m³/m².d e filtros de 3 m de largura e 5 m de comprimento.

Adotando-se um filtro com área ou igual a 20 m², por exemplo com largura (L) de 3 m e comprimento (C) de 5 m:

$$A_f = L \times C = 3 \times 5 = 15 \text{ m}^2$$

Passo 1: Calcular a área total necessária para filtração (**Equação 2.1**).

$$A_t = \frac{Q_t}{T} \rightarrow A_t = \frac{4 \text{ (L/s)} \times 86,4}{4 \text{ (m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d)}} = 86,4 \text{ m}^2$$

Passo 2: Estimar o número de filtros (**Equação 5.1**).

$$N_f = \frac{A_t}{A_f} \rightarrow N_f = \frac{86,4}{15} = 5,76 \approx 6 \text{ filtros}$$

Portanto, são necessários **6 filtros** para a ETA. Podendo-se assim modificar as dimensões iniciais da proposta

5.3 Perda de carga na camada filtrante limpa

A perda de carga em meios filtrantes geralmente é calculada pela equação de Ergun. Contudo, a perda de carga no meio filtrante em FL costuma ser baixa devido às baixas velocidades de escoamento. Devido a isso a perda de carga inicial do sistema não é um parâmetro relevante em filtros lentos, uma vez que não é significativo relativamente aos 80 cm disponíveis para compensar o incremento de perda de carga ao longo da carreira.

5.4 Perda de carga no meio fluidificado

Por sua vez, a perda de carga no meio filtrante fluidificado é um parâmetro importante para a determinação da perda de carga durante a retrolavagem, necessária para o cálculo da altura do reservatório. A partir do momento que o meio filtrante se encontra fluidificado a perda de carga independe da velocidade e pode ser estimada pela Equação 5.3:

Equação 5.3

$$h_f = l_0(S_a - 1)(1 - p_0)$$

Onde:

- h_f – perda de carga total no meio fluidificado;
- l_0 – espessura do meio filtrante em repouso (m);
- S_a – densidade relativa da areia à água;
- p_0 – porosidade do meio filtrante.

Sendo que a densidade relativa da areia é 2,65 e a porosidade da areia estimada entre 0,4 e 0,5. Azevedo Neto propõe uma estimativa de perda de carga como segue (Equação 5.4):

Equação 5.4

$$h_f = 0,9 \times l_0$$

No **Exemplo 5.2** são utilizadas ambas as equações para o cálculo da perda de carga no meio fluidificado:

Exemplo 5.2: Perda de carga no meio fluidificado.

Estimar a perda de carga para um filtro lento retrolavável com leito filtrante de areia com porosidade de 0,43 e com 0,5 m de profundidade.

Estimativa pela **Equação 5.3**:

$$h_f = l_0(S_a - 1)(1 - p_0) \rightarrow h_f = 0,5(2,65 - 1)(1 - 0,43) = 0,47 \text{ m}$$

Estimativa pela **Equação 5.4**:

$$h_f = 0,9 \times l_0 \rightarrow h_f = 0,9 \times 0,5 = 0,45 \text{ m}$$

A perda de carga estimada está entre **0,47 m** (Equação 5.3) e **0,45 m** (Equação 5.4).

5.5 Velocidade de lavagem e Expansão do meio filtrante

A expansão do meio filtrante (**E**) recomendada para o filtro lento retrolavável está entre 25% e 40% e, de acordo com as características da areia, é proporcional à velocidade de aproximação (v_a), ou de lavagem, que, por sua vez, será fundamental para o volume de água a ser utilizado na retrolavagem.

A velocidade pode ser calculada usando-se a Equação 5.5:

Equação 5.5

$$v_a = \frac{\mu Re}{\rho_a d}$$

Onde:

- μ – viscosidade dinâmica do fluido (kg/m.s);
- Re – número de Reynolds para o fluxo entorno do grão de areia (adimensional);
- ρ_a – densidade da água (kg/m³);
- d – diâmetro dos grãos (m).

O número de Reynolds nesse caso é calculado pela:

Equação 5.6

$$Re = \frac{-k_v(1 - \varepsilon_E) + \sqrt{k_v^2(1 - \varepsilon_E)^2 + 4k_l\beta}}{2k_l}$$

Onde:

- k_v – coeficiente de perda de carga devido às forças de viscosidade (adimensional);
- ε_E – porosidade do meio expandido (adimensional);
- k_e – coeficiente de perda de carga devido às forças estáticas (adimensional);
- β – fator de cálculo da retrolavagem (adimensional).

O fator de cálculo de retrolavagem é calculado por:

Equação 5.7

$$\beta = \frac{g \rho_a (\rho_p - \rho_a) d^3 \varepsilon_E^3}{\mu^2}$$

Onde:

- g – aceleração da gravidade (m/s^2);
- ρ_p – densidade da areia (kg/m^3);

Por sua vez, a porosidade do meio expandido é calculada por:

Equação 5.8

$$\varepsilon_E = 1 - \left[\frac{(1 - \varepsilon_r)}{(1 + E)} \right]$$

Onde:

- ε_r – porosidade do meio em repouso (adimensional).

Os valores sugeridos para k_v , k_e e ε_r da areia são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 – Parâmetros recomendados para o cálculo do número de Reynolds.

k_v	k_e	ε_r
110 - 115	2,0 - 2,5	40 - 43

Fonte: Crittenden et al. (2012).

Dessa maneira é sugerido o seguinte roteiro para o cálculo da velocidade de lavagem e apresentado o Exemplo 5.3:

- **Passo 1:** Calcular a porosidade do meio expandido segundo a **Equação 5.8**;

- **Passo 2:** Calcular o β segundo a **Equação 5.7**;
- **Passo 3:** Calcular o número de Reynolds (**Equação 5.6**);
- **Passo 4:** Calcular a velocidade de aproximação para a expansão desejada (**Equação 5.5**).

Exemplo 5.3: Cálculo da velocidade de aproximação durante a retrolavagem.

Estimar a velocidade necessária para a expansão de 25% do meio filtrante de um filtro lento retrolavável com 0,5 m de profundidade e diâmetro de 0,30 mm.

Passo 1: Porosidade do meio expandido segundo (Equação 5.8).

Adota-se a porosidade de 0,43 para o meio em repouso. Dessa maneira:

$$\varepsilon_E = 1 - \left[\frac{(1 - \varepsilon_r)}{(1 + E)} \right] \rightarrow \varepsilon_E = 1 - \left[\frac{(1 - 0,43)}{(1 + 0,25)} \right] = 0,54$$

Passo 2: Cálculo do β (Equação 5.7).

$$\beta = \frac{g \rho_a (\rho_p - \rho_a) d^3 \varepsilon_E^3}{\mu^2} \rightarrow \beta = \frac{(9,81 \text{ m/s}^2) (997 \text{ kg/m}^3) (2650 - 997 \text{ kg/m}^3) (0,00030 \text{ m})^3 0,54^3}{(0,890 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s})^2} = 86,78$$

Foram utilizados valores de ρ_a e μ_a para água a 25°C.

Passo 3: Número de Reynolds (Equação 5.6).

Adotam-se valores intermediários de k_e e k_v apresentados na Tabela 3.

$$Re = \frac{-k_v(1 - \varepsilon_E) + \sqrt{k_v^2(1 - \varepsilon_E)^2 + 4k_l\beta}}{2k_l} \rightarrow Re = \frac{-113 \times (1 - 0,54) + \sqrt{(113)^2 \times (1 - 0,54)^2 + 4 \times 2,3 \times 86,78}}{2 \times 2,3} = 1,562$$

Passo 4: Velocidade de aproximação para a expansão desejada (Equação 5.5).

$$v_a = \frac{\mu Re}{\rho_a d} \rightarrow v_a = \frac{(0,890 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}) \times 1,562}{(997 \text{ kg/m}^3) \times (0,00030 \text{ m})} = (0,00465 \text{ m/s}) \times (60 \text{ s/min}) = 0,28 \text{ m/min}$$

A velocidade de aproximação necessária para expandir a areia em **25%** é de aproximadamente **0,28 m/min**.

5.6 Volume de água para lavagem

O volume de água necessário para a limpeza do filtro depende da velocidade de aproximação adotada, área do filtro e tempo de limpeza adotado (Equação 5.9).

Equação 5.9

$$V_r = v_a \times A_f \times t \times 1,5$$

Onde:

- V_r – volume do reservatório de água para retrolavagem;
- v_a – velocidade de aproximação;
- t – tempo de limpeza;
- **1,5** é adotado como fator de segurança.

Observação importante: O tempo de limpeza recomendado é de **4 min**, contudo melhores tempos de limpeza podem ser estimados por estudos em sistemas piloto, além disso deve ser considerado o tempo de esvaziamento da coluna d'água dentro do filtro.

Exemplo 5.4: Cálculo do volume de água para retrolavagem.

Estimar o volume de água necessário para a limpeza de um filtro lento retrolavável com área de **2,5 m de largura** e **8 m de comprimento**. O tempo de limpeza foi otimizado em ensaios de limpeza em sistema piloto e reduzido a **4 min**. A velocidade de aproximação para expansão de 25% da areia é **0,28 m/min**.

Passo 1: Calcular a área dos filtros.

$$A_f = L \times C = (2,5 \text{ m}) \times (8 \text{ m}) = 20 \text{ m}^2$$

Passo 2: Calcular o volume de água necessário para a retrolavagem.

$$V_r = v_a \times A_f \times t \times 1,5 \rightarrow V_r = (0,28 \text{ m/min}) \times (20 \text{ m}^2) \times (4 \text{ min}) = 33,6 \text{ m}^3$$

Passo 2: Calcular o volume de água necessário para a retrolavagem

Portanto, para a lavagem de cada filtro por 4 min são necessários **33,6 m³** ou **33600 L** de água.

5.7 Calhas dos filtros

As calhas no filtro devem ser capazes de escoar a água de lavagem para fora do filtro, mantendo um fluxo uniforme dentro do filtro. Dessa maneira recomenda-se que sejam adotadas calhas com espaçamento (e) mínimo de 60 cm e máximo de 210 cm entre elas, ou 105 cm entre a calha e a parede do filtro. Para a altura deve ser considerada a expansão da areia durante a retrolavagem com uma folga de pelo menos 15 cm.

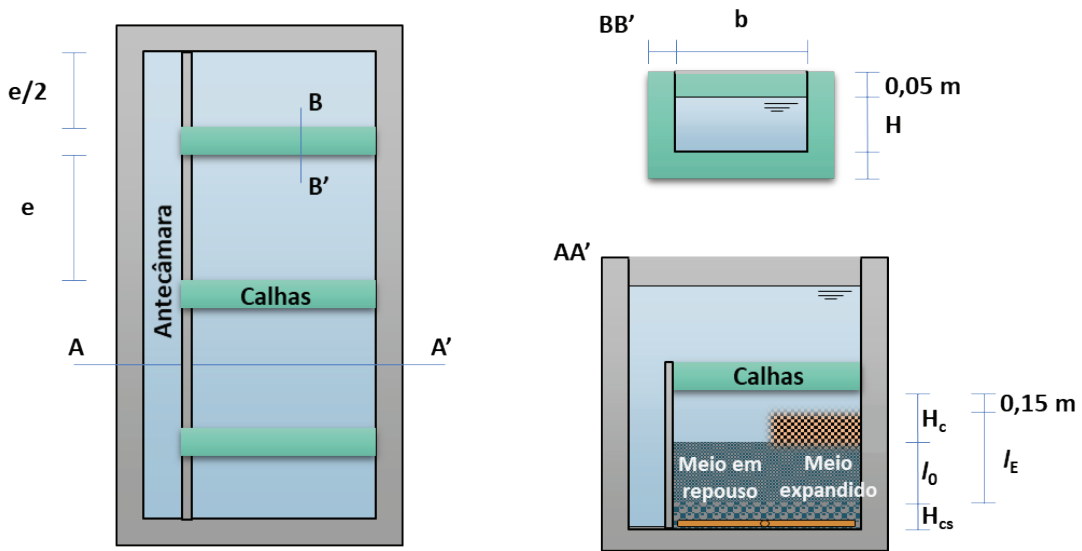


Figura 23 – Posicionamento e dimensão das calhas.

Fonte: os autores.

Assim a altura mínima da parte inferior das calhas pode ser estabelecida pela **Equação 5.10**:

Equação 5.10

$$H_c = l_0 E + 0,15 = l_E + 0,15$$

Onde:

- H_c – Altura do fundo da calha em relação ao meio filtrante (m);
- l_E – Profundidade do meio filtrante expandido (m).

As calhas devem ter capacidade para escoar toda a água do filtro durante a lavagem e são dimensionadas para tal (Equação 5.11):

Equação 5.11

$$Q_c = 1,38 b H^{3/2}$$

Onde:

- Q_c – Vazão em cada calha (m^3/s);
- b – Largura útil da calha (m);
- H – Altura máxima de água dentro da calha (m);

Geralmente adota-se uma folga de 5 cm em relação à altura máxima da água para a altura da calha.

No Exemplo 5.5 é demonstrado o cálculo para posicionamento das calhas.

Exemplo 5.5: Cálculo das dimensões e posicionamento de calhas.

Estimar a quantidade de calhas necessária para o escoamento da água de retrolavagem. Dados: $A_f = 20 m^2$; $L = 2,5 m$; $C = 8 m$; $H_{mf} = 0,5 m$; $E = 25\%$; $V_f = 22,4 m^3$; e $t = 4 min$.

Passo 1: Calcular a posição das calhas em relação ao meio filtrante usando a **Equação 5.10**:

$$h_c = h_{mf}E + 0,15 \rightarrow h_c = (0,5 m) \times 0,25 + (0,15 m) = 0,28 m$$

Passo 2: Calcular o número de calhas e o espaçamento entre elas.

Adotam-se o espaçamento de entre as calhas (1,00 m) e a largura útil da calha (0,20 m).

$$N_c = \frac{C}{d_c + b + 2e} \rightarrow N_c = \frac{8 m}{1 m + 0,2 m + 2(0,05 m)} = 5,33 \text{ calhas}$$

Adotando-se **5 calhas**, reordena-se o espaço entre cada uma:

$$d_c = \frac{C}{N} - b - 2e \rightarrow d_c = \frac{8 m}{5} - 0,2 m - 2(0,05 m) = 1,3 m$$

Nesse caso 1,3 m é uma distância maior do que a recomendada entre calha e paredes. Dessa maneira, as calhas podem ser ordenadas ao centro com metade do espaçamento a cada parede, que no caso é de **0,65 m**, de acordo com o espaçamento mínimo recomendado (0,60 m).

Passo 3: Calcular as dimensões das calhas.

Primeiramente calcula-se a vazão de retrolavagem:

$$Q_R = \frac{V_R}{t} \rightarrow Q_R = \frac{22,4 \text{ m}^3}{4 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 0,0933 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tendo-se adotado 5 calhas, calcula-se a vazão em cada calha:

$$Q_c = \frac{Q_R}{N_c} \rightarrow Q_c = \frac{0,093 \text{ m}^3/\text{s}}{5} = 0,0187 \text{ m}^3/\text{s}$$

Calcular a altura da água na calha:

$$Q_c = 1,38 b H^{3/2} \rightarrow H = \left(\frac{Q_c}{1,38 b} \right)^{2/3} \rightarrow H = \left(\frac{0,0187 \text{ m}^3/\text{s}}{1,38 \times 0,2 \text{ m}} \right)^{2/3} = 0,16 \text{ m}$$

Dessa maneira, adicionando-se uma folga de 5 cm e a mesma medida com o fundo a altura total da calha é de **26 cm**.

Portanto, serão utilizadas **5 calhas** ao longo do filtro espaçadas entre si em **1,3 m e a 0,65 m das laterais**. Cada calha possui 30 cm de base e 26 cm de altura, sendo **20 cm e 16 cm** de base e altura úteis, 5 cm de paredes e fundo, e 5 cm de segurança na superfície.

5.8 Altura do reservatório dos filtros

O reservatório deve estar posicionado a uma altura de maneira a oferecer carga hidráulica suficiente para garantir a velocidade necessária para a expansão do meio filtrante durante a retrolavagem, considerando as perdas de carga no sistema. Essa altura deve ser considerada relativamente acima das calhas de coleta de água da retrolavagem. Recomenda-se o uso de válvulas que permitam o controle da vazão durante a retrolavagem.

Assim, utilizando-se a equação da energia a altura mínima do reservatório pode estabelecida pela:

Equação 5.12

$$h_{mín R} = \frac{v_a^2}{2g} + \sum h_p$$

Onde:

- $h_{mín R}$ – Altura mínima do reservatório em relação ao topo das calhas (m);
- h_p – Perdas de carga no sistema (m);

Sendo que as perdas de carga no sistema englobam a perda na saída do reservatório, as perdas distribuídas e localizadas nas tubulações até o filtro e as perdas no fundo, camada suporte e meio filtrante (expandido) no filtro.

Exemplo 5.6: Cálculo da altura mínima do reservatório.

Estimar a altura mínima de um reservatório que supra as necessidades do caso apresentado nos exemplos anteriores. Dados adicionais: perdas de carga na tubulação = 0,60 m; perdas de carga no fundo e camada suporte = 0,20 m.

Do **Exemplo 5.2** tem-se $h = 0,47$ m. Assim:

$$h_{mín R} = \frac{v_a^2}{2g} + \sum h_p \rightarrow h_{mín R} = \frac{(0,00465 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} + 0,47 \text{ m} + 0,20 \text{ m} + 0,60 = 1,27 \text{ m}$$

Como pode ser notado, a velocidade ascensional no filtro é insignificante no cálculo da altura mínima do reservatório. Contudo, excluindo-se a perda de carga no meio filtrante fluidificado que é constante, a velocidade e influencia a vazão aplicada durante a limpeza que, por sua vez, influencia as velocidades nas tubulações que estão diretamente relacionadas com as perdas de carga.

Para a estimativa dessas perdas de carga recomendam-se outros materiais específicos como: (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991; DI BERNARDO; DANTAS, 2005; PORTO, 2006)

Portanto o reservatório deverá encontrar-se ao menos 1,27 m acima das calhas do filtro.

Ainda, em casos que julgarem-se aceitáveis, pode ser considerada uma expansão média para a altura do reservatório. Um exemplo é caso de filtros onde a água de lavagem é a filtrada pelo filtro com reservatório acoplado. Isso diminui a altura do filtro pela redução da água sobrenadante necessária (Capítulo 5.9, p.47).

5.9 Água sobrenadante

A altura da coluna d'água sobrenadante (H_s) depende diretamente das características adotadas para o filtro como taxa, perdas de carga máxima no meio filtrante e características da retrolavagem.

O mais usual é a adoção de nível d'água variando ao longo da carreira de filtração. Dessa maneira o nível mínimo recomendado é de 15 cm acima do meio filtrante, com adoção de mecanismos para minimizar o impacto da entrada da água no schmutzdecke e areia. Garante-se essa altura com a saída de água do filtro na mesma posição.

Adota-se como nível máximo o incremento de perda de carga no meio filtrante ao longo da carreira de filtração, em torno de 0,80 m a 1,0 m acima do nível mínimo de água.

5.10 Altura dos filtros

A altura do filtro (H_t) será em função do tipo de fundo, camada suporte, meio filtrante e nível da água sobrenadante e será a soma da profundidade de cada um deles minimamente, onde será instalado um extravasor, somado um fator de segurança (0,15 m). Além disso o tipo de concepção do filtro pode levar à um incremento dessa altura, sendo que a altura adotada deve ter no mínimo a altura necessária para a expansão do meio filtrante durante a retrolavagem.

Exemplo 5.7: Altura do filtro lento independente do sistema de retrolavagem.

Pretende-se estimar a altura de um filtro lento retrolavável. Dados: $H_{cs} = 0,3$ m; $H_{mf} = 0,5$ m; e $H_s = 0,95$ m

Assim:

$$H_t = H_{cs} + I_0 + H_s + 0,15 \rightarrow H_t = 0,3 \text{ m} + 0,5 \text{ m} + 0,95 \text{ m} + 0,15 \text{ m} \\ = 1,90 \text{ m}$$

Exemplo 5.8: Altura do filtro lento retrolavável com água filtrada com reservatório acoplado (filtro em escala comunitária).

Pretende-se estimar a altura de um filtro lento retrolavável de escala comunitária. Dados: $Q = 5 \text{ m}^3/\text{d}$; $d = 0,25 \text{ mm}$; $\varepsilon = 0,47$; h_p nas tubulações durante a retrolavagem = $0,40 \text{ cm}$; e H do reservatório de água de retrolavagem = $1,2$.

Passo 1: Calcular a área de filtração necessária e dimensões do filtro (**Equação 2.1**).

Adotando-se uma taxa de filtração de $6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$:

$$A_t = \frac{Q_t}{T} \rightarrow A_t = \frac{5 \text{ m}^3/\text{d}}{6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}} = 0,83 \text{ m}^2$$

No caso será adotado apenas um filtro cilíndrico, portanto:

$$A_t = A_f = \frac{\pi D^2}{4} \rightarrow$$

$$D = \sqrt{\frac{4A_f}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times (0,83 \text{ m}^2)}{3,14}} = 1,03 \text{ m}$$

Passo 2: Calcular a velocidade ascensional durante a retrolavagem, ou velocidade de aproximação (**Exemplo 5.3**).

Calcula-se a porosidade do meio expandido segundo (**Equação 5.8**).

Adotando-se a porosidade de $0,47$ para o meio em repouso e uma $E = 30\%$:

$$\varepsilon_E = 1 - \left[\frac{(1 - \varepsilon_r)}{(1 + E)} \right] \rightarrow \varepsilon_E = 1 - \left[\frac{(1 - 0,47)}{(1 + 0,30)} \right] = 0,59$$

Cálculo do β (**Equação 5.7**).

$$\beta = \frac{g \rho_a (\rho_p - \rho_a) d^3 \varepsilon_E^3}{\mu^2} \rightarrow \beta$$

$$= \frac{(9,81 \text{ m/s}^2) (998,2 \text{ kg/m}^3) (2650 - 998,2 \text{ kg/m}^3) (0,00025 \text{ m})^3 0,59^3}{(1,002 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s})^2}$$

$$= 52,31$$

Foram utilizados valores de ρ_a e μ_a para água a 20°C .

Número de Reynolds (**Equação 5.6**).

Adotam-se valores intermediários de k_e e k_v apresentados na **Tabela 3**.

$$Re = \frac{-k_v(1 - \varepsilon_E) + \sqrt{k_v^2(1 - \varepsilon_E)^2 + 4k_l\beta}}{2k_l} \rightarrow Re$$

$$= \frac{-113 \times (1 - 0,59) + \sqrt{(113)^2 \times (1 - 0,59)^2 + 4 \times 2,3 \times 52,31}}{2 \times 2,3}$$

$$= 1,056$$

Por fim, calcula-se a v_a para a expansão desejada (**Equação 5.5**):

$$v_a = \frac{\mu Re}{\rho_a d} \rightarrow v_a = \frac{(1,002 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}) \times 1,056}{(998,2 \text{ kg/m}^3) \times (0,00025 \text{ m})} = (0,00417 \text{ m/s}) \times (60 \text{ s/min}) = 0,25 \text{ m/min}$$

Passo 3: Calcular o volume de água necessária para a lavagem (**Equação 5.9**).

Adotando-se 10 min de lavagem:

$$V_r = v_a \times A_f \times t \rightarrow V_r = (0,25 \text{ m/min}) \times (0,83 \text{ m}^2) \times (10 \text{ min}) = 2,12 \text{ m}^3$$

Passo 4: Altura da saída da água de lavagem.

$$h_c = l_0 E + 0,15 \rightarrow h_c = (0,5 \text{ m}) \times 0,30 + (0,15 \text{ m}) = 0,30 \text{ m}$$

Nesse caso, por se tratar de um filtro pequeno, ao invés de se utilizar calha é sugerido o uso de um dreno com diâmetro mínimo necessário para um bom escoamento da água de lavagem (**50 a 100 mm**).

Passo 5: Calcular as perdas de carga no meio filtrante fluidificado (**Exemplo 5.5**).

Adotando-se uma $l_0 = 0,5 \text{ m}$:

$$h_l = 0,9 \times l_0 \rightarrow h_l = 0,9 \times 0,5 = 0,45 \text{ m}$$

Passo 5: Estimar as perdas de carga localizadas e distribuídas entre reservatório e filtro.

Passo 6: Altura do reservatório.

Do **Exemplo 5.2** tem-se $h = 0,47 \text{ m}$. Assim:

$$h_{mínR} = \frac{v_a^2}{2g} + \sum h_p \rightarrow h_{mínR} = \frac{(0,00417 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} + 0,40 \text{ m} + 0,45 \text{ m} + 0,03 = 0,88 \text{ m}$$

Passo 7: Altura do filtro.

No modelo proposto o filtro é limpo com água filtrada, sendo que o reservatório está ligado ao filtro. Dessa maneira o nível da água dentro do filtro deve ser suficiente para que o reservatório seja abastecido. Assim:

$$H_s = h_{mínR} + \Delta h$$

Onde Δh é a variação do nível de água adotado para compensar a perda de carga desenvolvida no meio filtrante ao longo da carreira.

Assim:

$$H_s = h_{m\hat{m}R} + \Delta h$$

Ainda, pode ser adotada a expansão média considerando a altura média do reservatório como referência para retrolavagem.

Dessa maneira, adotando-se um reservatório de 2500 L (2,5 m³) com 1200 mm de altura útil (H_r), tem-se:

$$H_s = h_{m\hat{m}R} + \Delta h - \frac{H_r}{2} \rightarrow H_s = 0,88 \text{ m} + 0,80 \text{ m} - \frac{1,200 \text{ m}}{2} = 1,08 \text{ m}$$

$$H_t = H_{cs} + l_0 + H_s + 0,15 \rightarrow H_t = 0,3 \text{ m} + 0,5 \text{ m} + 1,08 \text{ m} + 0,15 \text{ m} = 2,03 \text{ m}$$

GLOSSÁRIO

Adsorção

Trata-se do processo pelo qual átomos, moléculas ou íons são retidos na superfície de sólidos, a exemplo o meio filtrante, através de interações de natureza química ou física.

Biofilme

Matriz de microrganismos aderida a uma superfície sólida, quase sempre imersa em meio líquido, cuja aderência é propiciada por suas substâncias extracelulares excretadas e água.

Camada Filtrante

Camada de material granular, geralmente areia em filtros lentos, que tem como função reter as impurezas presentes na água a ser filtrada.

Camada Suporte

Camada entre o meio filtrante e o sistema de drenagem, com a função de sustentar e impedir o entupimento do sistema de drenagem pelo meio filtrante.

Carga Hidráulica

É a expressão da energia mecânica total da água.

Carreira de Filtração

É o tempo transcorrido entre o início da filtração e a sua interrupção no momento da limpeza dos filtros.

Diâmetro Efetivo

É o diâmetro cujo, em massa, 10% da areia tem diâmetros menores. Ou seja, peneirando se, 10% passa por uma peneira de abertura igual ao diâmetro efetivo.

Estação de Tratamento de Água

“Conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade.” (ABNT, 1992)

Filtro Lento

Dispositivo de filtração composto por meio granular, camada suporte e sistema de drenagem, por onde a água passa em baixas taxas de filtração e as impurezas são removidas por mecanismos físicos e biológicos.

Meio Granular

Meio, ou camada, de material granular. Em filtros lentos geralmente é areia. A disposição dos grãos no espaço faz com que espaços vazios se formem, permitindo o escoamento da água entre eles.

Schmutzdecke

Camada de material decantado ou retido na parte superior do meio filtrante em filtros lentos. É biologicamente ativa por ser composta também por algas e outras formas da vida, como plâncton, diatomáceas, protozoários, rotíferos e bactérias.

Sistema de Drenagem

Sistema que permite escoamento e direcionamento do fluido, no caso, água.

Taxa de Filtração

É a quantidade de fluido que se desloca por uma determinada superfície. Ou seja, a razão da vazão pela área de filtração.

Tempo de concentração média

Tempo em que a concentração atingida é metade da máxima esperada.

Tempo de Detenção Hidráulica

Tempo em que a água se mantém ocupando um determinado espaço, no caso, o filtro.

Tempo de Maturação (ou Recuperação do Filtro)

Tempo necessário para que o sistema de filtração atinja o potencial para a obtenção de água na qualidade requerida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **ABNT NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público.** Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA n° 357. Resolução CONAMA n° 357.** Brasília, 2005.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Portaria de consolidação n° 5, de 28 de setembro de 2017.** Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html>.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL - SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2013.** Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014.

COSTA, R. H. R. da. **Estudos comparativos da eficiência de filtros lentos de areia convencionais e de fluxo ascendente.** 1980. 256 f.. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1980.

CRITTENDEN, J. C. et al. **MWH's Water Treatment: Principles and Design.** 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2012.

DE SOUZA, F. H. **Influência do Diâmetro Efetivo do Meio Filtrante em Filtros Lentos Retrolaváveis**. 2013. 54 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <<http://www.ens.ufsc.br/principal/pdfs/3caad45d909f485bc4494c3e25b96a6c3e4fdb0a.pdf>>.

DE SOUZA, F. H. **Tratamento de água para abastecimento por meio de filtros lentos de fluxo ascendente com limpeza por retrolavagem e descarga de fundo**. 2015. 113 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

DE SOUZA, F. H. et al. Study of slow sand filtration with backwash and the influence of the filter media on the filter recovery and cleaning. **Environmental Technology**, v. 37, n. 14, p. 1802–1810, 17 jul. 2016. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09593330.2015.1132778>>.

DE SOUZA, F. H. et al. Diagnóstico e discussão sobre uso da Filtração Lenta para abastecimento público em Santa Catarina, Brasil. **Revista DAE**, v. 66, n. 209, p. 37–50, 2018. Disponível em: <<http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/dae.2017.013>>.

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

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de Tratamento de Água - Volume 1**. 2nd. ed. São Carlos: RiMa, 2005.

EMMENDOERFER, M. L. **Filtração Lenta Com Retrolavagem Para Propriedades Rurais De Uso Familiar**. 2006. 56 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

FUNASA. **Funasa » Saneamento Rural**. Disponível em: <<http://www.funasa.gov.br/site/engenharia-de-saude-publica-2/saneamento-rural/>>. Acesso em: 3 mar. 2015.

GIMBEL, R.; GRAHAM, N. J. D.; COLLINS, M. R. **Recent Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes**. 1st. ed. London: IWA Publishing, 2006.

HENDRICKS, D. **Fundamentals of Water Treatment Unit Processes : Physical, Chemical, and Biological**. 1st. ed. Broken Sound Parkway: International Water Organization, 2011.

HUISMAN, L.; WOOD, W. E. **Slow sand filtration**. Geneva, Belgium: World Health Organization, 1974.

ISHII, M. M. **Filtração lenta com retrolavagem para tratamento de água de abastecimento**. 2013. 56 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

LANGENBACH, K. et al. Modeling of slow sand filtration for disinfection of secondary clarifier effluent. **Water research**, v. 44, n. 1, p. 159–66, jan. 2010. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19833374>>. Acesso em: 3 abr. 2012.

LOGSDON, G.; KOHNE, R.; ABEL, S. Slow sand filtration for small water systems. **Journal of Environmental Engineering and Science**, v. 348, p. 339–348, 2002. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/nrc/jees/2002/00000001/00000005/art00004>>. Acesso em: 10 abr. 2012.

MARNOTO, M. J. E. **Expansão da areia durante a retrolavagem dos filtros lentos – influência sobre a qualidade da água para abastecimento e a duração das carreiras**. 2008. 79 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MICHELAN, D. C. de G. S. et al. Desempenho do sistema filtração em margem seguida de filtração lenta retrolavável em Ituporanga Santa Catarina. **Revista DAE**, v. 59, n. 187, p. 28–36, 2011.

MURTHA, N. A. **Avaliação da influência de variáveis hidráulicas, parâmetros de projeto e das características da água bruta na eficiência de filtros lentos de areia.** 1998. 227 f.. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.

NAKAMOTO, N. et al. **Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes: Further Developments and Applications.** 1st. ed. London: IWA Publishing, 2014.

OLIVEIRA, P. H. de. **Avaliação da perda de carga durante operação e limpeza de filtros lentos ascendentes.** 2017. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PIZZOLATTI, B. S. **Estudos de limpeza de filtro lento por raspagem e retrolavagem.** 2010. 119 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2010.

PIZZOLATTI, B. S. et al. Water treatment for rural areas by slow sand filtration. **21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment**, v. 2010, n. 701, p. 21–24, 2010. Disponível em: <<http://asae.frymulti.com/abstract.asp?aid=29433&t=1>>. Acesso em: 16 set. 2011.

PIZZOLATTI, B. S. **Influência da técnica de limpeza de filtros lentos e diâmetro dos grãos sobre a qualidade da água produzida, com destaque para remoção de carbamatos e oocistos de Cryptosporidium (simulados por microesferas).** 2014. 222 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PIZZOLATTI, B. S. et al. Comparison of backwashing with conventional cleaning methods in slow sand filters for small-scale communities. **Desalination and Water Treatment**, v. 54, n. January 2014, p. 1–7, 6 jan. 2014. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19443994.2013.879080>>. Acesso em: 17 jun. 2014.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 519p.. São Carlos: EESC, 2006.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. de. **Tratamento de Água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1991.

SÁ, J. C. **Influência das características da camada filtrante e da taxa de filtração na eficiência de remoção de Microcystis aeruginosa e microcistina na filtração lenta em areia**. 2006. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.bce.unb.br/handle/10482/3167>>. Acesso em: 1 set. 2011.

SCHÖNTAG, J. M. **Esferas de poliestireno como elemento filtrante em filtração rápida descendente**. 2015. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Tese de Doutorado, 2015.

SENS, M. L. et al. **Retrolavagem na Remoção de Protozoários (Giárdia e Cryptosporidium) como Tratamento de Água para Consumo Humano - Relatório de Pesquisa**, Florianópolis, 2018.

SUMMERS, R. A Review of Biologically-Based Drinking Water Treatment Processes for Organic Micropollutant Removal. In: NAKAMOTO, N. et al. (Ed.). **Progress in Slow Sand and Alternative Processes: Further Developments and Applications**. 1st. ed. London: IWA Publishing, 2014.

WHO; UNICEF. **Progress on Drinking Water and Sanitation - 2014 Update**. Geneva: WHO, 2014.

ISBN: 978-85-8388-146-9



9 788583 881469