

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Sabrina Dreifke Baldez

**ESTUDO DE DIMENSIONAMENTO DE FILTRO LENTO RETROLAVÁVEL DE
CAMADA SIMPLES (AREIA) E DUPLA CAMADA FILTRANTE (AREIA E
ANTRACITO)**

Frederico Westphalen, RS
2023

Sabrina Dreifke Baldez

**ESTUDO DE DIMENSIONAMENTO DE FILTRO LENTO RETROLAVÁVEL DE
CAMADA SIMPLES (AREIA) E DUPLA CAMADA FILTRANTE (AREIA E
ANTRACITO)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal de Santa Maria, RS, campus Frederico Westphalen, como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheira Ambiental e Sanitarista**.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Bruno Domingues Soares

Frederico Westphalen, RS
2023

Sabrina Dreifke Baldez

**ESTUDO DE DIMENSIONAMENTO DE FILTRO LENTO RETROLAVÁVEL DE
CAMADA SIMPLES (AREIA) E DUPLA CAMADA FILTRANTE (AREIA E
ANTRACITO)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal de Santa Maria, RS, campus Frederico Westphalen, como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheira Ambiental e Sanitarista**.

Aprovado em 10 de julho de 2023:

Marcus Bruno Domingues Soares, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Patrícia Rodrigues Fortes, Dra. (UFSM)

Raphael Corrêa Medeiros, Dr. (UFSM)

Frederico Westphalen, RS, Brasil
2023

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, que me deu força e iluminou o caminho ajudando a alcançar os objetivos e enfrentar cada dificuldade exposta ao longo da caminhada acadêmica.

Aos meus pais, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência, sempre me encorajando e me aconselhando a seguir pelo caminho certo, com humildade e respeito na trajetória.

Ao meu orientador, por todos os conselhos, pela ajuda, pela paciência, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho.

A todos que participaram, e de certa forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas que conheci e convivi ao longo desses anos de curso, que me incentivaram e contribuíram para a minha formação acadêmica.

RESUMO

ESTUDO DE DIMENSIONAMENTO DE FILTRO LENTO RETROLAVÁVEL DE CAMADA SIMPLES (AREIA) E DUPLA CAMADA FILTRANTE (AREIA E ANTRACITO)

AUTORA: Sabrina Dreifke Baldez

ORIENTADOR: Marcus Bruno Domingues Soares

A filtração lenta retrolavável (FLR) é uma alternativa bastante utilizada no tratamento de água de abastecimento em áreas rurais, em escala domiciliar ou para pequenas comunidades. O presente estudo teve como objetivo dimensionar o já consolidado FLR de camada simples (areia) e o inovativo FLR de dupla camada filtrante (areia + antracito), com o intuito de comparar importantes parâmetros como perda de carga no meio filtrante limpo, velocidade mínima de fluidificação do meio filtrante, porcentagem de expansão da camada filtrante durante a retrolavagem, volume de água para lavagem e a altura do reservatório de água para retrolavagem. Utilizando literatura específica, o dimensionamento se baseou em uma taxa de filtração de 4 m³/m².d, em um filtro de 100 mm, produzindo em torno de 31 litros de água tratada por dia. Os resultados mostraram que a perda de carga entre os meios filtrantes limpos foi de 0,05 m para o FLR-camada simples, e de 0,08 m para o FLR-dupla camada. A velocidade mínima de fluidificação do FLR-camada simples foi de 3,4x10⁻³ m/s, e o FLR-dupla camada foi de 2,5x10⁻³ m/s, levando a uma excessiva expansão do antracito, quando comparada às recomendações da literatura. Assim, o meio filtrante do FLR-camada simples expandiu 42% e o do FLR-dupla camada 32% para areia e 143% para o antracito. O volume de água para retrolavagem do FLR-camada simples foi de 9,7 litros, superior ao FLR-dupla camada, que foi de 7,1 litros. Enfim, a altura do reservatório de água para retrolavagem em relação à calha do FLR-dupla camada foi de 0,40 m, inferior ao FLR-camada simples, que foi de 0,56 m. Concluiu-se que o FLR-dupla camada é mais econômico do ponto de vista de volume de água para retrolavagem, devida a menor massa específica do carvão antracito; além de produzir água filtrada mais rápido, após a limpeza do meio filtrante, em decorrência da menor altura do reservatório em relação à calha de coleta de água de lavagem. Ao fim do dimensionamento, recomendações e apontamentos técnicos foram definidos.

Palavras-chave: Tratamento de água; Filtro lento retrolavável; camada simples; dupla camada filtrante.

ABSTRACT

Study of dimensioning of backwashed slow sand filter with single layer (sand) and double filter layer (sand and anthracite)

AUTHOR: Sabrina Dreifke Baldez

ADVISOR: Marcus Bruno Domingues Soares

Backwashed slow sand filtration (FLR) is an excellent alternative for treating supply water in rural areas, on a household scale or for small communities. The present study aims to dimension the already consolidated FLR with a single layer (sand) and the innovative FLR with a double filter layer (sand + anthracite), with the aim of comparing important parameters such as head loss in the clean filter medium, minimum speed of fluidization of the filtering medium, percentage of expansion of the filtering layer during backwashing, volume of water for washing and the height of the water reservoir for backwashing. Using the specific literature, the sizing was based on a filtration rate of $4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, in a 100 mm filter, producing around 31 liters of treated water per day. The results showed that the head loss between the clean filter media was 0.05 m for the single-layer FLR, and 0.08 m for the double-layer FLR. The minimum fluidization velocity of the single-layer FLR was $3.4 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, and the double-layer FLR was $2.5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, leading to an excessive expansion of the anthracite, when compared to recommendations of literature. Thus, the FLR-single layer filter media expanded 42% and the FLR-double layer 32% for sand and 143% for anthracite. The volume of water for backwashing the single-layer FLR was 9.7 liters, higher than the double-layer FLR, which was 7.1 liters. Finally, the height of the water reservoir for backwashing in relation to the double-layer FLR gutter was 0.40 m, lower than the single-layer FLR, which was 0.56 m. It was concluded that the FLR-double layer is more economical from the point of view of the volume of water for backwashing, in addition to producing water faster, after cleaning the filter medium, due to the lower height of the reservoir in relation to the collection chute. wash water. At the end of the sizing, recommendations and technical notes were made defined.

Keywords: Water treatment; Retrowashable slow filter; single layer; double layer filter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Filtração descendente (a) e filtração ascendente (b).	16
Figura 2 – Fluxograma de estações de tratamento de água com filtração lenta.	18
Figura 3 – Procedimento da raspagem da areia em Filtro Lento Convencional.....	18
Figura 4 – Filtração lenta com limpeza convencional	19
Figura 5 – Filtro lento retrolavável durante a retrolavagem.....	20
Figura 6 – Esquema genérico da formação de vazios	22
Figura 7 – Curva granulométrica típica de um material filtrante utilizado em processos de filtração.....	22
Figura 8 – Exemplo de tortuosidade em meio granular.....	24
Figura 9 – Curva granulométrica virtual da areia.....	37
Figura 10 – Desenho esquemático do reservatório de água para limpeza por retrolavagem do FLR.....	44
Figura 11 – Desenho esquemático do reservatório de água.	56
Figura 12 – Desenho esquemático durante a filtração do FLR camada simples.	59
Figura 13 – Desenho esquemático durante a filtração do FLR dupla camada.	60
Figura 14 – Desenho esquemático durante a retrolavagem do FLR camada simples	60
Figura 15 – Desenho esquemático durante a retrolavagem do FLR dupla camada.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de entrada utilizados no dimensionamento dos FLR's.	25
Tabela 2 – Exemplo de tabela para a determinação da curva de distribuição granulométrica virtual.....	26
Tabela 3 – Diâmetros equivalentes e alturas das subcamadas FLR em camada simples.	27
Tabela 4 – Diâmetros equivalentes e alturas das subcamadas do FLR em camada dupla*.	27
Tabela 5 – Exemplo de tabela para demonstração dos valores dos termos da equação cúbica para cada subcamada.	33
Tabela 6 – Tabela de construção das características físicas dos meios filtrantes virtuais.	36
Tabela 7 – Resultado dos valores da área superficial, S_v , L_i . S_v e L_i . S_v^2	38
Tabela 8 – Resultado da altura do meio expandido.....	40
Tabela 9 – Resultados da altura do meio expandido (L) para areia.	40
Tabela 10 – Resultado dos termos da equação cúbica para cada subcamada.....	42
Tabela 11 – Porosidade do meio expandido (ϵ) para as subcamadas e média do meio filtrante.	43
Tabela 12 – Parâmetros para calcular Δh_p	45
Tabela 13 – Resultado dos valores da área superficial, S_v , L_i . S_v e L_i . S_v^2 (areia).	46
Tabela 14 – Resultado dos valores da área superficial, S_v , L_i . S_v e L_i . S_v^2 (antracito).	47
Tabela 15 – Resultado da altura do meio expandido (L) – areia.	50
Tabela 16 – Resultado da altura do meio expandido (L) – antracito.....	50
Tabela 17 – Resultados da altura do meio expandido (L) para areia e antracito.....	50
Tabela 18 – Resultados dos números de Galileo e Reynolds para areia e antracito.....	51
Tabela 19 – Resultado dos termos da equação cúbica para cada subcamada de areia.	54
Tabela 20 – Porosidade do meio expandido (ϵ) para as subcamadas e média do meio filtrante de areia.....	54
Tabela 21 – Resultado dos termos da equação cúbica para cada subcamada de antracito.....	55
Tabela 22 – Porosidade do meio expandido (ϵ) para as subcamadas e média do meio filtrante de antracito.	55
Tabela 23 – Parâmetros para calcular Δh_p	57
Tabela 24 – Resultados finais FLR-camada simples.....	58
Tabela 25 – Resultados finais FLR-dupla camada.	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1 OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 A FILTRAÇÃO LENTA (FL)	15
3.2 TIPOS DE FILTROS LENTOS	16
3.3 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA FILTRAÇÃO LENTA.....	17
3.4 LIMPEZA DE FILTROS LENTOS (meio filtrante).....	18
3.5 PARÂMETROS OPERACIONAIS DE FILTROS LENTOS	21
3.5.1 Características técnicas do meio filtrante	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1 PARÂMETROS DE ENTRADA DO PROJETO	25
4.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.	26
4.3 DIVISÕES DO MEIO FILTRANTE EM SUBCAMADAS E DETERMINAÇÃO DOS DIÂMETROS CARACTERÍSTICOS.	26
4.4 DETERMINAÇÃO DA ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA.....	27
4.5 DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA DE AREIA E CARVÃO ANTRACITO NO MEIO LIMPO DURANTE A FILTRAÇÃO	28
4.6 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DO MEIO FILTRANTE NA RETROLAVAGEM.....	29
4.6.1 Determinação da perda de carga e altura do meio fluidificado (expandido).....	29
4.6.2 Determinação do número de Galileo e do número de Reynolds	31
4.6.3 Determinação da velocidade mínima de fluidificação	31
4.6.4 Determinação da porosidade do meio expandido.....	33
4.7 VOLUME DE ÁGUA PARA LAVAGEM.....	33

4.8 ALTURA DA CALHA COLETORA DE ÁGUA DE LAVAGEM.....	34
4.9 ALTURA DO RESERVATÓRIO EM RELAÇÃO AO TOPO DA CALHA	34
4.10 ALTURA TOTAL DO FILTRO	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1 CURVA GRANULOMÉTRICA VIRTUAL	36
5.2 DIMENSIONAMENTO DO FLR DE CAMADA SIMPLES	38
5.2.1 Resultado da determinação da área superficial específica, $L. S_v$ e $L. S_v^2$	38
5.2.1 Resultado da determinação da perda de carga no meio limpo durante a filtração	38
5.2.2 Avaliação do comportamento hidráulico do meio filtrante na retrolavagem	39
5.2.2.1 Determinação da perda de carga e altura do meio fluidificado (expandido).....	39
5.2.2.2 Determinação do número de Galileo e do número de Reynolds	41
5.2.2.3 Determinação da velocidade mínima de fluidificação	41
5.2.2.4 Determinação da porosidade do meio expandido.....	42
5.2.3 Volume de água para lavagem.....	43
5.2.4 Altura da calha coletora de água de lavagem	44
5.2.5 Altura do reservatório em relação ao topo da calha	45
5.2.6 Altura total do filtro areia	45
5.3 DIMENSIONAMENTO FLR DE CAMADA DUPLA	46
5.3.1 Resultado da determinação da área superficial específica, $L. S_v$ e $L. S_v^2$	46
5.3.2 Resultado da determinação da perda de carga no meio limpo durante a filtração	47
5.3.3 Avaliação do comportamento hidráulico do meio filtrante na retrolavagem	48
5.3.3.1 Determinação da perda de carga e altura do meio fluidificado (expandido).....	48
5.3.3.2 Determinação do número de Galileo e do número de Reynolds	51
5.3.3.3 Determinação da velocidade mínima de fluidificação	52
5.3.3.4 Cálculo da fração mássica (X_2)	52
5.3.3.5 Determinação da porosidade do meio expandido.....	53
5.3.4 Volume de água para lavagem.....	55

5.3.5	Altura da calha coletora de água de lavagem	56
5.3.6	Altura do reservatório em relação ao topo da calha	57
5.3.7	Altura total do filtro antracito	58
5.7	RESUMO DOS PRINCIPAIS PARAMETROS DE DIMENSIONAMENTO	58
6.	CONCLUSÃO	62
7.	REFÊRENCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

Água potável é um dos pilares da lei do saneamento básico no Brasil. Em todo o mundo campanhas são realizadas para conscientizar a sociedade sobre a importância de cuidar e preservar essa fonte de vida. O acesso à água potável é um direito humano, e junto com o saneamento básico, no Brasil, cerca de 16,4% da população não tem acesso ao sistema de abastecimento, fazendo com que o brasileiro busque fontes viáveis de baixo custo e fácil acesso para cada realidade como poços, nascentes cisternas, carros pipas entre outras (BRASIL; MDR; SNS, 2018).

Segundo Richter (2009) não existe água totalmente pura disponível na natureza. Sabe-se que a água tratada para consumo humano é essencial, pois ela sem tratamento pode causar inúmeras doenças, sobrecarregando assim o sistema único de saúde (SUS) e as redes particulares. A Lei nº 11.445/2007 estabelece as diretrizes nacionais do saneamento básico, tendo como principal foco os serviços públicos de abastecimentos de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e o manejo dos resíduos sólidos, além dos serviços de drenagem e manejo de águas pluviais (BRASIL, 2007).

Neste contexto, um sistema de filtração lenta de água é uma tecnologia considerada eficiente, de simples construção e manutenção, podendo ser utilizados recursos locais e sem adição 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 técnica da retrolavagem em filtros lentos, até então incomum, pois o método convencional por raspagem é o consolidado, vem se demonstrando vantajosa e prática para filtros lentos de pequena escala FUNASA, (2019). Pelo simples abrir de uma válvula, a inserção de água em contrafluxo no leito filtrante sujo proporciona a expansão e fluidificação do meio filtrante, promovendo a limpeza do leito, tornando a limpeza convencional obsoleta. Estudos de Emmedoerffer (2006) e Marnoto (2008) foram os primeiros realizados com o objetivo de avaliar a expansão do meio filtrante durante a retrolavagem em filtros lentos. Os estudos abordaram também aspectos hidráulicos e de qualidade da água, obtendo resultados satisfatórios. Emmedoerffer (2006) buscou otimizar o tempo de retrolavagem diminuindo a quantidade de água usada na lavagem. Já o estudo de Marnoto (2008) demonstrou a eficiência da operação de limpeza de filtros. Por fim, Pizzolatti (2014) comparou de forma concomitante

os efeitos da limpeza de um filtro lento convencional e um FLR, provando que a retrolavagem é tão eficiente quanto à limpeza convencional.

A dupla camada filtrante é usualmente utilizada em filtros rápidos (ABNT, 1992), e não se tem conhecimento de testes em filtros lentos retrolaváveis. Em filtros rápidos, essa prática é utilizada porque o carvão antracito possui massa específica menor que o da areia, além de possuir maior porosidade. Assim, é possível posicioná-lo na parte superior do meio filtrante, promovendo a filtração em profundidade.

No presente estudo é apresentado o dimensionamento de um FLR de dupla camada (areia e antracito) e um de camada simples (areia). O objetivo é avaliar os resultados do dimensionamento para compreender a viabilidade técnica da tecnologia da dupla camada, para que possa ser utilizada em projetos de pesquisa futuros.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Dimensionar e avaliar os resultados de dimensionamento de FLR's de camada simples (areia) e dupla camada (areia e carvão antracito).

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Avaliar a perda de carga entre os dois tipos de filtros no meio filtrante limpo;
- Verificar a velocidade mínima de fluidificação do meio filtrante de ambos os filtros;
- Avaliar a altura de expansão do meio filtrante durante a retrolavagem de ambos os filtros;
- Avaliar o volume de água para lavagem de ambos os filtros;
- Avaliar a altura do reservatório de água para retrolavagem de ambos os filtros.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 A FILTRAÇÃO LENTA (FL)

Segundo Richter (2009), surgiu a primeira instalação de tratamento de água para consumo humano de John Gibb, que projetou um filtro lento de areia em Paisley na Escócia, em 1804. Isto fez com que o filtro de areia de baixa velocidade para purificação da água se proliferasse para tratar água ao redor do mundo. Em 1829 o filtro lento de areia passou a ser utilizado no abastecimento público em Londres. Com estudos realizados nas décadas de 1860 e 1870, análises bacteriológicas tomaram vez. Seguindo as descobertas de Louis Pasteur e outros estudiosos, a eficiência da filtração em areia foi comprovada, uma vez que ela removia um suposto material que transmitiria infecções pela água (HUISMAN; WOOD, 1974).

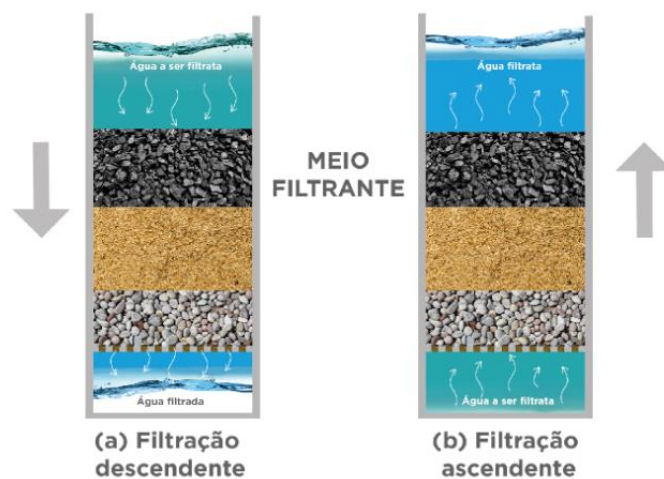
A filtração lenta perdeu espaço devido ao aparecimento de tecnologias mais avançadas, principalmente o estudo da coagulação/floculação, com a necessidade de menores áreas para implementação e maior a necessidade de produção e distribuição de água tratada, devido ao crescimento populacional, especialmente nos grandes centros urbanos (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999).

Atualmente a técnica da filtração lenta é utilizada, principalmente, para a potabilização de água em comunidades rurais com escassez de recursos para a instalação de um sistema público de abastecimento, onde a instalação e operação desse tipo de tecnologia é algo inviável do ponto de vista econômico. Recentemente, a filtração lenta vem sendo reconhecida por sua capacidade de remover contaminantes emergentes como agrotóxicos e produtos farmacêuticos (SUMMERS; SHIMABUKU; ZEARLEY, 2014). Assim, a filtração lenta torna-se interessante por ser de fácil operação, pois geralmente não demanda dosagem de produtos químicos, apenas a cloração para desinfecção final da água (GIMBEL; GRAHAM; COLLINS, 2006).

3.2 TIPOS DE FILTROS LENTOS

Os filtros lentos podem ser classificados de acordo com sua operação, sendo analisado o tipo de escoamento hidráulico adotado, descendente ou ascendente (Figura 1), com o fluxo contínuo ou intermitente, de nível constante ou variável e o tipo de limpeza a ser utilizado, podendo variar em convencional e a retrolavagem.

Figura 1 – Filtração descendente (a) e filtração ascendente (b).



Fonte: MAYKELL GUIMARÃES.

A diferença entre os filtros de nível constante e variável é que, no primeiro tem-se a permanência constante do nível da água sobre o meio filtrante, chamada de água sobrenadante, cuja a taxa de filtração será declinante. Já em um filtro de nível variável há o aumento da coluna d'água acima do meio filtrante ao longo do tempo. Devido a isso, a taxa mantém-se constante compensando a perda de carga desenvolvida pela obstrução do meio filtrante (FUNASA, 2019).

Quando se relata em relação ao fluxo contínuo ou intermitente há algumas variáveis a serem consideradas. Os filtros de fluxo contínuo são aqueles que operam sem interrupção da vazão de alimentação. Nos filtros de fluxo intermitente há pausas no abastecimento, não sendo recomendados grandes períodos de tempo de intermitência, pois poderá haver interferência na atividade biológica que ocorre no meio filtrante, pois a circulação de água traz oxigênio e nutrientes utilizados pelos microrganismos (FUNASA, 2019).

Quanto ao tipo de limpeza do meio filtrante, a mais comumente utilizada é a convencional, que acontece por raspagem do meio filtrante. Em filtros lentos de menor escala é possível utilizar a retrolavagem, cujo modelo inicial foi desenvolvido por Emmedoerffer (2006) e aperfeiçoado por Marnoto (2008) e Pizzolatti (2014).

3.3 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA FILTRAÇÃO LENTA

Apesar de ser uma tecnologia consolidada, a filtração lenta possui algumas limitações, principalmente, a taxa de filtração, qualidade da água bruta e o tempo de amadurecimento do filtro.

Taxa de filtração é o volume de fluido que passa pelo filtro por metro quadrado durante um período de tempo. Segundo a FUNASA (2019), para a utilização da técnica da FL recomendam-se taxas de filtração entre 3 e 12 m³/m². d, que é considerada uma limitação da técnica. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, para a construção e operação de estações de tratamento de água envolvendo a FL, recomendam-se que a taxa de filtração não ultrapasse 6 m³/m². d (ABNT, 1992). Em termos comparativos, na filtração rápida, recomenda-se taxas entre 120 a 300 m³/m². d.

Outro fator limitante da FL é a turbidez da água bruta, pois como a taxa de filtração é lenta a capacidade de reter grandes quantidades de sólidos suspensos é bem limitada. Segundo a literatura, a turbidez da água bruta deve apresentar aproximadamente 10 uT. Valores muito superiores ocasiona a rápida colmatação do meio filtrante por ter a grande presença de sólidos em suspensão, diminuindo as carreiras de filtração (VERAS; DI BERNARDO, 2018).

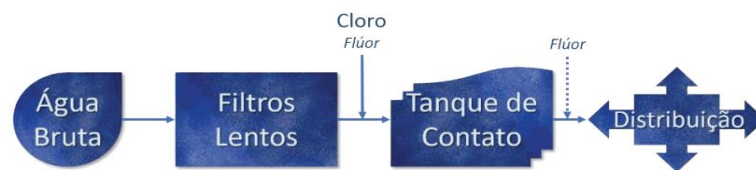
Uma maneira viável de minimizar os impactos durante o processo de filtração devido à alta turbidez da água bruta é a utilização de pré-filtro, pois essa técnica reduz a quantidade de material em suspensão amortecendo picos causados por precipitações. Há também a técnica da aeração para redução de ferro e manganês dissolvidos na água bruta e, menos comum, a coagulação), outra limitação importante é a remoção de sólidos dissolvidos (FUNASA, 2019).

A camada biológica (*Schmutzdecke*) formada nos primeiros centímetros de meio filtrante é uma vantagem da FL. Esta camada auxilia diretamente na remoção e redução de

patógenos e também na remoção de características físicas e químicas da água, sendo assim dispensável o uso de produtos químicos na filtração (FUNASA, 2019).

A facilidade de operação de filtros lentos também é uma grande vantagem. Isto ocorre devido à ausência de controle da dosagem de coagulante para o tratamento, sendo necessária apenas a aplicação de cloro e flúor (Figura 2). Dessa forma pode ser operado de maneira simples, tendo baixo custo inclusive de instalação, podendo ser operado com recursos locais (SOUZA; TOSCANO; CARNEIRO; SENS, 2018).

Figura 2 – Fluxograma de estações de tratamento de água com filtração lenta.

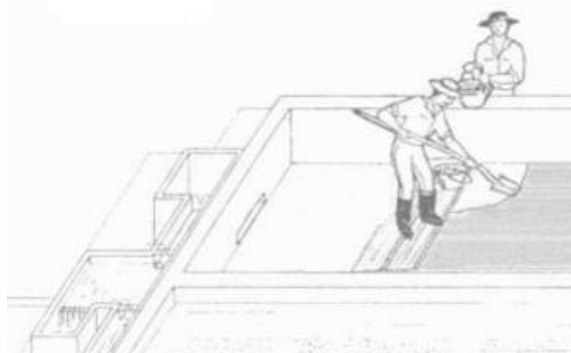


Fonte: FUNASA, 2019.

3.4 LIMPEZA DE FILTROS LENTOS (meio filtrante)

A técnica mais antiga de limpeza de filtros lentos é a de raspagem (Figura 3). Esta técnica consiste basicamente em drenar a água até o nível logo a baixo da superfície. Dessa forma a camada biológica (*Schmutzdecke*) e os primeiros 5 cm de areia são raspados, lavados e acondicionados para serem recolocados no filtro.

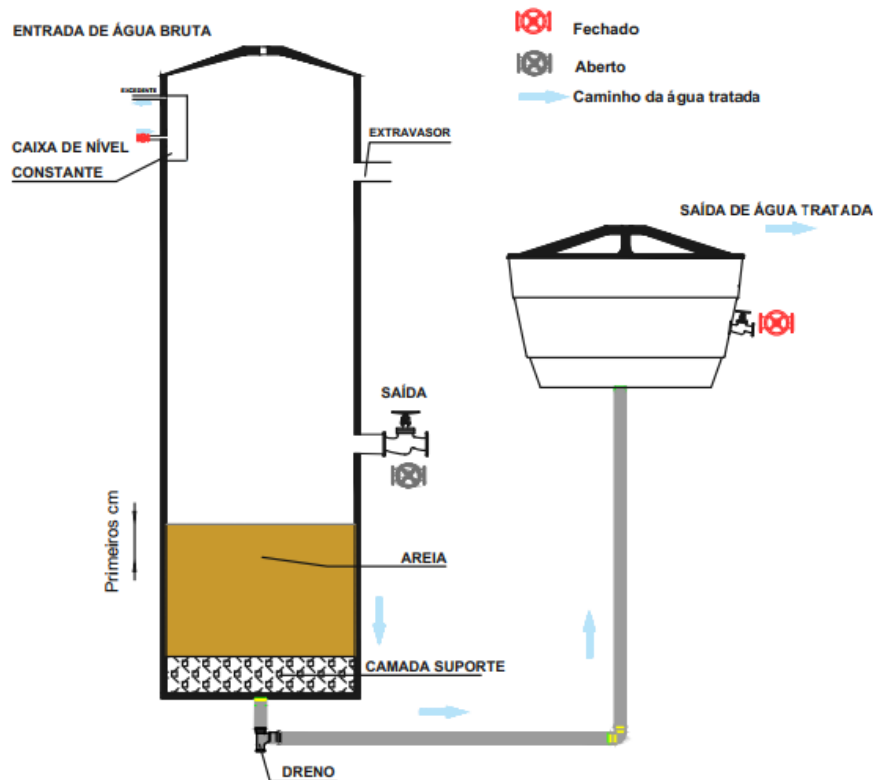
Figura 3 – Procedimento da raspagem da areia em Filtro Lento Convencional.



Fonte: DI BERNARDO, 1996.

Segundo Di Bernardo (2005) e Pizzolatti (2010), para que a atividade biológica no filtro não tenha perda de eficiência, a reposição da areia deve ser de forma adequada, mantendo o filme biológico formado, o que torna a manutenção do meio filtrante trabalhoso (Figura 4). Nesse intervalo de tempo o filtro permanece parado, ou seja, não há produção de água.

Figura 4 – Filtração lenta com limpeza convencional.



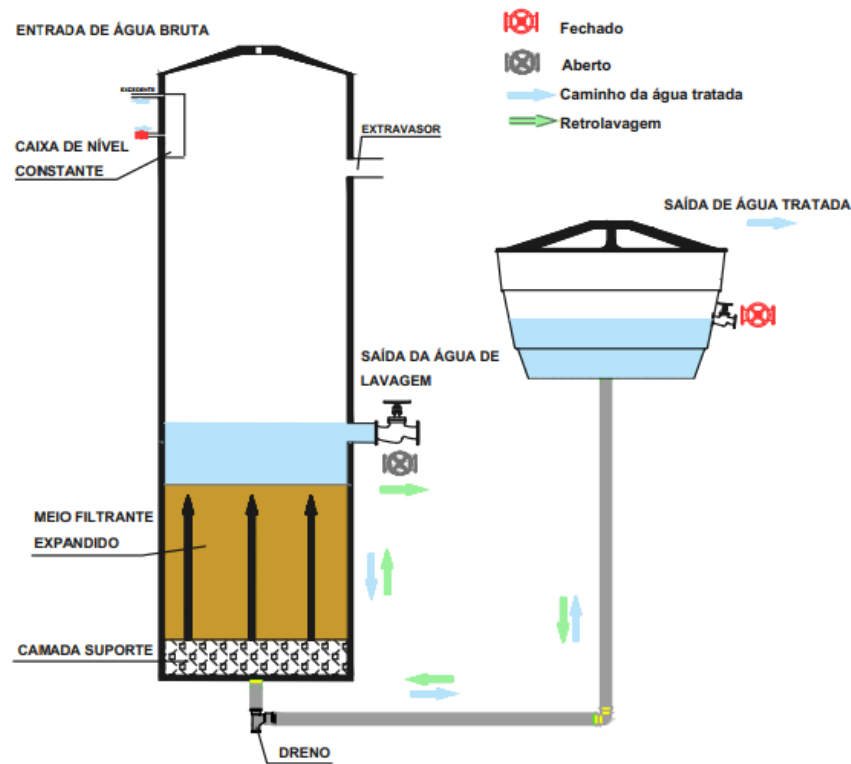
Fonte: Autora.

Contudo, há estudos recentes que apontam a retrolavagem com técnica de limpeza de filtros lentos, eficiente e de fácil operação, sendo recomendada aplicação em escalas menores (MICHELAN, 2010; PIZZOLATTI, 2010). Segundo Pizzolatti (2014), a técnica da retrolavagem é vantajosa quando comparada à convencional, pois a última é trabalhosa devido ao processo de raspagem, limpeza e reposição do meio filtrante ao final da carreira de filtração.

A técnica consiste em abrir uma válvula por um tempo pré-determinado. A água de um reservatório para retrolavagem é encaminhada então em contrafluxo, expandindo o meio

filtrante, fazendo com que os grãos se choquem entre si, promovendo assim a limpeza (Figura 5).

Figura 5 – Filtro lento retrolavável durante a retrolavagem.



Fonte: Autora.

A simplicidade da técnica torna pessoas leigas tecnicamente capazes de operar, reduzindo prováveis erros ou acidentes na hora da limpeza do filtro. Assim como na limpeza convencional, durante a retrolavagem é interrompida a produção de água tratada, bem como após as horas seguintes à retrolavagem, devido a uma significativa piora natural na qualidade da água tratada (PIZZOLATTI, 2010; PIZZOLATTI, 2014). Para a filtração lenta a retrolavagem apresenta-se como promissora, pela facilidade de limpeza em relação aos sistemas convencionais (EMMENDOERFER, 2006; MICHELAN, 2010; PIZZOLATTI, 2010; SOARES et al., 2010).

Richter e Azevedo Netto (2003) explicam que há dois critérios para saber quando é necessária a limpeza do meio filtrante. O primeiro é quando o nível de água atingir certo limite, ou seja, quando atingir a carga hidráulica máxima pré-estabelecida no dimensionamento.

O segundo é se houver controle da turbidez no efluente (água tratada) de cada filtro, recomenda-se que seja lavado o filtro que apresentar pior resultado.

Segundo ainda Richter e Azevedo Netto (2003), o tempo de lavagem do filtro está entre 6 a 10 minutos, para fins de filtros rápidos. Já para lavagem de filtros lento, Emmedoerffer (2006) diz que 4 minutos são suficientes para expandir o leito e realizar a limpeza do meio, considerando um leito de 40 cm de espessura e preenchido com areia.

3.5 PARÂMETROS OPERACIONAIS DE FILTROS LENTOS

3.5.1 Características técnicas do meio filtrante

As características físicas do meio filtrante tais como formato do grão, porosidade, coeficiente de uniformidade, diâmetro efetivo, profundidade do meio e tortuosidade são conceitos e parâmetros que influenciam diretamente na eficiência da filtração (SOARES, 2015).

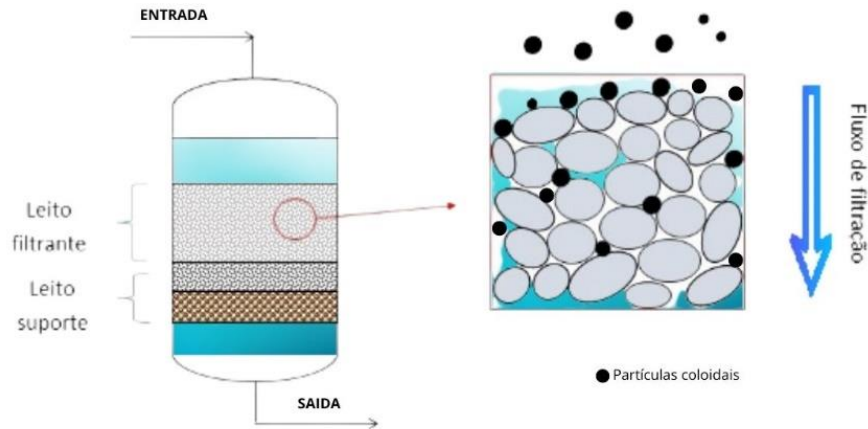
A forma do grão é um aspecto relevante pois, dependendo do formato (irregular, arredondado) e da distribuição granulométrica, ao serem colocados dentro do filtro de maneira adequada eles se ajustam de maneira aleatória, originando espaços vazios entre eles, conforme na Figura 6 (STEVENSON, 1997). Isto garante que o meio filtrante forme uma espécie de rede contendo as partículas coloidais, fazendo com que as impurezas fiquem presas entre os espaços vazios, assim deixando somente a água limpa passar Gibson et al. (2009), associam a percolação em profundidade de materiais particulados à grãos de formato mais esféricos, quando comparados a grãos de forma mais irregular.

O coeficiente de esfericidade é uma medida para avaliar a forma dos grãos, e é um parâmetro muito adotado em dimensionando de filtros. Quanto mais próximo de 1 (um) mais a forma se aproxima de uma esfera. Este parâmetro depende do tipo de material. (DHARMARAJAH & CLEASBY, 1986). Por exemplo, o coeficiente de esfericidade da areia fica entre 0,75 e 0,85, já o carvão antracito possui valor de 0,5, aproximadamente.

Porosidade é a relação do volume existente de espaços vazios que há entre os grãos e o volume total da matéria, conforme mostra a Figura 6. A porosidade tem influência na perda de carga, condutividade hidráulica e retenção de partículas no interior do meio filtrante (DI BERNARDO, 2003; TRUSSELL et al., 1999). Este parâmetro está diretamente ligado à

esfericidade do grão, sendo que quanto menor o coeficiente de esfericidade maior será a porosidade em um leito fixo. (DI BERNARDO, 2003).

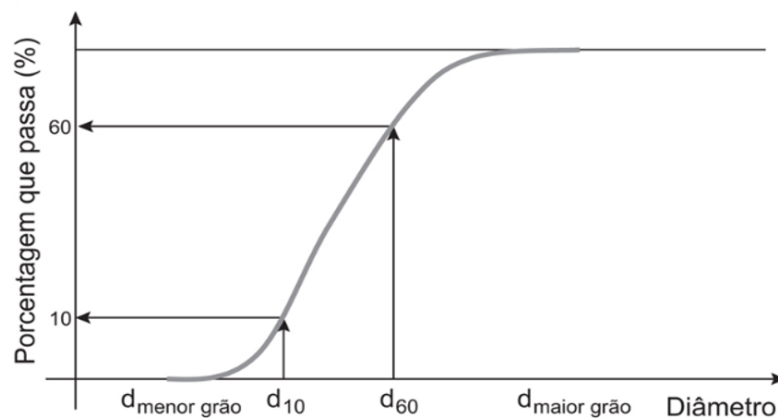
Figura 6 – Esquema genérico da formação de vazios.



Fonte: EQMA ENGENHARIA.

A curva de distribuição granulométrica, onde é possível a determinação do tamanho efetivo dos grãos (d_{10}) bem como a assiduidade de sua ocorrência dividida em faixas de diâmetro, é demonstrada através de representação gráfica (DI BERNARDO, 2003; LIMA; LUZ, 2001) dada na Figura 7. A dispersão entre um intervalo pré-determinado pode requerer a necessidade de triturar/selecionar os grãos para fins de utilização como meio filtrante (WICHTMANN et al., 2019).

Figura 7 – Curva granulométrica típica de um material filtrante utilizado em processos de filtração.



Fonte: SECKLER, 2017.

Obtido da curva de distribuição granulométrica, o coeficiente de uniformidade (C_u) é uma relação entre os diâmetros d_{60} e d_{10} conforme apresentado na equação 1 e representa uma média de dispersão da curva granulométrica do material (SECKLER, 2017). Quanto mais próximo de 1 (um) mais uniforme são os grãos do material em estudo, sendo os coeficientes maiores aqueles mais fáceis de serem encontrados, e os menores os que mais apresentam eficiência na penetração de impurezas. Para a filtração lenta recomenda-se coeficiente de uniformidade deve ser preferencialmente inferior a 3 (LONGSDON et al; 2002).

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Equação 1

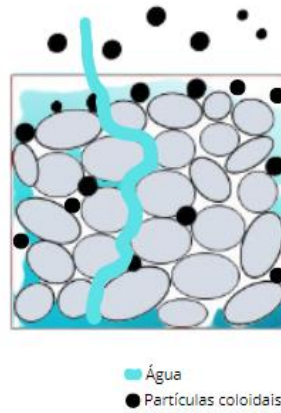
O diâmetro efetivo (d_{10}) é aquele no qual 10% da massa do material filtrante apresenta dimensão inferior. Matematicamente, diâmetros efetivos dos grãos estão diretamente ligados à perda de carga. Sendo assim, quanto menor o diâmetro efetivo maior a perda de carga (SECKLER, 2017). Desta forma, grãos de menor diâmetro, quando agrupados, tendem a formar vãos menores, gerando uma baixa condutividade hidráulica no meio (PINTO, 2011).

Outra característica importante é a profundidade do meio. Com o uso da baixa taxa de filtração em filtros lentos, estudos mostram que não há necessidade de se ter uma camada de meio filtrante muito extensa, já em filtros rápidos, devido à alta taxa de filtração utilizada, há redução da eficiência na filtração, sendo esta compensada com o aumento da profundidade do meio filtrante. Em FLR's alguns estudos obtiveram bons resultados com 40 cm de espessura de leito filtrante, com boa remoção de cor e turbidez. Porém, a água não é avaliada apenas para cor e turbidez. Há uma questão, por exemplo, microbiológica muito importante, que depende quase, diretamente, da espessura do meio filtrante. (POERSCH, 2012; ISHII, 2013; SOUZA, 2013a; PIZZOLATTI et al., 2014; CARNEIRO et al., 2016; SOUZA et al., 2016; STÜPP, 2016).

Devido à existência de vazios entre os grãos, a água acaba percorrendo um caminho tortuoso, causando o fenômeno da tortuosidade. A tortuosidade é tida pela razão entre o comprimento médio efetivo da linha do fluxo e o comprimento da linha reta entre dois pontos (Figura 8). Quanto maior a tortuosidade no percurso feito pelo fluxo, maior será a resistência

exercida sobre ele (KHABBAZI et al., 2016; LIU et al., 1995; THAUVIN; MOHANTY, 1998; VAN LOPIK et al., 2017).

Figura 8 – Exemplo de tortuosidade em meio granular.



Fonte: HENRIQUE MARTINS NETO.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PARÂMETROS DE ENTRADA DO PROJETO

Alguns parâmetros de entrada de projeto, para a implementação da filtração lenta, são sugeridos por FUNASA (2019), Richter (2009), Seckler (2017); Pizzolatti (2014); Emmedoerffer (2006) e ABNT (1992). Os parâmetros de entrada adotados neste estudo estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada utilizados no dimensionamento dos FLR's.

	Parâmetro	Símbolo	Areia	Antracito
MEIO FILTRANTE	Porosidade total inicial	ϵ_0	0,28	0,30
	Altura do meio filtrante (m)	L_0	0,40 e 0,15 [¥]	0,25 [¥]
	Altura da camada suporte (m)	H_{CS}	0,10	0,10
	Massa específica (kg/m ³) *	ρ_p	2.650	1.600
	Coefficiente de esfericidade **	ψ	0,80	0,50
	Coefficiente de uniformidade ***	CU	1,59	1,59
Água	Visc. dinâm. da água (N/S.m ²) #	μ	0,001002	0,001002
	Massa específica água (kg/m ³) #	ρ	997	997
Hidráulicos	Carga hidráulica (m) ⁺	Δh	0,685	0,685
	Taxa de filtração (m ³ /m ² *d) \$	q	4	4
	Tempo de lavagem (min)	t	4	4
Outro	Aceleração da gravidade (m/s ²)	g	9,81	9,81
	Diâmetro do filtro (mm)	\emptyset	100	100
	Diâmetro dos demais tubos (mm)	\emptyset	25	25

* Intervalo recomendado na literatura para o antracito: 1.450 a 1.750 ; ** Intervalo recomendado na literatura consecutivamente: 0,75 a 0,85 (areia) e 0,45 a 0,60 (antracito); *** Intervalo recomendado na literatura: 1,5 a 1,8; ⁺ Δh 0,685 m é para padronizar com filtros já construídos pelo grupo de pesquisa LABTAG; \$ Intervalo recomendado na literatura: 3 a 12 m³/m².d; [¥] Medida adotada para o FLR dupla camada.

4.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.

Para fins do dimensionamento do sistema de FLR, foi necessário criar um meio filtrante virtual para que as características do mesmo pudessem ser utilizadas no dimensionamento. Assim, com base no coeficiente de uniformidade adotado, foi possível montar a curva granulométrica virtual utilizando porcentagem das massas retidas e passantes (Tabela 2). No presente estudo foi utilizado o mesmo coeficiente de uniformidade para o filtro lento retrolavável de camada simples e o de camada dupla. A curva virtual foi formulada através de uma regra de três, onde foi analisado a porcentagem retida em cada peneira, para que fosse garantido o coeficiente de uniformidade determinado.

Tabela 2 – Exemplo de tabela para a determinação da curva de distribuição granulométrica virtual.

Nº ABNT	Diâmetro da peneira (mm)	Peso da peneira (g)	Peso da peneira + amostra (g)	Massa retida (g)	% retida simples	% retida acumulada	% passante acumulada
---------	--------------------------	---------------------	-------------------------------	------------------	------------------	--------------------	----------------------

4.3 DIVISÕES DO MEIO FILTRANTE EM SUBCAMADAS E DETERMINAÇÃO DOS DIÂMETROS CARACTERÍSTICOS.

Os materiais filtrantes, areia e carvão antracito, não são uniformes em sua distribuição granulométrica. Desse modo é recomendado dividir o meio filtrante em cinco subcamadas, com diâmetros equivalentes referentes às granulometrias de d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} e d_{90} (SECKLER, 2017). isto é necessário para posterior cálculo da perda de carga durante a filtração, e a expansão do meio filtrante durante a retrolavagem, obtendo com isso valores mais representativos. O FLR de camada simples foi dividido em cinco subcamadas dentro dos 40 cm, como é demonstrado na Tabela 3. No FLR de camada dupla também foi realizada a divisão em cinco subcamadas para cada meio filtrante, sendo areia 15 cm e antracito 25 cm, como demonstra na Tabela 4.

Tabela 3 – Diâmetros equivalentes e alturas das subcamadas FLR em camada simples.

Subcamada (%)	L_i (m)	d_{eq} (mm)
0-20	0,08	$d_{10} = 0,30$
20-40	0,08	$d_{30} = 0,46$
40-60	0,08	$d_{50} = 0,50$
60-80	0,08	$d_{70} = 0,55$
80-100	0,08	$d_{90} = 0,60$
Total	0,4	

Tabela 4 – Diâmetros equivalentes e alturas das subcamadas do FLR em camada dupla*.

Subcamada (%)	L_i (m)	d_{eq} (mm)	Subcamada (%)	L_i (m)	d_{eq} (mm)
0-20	0,03	$d_{10} = 0,30$	0-20	0,05	$d_{10} = 0,30$
20-40	0,03	$d_{30} = 0,46$	20-40	0,05	$d_{30} = 0,46$
40-60	0,03	$d_{50} = 0,50$	40-60	0,05	$d_{50} = 0,50$
60-80	0,03	$d_{70} = 0,55$	60-80	0,05	$d_{70} = 0,55$
80-100	0,03	$d_{90} = 0,60$	80-100	0,05	$d_{90} = 0,60$
Total	0,15		Total	0,25	

*esquerda areia e direita antracito.

4.4 DETERMINAÇÃO DA ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA.

O parâmetro S_v (área superficial específica) mantém correlação direta com as propriedades físicas fundamentais do tamanho da partícula e uniformidade/porosidade do material em estudo. Assim, neste torna-se importante avaliar a área superficial específica para cada subcamada o que pode ser feito pela Equação 2 abaixo. sendo esses valores necessários para o cálculo da perda de carga, no meio filtrante limpo, durante a filtração, e a expansão do material filtrante durante a retrolavagem (SECKLER, 2017).

$$S_V = \frac{6}{\psi * d_{eq}}$$

Equação 2

Onde: α – constante; S_v – área superficial (m^{-1}); ψ – coeficiente esfericidade do material filtrante e d_{eq} – diâmetro equivalente do material filtrante (m).

4.5 DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA DE AREIA E CARVÃO ANTRACITO NO MEIO LIMPO DURANTE A FILTRAÇÃO

Para determinar a perda de carga no meio filtrante limpo é necessário que sejam calculados os parâmetros alfas (α) e beta (β) para areia e antracito, conforme Equação 3 e Equação 4 (SECKLER, 2017).

$$\alpha = \frac{4,17 * \mu * (1 - \varepsilon_0)^2}{\rho * g * \varepsilon_0^3} \quad \text{Equação 3}$$

$$\beta = \frac{0,48 * (1 - \varepsilon_0)}{g * \varepsilon_0^3} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: 4,17 – constante; 0,48 – constante; μ – viscosidade dinâmica da água N/S.m²; ρ – massa específica da água (kg/m³); g – aceleração da gravidade (m/s²); ε_0 – porosidade inicial do meio filtrante.

Sendo assim, a perda de carga em ambos os materiais filtrantes pode, então, ser calculada pela Equação 5.

$$H = \alpha * v * \sum_{i=1}^n L_i * S_{vi}^2 + \beta * v^2 * \sum_{i=1}^n L_i * S_{vi} \quad \text{Equação 5}$$

Onde: H – perda de carga no meio filtrante limpo; v – velocidade superficial (m/s); L_i – altura da subcamada filtrante (m); S_{vi} – área superficial subcamada (m); μ – viscosidade dinâmica da água (N/S.m²); ρ – massa específica da água (kg/m³); g – aceleração da gravidade (m/s²); ε_0 – porosidade inicial do meio filtrante.

4.6 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DO MEIO FILTRANTE NA RETROLAVAGEM

Para a avaliação do comportamento hidráulico do meio filtrante durante a retrolavagem é necessário seguir os cálculos relatados nos itens 4.6.1.

4.6.1 Determinação da perda de carga e altura do meio fluidificado (expandido)

Avaliar a perda de carga no meio filtrante fluidificado é importante para se determinar da perda de carga durante a retrolavagem, que irá definir a altura do reservatório de água para retrolavagem e a altura do filtro. Após o meio filtrante encontrar-se fluidificado, a velocidade se torna independente, assim a perda de carga, de forma simplificada, pode ser calculada pela Equação 6 (FUNASA, 2019), que foi a equação utilizada para a definição da altura do reservatório de água para retrolavagem e altura do filtro.

$$\Delta h = 0,9 \cdot L_0 \quad \text{Equação 6}$$

Onde: Δh – perda de carga total no meio fluidificado (m) e L_0 – espessura do meio filtrante em repouso (m).

Porém, segundo Richter (2009), para se encontrar a perda de carga total no meio fluidificado, deve-se seguir a Equação 7.

$$\Delta h = 0,25 \cdot L_0 \quad \text{Equação 7}$$

Onde: Δh - perda de carga total no meio fluidificado (m) e L_0 - espessura do meio filtrante em repouso (m).

Segundo Seckler (2017), a perda de carga no meio expandido, considerando a porosidade do meio em repouso, pode ser também calculada pela Equação 8.

$$\Delta h = \frac{(\rho_p - \rho) \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot L_0}{\rho} \quad \text{Equação 8}$$

Onde: Δh – perda de carga total no meio fluidificado (m); L_0 – altura inicial do material filtrante (m); ρ_p – massa específica do meio filtrante (kg/m^3); ρ – massa específica da água (kg/m^3); ϵ_0 – porosidade inicial do meio filtrante.

Como a altura do meio expandido está relacionada com sua porosidade, segundo Seckler (2017), tem-se a Equação 9.

$$L = L_i * \frac{1-\epsilon_0}{1-\epsilon} \quad \text{Equação 9}$$

Onde: L – altura do material filtrante expandido (m); L_i – altura inicial da subcamada filtrante (m); ϵ_0 – porosidade inicial do meio filtrante e ϵ – porosidade do meio filtrante expandido.

A Equação 9, foi utilizada para o cálculo da altura do meio expandido para cada subcamada, cujo somatório será a altura total do leito expandido.

A altura de expansão recomendada pela FUNASA (2019) é de 25% a 40%. Richter (2019) recomenda uma expansão de 25% a 50%. Emmedoerffer (2006) demonstra que uma expansão de 40% a 60% também pode ser suficiente para filtros lentos retrolaváveis. Segundo o autor, com essa expansão se garante que a sujeira se desprenda do grão, deixando o meio filtrante limpo.

Para se obter a perda de carga em função da porosidade do meio expandido, é possível combinar as Equação 8 e Equação 9 obtendo a Equação 10 (Seckler, 2017). Esta equação, foi utilizada para a determinação da porosidade do meio expandido, quando o leito está submetido a uma determinada velocidade de fluidificação.

$$\Delta h = \frac{(\rho_p - \rho) \cdot (1 - \epsilon) \cdot L}{\rho} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: Δh – perda de carga total no meio fluidificado (m); L – altura do material filtrante expandido em (m); ρ_p – massa específica do meio filtrante (kg/m^3); ρ – massa específica da água em (kg/m^3); ϵ_0 – porosidade do meio filtrante expandido.

4.6.2 Determinação do número de Galileo e do número de Reynolds

O cálculo da velocidade mínima de fluidificação é de grande importância pois é ela que vai relatar se o meio irá fluidificada ou não, sob um valor de velocidade ascensional de água de lavagem (CLEASBY; FAN; DI BERNARDO,1981). O número de Galileo (Equação 11) e Número de Reynolds (Equação 12) estão associados à condição de mínima fluidificação (Seckler, 2017).

$$Ga = \frac{\rho \cdot d_{90}^3 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot g}{\mu^2} \quad \text{Equação 11}$$

Onde: Ga – número de Galileo (adimensional); ρ – massa específica da água (kg/m^3); d_{90} – Diâmetro efetivo (m); ρ_p – massa específica do meio filtrante (kg/m^3); g – aceleração da gravidade (m/s^2) e μ – viscosidade dinâmica da água (N/S.m^2).

$$Re = \sqrt{[(33,7)^2 + 0,0408 \cdot Ga]} - 33,7 \quad \text{Equação 12}$$

Onde: Re – número de Reynolds associado à condição de mínima fluidificação (adimensional); Ga – número de Galileo (adimensional).

4.6.3 Determinação da velocidade mínima de fluidificação

Determinado o número de Reynolds, a velocidade mínima de fluidificação pode ser calculada pela Equação 13 (Seckler, 2017). Será essa velocidade mínima de fluidificação a ser utilizada nos próximos cálculos para se encontrar o volume de água para lavagem, a altura do reservatório de água para retrolavagem e a altura do filtro.

$$V_{mf} = \frac{Re \cdot \mu}{d_{90} \cdot \rho} \quad \text{Equação 13}$$

Onde: V_{mf} – velocidade mínima de fluidificação (m/s); Re – número de Reynolds associado à condição de mínima fluidificação (adimensional); ρ – massa específica da água (kg/m^3) e μ – viscosidade dinâmica da água (N/S.m^2).

O FLR de dupla camada, como há dois materiais filtrantes (areia e carvão antracito), terá velocidades mínimas de fluidificação diferentes. A velocidade média de fluidificação (Equação 14) será em função da fração mássica de cada meio filtrante SECKLER, 2017.

$$V_{mf} = V_{mf1} \cdot \frac{V_{mf2} X_2^{1,69}}{V_{mf1}} \quad \text{Equação 14}$$

Onde: V_{mf1} – velocidade mínima de fluidificação das partículas mais pesadas que compõem o meio filtrante (m/s); V_{mf2} – velocidade mínima de fluidificação das partículas mais leves que compõem o meio filtrante (m/s); X_2 – fração mássica do meio filtrante associado à velocidade V_{mf2} .

Como a velocidade mínima de fluidificação da areia é maior que a do antracito, V_{mf1} estará associado à areia, e V_{mf2} , à antracito. Assim sendo, X_2 estará associado também à areia. A fração mássica pode ser calculada pela Equação 15 e, conseqüentemente, X_2 poderá ser calculado pela Equação 16 (Seckler, 2017).

$$\text{Massa} = L_0 \cdot A \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot \rho_p \quad \text{Equação 15}$$

Onde: Massa – massa do meio filtrante (kg); L_0 – altura inicial do meio filtrante; A – área do filtro (m^2); ε_0 – porosidade inicial do meio filtrante e ρ_p – massa específica do material (kg/m^3).

O cálculo de X_2 é dado pela Equação 16, considerando a massa maior de antracito SECKLER, 2017.

$$X_2 = \frac{m_{antracito}}{m_{antracito} + m_{areia}} \quad \text{Equação 16}$$

Onde: $m_{antracito}$ – massa do antracito (kg) e m_{areia} – massa da areia (kg).

4.6.4 Determinação da porosidade do meio expandido

Ainda que não seja possível prever a perda de carga, é possível calcular no meio filtrante limpo, como já foi visto. Estudos demonstraram que a Equação 17 também pode ser utilizada em meios filtrantes na condição de expansão (Seckler, 2017). Através dela é possível abstrair a porosidade do meio filtrante expandido.

$$\frac{4,17 \cdot \mu \cdot (1-\varepsilon)^2 \cdot S_v^2 \cdot V_{mf}}{\rho \cdot g \cdot \varepsilon^3} + \frac{0,48 \cdot (1-\varepsilon) \cdot S_v \cdot V_{mf}^2}{g \cdot \varepsilon^3} = \frac{(\rho_p - \rho) \cdot (1-\varepsilon)}{\rho} \quad \text{Equação 17}$$

Onde: μ – viscosidade dinâmica da água (N/S.m²); S_v – área superficial (m⁻¹); V_{mf} – velocidade mínima de fluidificação (m/s); ρ – massa específica da água (kg/m³); ρ_p – massa específica do meio filtrante (kg/m³); g – aceleração da gravidade (m/s²) e ε – porosidade do meio filtrante expandido.

Ao realizar a simplificação da Equação 17 em função da porosidade (ε), obtém-se na forma de $C_1 \varepsilon^3 + C_2 \varepsilon + C_3 = 0$ em que os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 estão sendo denotados aqui pela Equação 18.

$$\begin{aligned} C_1 &= (\rho_p - \rho) \cdot g && \text{Equação 18} \\ C_2 &= +4,17 \cdot \mu \cdot S_v^2 \cdot V_{mf} \\ C_3 &= -\rho \cdot 0,48 \cdot S_v \cdot V_{mf}^2 - 4,17 \cdot \mu \cdot V_{mf} \end{aligned}$$

Tabela 5 – Exemplo de tabela para demonstração dos valores dos termos da equação cúbica para cada subcamada.

	$C_1 = (\rho_p - \rho) \cdot g$	$C_2 = +4,17 \cdot \mu \cdot S_v^2 \cdot V_{mf}$	$C_3 = -\rho \cdot 0,48 \cdot S_v \cdot V_{mf}^2 - 4,17 \cdot \mu \cdot S_{vi}^2 \cdot V_{mf}$
d_{eq}	-	-	-

4.7 VOLUME DE ÁGUA PARA LAVAGEM

O volume da água para a lavagem do meio filtrante depende da velocidade mínima de fluidificação, área do filtro e tempo de limpeza adotado, considerando um coeficiente de segurança de 50% (Equação 19). FUNASA (2019) recomenda o tempo de 4 minutos para FLR's

de areia. Recomenda-se realizar testes em sistemas pilotos para saber se esse tempo também é suficiente para realizar a limpeza de meios filtrantes contendo carvão antracito, uma vez que sua superfície específica é diferente da areia.

$$V_r = V_{mf} \cdot A \cdot t \cdot 1,5 \quad \text{Equação 19}$$

Onde: V_r - volume do reservatório (m^3); V_{mf} - velocidade mínima de fluidificação; A - área de filtração (m^2) e t - tempo de lavagem (min).

Contudo, em termos operacionais, é importante que se considere também o tempo de esvaziamento da coluna de água dentro do filtro, embora este não vá influenciar na eficiência de limpeza do filtro.

4.8 ALTURA DA CALHA COLETORA DE ÁGUA DE LAVAGEM

Para determinarmos a altura da calha de coleta de água de lavagem será considerada a altura do meio filtrante expandindo com um coeficiente de segurança de 0,15 m (FUNASA, 2019). Então, a altura mínima da calha seguirá a Equação 20.

$$H_c = L + 0,15 \quad \text{Equação 20}$$

Onde: H_c - altura da calha (m); L - altura do material filtrante expandido (m).

4.9 ALTURA DO RESERVATÓRIO EM RELAÇÃO AO TOPO DA CALHA

A definição da altura do reservatório de água para retrolavagem leva em consideração que o mesmo precisa estar posicionado, de maneira que ofereça carga hidráulica suficiente para garantir a velocidade mínima, para a expansão do meio filtrante durante a retrolavagem. Assim, essa altura refere-se, na prática, a altura de água dentro do reservatório. Utilizando a equação da energia pode-se definir a altura mínima pela Equação 21 (FUNASA, 2019).

$$h_{\min r} = \left(\frac{V_{mf}^2}{2.g}\right) + \sum \Delta h_p \quad \text{Equação 21}$$

Onde: $h_{\min r}$ – altura mínima do reservatório (m); V_{mf} – velocidade mínima de fluidificação (m/s); g – aceleração da gravidade (m/s^2) e Δh_p – soma das perdas de carga na camada suporte (0,2 m, segundo Emmedoerffer 2006) e no meio filtrante (Equação 6) dado em metros (m).

Para simular o nível de água dentro do reservatório e, conseqüentemente, determinar a altura mínima do reservatório, será adotado um sólido de geometria cilíndrica de 30 cm de diâmetro.

4.10 ALTURA TOTAL DO FILTRO

Para o cálculo da altura total do filtro foram consideradas: a altura da camada suporte, a altura do meio filtrante, a altura da calha, a altura mínima do reservatório, a carga hidráulica máxima acima do meio filtrante e 0,15 m de segurança acima do extravasor (Equação 22) (Adaptado FUNASA, 2019).

$$H_f = H_{cs} + H_c + H_{\min r} + \Delta h_{\max} + 0,15 \quad \text{Equação 22}$$

Onde: H_f – Altura do filtro (m); H_{cs} – Altura da camada suporte (m); H_c – Altura da calha (m); $H_{\min r}$ – Altura mínima reservatório (m); Δh_{\max} – Carga hidráulica adotada (0,685 m).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CURVA GRANULOMÉTRICA VIRTUAL

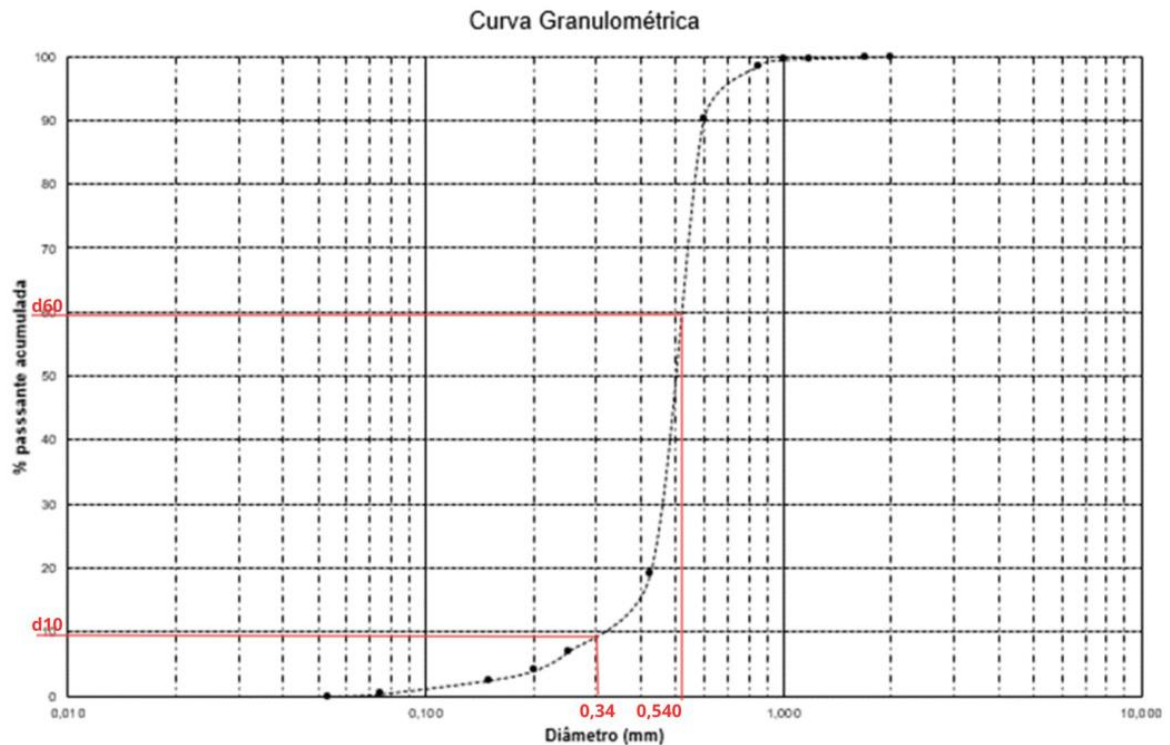
A Tabela 6 demonstra o resultado da construção das características físicas dos meios filtrantes virtuais utilizados nos FLR's. A partir da Tabela 6, foi possível construir a curva de distribuição granulométrica virtual com valores fictícios, apresentada na Figura 9, dos meios filtrantes utilizados no dimensionamento dos filtros. A mesma apresenta a variação do tamanho dos grãos com o d_{60} : 0,560mm e o d_{10} (tamanho efetivo): 0,340mm, bem como o coeficiente de uniformidade (CU) de 1,59. O tamanho efetivo e coeficiente de uniformidade estão de acordo com os estudos de LONGSDON et al, (2002), para filtros lentos.

Tabela 6 – Tabela de construção das características físicas dos meios filtrantes virtuais.

N° ABNT	Diâmetro peneira (mm)	Peso peneira (g)	Peso peneira + amostra (g)	Massa retida (g)	% retida	% retida	% passante
					simples	#	#
10	2	419	419	0	0	0	100
12	1,7	339	340	1	0,1	0,1	99,9
16	1,18	341	343	2	0,2	0,3	99,7
18	1	342	344	2	0,2	0,5	99,5
20	0,85	367	377	10	1	1,5	98,5
30	0,6	323	405	82	8,21	9,71	90,29
40	0,425	321	1031	710	71,07	80,78	19,22
60	0,25	322	444	122	12,21	92,99	7,01
70	0,2	248	278	30	3	96	4
100	0,15	308	323	15	1,5	97,5	2,5
200	0,075	305	326	21	2,1	99,6	0,4
270	0,053	381	385	4	0,4	100	0
fundo					0	100	0
					0	100	0
	TOTAL			999	100	-	-

acumulada

Figura 9 – Curva granulométrica virtual da areia.



Fonte: autora.

Com base na curva virtual da Figura 9, foi possível obter valores como o diâmetro efetivo d_{10} e d_{60} do material passante pelas peneiras. De posse desses valores se pode encontrar o coeficiente de uniformidade (C_u). Na curva é possível também obter o valor médio dos grãos denominado d_{50} (VAN LOPIK et al., 2017).

A determinação do coeficiente de uniformidade está expressa na Equação 23.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0,560}{0,340} = 1,59 \quad \text{Equação 23}$$

Através da razão entre o d_{60} e d_{10} , foi encontrado um coeficiente de uniformidade de 1,59, dentro do recomendado para filtração lenta. Segundo WIECHETECK (1996), valores menores que 5 indicam pequena desuniformidade nos grãos, que de certa forma facilita a filtração em profundidade, pois há maior potencial de infiltração de partículas no meio filtrante. Soares e Pizzolatti (2019) e Soares (2015) demonstram que alta uniformidade no material

filtrante facilita a percolação das partículas de menor diâmetro em profundidade assim tornando aumentando a eficiência do meio filtrante.

5.2 DIMENSIONAMENTO DO FLR DE CAMADA SIMPLES

5.2.1 Resultado da determinação da área superficial específica, $L_i \cdot S_v$ e $L_i \cdot S_v^2$

O resultado da determinação da área superficial específica (S_v) dada pela Equação 2, assim como para $L_i \cdot S_v$ e $L_i \cdot S_v^2$ estão demonstrados na Tabela 7. Esses valores foram utilizados para o cálculo da perda de carga no meio filtrante limpo durante a filtração, e para avaliação da expansão do material filtrante durante a retrolavagem.

Tabela 7 – Resultado dos valores da área superficial, S_v , $L_i \cdot S_v$ e $L_i \cdot S_v^2$.

Diâmetro (mm)	Altura (m)	S_v	$L_i \cdot S_v$	$L_i \cdot S_v^2$
$d_{10} = 0,30$	0,08	22.058,82	1.764,71	38.927.335,64
$d_{30} = 0,46$	0,08	16.304,35	1.304,35	21.266.540,64
$d_{50} = 0,50$	0,08	15.000,00	1.200,00	18.000.000,00
$d_{70} = 0,55$	0,08	14.150,94	1.132,08	16.019.935,92
$d_{90} = 0,60$	0,08	12.500,00	1.000,00	12.500.000,00
Somatória	0,40	80.014,11	6.401,13	106.713.812,20

5.2.1 Resultado da determinação da perda de carga no meio limpo durante a filtração

Para se obter os valores da perda de carga no meio filtrante limpo foi necessário primeiramente, calcular os valores de alfa (α) e beta (β), cujos resultados são apresentados nas Equação 24 e Equação 25.

$$\alpha = \frac{4,17 \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon_0)^2}{\rho \cdot g \cdot \varepsilon_0^3} = \frac{4,17 \cdot 0,001002 \cdot (1 - 0,28)^2}{997,981 \cdot 0,28^3} = 0,00001009 \quad \text{Equação 24}$$

$$\beta = \frac{0,48 \cdot (1-\varepsilon_0)}{g \cdot \varepsilon_0^3} = \frac{0,48 \cdot (1-0,28)}{9,81 \cdot 0,28} = 1,604835906 \quad \text{Equação 25}$$

Sendo assim, a perda de carga em ambos os materiais filtrantes pode, então, ser calculada pela Equação 26.

$$H = \alpha \cdot v \cdot (\sum L_i \cdot S_v^2) + \beta \cdot v^2 \cdot (\sum L_i \cdot S_v) \quad \text{Equação 26}$$

$$H = (0,00001009 \cdot 0,0000463 \cdot 106.713.812,20) + 1,604835906 \cdot (0,0000463)^2 \cdot 6.401,13$$

$$H = 0,050\text{m}$$

Ou seja, durante a filtração, sob uma taxa de $4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, teria-se uma perda de carga no meio filtrante limpo de 0,05 m.

5.2.2 Avaliação do comportamento hidráulico do meio filtrante na retrolavagem

5.2.2.1 Determinação da perda de carga e altura do meio fluidificado (expandido)

Segundo a FUNASA (2019) a perda de carga pode ser estimada através Equação 27, cujo resultado (0,36 m) será utilizado para a definição da altura do reservatório de água para retrolavagem e altura do filtro.

$$\Delta h = 0,9 \cdot L_0 \quad \text{Equação 27}$$

$$\Delta h = 0,9 \cdot 0,40$$

$$\Delta h = 0,36 \text{ m}$$

Já segundo Seckler (2017), a perda de carga no meio expandido, considerando a porosidade do meio em repouso, é apresentado na Equação 28.

$$\Delta h = \frac{(\rho_p - \rho) \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot L_0}{\rho} \quad \text{Equação 28}$$

$$\Delta h = \frac{(2650 \cdot 997) \cdot (1 - 0,28) \cdot 0,40}{997} = 0,48 \text{ m}$$

Segundo Seckler (2017), a altura do meio expandido está relacionada com sua porosidade, conforme demonstra a Equação 29 e apresentado na Tabela 8.

$$L = L_i * \frac{1-\varepsilon_0}{1-\varepsilon} \quad \text{Equação 29}$$

O cálculo da altura do meio expandido foi realizado, então para cada subcamada, utilizando a porosidade do meio expandido obtida na sessão 5.2.2.4, que considerou a velocidade mínima de fluidificação, obtida na sessão 5.2.2.3. O somatório da altura das subcamadas formou a altura total do leito expandido, conforme demonstra a Tabela 8.

Tabela 8 – Resultado da altura do meio expandido.

Subcamada	L_i (m)	L (m)
d ₁₀	0,08	0,13
d ₃₀	0,08	0,11
d ₅₀	0,08	0,11
d ₇₀	0,08	0,11
d ₉₀	0,08	0,10
Somatório	0,40	0,57

Assim sendo, a altura do meio filtrante expandido corresponderá a 0,57 m. É possível observar que houve um aumento no leito durante a retrolavagem, considerando altura do meio filtrante inicial (L_0) de 0,40 m. Com isso, obteve-se uma expansão de 42%, ou seja, acima do recomendado pela FUNASA (2019), que é de 25% a 40%, mas recomendado por Richter (2019), 25% a 50%, Tabela 9.

Com base na altura do leito expandido pode-se encontrar a altura da calha, apresentado na sessão 5.2.4 Equação 36.

Tabela 9 – Resultados da altura do meio expandido (L) para areia.

	L (m)	L_0 (m)	%	Está dentro do recomendado? Sim/Não
Areia (m)	0,57	0,40	42	Sim

5.2.2.2 Determinação do número de Galileo e do número de Reynolds

Para estimar a velocidade mínima de fluidificação foi necessário calcular os números de Galileo e Reynolds conforme as equações a seguir.

Galileo:

$$Ga = \frac{\rho \cdot d_{90}^3 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot g}{\mu^2} \quad \text{Equação 30}$$

$$Ga = \frac{997 \cdot (0,0006^3) \cdot (2650 - 997) \cdot 9,81}{0,001002^2} = 3.478,21$$

Reynolds:

$$Re = \sqrt{[(33,7)^2 + 0,0408 \cdot Ga]} - 33,7 \quad \text{Equação 31}$$

$$Re = \sqrt{[(33,7)^2 + 0,0408 \cdot 3.478,21]} - 33,7 = 2,0435$$

De posse dos resultados dos números de Galileo (3.478,21) e Reynolds (2,04), foi possível encontrar a velocidade mínima de fluidificação do material filtrante.

5.2.2.3 Determinação da velocidade mínima de fluidificação

A velocidade mínima de fluidificação é de suma importância, pois é a velocidade necessária para que o leito se expanda a partir de d_{90} , podendo atingir ou não a expansão mínima e máxima recomendada. Nos casos em que a velocidade mínima de fluidificação não atingir o intervalo de expansão recomendado, deverá ser realizado ajuste manual para atingir o objetivo de expansão apropriado do meio filtrante.

$$V_{mf} = \frac{Re \cdot \mu}{d_{90} \cdot \rho} = \frac{2,0435 \cdot 0,001002}{0,0006 \cdot 997} = 0,0034 \text{ m/s} \quad \text{Equação 32}$$

5.2.2.4 Determinação da porosidade do meio expandido

A porosidade do meio expandido foi determinada pela Equação 33, a qual pode ser simplificada, conforme demonstra a Equação 34, e aplicada para cada subcamada (d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} , d_{90}) conforme especificado na Tabela 10.

$$\frac{4,17 \cdot \mu \cdot (1-\varepsilon)^2 \cdot S_v^2 \cdot V_{mf}}{\rho \cdot g \cdot \varepsilon^3} + \frac{0,48 \cdot (1-\varepsilon) \cdot S_v \cdot V_{mf}^2}{g \cdot \varepsilon^3} = \frac{(\rho_p - \rho) \cdot (1-\varepsilon)}{\rho} \quad \text{Equação 33}$$

Ao realizar a simplificação da Equação 33, em função da porosidade (ε), obtém-se uma equação polinomial de terceiro grau na forma de $C_1 \varepsilon^3 + C_2 \varepsilon + C_3 = 0$ em que os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 , estão especificados a seguir. O resultado de cada coeficiente da equação é apresentado na Tabela 10.

$$C_1 = (p_p - \rho) \cdot g \quad \text{Equação 34}$$

$$C_2 = +4,17 \cdot \mu \cdot S_v^2 \cdot V_{mf}$$

$$C_3 = -\rho \cdot 0,48 \cdot S_v \cdot V_{mf}^2 - 4,17 \cdot \mu \cdot v$$

Tabela 10 – Resultado dos termos da equação cúbica para cada subcamada.

	$C_1 = (\rho_p - \rho) \cdot g$	$C_2 = +4,17 \cdot \mu \cdot S_v^2 \cdot V_{mf}$	$C_3 = -\rho \cdot 0,48 \cdot S_v \cdot V_{mf}^2 - 4,17 \cdot \mu \cdot v$
d10	16.215,93	6.959,43	-7.083,11
d30	16.215,93	3.802,03	-3.893,45
d50	16.215,93	3.218,04	-3.302,15
d70	16.215,93	2.864,04	-2.943,39
d90	16.215,93	2.234,75	-2.304,84

Com o uso de uma calculadora científica foi possível obter a porosidade do meio expandido para cada subcamada, bem como calcular a porosidade média do meio expandido (Tabela 11).

Tabela 11 – Porosidade do meio expandido (ϵ) para as subcamadas e média do meio filtrante.

Solução		
d ₁₀	ϵ	0,57
d ₃₀	ϵ	0,498
d ₅₀	ϵ	0,477
d ₇₀	ϵ	0,46
d ₉₀	ϵ	0,43
	Média	0,487

Ou seja, a porosidade média do meio filtrante expandido foi de $\epsilon = 0,487$ (48,7%). De posse do valor da porosidade, pôde-se determinar a altura do meio expandido (sessão 5.2.2.1).

5.2.3 Volume de água para lavagem

O volume de água para lavagem calculado (9,7 litros) é a quantidade de água necessária para lavar o meio filtrante pelo tempo de 4 minutos, conforme recomendação da FUNASA (2019) e apresentado na Equação 35, em um filtro de área 0,00785 m² (correspondente a um filtro de 100 mm de diâmetro). Este é o tempo necessário para que a sujeira se desprenda dos grãos e o meio filtrante seja limpo.

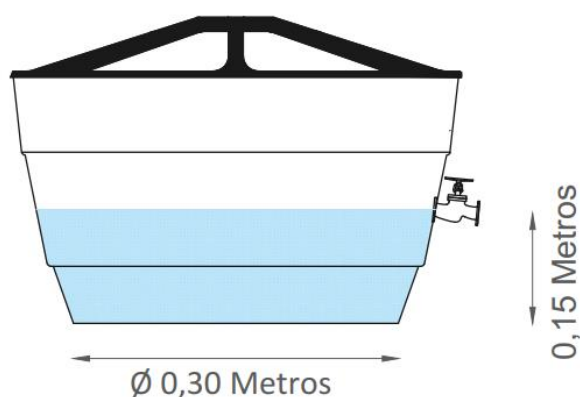
$$V_r = V_{mf} \cdot A \cdot t \cdot 1,5 \quad \text{Equação 35}$$

$$V_r = 0,0034 \cdot 0,00785 \cdot 4 \cdot 1,5$$

$$V_r = 0,0097 \text{ m}^3 \text{ ou, } 9,7 \text{ l}$$

Considerando um reservatório de forma cilíndrica, como é representado hipoteticamente na Figura 10, com 30 cm de diâmetro e volume de água de 9,7 litros, ter-se-á a tubulação de água tratada posicionada a uma altura de 0,15 m acima da base do mesmo.

Figura 10 – Desenho esquemático do reservatório de água para limpeza por retrolavagem do FLR.



Fonte: Autora.

5.2.4 Altura da calha coletora de água de lavagem

Nesse dimensionamento foi utilizada somente uma calha de 25 mm de diâmetro, devido ao diâmetro adotado do filtro (100 mm). Ela deve ser capaz de escoar água de maneira que não interfira no meio filtrante, mantendo um fluxo uniforme. A altura deve considerar o meio filtrante expandido (L) mais um coeficiente de segurança de 0,15 m (FUNASA, 2019).

$$H_c = L + 0,15 \quad \text{Equação 36}$$

$$H_c = 0,57 + 0,15$$

$$H_c = 0,72 \text{ m}$$

Ou seja, a calha será posicionada a uma altura de 0,72 m acima da camada suporte. Recomenda-se a utilização de um registro de esfera para a abertura da calha para acionamento da retrolavagem, devido à menor perda de carga proferida pela mesma, além de garantir uniformidade no escoamento durante a retrolavagem.

5.2.5 Altura do reservatório em relação ao topo da calha

A altura do reservatório deve estar adequada com os aspectos hidráulicos, uma vez que a gravidade será responsável pela retrolavagem. Assim, o reservatório deve ser posicionado de maneira que a energia hidráulica (carga hidráulica) seja capaz de superar as perdas de energia (perdas de carga), gerando a expansão do meio filtrante e, conseqüentemente, a limpeza do mesmo. Dentre as perdas de carga envolvidas estão a provinda da energia cinética, provocada pela velocidade mínima de fluidificação, bem como as perdas de carga na camada suporte (Emmedoerffer, 2006) e no meio filtrante.

$$h_{\min R} = \left(\frac{V_{mf}^2}{2.g}\right) + \sum \Delta h_p \quad \text{Equação 37}$$

$$h_{\min R} = \left(\frac{0,0034^2}{2,9,81}\right) + 0,56 = 0,56 \text{ m}$$

Ou seja, a altura mínima do reservatório em relação a calha coletora é de 0,56m.

Tabela 12 – Parâmetros para calcular Δh_p .

Parâmetro	Símbolo	Medida	Fonte
Perda na areia (m)	Δh	0,36	Equação 27
Perda na camada suporte (m)	h_{cs}	0,2	(EMMENDOERFER, 2006)
$\sum \Delta h_p$ (m)		0,56	

Assim, o nível de água dentro do reservatório deve estar posicionado 0,56 m acima da calha coletora de água de lavagem.

5.2.6 Altura total do filtro areia

A altura do filtro será em função da altura da camada suporte (H_{cs}), do meio filtrante expandido (L), 0,15 m de segurança, altura mínima do reservatório ($H_{\min r}$), e da carga hidráulica máxima adotada acima do nível de água máximo no reservatório (Δh_{\max}). Basicamente será a soma de todas as alturas, somado um coeficiente de segurança de 0,15 m, abaixo do qual será instalado um extravasor.

$$H_f = H_{cs} + L + 0,15 + H_{\min r} + \Delta h_{\max} + 0,15 \quad \text{Equação 38}$$

$$H_f = 0,10 + 0,57 + 0,15 + 0,56 + 0,685 + 0,15$$

$$H_f = 2,21\text{m}$$

Ou seja, o filtro lento retrolavável de camada simples terá altura total de 2,21m.

5.3 DIMENSIONAMENTO FLR DE CAMADA DUPLA

O FLR de dupla camada é constituído de areia e antracito. Como os materiais possuem características físicas distintas, parte do dimensionamento é realizado para ambos os materiais, cada um levando em consideração os seus parâmetros. Após definida a velocidade mínima de fluidificação (V_{mf}) de cada um, o dimensionamento seguiu considerando uma única velocidade mínima de fluidificação (média) para ambos os materiais.

5.3.1 Resultado da determinação da área superficial específica, $L_i \cdot S_v$ e $L_i \cdot S_v^2$

O resultado da determinação da área superficial específica (S_v) dada na Equação 2, assim como para $L_i \cdot S_v$ e $L_i \cdot S_v^2$ estão demonstrados na Tabela 13, para areia, e na

Tabela 14, para o antracito no qual o somatório será utilizado na Equação 44. Com a divisão da altura do meio filtrante em 5 subcamadas tem-se para areia cinco subcamadas de 0,03 m, e para o antracito cinco subcamadas de 0,05 m, esses valores serão utilizados para o cálculo da perda de carga no meio filtrante limpo durante a filtração, e para avaliar a expansão do material filtrante durante a retrolavagem.

Tabela 13 – Resultado dos valores da área superficial, S_v , $L_i \cdot S_v$ e $L_i \cdot S_v^2$ (areia).

Diâmetro (mm)	L_i Altura (m)	S_v	$L_i \cdot S_v$	$L_i \cdot S_v^2$
$d_{10} = 0,30$	0,03	22.058,82	661,76	14.597.750,87
$d_{30} = 0,46$	0,03	16.304,35	489,13	7.974.952,74
$d_{50} = 0,50$	0,03	15.000,00	450,00	6.750.000,00
$d_{70} = 0,55$	0,03	14.150,94	424,53	6.007.475,97
$d_{90} = 0,60$	0,03	12.500,00	375,00	4.687.500,00
Somatória	0,15	80.014,11	2.400,42	40.017.679,58

Tabela 14 – Resultado dos valores da área superficial, S_v , L_i , S_v e $L_i \cdot S_v^2$ (antracito).

Diâmetro (mm)	L_i Altura (m)	S_v	$L_i \cdot S_v$	$L_i \cdot S_v^2$
$d_{10} = 0,30$	0,05	35.294,12	1.764,71	62.283.737,02
$d_{30} = 0,46$	0,05	26.086,96	1.304,35	34.026.465,03
$d_{50} = 0,50$	0,05	24.000,00	1.200,00	28.800.000,00
$d_{70} = 0,55$	0,05	22.641,51	1.132,08	25.631.897,47
$d_{90} = 0,60$	0,05	20.000,00	1.000,00	20.000.000,00
Somatória	0,25	128.022,58	6.401,13	170.742.099,52

5.3.2 Resultado da determinação da perda de carga no meio limpo durante a filtração

Os valores de perda de carga no meio filtrante limpo dependem diretamente da determinação dos valores de α e β , cujos resultados são apresentados a seguir:

Areia

$$\alpha = \frac{4,17 \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon_0)^2}{\rho \cdot g \cdot \varepsilon_0^3} = \frac{4,17 \cdot 0,001002 \cdot (1 - 0,28)^2}{997,9,81 \cdot 0,28^3} = 0,00001009 \quad \text{Equação 39}$$

$$\beta = \frac{0,48 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{g \cdot \varepsilon_0^3} = \frac{0,48 \cdot (1 - 0,28)}{9,81 \cdot 0,28^3} = 1,604835906 \quad \text{Equação 40}$$

Sendo assim, a perda de carga pode, então, ser calculada pela Equação 41

$$H = \alpha \cdot v \cdot (\sum L_i \cdot S_v^2) + \beta \cdot v^2 \cdot (\sum L_i \cdot S_v) \quad \text{Equação 41}$$

$$H = 0,00001009 \cdot 0,0000463 \cdot (40.017.679,58) + 1,604835906 \cdot (0,0000463)^2 \cdot (2.400,42)$$

$$H = 0,019\text{m}$$

Antracito

$$\alpha = \frac{4,17 \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon_0)^2}{\rho \cdot g \cdot \varepsilon_0^3} = \frac{4,17 \cdot 0,001002 \cdot (1 - 0,30)^2}{997,9,81 \cdot 0,30^3} = 0,00000775 \quad \text{Equação 42}$$

$$\beta = \frac{0,48 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{g \cdot \varepsilon_0^3} = \frac{0,48 \cdot (1 - 0,30)}{9,81 \cdot 0,30^3} = 1,268546834 \quad \text{Equação 43}$$

Sendo assim, a perda de carga pode, então ser calculada pela Equação 44.

$$H = \alpha * v * (\sum L_i * S_v^2) + \beta. v^2 * (\sum L_i * S_v) \quad \text{Equação 44}$$

$$H = 0,00000775 . 0,0000463 . 170.742.099,52 + 1,268546834. (0,0000463)^2 . (6.401,13)$$

$$H = 0,061\text{m}$$

Ou seja, durante a filtração, sob uma taxa de $4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, tem-se os valores de 0,019 m e 0,061 m de perda de carga para areia e antracito, respectivamente, totalizando 0,080 m de perda de carga no meio filtrante limpo.

5.3.3 Avaliação do comportamento hidráulico do meio filtrante na retrolavagem

5.3.3.1 Determinação da perda de carga e altura do meio fluidificado (expandido)

Segundo a FUNASA (2019) a perda de carga pode ser estimada para ambos os materiais através da Equação 45 e Equação 46, sendo L_0 a espessura do meio filtrante em repouso (m), obtém-se os valores determinados para cada material.

Areia - Δh_a

$$\Delta h_a = 0,9 . L_0 \quad \text{Equação 45}$$

$$\Delta h_a = 0,9 . 0,15$$

$$\Delta h_a = 0,135 \text{ m}$$

Antracito - Δh_p

$$\Delta h_p = 0,25 . L_0 \quad \text{Equação 46}$$

$$\Delta h_p = 0,25 . 0,25$$

$$\Delta h_p = 0,0625 \text{ m}$$

A perda de carga total no meio fluidificado de 0,1975 m, considerando a perda de carga da areia e do antracito, será utilizado para a definição da altura do reservatório de água para retrolavagem e altura do filtro.

Utilizando a metodologia de Seckler (2017), a perda de carga no meio expandido está relacionada à porosidade do meio em repouso para ambas as matérias, podendo também ser calculada pela Equação 47 e Equação 48.

Areia

$$\Delta h = \frac{(\rho_p - \rho) \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot L_0}{\rho} \quad \text{Equação 47}$$

$$\Delta h = \frac{(2650 \cdot 997) \cdot (1 - 0,28) \cdot 0,15}{997} = 0,18 \text{ m}$$

Antracito

$$\Delta h = \frac{(\rho_p - \rho) \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot L_0}{\rho} \quad \text{Equação 48}$$

$$\Delta h = \frac{(1600 \cdot 997) \cdot (1 - 0,30) \cdot 0,25}{997} = 0,11 \text{ m}$$

Os valores da perda de carga de areia e antracito são, respectivamente, 0,18 m e 0,11 m, totalizando uma perda de carga no meio expandido de 0,29 m, muito próximo à metodologia da FUNASA.

Segundo Seckler (2017), a altura do meio expandido está relacionada com sua porosidade, conforme demonstra a Equação 49.

$$L = L_i * \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} \quad \text{Equação 49}$$

O cálculo da altura do meio expandido foi realizado então para cada subcamada, utilizando a porosidade do meio expandido obtida na sessão 5.3.3.5, que considerou a velocidade mínima de fluidificação, obtida na sessão 5.3.3.3. O somatório da altura das subcamadas formou a altura total do leito expandido de areia e antracito, conforme demonstrado nas Tabela 15 e Tabela 16.

Tabela 15 – Resultado da altura do meio expandido (L) – areia.

Subcamada	L_i (m)	L (m)
d ₁₀	0,03	0,046
d ₃₀	0,03	0,040
d ₅₀	0,03	0,039
d ₇₀	0,03	0,038
d ₉₀	0,03	0,036
Somatório	0,15	0,198

Tabela 16 – Resultado da altura do meio expandido (L) – antracito.

Subcamada	L_i (m)	L (m)
d ₁₀	0,05	0,17
d ₃₀	0,05	0,12
d ₅₀	0,05	0,11
d ₇₀	0,05	0,11
d ₉₀	0,05	0,10
Somatório	0,25	0,61

Assim sendo, a altura do meio filtrante expandido corresponderá a 0,81 m (Tabela 17). É possível observar que houve um aumento no leito durante a retrolavagem, considerando a altura do meio filtrante inicial (L_0) de 0,40 m. Com isso, obteve-se uma expansão de 32% para a areia e 143% para o antracito. A faixa de recomendação é de 25% a 40%, segundo a FUNASA (2019), e 25% a 50%, segundo Richter (2019). Como não é possível alterar a distribuição granulométrica do material filtrante, para alterar assim a sua expansão, recomenda-se que sejam realizados estudos em sistemas pilotos de filtração lenta, uma vez que a recomendação citada é baseada em testes e experiências obtidas em filtros rápidos, os quais recebem coagulante para otimizar o tratamento da água.

Tabela 17 – Resultados da altura do meio expandido (L) para areia e antracito.

	L (m)	L_0 (m)	%	Está dentro do recomendado? Sim/Não
Areia (m)	0,198	0,15	32	Sim
Antracito (m)	0,61	0,25	143	Não
Somatório (m)	0,81	0,40	-	-

Com base na altura do leito expandido pode-se encontrar a altura da calha, apresentado na sessão 5.3.5 e na Equação 62.

5.3.3.2 Determinação do número de Galileo e do número de Reynolds

Para estimar a velocidade mínima de fluidificação foi necessário determinar os números de Galileo e Reynolds.

Areia

Galileo:

$$Ga = \frac{\rho \cdot d_{90}^3 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot g}{\mu^2} \quad \text{Equação 50}$$

$$Ga = \frac{997 \cdot 0,0006^3 \cdot (2650 - 997) \cdot 9,81}{0,001002^2} = 3.478,21$$

Reynolds:

$$Re = \sqrt{[(33,7)^2 + 0,0408 \cdot Ga]} - 33,7 \quad \text{Equação 51}$$

$$Re = \sqrt{[(33,7)^2 + 0,0408 \cdot 3478,21]} - 33,7 = 2,0435$$

Antracito

Galileo:

$$Ga = \frac{\rho \cdot d_{90}^3 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot g}{\mu^2} \quad \text{Equação 52}$$

$$Ga = \frac{997 \cdot 0,0006^3 \cdot (1600 - 997) \cdot 9,81}{0,001002^2} = 1.268,82$$

Reynolds:

$$Re = \sqrt{[(33,7)^2 + 0,0408 \cdot Ga]} - 33,7 \quad \text{Equação 53}$$

$$Re = \sqrt{[(33,7)^2 + 0,0408 \cdot 1.268,82]} - 33,7 = 0,7595$$

Tabela 18 – Resultados dos números de Galileo e Reynolds para areia e antracito.

	Re	Ga
Areia (m)	2,0435	3.478,21
Antracito (m)	0,7595	1.268,82

De posse dos resultados dos números de Galileo e Reynolds, foi possível encontrar a velocidade mínima de fluidificação dos materiais filtrantes.

5.3.3.3 Determinação da velocidade mínima de fluidificação

A velocidade mínima de fluidificação foi calculada separadamente para ambos os materiais, cujo resultado é expresso na Equação 54 e Equação 55.

Areia

$$V_{mf \text{ areia}} = \frac{Re \cdot \mu}{d_{90} \cdot \rho} = \frac{2,0435 \cdot 0,001002}{0,0006 \cdot 997} = 0,0034 \text{ m/s} \quad \text{Equação 54}$$

Antracito

$$V_{mf \text{ ant.}} = \frac{Re \cdot \mu}{d_{90} \cdot \rho} = \frac{0,7595 \cdot 0,001002}{0,0006 \cdot 997} = 0,0013 \text{ m/s} \quad \text{Equação 55}$$

Como temos dois meios filtrantes com características distintas, é recomendado utilizar a Equação 59, para definir a velocidade mínima de fluidificação para ambos os meios filtrantes. Neste caso é necessário que seja conhecida a fração mássica do material X_2 , que será associado à velocidade mínima de fluidificação V_{mf2} . Como a velocidade mínima de fluidificação da areia é maior que a do antracito, V_{mf1} estará associado à areia, e V_{mf2} , à antracito. Assim sendo, X_2 estará associado também ao antracito, conforme é demonstrado na sessão 5.3.3.4.

5.3.3.4 Cálculo da fração mássica (X_2)

Areia

$$\text{Massa} = L_0 \cdot A \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot \rho_p \quad \text{Equação 56}$$

$$\text{Massa} = 0,15 \cdot 0,00785 \cdot (1 - 0,28) \cdot 2650$$

$$\text{Massa} = 2,25 \text{ kg}$$

Antracito

$$\text{Massa} = L_0 \cdot A \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot \rho_p \quad \text{Equação 57}$$

$$\text{Massa} = 0,25 \cdot 0,00785 \cdot (1 - 0,30) \cdot 1600$$

$$\text{Massa} = 2,20 \text{ kg}$$

$$X_2 = \frac{m_{\text{antracito}}}{m_{\text{antracito}} + m_{\text{areia}}} \quad \text{Equação 58}$$

$$X_2 = \frac{2,20}{2,20 + 2,25}$$

$$X_2 = 0,49 \text{ kg}$$

Assim a velocidade mínima de fluidificação para ambos os meios filtrantes é apresentada a seguir:

$$V_{mf} = V_{mf.1} \frac{V_{mf.2}}{V_{mf.1}} x_2^{1,69} \quad \text{Equação 59}$$

$$V_{mf} = 0,0034 \cdot \frac{0,0013^{0,49 \cdot 1,69}}{0,0034}$$

$$V_{mf} = 0,0025 \text{ m/s}$$

De posse do valor de velocidade mínima de fluidificação de ambos os meios filtrantes, pode-se determinar a expansão do meio filtrante pela Equação 61.

5.3.3.5 Determinação da porosidade do meio expandido

A porosidade do meio expandido foi determinada pela Equação 60, a qual pode ser simplificada, conforme demonstra a Equação 61, e aplicada para cada subcamada (d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} , d_{90}) conforme na Tabela 19.

$$\frac{4,17 \cdot \mu \cdot (1-\varepsilon)^2 \cdot S_v^2 \cdot V_{mf}}{\rho \cdot g \cdot \varepsilon^3} + \frac{0,48 \cdot (1-\varepsilon) \cdot S_v \cdot V_{mf}^2}{g \cdot \varepsilon^3} = \frac{(\rho_p - \rho) \cdot (1-\varepsilon)}{\rho} \quad \text{Equação 60}$$

Ao realizar a simplificação da Equação 60, em termos de porosidade (ε), obtém-se uma equação polinomial de terceiro grau dada por $C_1 \varepsilon^3 + C_2 + C_3 = 0$, cujo o coeficiente C_1 , C_2 e

C₃ estão explicados na Equação 61. O resultado de cada coeficiente da equação é apresentado na Tabela 19, para a areia, e Tabela 21, para o antracito.

$$C_1 = (\rho_p - \rho) \cdot g \quad \text{Equação 61}$$

$$C_2 = +4,17 \cdot \mu \cdot S_v^2 \cdot V_{mf}$$

$$C_3 = -\rho \cdot 0,48 \cdot S_v \cdot V_{mf}^2 - 4,17 \cdot \mu \cdot V_{mf}$$

Com o uso de uma calculadora científica foi possível obter a porosidade do meio expandido para cada subcamada para ambos os materiais filtrantes, bem como a porosidade média, conforme demonstra a Tabela 20 e Tabela 22.

Tabela 19 – Resultado dos termos da equação cúbica para cada subcamada de areia.

	$C_1 = (\rho_p - \rho) \cdot g$	$C_2 = + 4,17 \cdot \mu \cdot S_v^2 \cdot V_{mf}$	$C_3 = - \rho \cdot 0,48 \cdot S_v \cdot V_{mf}^2 - 4,17 \cdot \mu \cdot S_v^2 \cdot V_{mf}$
d ₁₀	16.215,93	5.150,00	-5.217,73
d ₃₀	16.215,93	2.813,52	-2.863,58
d ₅₀	16.215,93	2.381,36	-2.427,42
d ₇₀	16.215,93	2.119,40	-2.162,85
d ₉₀	16.215,93	1.653,72	-1.692,10

Tabela 20 – Porosidade do meio expandido (ϵ) para as subcamadas e média do meio filtrante de areia.

Solução		
d ₁₀	ϵ	0,53
d ₃₀	ϵ	0,46
d ₅₀	ϵ	0,44
d ₇₀	ϵ	0,43
d ₉₀	ϵ	0,4
	Média	0,452

Tabela 21 – Resultado dos termos da equação cúbica para cada subcamada de antracito.

	$C_1 = (\rho_p - \rho) \cdot g$	$C_2 = + 4,17 \cdot \mu \cdot S_v^2 \cdot V_{mf}$	$C_3 = - \rho \cdot 0,48 \cdot S_v \cdot V_{mf}^2 - 4,17 \cdot \mu \cdot S_v^2 \cdot V_{mf}$
d ₁₀	5.915,43	13.184,00	-13.292,38
d ₃₀	5.915,43	7.202,60	-7.282,70
d ₅₀	5.915,43	6.096,28	-6.169,98
d ₇₀	5.915,43	5.425,67	-5.495,19
d ₉₀	5.915,43	4.233,53	-4.294,94

Tabela 22 – Porosidade do meio expandido (ϵ) para as subcamadas e média do meio filtrante de antracito.

Solução		
d ₁₀	ϵ	0,79
d ₃₀	ϵ	0,71
d ₅₀	ϵ	0,69
d ₇₀	ϵ	0,68
d ₉₀	ϵ	0,64
	Média	0,702

Assim, a porosidade média do meio filtrante expandido foi de $\epsilon = 0,452$ (45,2%), para a areia, e $\epsilon = 0,702$ (70,2%), para o antracito. De posse do valor da porosidade do meio expandido, pôde-se determinar a altura do meio expandido, conforme demonstrado na sessão 5.3.3.1.

5.3.4 Volume de água para lavagem

Utilizando a velocidade mínima de fluidificação de 0,0025m/s, uma área de 0,00785 m² (correspondente a um filtro de 100 mm de diâmetro) e 4 minutos de tempo de lavagem, conforme recomendação da FUNASA (2019), foi obtido um volume de lavagem de 7,2 litros de água, com um fator de segurança de 50%, conforme demonstra os cálculos a seguir:

$$V_r = V_{mf} \cdot A \cdot t \cdot 1,5$$

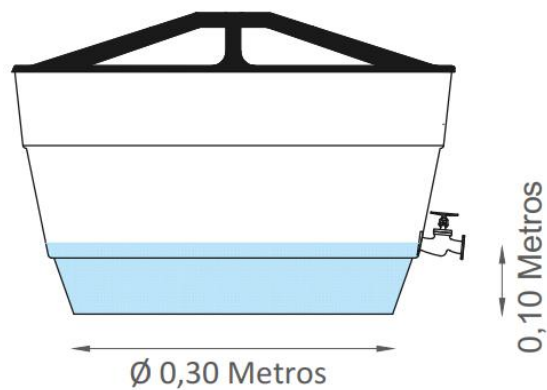
Equação 62

$$V_r = 0,0025 \cdot 0,00785 \cdot 4 \cdot 1,5$$

$$V_r = 0,0072 \text{ m}^3 \text{ ou } 7,2 \text{ l}$$

Considerando um reservatório de forma cilíndrica (Figura 11), com 30 cm de diâmetro, e com um volume de água de 7,2 litros, têm-se uma altura de 0,10 m de lâmina de água dentro do mesmo. Assim, a tubulação de água tratada deverá ser posicionada a uma altura de 0,10 m acima da base do mesmo do reservatório.

Figura 11 – Desenho esquemático do reservatório de água.



Fonte: Autora.

5.3.5 Altura da calha coletora de água de lavagem

No FLR de dupla camada optou-se por utilizar apenas uma calha de 25 mm de diâmetro, devido ao diâmetro do filtro adotado (100 mm), sendo a mesma capaz de escoar toda a água de maneira que não interfira na expansão do meio filtrante, mantendo um fluxo uniforme. A altura deve considerar o somatório do meio filtrante expandido (L) mais um coeficiente de segurança de 0,15 m (FUNASA, 2019).

$$H_c = L + 0,15$$

Equação 63

$$H_c = 0,81 + 0,15$$

$$H_c = 0,96 \text{ m}$$

Desta forma a calha deveria estar na altura 0,96 m acima do meio filtrante em repouso. Também é recomendada a utilização de um registro de esfera para a abertura da calha para acionamento da retrolavagem, devido à menor perda de carga proferida pela mesma, além de garantir uniformidade no escoamento durante a retrolavagem.

5.3.6 Altura do reservatório em relação ao topo da calha

A altura do reservatório deve atender aos quesitos hidráulicos, sendo que a gravidade será responsável pela retrolavagem. Assim, o reservatório deve ser posicionado de maneira que a energia hidráulica (carga hidráulica) seja capaz de superar as perdas de energia (perdas de carga), gerando a expansão do meio filtrante e, conseqüentemente, sua limpeza. Dentre as perdas de carga envolvidas está a provinda da energia cinética, provocada pela velocidade mínima de fluidificação, bem como as perdas de carga na camada suporte (EMMEDOERFFER, 2006) e no meio filtrante (Equação 63). Foram utilizados os dados de perda de carga para o cálculo da altura mínima do reservatório (Tabela 23).

$$h_{\min R} = \left(\frac{V_{mf}^2}{2.g}\right) + \sum \Delta h_p \quad \text{Equação 64}$$

$$h_{\min R} = \left(\frac{0,0025^2}{2.9,81}\right) + 0,40 = 0,40\text{m}$$

Tabela 23 – Parâmetros para calcular Δh_p .

Parâmetro	Símbolo	medida	Fonte
Perda na areia (m)	Δh_a	0,36	Equação 45
Perda de antracito (m)	Δh_p	0,625	Equação 46
Perda na camada suporte (m)	h_{cs}	0,2	(EMMEDOERFFER, 2006)
Soma (m)	$\sum \Delta h_p$	0,40	

Assim, o nível de água dentro do reservatório deve estar posicionado a 0,40 m acima da calha coletora de água de lavagem.

5.3.7 Altura total do filtro antracito

A altura do filtro será em função da altura da camada suporte (H_{cs}), meio filtrante expandido (L), 0,15 m de segurança (onde é posicionada a calha), altura mínima do reservatório (H_{minr}) e da carga hidráulica máxima adotada acima do nível de água máximo no reservatório (Δh_{max}). Basicamente será a soma de todas as alturas conforme a Equação 64, somado um coeficiente de segurança de 0,15 m, abaixo do qual será instalado um extravasor.

$$H_f = H_{cs} + L + 0,15 + H_{minr} + \Delta h_{max} + 0,15 \quad \text{Equação 65}$$

$$H_f = 0,10 + 0,81 + 0,15 + 0,40 + 0,685 + 0,15$$

$$H_f = 2,29\text{m}$$

Ou seja, tem-se um filtro lento retrolavável de camada dupla terá altura total de 2,69m.

5.7 RESUMO DOS PRINCIPAIS PARAMETROS DE DIMENSIONAMENTO

Um resumo dos principais resultados pode ser observado na Tabela 24 e Tabela 25, bem como um desenho esquemático na Figura 12 e Figura 13, para efeitos de comparação de ambas as configurações de FLR's.

Tabela 24 – Resultados finais FLR-camada simples.

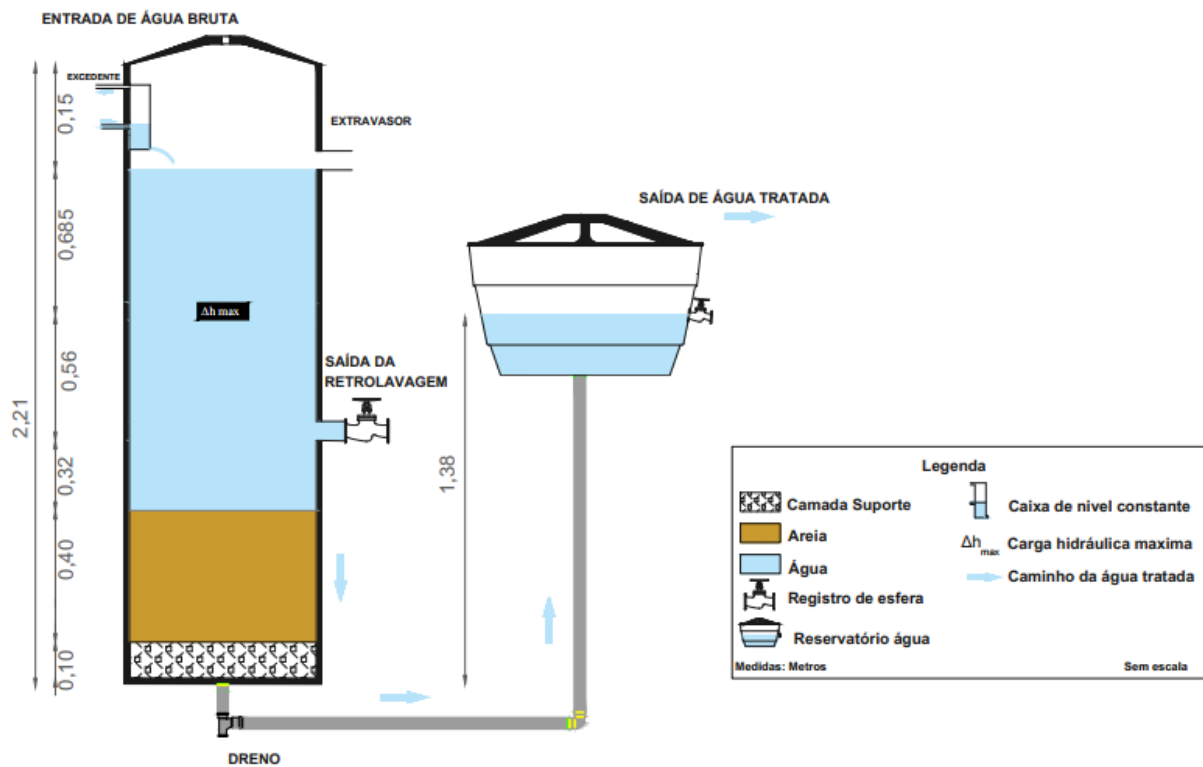
Parâmetro	Símbolo	Resultados
Velocidade mínima de fluidificação (m/s)	V_{mf}	$3,4 \times 10^{-3}$
Altura do leito expandido (m)	L	0,57
Perda de carga meio limpo (m)	H	0,05
Expansão do leito	E	42%
Altura mínima do reservatório (m)	h_{minr}	0,56
Altura da calha (m)	H_c	0,72
Volume do reservatório (l)	V_r	9,7
Altura do filtro (m)	H_f	2,21

Tabela 25 – Resultados finais FLR-dupla camada.

Parâmetro	Símbolo	Areia	Antracito
Velocidade mínima de fluidificação (m/s)	V_{mf}	$2,5 \times 10^{-3}$	
Altura do leito expandido (m)	L	0,20	0,61
Perda de carga meio limpo (m)	H	0,019	0,061
Expansão do leito	E	32%	143%
Altura mínima do reservatório (m)	$h_{min r}$	0,40	
Altura da calha (m)	H_c	0,96	
Volume do reservatório (l)	V_r	7,2	
Altura do filtro (m)	H_f	2,29	

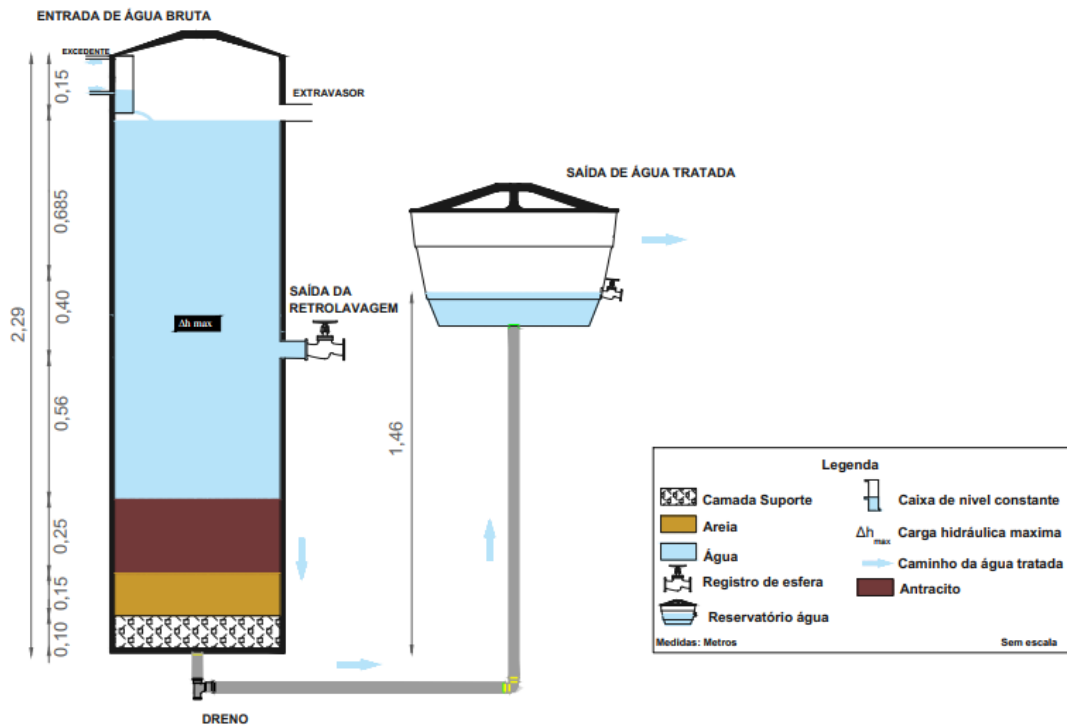
Os filtros em operação antes da retrolavagem podem ser analisados nas Figura 12 e Figura 13, produzindo em torno de 31 litros de água tratada no dia.

Figura 12 – Desenho esquemático durante a filtração do FLR camada simples.



Fonte: Autora.

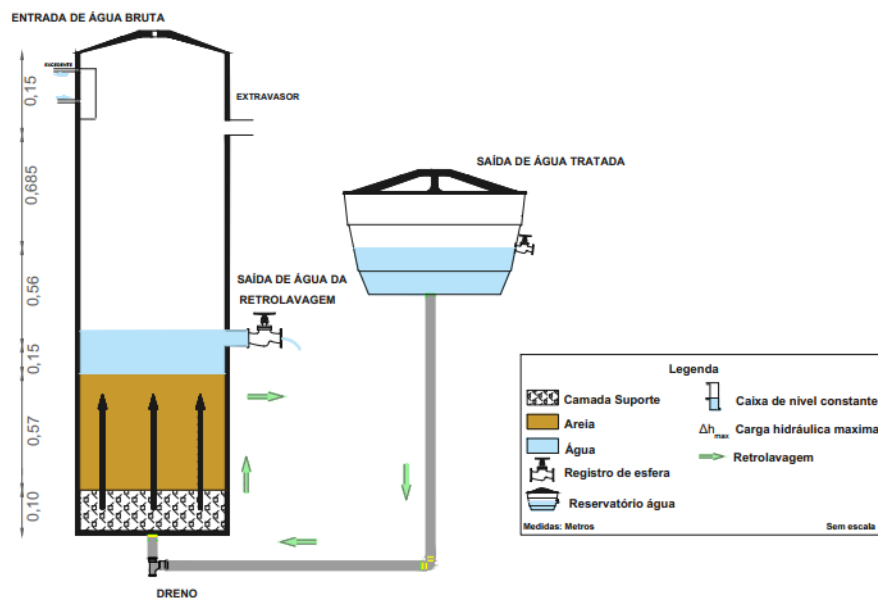
Figura 13 – Desenho esquemático durante a filtração do FLR dupla camada.



Fonte: Autora.

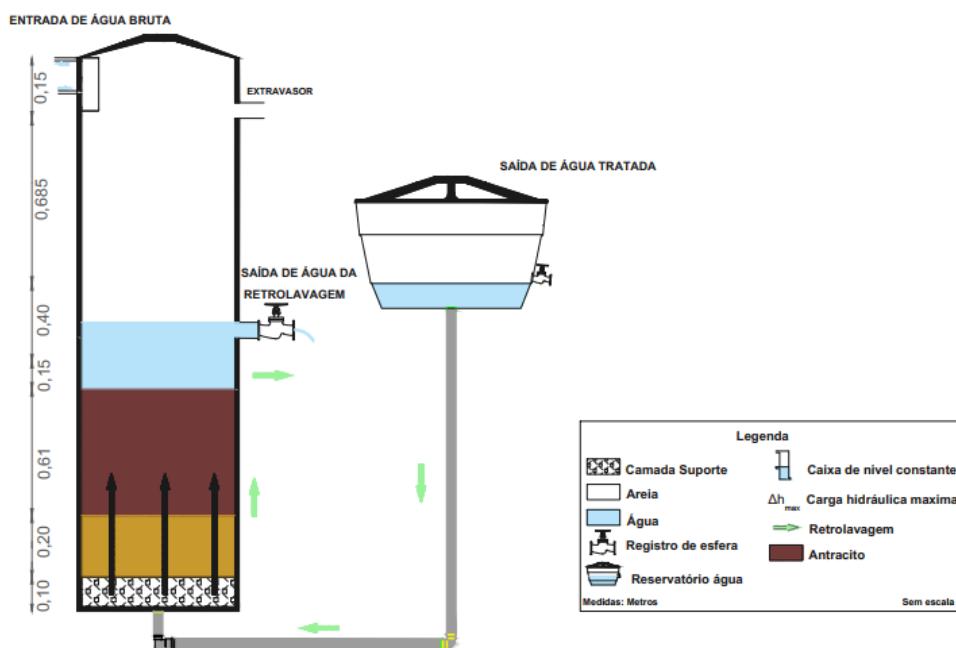
Devido aos materiais filtrantes possuírem características físicas distintas, obteve-se valores e comportamentos diferentes durante a retrolavagem, conforme pode ser analisado no desenho esquemático na Figura 14 e Figura 15 no qual se dá início a retrolavagem.

Figura 14 – Desenho esquemático durante a retrolavagem do FLR camada simples



Fonte: Autora.

Figura 15 – Desenho esquemático durante a retrolavagem do FLR dupla camada.



Fonte: Autora.

De forma geral, os resultados mostraram que a perda de carga entre os meios filtrantes limpos foi de 0,05 m para o FLR-camada simples, e de 0,08 m para o FLR-dupla camada, sendo este superior devido à característica peculiar angular do carvão antracito. A velocidade mínima de fluidificação do FLR-camada simples foi de $3,4 \times 10^{-3}$ m/s, e o FLR-dupla camada foi de $2,5 \times 10^{-3}$ m/s, levando a uma excessiva expansão do antracito, quando comparada as recomendações da literatura, devida a sua menor massa específica quando comparada ao da areia. Assim, o meio filtrante do FLR-camada simples expandiu 42% e o do FLR-dupla camada 32% para areia e 143% para o antracito.

O volume de água para retrolavagem do FLR-camada simples foi de 9,7 litros; superior ao FLR-dupla camada, que foi de 7,1 litros. Isto demonstra que o FLR-dupla camada é mais econômico durante a retrolavagem, economizando água filtrada neste procedimento.

Enfim, a altura do reservatório de água para retrolavagem em relação à calha do FLR-dupla camada foi de 0,40 m, inferior ao FLR-camada simples, que foi de 0,56 m, o que faz com que o FLR-dupla camada produza água filtrada mais rapidamente após a limpeza do meio filtrante, devida à menor altura do reservatório em relação a calha de coleta de água de lavagem, quando comparado ao FLR-camada simples. O FLR-dupla camada se apresenta mais alto do que o FLR-camada simples, entre outros fatores, principalmente devida à altura da calha do primeiro (0,96 m), que é superior ao do segundo (0,72 m).

6. CONCLUSÃO

Esse trabalho realizou o dimensionamento do FLR-camada simples (areia) e FLR-dupla camada (areia + antracito). Sendo contatada, a maior perda de carga no meio filtrante limpo do FLR-dupla camada é devido à característica peculiar angular do carvão antracito. A excessiva expansão do antracito, quando comparada às recomendações da literatura, foi devida à sua menor massa específica quando comparada ao da areia. Só é possível ser alterada a expansão caso haja alteração das características granulométricas do meio filtrante (antracito), o que não é possível para essa configuração de FLR.

É possível que a utilização de camadas mais espessas de antracito possa diminuir a expansão do mesmo. Isto, entretanto, traria impacto no volume de água para lavagem, na altura do reservatório de água para lavagem e na altura final do filtro, que já é consideravelmente alto, podendo inviabilizar a utilização do mesmo, quando comparado ao de camada simples.

É importante lembrar que a expansão máxima recomendada na literatura é baseada em filtros rápidos, que utilizam produtos químicos para o processo de coagulação. Assim, é interessante que se realizem testes em sistemas pilotos de FLR, para saber se a expansão de 143% é eficiente na limpeza de meios filtrantes de FLR.

O tempo de lavagem de 4 minutos também deve ser avaliado em sistemas pilotos, o recomendado na literatura se baseia em FLR de camada simples (areia), que tem forma geométrica diferente do antracito.

O ponto positivo da FLR-dupla camada utilizar menos água para a retrolavagem, é que ele tende a produzir mais água tratada, além de produzir água mais rápido, após a limpeza do meio filtrante, devido à menor altura do reservatório em relação a calha de coleta de água de lavagem.

Tendo em vista os resultados encontrados no presente estudo, recomendam-se pesquisas mais aprofundadas com a construção de sistemas piloto, para avaliar o desempenho e o comportamento de ambos os FLR's, camada simples e dupla camada em operação.

7. REFÊRENCIAS

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

BRASIL. **Decreto no 7.217, de 21 de junho de 2010. Regulamenta a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007.**Diário Oficial da União. Brasília-DF, 2010.

BRASIL; MDR; SNS BRASIL; MDR; SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 24ª Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos.** [s: s.n.]. [s: s.n.].

BRINCK, N. C. P. **Avaliação do tipo de material filtrante no comportamento hidráulico de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento.** 2009. 393 f. Tese (Doutorado)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARNEIRO, C. G. et al. **Desenvolvimento de um sistema alternativo para o tratamento de água oriunda de nascente em propriedades rurais.** In: 27o Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente - Encontro Técnico AESABESP, São Paulo. **Anais...** São Paulo: AESABESP, 2016.

CLEASBY JL, DI BERNARDO L, FAN KS. **Predicting fluidization and expansion of filter media.** *Journal of the Environmental Engineering Division.* 1981;107(3):455–471: New York.

Di BERNARDO, L.; RIVERA, E. – **Influence of sand uniformity coefficient on slow sand filtration.** In: *Advances in slow sand and alternative biological filtration* pp. 179 – 178, John Wiley & Sons Ltd, England, 1996.

Di BERNARDO, L. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (Brasil). **Tratamento de águas de abastecimento por filtração direta.** Rio de Janeiro, ABES,2003. 498 p.

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. **Caderno Técnico: Projeto e operação de filtros lentos retrolaváveis para o tratamento de água para abastecimento** Florianópolis-SC, 2019.

GIBSON, S. et al. Vertical gradational variability of fines deposited in a gravel framework. **Sedimentology**. v. 56, n. 3, p. 661-676, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.00991.x>.

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

HUISMAN, L.; WOOD, W. E. **Slow sand filtration**. Geneva: WHO, 1974.

KHABBAZI, A. E.; HINEBAUGH, J.; BAZYLAK, A. **Determining the impact of rectangular grain aspect ratio on tortuosity–porosity correlations of two-dimensional stochastically generated porous media**. **Science Bulletin**. v. 61, n. 8, p. 601-611, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11434-016-1020-3>.

LIU, X.; CIVAN, F.; EVANS, R. D. Correlation of the Non-Darcy Flow Coefficient. **Journal of Canadian Petroleum Technology**. v. 34, n. 10, p. 4, 1995. 10.2118/95-10-05 %J Journal of Canadian Petroleum Technology.

LIMA, R. M. F.; LUZ, J. A. M. d. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes **Revista Escola de Minas**. v. 54, n. p. 155-159, 2001.

LOGSDON G. S. et al. - **Slow sand filtration for small water systems** **Journal of Environmental Engineering and Science**, Volume 1, Number 5, September 2002, pp. 339-348(10). NRC Ressarce Press, canada, 2002.

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 (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MARTINS NETO, Henrique. **Quais são os mecanismos de filtração dentro do filtro de areia:** confira os mecanismos de filtração. Confira os mecanismos de filtração. Disponível em: <https://www.digitalwater.com.br/filtro-de-areia/>. Acesso em: 17 jun. 2023.

MICHELAN, D. C. G. dos S. **Filtração Em Margem De Rio Precedendo A Filtração Lenta, Para Remoção De Carbofurano, Em Tratamento De Água Para Consumo Humano.** 2010. 342 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010

PINTO, C. d. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas.** Ed. 2011.

PIZZOLATTI, B. S. (2014). **Influência da técnica de limpeza de filtros lentos e diâmetro dos grãos sobre a qualidade da água produzida, com destaque para remoção de carbonatos e oocistos de Cryptosporidium (simulados por microesferas).** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, SC, 225p

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.

POERSCH, F. C. D. A. **Sistema de Filtros Lentos Descendentes com Retrolavagem sem Reservatório Elevado.** 2012. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

RICHTER, C. A; AZEVEDO NETTO, J.M. **Tratamento de Água – Tecnologia Atualizada;** 5ª reimpressão, Edgard Blucher, São Paulo, 2003

RICHTER, Carlos A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento**: Editora Blucher, 2009. E book. ISBN 9788521217244. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521217244/>. Acesso em: 13 mai. 2023.

SECKLER, Sidney. **Tratamento de Água - Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento**: Grupo GEN, 2017. *E-book*. ISBN 9788595153851. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595153851/>. Acesso em: 13 mai. 2023.

SOARES, M. B. D. **The Influence of High Infiltration Rates, Suspended Sediment Concentration and Sediment Grain Size on River and Lake Bed Clogging**. 2015. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia) -Technis che Universität Berlin, Berlin, 2015.

SOARES, M. et al. Backwashed Slow Sand Filtration for Water Supply during Droughts Periods in Animal Production. **21st Century Watershed Technology Improving Water Quality**. v. 37, n. p. 2010. <https://doi.org/10.13031/2013.29438>.

SOUZA, F. H. **Influência do Diâmetro Efetivo do Meio Filtrante em Filtros Lentos Retrolaváveis**. 2013a. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SOUZA, Fernando Hymnô de; TOSCANO, Bruna; CARNEIRO, Carolina Gemelli; SENS, Maurício Luiz. **Diagnóstico e discussão sobre uso da Filtração Lenta para abastecimento público em Santa Catarina, Brasil**. *Revista Dae*, [S.L.], v. 66, n. 209, p. 37-50, 2018. *Revista DAE*. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2017.013>.

SOUZA, F. H. **Influência do Diâmetro Efetivo do Meio Filtrante em Filtros Lentos Retrolaváveis**. 2013b. Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

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.

STEVENSON, D. G. Flow and filtration through granular media - the effect of grain and particle size dispersion. **Water Research**. v. 31, n. 2, p. 12, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00271-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00271-0).

STÜPP, A. J. **Avaliação do Funcionamento de um filtro Lento com retrolavagem Automática para o tratamento de Água de abastecimento em pequenas comunidades**. 2016. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

SUMMERS, R S; SHIMABUKU, K; ZEARLEY, T. A review of biologically-based drinking water treatment processes for organic micropollutant removal. **Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes—Further Developments and Applications**, Collins M. and Graham N.(eds), IWA, London, p. 17–24, 2014.

TOBIASON JE, et al. **Granular Media Filtration**. In: EDZWALD JK, ed. **Water quality and treatment: a handbook on drinking water**. 6th ed. Denver: AWWA; 2011: cap. 10.

THAUVIN, F.; MOHANTY, K. K. Network Modeling of Non-Darcy Flow Through Porous Media. **Transport in Porous Media**. v. 31, n. 1, p. 18, 1998. 10.1023/A:1006558926606.

TRUSSELL, R. R.et al. Estimating the porosity of a full-scale anthracite filter bed. **Journal American Water Works Association**. v. 91, n. 12, p. 9, 1999. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1999.tb08750.x>.

VAN LOPIK, J. H.et al. The Effect of Grain Size Distribution on Nonlinear Flow Behavior in Sandy Porous Media. **Transport in Porous Media**. v. 120, n. 1, p. 29, 2017. 10.1007/s11242-017-0903-3.

VERAS, L. R. V.; DI BERNARDO, L. Tratamento de água de abastecimento por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas - FiME **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 13, n. 1, p. 17, 2008.

WIECHETECK, G. K. **Influência do método de lavagem por características de carvões antracitos o e betuminoso utilizados em meio filtrante**. 1996. 175 f. Dissertação (Mestrado)-USP, São Carlos - SP, 1996.

WICHTMANN, T.; TRIANTAFYLLIDIS, T.; SPÄTH, L. On the influence of grain shape on the cumulative deformations in sand under drained high-cyclic loading. **Soils and Foundations**. v. 59, n. 1, p. 9, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.11.001>