

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Larissa Lis do Amparo Koerig

**Avaliação da retrolavagem em um sistema de filtração lenta utilizando areia e carvão
antracitoso como material filtrante**

Florianópolis

2022

Larissa Lis do Amparo Koerig

**Avaliação da retrolavagem em um sistema de filtração lenta utilizando areia e carvão
antracitoso como material filtrante**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Samuel Lunardi

Florianópolis

2022

Koerig, Larissa Lis do Amparo

Avaliação da retrolavagem em um sistema de filtração lenta utilizando areia e carvão antracitoso como material filtrante / Larissa Lis do Amparo Koerig ; orientador, Samuel Lunardi, 2022.

66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, , Graduação em ,
Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. . 2. Filtração lenta. 3. Retrolavagem. 4. Carvão antracitoso. 5. Areia. I. Lunardi, Samuel . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em . III. Título.

Larissa Lis do Amparo Koerig

**Avaliação da retrolavagem em um sistema de filtração lenta utilizando areia e carvão
antracitoso como material filtrante**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 09 de setembro de 2022.

Prof.^a Maria Elisa Magri, Dr.^a
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Samuel Lunardi, Me.
Orientador(a)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Marcelle Martins, Ma.
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

*Este trabalho é dedicado aos meus pais,
Antônio e Roberta, por toda compreensão,
dedicação e carinho oferecidos sempre.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de começar agradecendo aos meus pais, por terem me dado todo o suporte necessário ao longo do curso, por estarem ao meu lado nos momentos que mais precisei, pelo carinho e por entender minha ausência quando precisava estudar. Pai, você é meu exemplo, minha inspiração diária, obrigada por sempre cuidar tão bem de mim. Te amo eternamente! Mãe, obrigada por cada incentivo e cada conselho nos momentos bons e nos difíceis, obrigada pela companhia de sempre, amo você!

Agradeço aos meus irmãos, Laurindo e Douglas, por me incentivarem a seguir o meu objetivo. E a minha avó, Tereza, por ser meu ponto de paz, eu sempre terei orgulho de ser sua neta.

Agradeço a UFSC por todo crescimento e desenvolvimento que me proporcionou. Tenho orgulho de ter frequentado por mais de 5 anos e terei sempre boas lembranças quando voltar.

Agradeço em especial a minha amiga, Larissa Walzburiech, por ser a melhor pessoa que a UFSC me deu. Ainda me surpreendo com a nossa conexão e como você pode ser tão boa de coração. Só a gente sabe o quanto a graduação foi difícil e passar por ela com você foi muito mais leve. Obrigada por todos os trabalhos, por todas as caminhadas pro ônibus, por estudar na copa, eu não teria chegado até aqui sem você. Te amo amiga!

Agradeço aos meus amigos, Edenilson Assunção e Eduardo Scotti, por ouvirem minhas reclamações, por estudarem junto, por todas as piadas, encontros virtuais durante a pandemia, por tudo, obrigada amigos! Amo vocês.

Agradeço as amigas que fiz na graduação ao longo desses anos, e que vou levar pra vida, em especial Ana Clara e Monica Vitart. E as amigas que mesmo de longe sempre mandaram energias positivas, obrigada Maila, Joanna, Franciele e Shaiane.

Ao meu orientador, Samuel Lunardi, agradeço pela disponibilidade, disposição e por toda a ajuda durante a realização deste trabalho.

Aos demais componentes da banca, professor Bruno Pizzolatti e Marcelle Martins, obrigado pela disponibilidade e pelo conhecimento em analisar a presente pesquisa.

E a minha cachorra Pig, quem eu sempre recorria quando precisava descansar os pensamentos.

No mais, muito obrigada a todos que fizeram parte dessa boa parte da minha vida.

RESUMO

Filtros lentos são considerados por diversos autores uma excelente alternativa para o fornecimento de água potável em comunidades rurais e/ou isoladas. Alguns trabalhos utilizam a retrolavagem como forma de limpeza do filtro, esta operação é vantajosa e prática. Apenas com a abertura de uma válvula é possível inverter o fluxo da água, fornecendo uma vazão capaz de assegurar a expansão adequada do meio filtrante, possibilitando uma limpeza eficiente. No entanto, até o momento não se tem registros na literatura acerca de estudos sobre o comportamento da expansão de areia e antracito utilizados em conjunto como meio filtrante durante a retrolavagem. A elaboração deste estudo teve como propósito investigar o comportamento hidráulico de meios filtrantes constituídos de camada dupla com areia e carvão antracitoso, camada simples de areia e camada simples de antracito. O comportamento de ambos os meios filtrantes foi avaliado durante o seu processo de fluidificação e expansão, quando submetidos a diferentes velocidades de aproximação da água (0,08 a 0,80 m/min). Os experimentos realizados demonstraram que a camada simples de areia se mostrou mais vantajosa em termos de velocidade de aproximação da água para uma expansão de 40%, considerada eficiente para a limpeza. A camada simples de carvão antracito apresentou maior demanda de energia para fluidificação, em virtude dos seus grãos serem mais pesados. Para a camada dupla, durante o processo de fluidificação e expansão os meios filtrantes comportaram-se de modo distinto devido as diferentes propriedades físicas dos materiais filtrantes utilizados, tais como a massa específica e diâmetro efetivo. No que diz respeito a perda de carga no meio filtrante, na camada suporte e total no filtro, o carvão antracitoso foi o que apresentou melhor resultado. Em função dos resultados obtidos, este trabalho pode-se considerar uma avaliação inicial dos materiais filtrantes e suas configurações de camada dupla e simples de antracito, podendo resultar no aumento da utilização destas configurações para filtros lentos retrolaváveis.

Palavras-chave: Areia. Carvão antracitoso. Dupla camada. Filtração lenta. Retrolavagem.

ABSTRACT

Slow filters are considered by several authors an excellent alternative for the supply of drinking water in rural and/or isolated communities. Some works use backwashing as a way of cleaning the filter, this operation is advantageous and practical. Only by opening a valve it is possible to reverse the flow of water, providing a flow capable of ensuring adequate expansion of the filter medium, enabling efficient cleaning. However, so far there are no records in the literature about studies on the behavior of the expansion of sand and anthracite used together as a filter medium during backwashing. The purpose of this study was to investigate the hydraulic behavior of filter media consisting of a double layer with sand and anthracite coal, a simple layer of sand and a simple layer of anthracite. The behavior of both filter media was evaluated during their fluidization and expansion process, when subjected to different speeds of water approach (0.08 to 0.80 m/min). The experiments carried out showed that the simple layer of sand proved to be more advantageous in terms of speed of approach of the water for an expansion of 40%, considered efficient for cleaning. The simple layer of anthracite coal presented higher energy demand for fluidization, due to its heavier grains. For the double layer, during the fluidization and expansion process, the filter media behaved differently due to the different physical properties of the filter materials used, such as the specific mass and effective diameter. Regarding the pressure drop in the filter medium, in the support layer and in the total filter, the anthracite carbon presented the best result. Based on the results obtained, this work can be considered an initial evaluation of filter materials and their configurations of double and single layers of anthracite, which may result in an increase in the use of these configurations for slow backwash filters.

Keywords: Sand. Anthracite coal. Double layer. Slow filtration. Backwash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Filtração lenta convencional	18
Figura 2 - Filtro lento descendente	20
Figura 3 - Filtro lento retrolavável	22
Figura 4 - Curva granulométrica típica de um material filtrante	23
Figura 5 - Tamanho dos grãos	24
Figura 6 - Comportamento da perda de carga em função da velocidade ascensional	26
Figura 7 - Fluxograma de etapas de realização do experimento.	27
Figura 8 - Agitador para ensaio granulométrico.....	28
Figura 9 - Curva granulométrica da areia	31
Figura 10 - Curva granulométrica do antracito	32
Figura 11 - Configurações de meio filtrante.....	33
Figura 12 - Disposição dos piezômetros no piloto	34
Figura 13 - Configuração do sistema.....	35
Figura 14 - Controle da expansão do meio filtrante	36
Figura 15 - Foto do sistema piloto de filtração lenta com retrolavagem.....	38
Figura 16 - Configuração do sistema para controle da vazão	39
Figura 17 - Variação da expansão da areia para diferentes velocidades de aproximação da água	41
Figura 18 - Variação da perda de carga na areia para diferentes velocidades de aproximação da água.....	42
Figura 19 - Variação da expansão da camada dupla areia e antracito para diferentes velocidades de aproximação da água	44
Figura 20 - Variação da perda de carga da camada dupla areia e antracito para diferentes velocidades de aproximação da água.....	44
Figura 21 - Meio filtrante expandido.....	45
Figura 22 - Mistura do meio filtrante	46
Figura 23 - Tamanho dos grãos	46
Figura 24 - Peso do grão de antracito e de areia.....	47
Figura 25 - Variação da expansão do antracito para diferentes velocidades de aproximação da água.....	48

Figura 26 - Variação da perda de carga do antracito para diferentes velocidades de aproximação da água.....	49
Figura 27 - Comparação entre a expansão dos meios filtrantes para diferentes velocidades de aproximação.....	50
Figura 28 - Referência -Expansão x Velocidade ascensional de água de lavagem.....	51
Figura 29 - Comparação entre a perda de carga nos meios filtrantes para diferentes velocidades de aproximação.....	52
Figura 30 - Comparação entre a perda de carga total nos filtros para diferentes velocidades de aproximação.....	53
Figura 31 - Perda de carga na camada suporte para diferentes velocidades de aproximação ..	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de filtros lentos descendente	19
Tabela 2 - Características dos meios filtrantes	25
Tabela 3 - Peneiras utilizadas para ensaio de granulometria.....	28
Tabela 4 - Características geral do filtro	30
Tabela 5 - Resumo do ensaio granulométrico dos materiais filtrantes.....	32
Tabela 6 – Vazões estabelecidas	36
Tabela 7 - Ensaio de expansão da areia	40
Tabela 8 - Ensaio de expansão camada dupla: Areia e Antracito	43
Tabela 9 - Ensaio de expansão do antracito	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CU Coeficiente de Uniformidade

FL Filtro Lento/Filtração Lenta

FLR Filtro Lento Retrolavável

LAPOA Laboratório de Potabilização das Águas

RL Retrolavagem

ETA Estações de Tratamento de Água

LISTA DE SIMBOLOS

d_{10} Diâmetro Efetivo

$E\%$ Expansão do Meio Filtrante

v_a Velocidade de Aproximação

φ Diâmetro de Tubulação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....	17
2.1	FILTRAÇÃO LENTA.....	17
2.1.1	Princípio do processo de filtração lenta.....	18
2.2	FILTRAÇÃO LENTA COM RETROLAVAGEM	20
2.3	MATERIAIS FILTRANTES	22
2.3.1	Tamanho e distribuição dos grãos	22
2.3.2	Formato dos grãos	24
2.3.3	Porosidade	24
2.3.3.1	<i>Velocidade mínima de fluidificação e expansão de meios granulares.....</i>	<i>25</i>
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	ENSAIO PRELIMINAR	28
3.1.1	Ensaio de granulometria	28
3.2	MATERIAL FILTRANTE.....	29
3.3	SISTEMA PILOTO	33
3.3.1	Operação do sistema.....	37
3.3.2	Velocidade de Aproximação	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1	ENSAIOS DE EXPANSÃO.....	40
4.1.1	Meio filtrante de areia	40
4.1.2	Meio filtrante de areia e antracito.....	43
4.1.3	Meio filtrante de antracito	47
4.1.4	Comparação entre os meios filtrantes.....	49

4.1.4.1	<i>Expansão</i>	49
4.1.4.2	<i>Perda de carga</i>	52
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	55
6	REFERÊNCIAS	56
7	ANEXO 1	61
7.1	Planilha de cálculo do ensaio granulométrico da Areia I	61
7.2	Planilha de calculo do ensaio granulométrico do antracito	61

1 INTRODUÇÃO

A dificuldade ao acesso à água potável ainda é um grande problema a nível mundial. De acordo com levantamento publicado em 2017, cerca de 844 milhões de pessoas não têm acesso a água potável no mundo, e 2 bilhões de pessoas tem a sua fonte principal de água contaminada com materiais fecais (OMS; UNICEF, 2017). No Brasil o problema não é diferente, cerca de 35 milhões de pessoas não tem acesso a rede de abastecimento de água, e utiliza fontes alternativas para o abastecimento de água como: poços, nascentes, cisternas, carro pipa, entre outros (BRASIL, 2019). O problema é mais grave na área rural, onde 24 milhões de pessoas não possuem atendimento adequado a rede de abastecimento (PRNS, 2019).

Diversas tecnologias podem ser utilizadas para o tratamento de água, dependendo da qualidade da água bruta a ser tratada e da qualidade desejada, estas podem ser desde mais simples até mais complexas e modernas (SOUZA, 2020). Uma destas tecnologias é a filtração lenta, que é tida como uma técnica simples, econômica e viável para comunidades remotas (NAKAMOTO et al., 2014). A filtração lenta consiste na percolação da água em um meio filtrante com baixas taxas de filtração. Estas possibilitam a remoção dos poluentes contidos na água através das ações de microrganismos que se inserem no meio filtrante, além da remoção das partículas contidas na água que ficam retidas entre os grãos de areia (NETO, 2019). Filtros lentos podem variar em suas características operacionais e de meio filtrante.

A raspagem da areia na superfície do filtro é o método de limpeza mais utilizado, todavia, estudos propõem a retrolavagem como uma técnica eficaz para a limpeza dos filtros, e com resultados satisfatórios em termos de qualidade de água e operação quando utilizados em pequena escala (EMMENDOERFER, 2006; MICHELAN, 2010; PIZZOLATTI, 2010, 2014).

Em síntese, a retrolavagem é feita através da inserção de água em contrafluxo no leito filtrante sujo, proporcionando a expansão e fluidificação do meio filtrante e promovendo a limpeza do leito (SOUZA, 2015). Estudos de Emmendorfer (2006) e Marnoto (2008) foram realizados com o objetivo de avaliar a expansão do meio filtrante durante a retrolavagem, aspectos hidráulicos e qualidade da água, obtendo resultados satisfatórios.

No entanto, até o momento não se tem registros na literatura acerca de estudos sobre o comportamento da expansão de areia e antracito utilizados em conjunto como meio filtrante. A elaboração deste estudo trará uma melhor compreensão das particularidades comportamentais do carvão antracitoso e areia durante a retrolavagem. O entendimento de tais

fatores proporcionará um processo de limpeza mais eficiente para filtros lentos com potencial redução da energia necessária para expansão do leito filtrante.

Logo, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo avaliar a expansão da areia e do carvão antracitoso durante a retrolavagem de um sistema de filtração lenta, com diferentes configurações de meio filtrante (areia e antracito; apenas areia e apenas antracito) e avaliar a relação entre o percentual de expansão e a velocidade de aproximação aplicada para cada configuração.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste TCC.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a expansão da areia e do carvão antracitoso durante a retrolavagem de um sistema de filtração lenta.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Executar a retrolavagem de um sistema de filtração lenta em escala piloto;
- Ponderar sobre aspectos hidráulicos da retrolavagem de diferentes configurações de meio filtrante (areia e antracito; apenas areia e apenas antracito);
- Avaliar a relação entre o percentual de expansão do meio filtrante e a velocidade de aproximação aplicada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1 FILTRAÇÃO LENTA

Os primeiros registros escritos da utilização de métodos para o tratamento de água ocorreram por volta de 4000 a.C., em que a finalidade era a remoção de cor, sabor e odor da água. Por volta de 1700 a.C., a filtração se firma como meio eficiente para a remoção das partículas suspensas na água, ainda que na época o grau de turbidez da água não era medido. O uso em grande escala, em específico da filtração lenta, teve início na Europa em 1800 (USEPA, 2000).

O processo de potabilização utilizado nesta tecnologia é simples e, quando bem operado, apresenta boa eficiência. Simula basicamente os processos naturais de purificação das águas, no qual a percolação pelo subsolo remove microrganismos, partículas, substâncias químicas, componentes biológicos, entre outros contaminantes (DI BERNARDO, BRANDÃO, HELLER, 1999). Outro motivo que justifica a adoção deste método de tratamento, é que a filtração lenta é uma técnica que utiliza pouco ou nenhum produto químico, reduzindo assim o risco de formação de subprodutos (PIZZOLATTI, 2010).

No Brasil, essa técnica é utilizada principalmente para a potabilização de água onde é inviável a instalação de Estações de Tratamento de Água (ETA) convencionais com coagulação, floculação e decantação, devido à falta de mão de obra especializada ou ausência de recursos econômicos (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999). No estado de Santa Catarina, estima-se que 6% dos municípios utilizam a filtração lenta como alternativa de tratamento de água, sendo que em 3% dos municípios do estado esta é a única tecnologia utilizada, fornecendo água para toda a cidade de modo integral (DE SOUZA et al., 2018).

Por fim, destaca-se que os filtros lentos se apresentam como uma excelente alternativa de tratamento de água, principalmente em escala domiciliar em meio rural. Entretanto, Souza et al. (2018) menciona que, a aplicação da filtração lenta nem sempre é feita de maneira adequada, relatando o desperdício de meio filtrante durante a limpeza dos filtros, colmatação em dias de chuva e falta de controle na qualidade do processo. O mesmo autor reforça que o conhecimento da técnica, apesar de simples, não é visível, sendo necessária a constante transmissão de informação sobre a tecnologia.

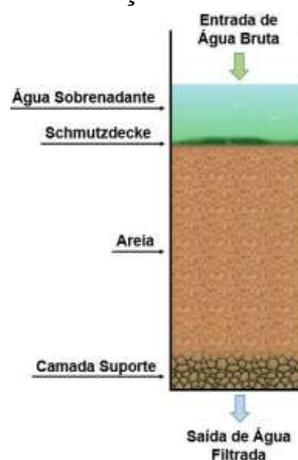
2.1.1 Princípio do processo de filtração lenta

A filtração lenta (FL) consiste na passagem da água em baixas taxas de filtração por um meio filtrante poroso, geralmente areia, que por meio de mecanismos físicos permitem a remoção de material suspenso na água e por meio da atividade biológica, a remoção de patógenos (HUISMAN; WOOD, 1974; DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999). As taxas de filtração recomendadas são entre 3 e 12 m³/m².d. (HUISMAN; WOOD, 1974).

Segundo Pizzolatti (2010), no início do processo de filtração, bactérias (predadoras ou benéficas) podem ser transportadas pela água e crescer de forma seletiva sobre a camada filtrante, criando assim uma camada biológica, mais conhecida como *schmutzdecke*. Estas bactérias oxidam a matéria orgânica presente na água, obtendo assim, energia necessária para seu metabolismo e para seu crescimento, representando a ação mais importante da filtração lenta. (HUISMAN; WOOD, 1974; CAMPOS et al., 2002; MELO, 2006).

Quando ocorre o processo de limpeza do meio filtrante, as bactérias são removidas da camada superior do filtro, logo, é preciso de um período de maturação do meio filtrante até que a camada biológica se desenvolva novamente (VARGAS, 2004). Na Figura 1 podemos observar um filtro lento descendente. Em sistemas desse tipo a entrada de água bruta se dá na parte superior do filtro, passando pela camada filtrante, constituída normalmente de areia, e posteriormente pela camada suporte, composta de pedregulho. A água filtrada sai no fundo do filtro. Podemos observar ainda a formação do *schmutzdecke* na superfície do material filtrante.

Figura 1 - Filtração lenta convencional



Fonte: NETO (2019).

De acordo com Costa (1980) e Sá (2006), são três mecanismos responsáveis pela remoção das partículas no tratamento de água por filtração lenta: mecanismos de transporte (conduzindo a partícula em direção ao grão de areia), aderência (operação para manter as partículas em contato com a superfície dos grãos de areia), desprendimento (arraste das partículas para as camadas mais profundas dos meios filtrantes) e purificação (conduzido principalmente pelos processos biológicos). Os mecanismos com que as partículas em suspensão são removidas por meio da filtração são complexos e dependem das características do material filtrante, características da água bruta, e da operação do sistema (AMIRTHARAJAH, 1988).

Segundo Van Dijk et al. (1978), o meio filtrante caracteriza-se pelo seu diâmetro efetivo (d_{10}) e pelo coeficiente de uniformidade (CU). O diâmetro efetivo é o que dita o tamanho predominante dos grãos. Peneirando o meio filtrante, 10% passa por uma peneira de abertura igual ao diâmetro efetivo. O coeficiente de uniformidade influencia na profundidade que as impurezas penetram (STUPP, 2016).

Para a camada filtrante de filtros lentos, a norma brasileira NBR 12216:1992 determina o tamanho efetivo dos grãos de 0,25 a 0,35 mm e um coeficiente de uniformidade menor que 3 (ABNT, 1992). Di Bernardo et al (1999) indica que o material mais adequado para a filtração lenta tem as seguintes características: tamanho dos grãos de 0,08 a 1,0 mm, diâmetro efetivo de 0,15 a 0,30 mm, e coeficiente de uniformidade de 2 a 5. A Tabela 1 apresenta os parâmetros e valores usuais utilizados para a camada filtrante de um filtro lento descendente.

Tabela 1 - Características de filtros lentos descendente

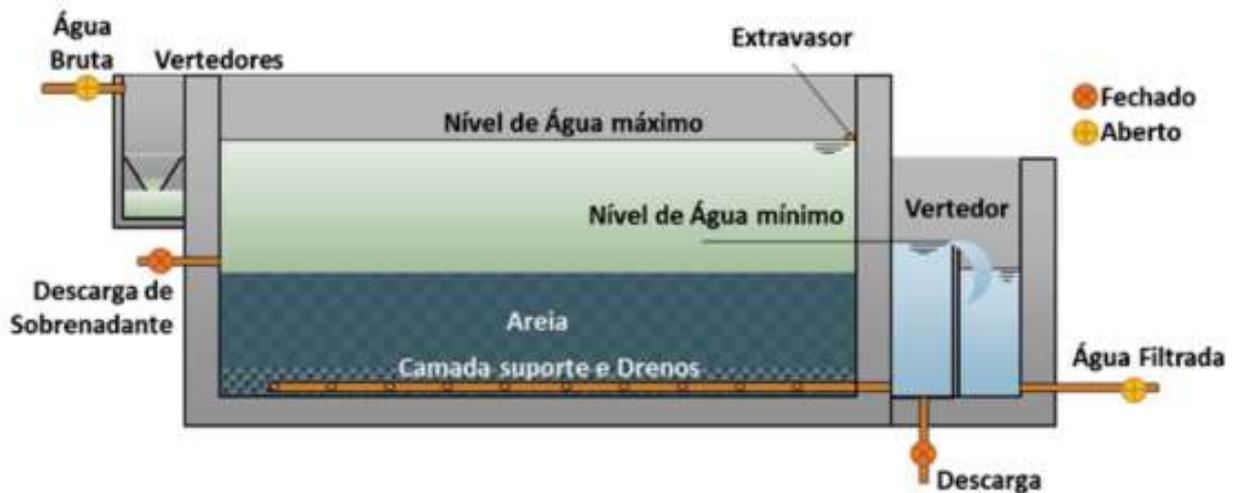
Referencias/Parâmetro	1	2	3	4	5
Profundidade do meio filtrante (m)	0,90 – 1,20	0,7 – 1,4	0,9 – 1,5	0,9 – 1,0	0,9
Camada suporte (m)	0,40 – 0,45	0,3	-	-	0,2
Altura da água na superfície (m)	1,0 – 1,5	1,0 – 1,5	0,9 – 1,8	-	-
Taxa de filtração ($m^3/m^2.d$)	2 – 14	2,5 – 8,6	1,9 – 6,0	3 – 6	< 6
Diâmetro efetivo – d_{10} (mm)	0,30 – 0,35	0,15 – 0,35	0,15 – 0,30	0,15 – 0,30	0,25 – 0,35

Coefficiente de Uniformidade – CU	1,5 – 3,0	< 3,0 < 2,0 preferencial	< 2,5	2 a 5	< 3
--	-----------	-----------------------------	-------	-------	-----

Elaboração: SOUZA, (2020). Referências: [1] Valencia (1981); [2] Huisman; Wood, (1974); [3] Crittenden et al. (2012); [4] Di Bernardo; Brandão; Heller (1999); [5] ABNT (1992).

Na Figura 2 abaixo, podemos observar um filtro lento descendente, o qual é composto basicamente de um tanque com controlador de vazão, camada filtrante (areia), camada suporte, sistema de drenagem, tubulação de descarga do sobrenadante, demais tubulações, válvulas e acessórios de saída (HUISMAN E WOOD, 1974).

Figura 2 - Filtro lento descendente



Fonte: FUNASA (2019)

Há também o sistema de filtração lenta ascendente, o qual segue os mesmos princípios da filtração lenta descendente. No entanto, tem sua alimentação efetuada a partir da base inferior do leito (junto com a camada suporte), fazendo com que a água “suba” através do leito (COSTA, 1980).

2.2 FILTRAÇÃO LENTA COM RETROLAVAGEM

O sistema de filtração lenta com retrolavagem vem sendo estudado com o passar dos anos. Em 1992 o pesquisador Dr. Mauricio Sens ministrou um curso sobre filtração de água na Universidade Federal de Santa Catarina, e desde então, estudos e aplicações da retrolavagem para limpeza de filtros lentos continuam sendo aprimorados no LAPOÁ - Laboratório de Potabilização das Águas, no departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental desta mesma

universidade (EMMENDOERFER, 2006). O primeiro trabalho publicado por Michielin (2003), objetivou estudar, através de um sistema feito em acrílico, as condições hidráulicas de fluidificação do material filtrante, como: velocidade de aproximação; percentagem de expansão e a observação do comportamento do meio filtrante e camada suporte durante a retrolavagem. Seguido de estudos semelhantes com Emmendoerfer (2006), e Marnoto (2008).

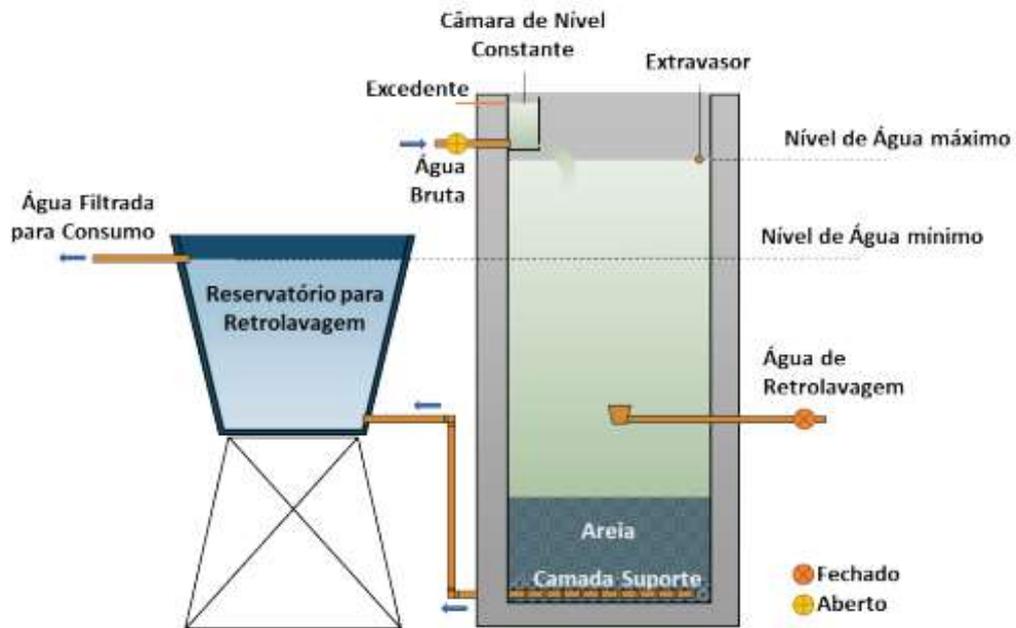
O que diferencia o filtro lento retrolavável (FLR) e o filtro lento convencional (FLC) é o modo de limpeza. Nos modelos convencionais, quando há a colmatação do filtro, a camada superficial de areia é raspada e retirada do filtro para lavagem ou substituição. Já nos filtros lentos retrolaváveis, a limpeza é feita pela inversão do fluxo da água filtrada, que retorna de um reservatório elevado. A carga hidráulica aplicada faz com que a areia se expanda, limpando assim o meio filtrante. A retrolavagem se torna promissora pela facilidade de limpeza em relação ao sistema convencional (PIZZOLATTI, 2010; ISHII, 2013; MICHELAN et al., 2011; DE SOUZA, 2013, 2015).

Para a limpeza por retrolavagem funcionar de forma correta, o meio filtrante deve estar parcialmente ou totalmente fluidificado, precisando assim de uma velocidade mínima de aproximação da água. A fluidificação ocorre devido as forças de arraste que agem sobre o grão, vencendo as forças de peso e empuxo do meio estático. Ao atingir certa velocidade, as pressões entre os grãos são anuladas, neste ponto a fluidificação é iminente e qualquer velocidade acima deste ponto irá fluidificar o meio, tornando a perda de carga constante (HENDRICKS, 2011).

Pizzolatti (2014) destaca algumas vantagens da filtração lenta com retrolavagem quando comparada com à filtração lenta convencional. Entre elas: o tempo de limpeza é reduzido, conseqüentemente, reduz o tempo fora de operação, resultando em maior produção efetiva. Ainda, não se tem a perda do material filtrante e tem um custo de mão de obra menor para o procedimento de limpeza.

Entretanto, um ponto negativo da filtração lenta com retrolavagem é o custo de implantação mais elevado devido à necessidade de reservatório de água para retrolavagem, sistema de calhas para coleta da água de retrolavagem, válvulas e demais acessórios necessários para o funcionamento hidráulico da limpeza (PIZZOLATTI, 2014). A Figura 3 ilustra estes componentes citados.

Figura 3 - Filtro lento retrolavável



Fonte: FUNASA (2019)

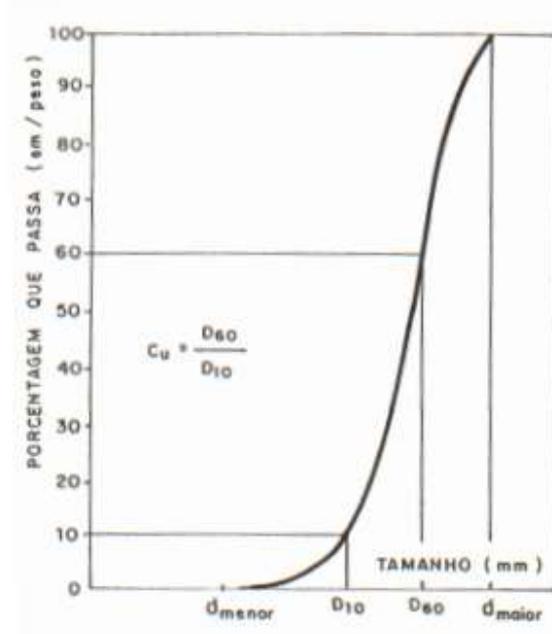
2.3 MATERIAIS FILTRANTES

Os materiais filtrantes mais utilizados são a areia, carvão antracito e granada, podendo ser utilizados em camada única, dupla ou tripla (CRITTENDEN et al., 2012). A escolha destes materiais filtrantes e o conhecimento das suas características granulométricas é um aspecto importante para uma boa eficiência do filtro. Estas características incluem: tamanho, formato, densidade e dureza (BRINCK, 2009).

2.3.1 Tamanho e distribuição dos grãos

O tamanho e a distribuição dos grãos são determinados a partir da curva de distribuição granulometria (Figura 4), gerada a partir dos resultados obtidos durante a análise de peneiramento do material (PINTO, 2011).

Figura 4 - Curva granulométrica típica de um material filtrante



Fonte: DI BERNARDO (1991)

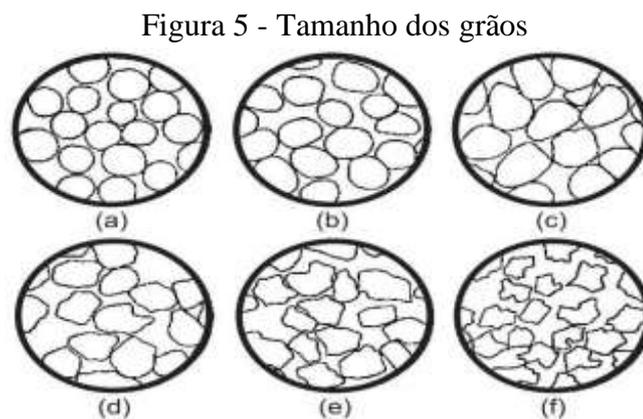
Segundo Di Bernardo (2003), baseado nos valores expressados pelo gráfico, obtém-se o tamanho do maior e do menor grão, o diâmetro efetivo (abertura da peneira onde passa somente 10% da amostra), o d_{60} (abertura de peneira em que passa 60% do material) e o coeficiente de uniformidade (CU) (Equação 1).

$$CU = \frac{d_{60}}{d_{10}} \text{ Equação 1}$$

Essas características do meio filtrante têm relação com os mecanismos de filtração, sendo os menores diâmetros efetivos (d_{10}) os mais eficientes para a remoção de turbidez na água, pois favorecem a retenção das partículas nos primeiros centímetros do meio filtrante (CRITTENDEN et al., 2012), entretanto isso influencia diretamente no desenvolvimento da perda de carga (DE SOUZA, 2013; PIZZOLATTI, 2014). Outra característica importante é o coeficiente de uniformidade (CU). Coeficientes de uniformidade baixos (< 5) indicam uma maior uniformidade do corpo granular, desta maneira facilitando uma maior profundidade de infiltração de impurezas no meio filtrante (WIECHETECK, 1996).

2.3.2 Formato dos grãos

Segundo Lunardi (2021), o formato geométrico da superfície dos grãos tem um papel importante na eficiência e desempenho de um meio filtrante. Os grãos que possibilitam melhor desempenho de filtração são os com formato geométrico muito irregular, e os grãos que oferecem melhor eficiência durante a limpeza são os grãos com formatos mais circulares e com superfícies lisas (DI BERNARDO, 2003; DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008). Os mesmos autores destacam que dificilmente grãos provenientes de fontes naturais possuam características de superfície com formato perfeito, e que podem variar entre formatos arredondados, agudos, angulares, esféricos, desgastados e triturados, conforme é possível observar na Figura 5.



Legenda: Esférico (a), Arredondado (b) Desgastado, (c) Agudo (d), Angular (e), Triturado (f).

Fonte: Di Bernardo (2003)

2.3.3 Porosidade

A origem da porosidade em meios filtrantes parte da justificativa de que, quando o material é despejado no interior da estrutura dos filtros, os grãos (de mais diversas formas e diâmetros) se encaixam de modo aleatório originando espaços vazios entre eles (STEVENSON, 1997). A definição da porosidade em um meio filtrante é tida como a relação do volume intersticial de espaços vazios que ocorrem entre os grãos e o volume total de material. Este parâmetro tem influência na perda de carga, condutividade hidráulica e afeta a capacidade de reter sólidos no interior do meio filtrante (DI BERNARDO, 2003; TRUSSELL et al., 1999).

Segundo Brinck (2009), a densidade é definida como a massa de material dividida pelo seu volume. Lunardi (2021) afirma que meios filtrantes de preenchimento livre, sem

compactação, tendem a possuir menor densidade e conseqüentemente uma maior formação de espaços vazios entre os grãos.

A Tabela 2 mostra os valores das principais características relacionada aos materiais filtrantes mais utilizados na filtração. As referências são da areia para filtração lenta com retrolavagem e o antracito e a granada para filtração rápida.

Tabela 2 - Características dos meios filtrantes

Referências	1	2	3
Propriedade	Areia	Antracito	Granada
Tamanho efetivo (D₁₀) (mm)	0,25 – 0,35	0,8 – 2,0	0,2 – 0,4
Coefficiente de uniformidade	> 1,6	1,3 – 1,7	1,3 – 1,7
Densidade (g/mL)	2,65	1,4 – 1,7	3,6 – 4,2
Porosidade (%)	40 – 50	47 – 52	45 – 58
Dureza (Moh)	-	2 - 3	6,5 – 7,5

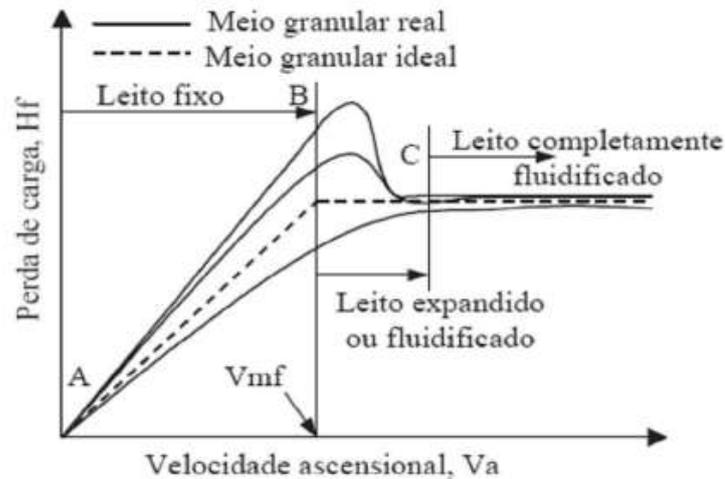
Fonte: 1) Souza e Sens (2020) 2 e 3) Adaptado de Crittenden et. Al (2012)

De acordo com AWWA (1991), o desenvolvimento de filtros de camada dupla utilizando areia e carvão antracitoso propôs a remoção prévia de materiais de maior diâmetro. O carvão antracitoso possui menor densidade, o qual propicia a estratificação inversa do meio, facilitando a percolação em profundidade apenas de partículas finas. Em consequência tem-se o aumento do tempo de carreira e eficiência do filtro (LUNARDI, 2021). Conforme apresentado na Tabela 2, o antracito é menos denso que a areia, favorecendo o uso desta camada dupla areia-antracito na retrolavagem sem que haja mistura de material filtrante.

2.3.3.1 Velocidade mínima de fluidificação e expansão de meios granulares

A variação da perda de carga em um meio filtrante, em função da velocidade de aproximação da água é ilustrada pela Figura 6 abaixo, onde a linha tracejada representa a situação ideal e as linhas contínuas a situação real.

Figura 6 - Comportamento da perda de carga em função da velocidade ascensional



Fonte: Dalsasso (2005)

Para Brincks (2009), o ponto A da figura indica a fase inicial da lavagem, a qual não há expansão do leito filtrante e a variação da perda de carga no meio filtrante é progressiva. No ponto B, a perda de carga se torna constante e a velocidade de aproximação da água atinge o limite conhecido como velocidade mínima de fluidificação (V_{mf}). A partir do ponto C, o meio filtrante encontra-se totalmente fluidificado, logo, independentemente do aumento da velocidade ascensional, a perda de carga permanece praticamente constante (DALSASSO, 2005).

Marnoto (2008, *apud* Mandonado, 2004) afirma que quando a velocidade de aproximação é baixa, o leito filtrante não se expande e a sua porosidade não sofre alteração. Entretanto, à medida que velocidade aumenta, as forças de atrito aumentam até superar o peso das partículas, ficando suspensas livremente no líquido.

A dureza dos grãos do material filtrante é importante pois durante o processo de lavagem, devido a fluidificação e expansão do meio filtrante, o material tenderá a se desintegrar em grãos menores caso não tenha resistência à abrasão. Isto acarretará na alteração da curva granulométrica e comprometerá o processo de filtração (BRINCK, 2009).

Emmendoerfer (2006) estudou um filtro lento retrolavável com areia no meio filtrante de diâmetro efetivo igual a 0,22 mm. A retrolavagem foi dimensionada para uma expansão média de 40%, e para esta expansão bastou uma velocidade ascensional da água de 0,34 m/min. Este aspecto é bastante positivo pois as baixas velocidades para a expansão da areia, indicam um menor consumo de água para a lavagem dos filtros.

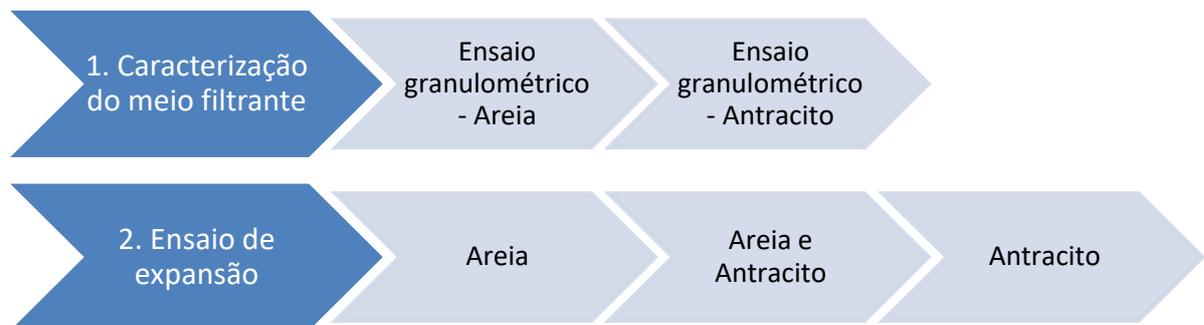
3 METODOLOGIA

Como demonstrado em estudos recentes, a retrolavagem é uma alternativa promissora para a limpeza de filtros lentos em escala comunitária (PIZZOLATTI, 2010, 2014; PIZZOLATTI et al., 2010, 2014; MICHELAN et al., 2011; SOUZA, 2013a, 2015). Contudo, nenhum enfoque foi dado até o momento em estudos de avaliação da retrolavagem para o meio filtrante composto de areia e carvão antracitoso para a filtração lenta. Logo, este estudo foi pensado em avaliar o meio filtrante composto de areia e carvão antracito em camada dupla e individualmente com os mesmos materiais filtrantes, a fim de servir como base para trabalhos futuros.

O estudo foi realizado nas dependências da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), junto ao Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOÁ). No laboratório, utilizou-se um sistema já existente de filtração lenta retrolavável em escala piloto. Neste foram realizados os ensaios de expansão do meio filtrante, em 3 configurações diferentes.

O fluxograma demonstrado na Figura 7, apresenta as etapas do desenvolvimento e realização do experimento.

Figura 7 - Fluxograma de etapas de realização do experimento.



Fonte: A Autora

Os principais parâmetros de controle durante o ensaio foram: vazão, perda de carga no filtro, expansão do meio filtrante, tempo e taxa de lavagem (velocidade). A água utilizada para o processo de retrolavagem é tratada.

3.1 ENSAIO PRELIMINAR

3.1.1 Ensaio de granulometria

Foram realizados ensaios de granulometria com o objetivo de se obter as características dos materiais filtrantes. Primeiramente os materiais filtrantes foram lavados e secos em estufa a 105 °C durante 18 horas, conforme estipula a NBR 6457 (ABNT, 1986). Posteriormente foi coletada uma amostra homogeneia do material, pesado e levado sobre as peneiras para o Agitador de Peneiras Eletromagnético Bertel (Figura 8), o qual manteve-se sob vibração durante 15 minutos. O tamanho das aberturas das peneiras utilizadas é especificado na Tabela 3 conforme padronização NBR7181 (ABNT, 1984).

Figura 8 - Agitador para ensaio granulométrico



Fonte: A Autora

Tabela 3 - Peneiras utilizadas para ensaio de granulometria

Número (*)	Abertura da malha (mm)
4	4,75
5	4,00
10	2,00

12	1,70
16	1,18
18	1,00
20	0,85
25	0,71
30	0,60
40	0,425
50	0,30
60	0,250
70	0,212
80	0,180

* Número de malhas por polegada

Fonte: A autora

Após a realização do peneiramento, pesou-se então a quantidade de areia retida em cada peneira. A partir desses valores fez-se a confecção de uma curva (porcentagem passante x diâmetros de grãos), onde determinou-se o D_{60} , diâmetro efetivo, coeficiente de uniformidade do meio filtrante e o coeficiente de curvatura. Sendo que o D_{60} é a abertura de peneira em que passa 60% do material, o diâmetro efetivo é a abertura onde passa somente 10% da amostra e o coeficiente de uniformidade é a relação entre o D_{60} e o diâmetro efetivo.

3.2 MATERIAL FILTRANTE

O filtro foi operado utilizando três combinações diferentes de meio filtrante (areia e antracito, apenas areia e apenas antracito), para todas as configurações foram utilizados uma espessura de camada filtrante de 40 cm. Segundo as recomendações de Funasa et al. (2019), entre 40 a 60 cm assegura-se uma eficiente redução dos indicadores de qualidade da água. Emmendoerfer (2006) estudou um filtro lento retrolavável e indica que 40 cm de areia é suficiente para a filtração ser adequada.

A camada suporte era composta de 25 cm de pedregulho, subdividida em 3 camadas de diâmetros diferentes, conforme orientado no estudo de Souza (2020). O mesmo autor afirma que a camada suporte tem a função de sustentar e impedir o entupimento do sistema de drenagem pelo meio filtrante. As configurações do meio filtrante e da camada suporte estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características geral do filtro

	Configuração 1	Areia= 40 cm
Meio filtrante	Configuração 2	Areia= 20 cm na base; Carvão antracito= 20 cm no topo.
	Configuração 3	Carvão antracito= 40 cm
	L= 10 cm	d= 6,65 – 12,7 mm
Camada suporte	L= 7,5 cm	d= 3,18 – 6,65 mm
	L= 7,5 cm	d= 2 – 3,18 mm

Legenda: L=espessura; d= diâmetro do seixo rolado.

Fonte: A Autora

Na configuração 2 do meio filtrante, o carvão antracitoso foi utilizado na parte de cima do filtro partindo do conceito de que, por ser menos denso que a areia, não haverá mistura dos materiais durante a retrolavagem (STUPP, 2021). Pelo fato de o carvão antracitoso possuir uma granulometria maior que a usada em filtros lentos, tem a função de operar como um pré-filtro, retendo partículas até chegar na camada de areia. Segundo Paterniani e Conceição (2004), a unidade de pré-filtração é uma alternativa de simples operação que promove a remoção de partículas e a melhora da qualidade da água sem utilização de produtos químicos.

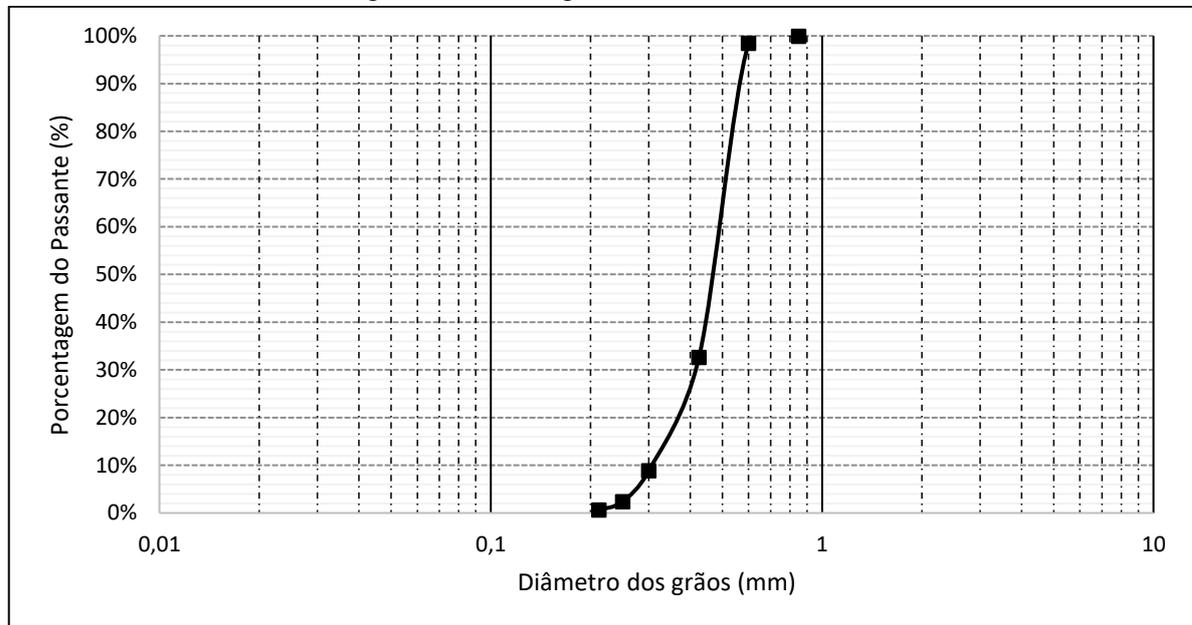
O carvão antracitoso utilizado tem características comerciais, sendo mais fácil de adquirir, não havendo necessidade de fabricação para obter uma granulometria nova. O mesmo foi comprado da empresa Clarifil, localizada na cidade de Itajaí – SC, comercializado com as seguintes características iniciais: tamanho dos grãos de 0,6 a 1,00 mm e coeficiente de uniformidade < 1,7.

Através dos ensaios de granulometria realizados se construiu a curva granulométrica para a areia e para o antracito. A partir das curvas granulométricas determinou-se o d_{60} , diâmetro efetivo (d_{10}) e o coeficiente de uniformidade (CU) das amostras.

A curva granulométrica da areia pode ser observada na Figura 9. Onde determinou o diâmetro efetivo d_{10} de 0,31 mm, o d_{60} de 0,49 mm e o coeficiente de uniformidade calculado foi de 1,58. Segundo Souza e Sens (2019) o diâmetro efetivo recomendado para a areia de filtros lentos retrolaváveis está compreendido em uma faixa de 0,25 a 0,35 mm e coeficiente de uniformidade (CU) < 1,6 (SOUZA; SENS, 2019). A NBR 12216 (1992), determina d_{10} dos grãos entre 0,25 a 0,35 mm e CU menor que 3. Sendo assim, a areia está dentro dos parâmetros

indicados. A planilha com os dados para a construção do gráfico encontra-se no Apêndice 1 (Pág. 63).

Figura 9 - Curva granulométrica da areia

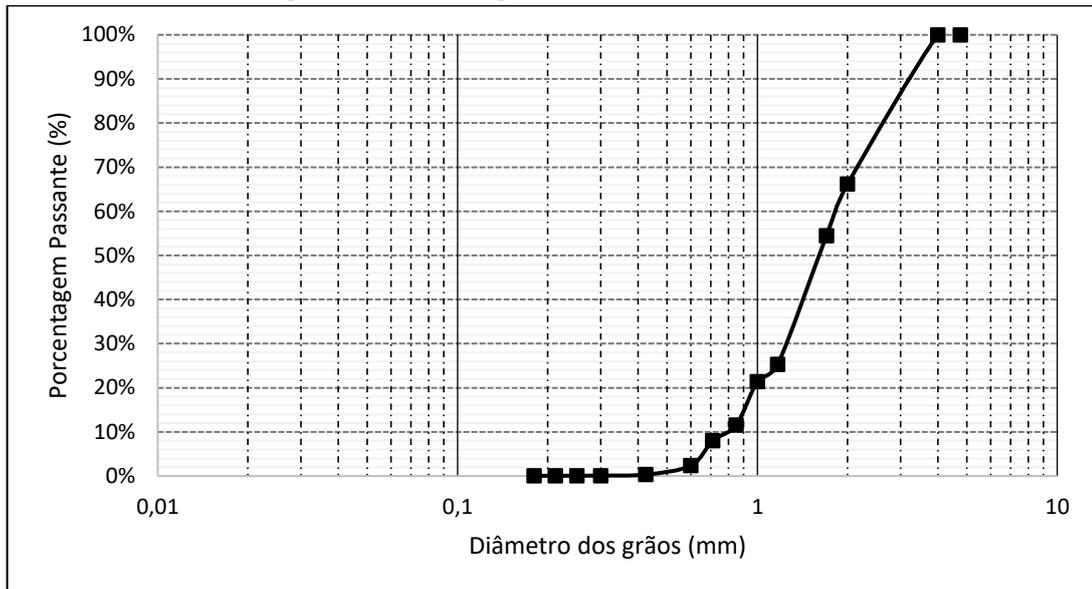


Fonte: A Autora

Através da curva podemos observar ainda o diâmetro do menor grão e o do maior, os quais estão compreendidos em uma faixa de 0,212 a 0,60 mm.

Na Figura 10 está apresentada a curva granulométrica do antracito. Por meio da curva granulométrica obteve-se um diâmetro efetivo de 0,79 mm, d_{60} de 1,72 mm, e o coeficiente de uniformidade 2,18. O menor grão tem 0,6 mm e o maior 2 mm, pois nas peneiras com abertura de malha maior que 2 mm não houve material retido.

Figura 10 - Curva granulométrica do antracito



Fonte: A Autora

Observa-se que as especificações passadas pela empresa não coincidem com os valores encontrados, uma vez que o diâmetro efetivo encontrado foi de 0,79 e o especificado era de 0,9 – 1 mm. O mesmo se observa para o coeficiente de uniformidade, que o valor referência era $< 1,7$ e o resultado encontrado foi superior, conforme apresentado na Tabela 5. Apesar das divergências encontradas, o objetivo final do teste granulométrico era caracterizar o antracito e trabalhar com a forma comercial vendida.

A Tabela 5 abaixo mostra um resumo com as principais características da areia e do antracito utilizado neste estudo.

Tabela 5 - Resumo das características dos materiais filtrantes

	Areia	Antracito
Diâmetro do menor grão (mm)	0,212	0,60
Diâmetro do maior grão (mm)	0,60	2,00
Diâmetro efetivo (d_{10}) (mm)	0,31	0,79
d_{60} (mm)	0,49	1,72
Coeficiente de uniformidade (CU)	1,58	2,18
Densidade do material (ρ) (g/ml)*	2,65	1,5

* Referência: Crittenden et. Al (2012)

Fonte: A Autora

As configurações dos materiais filtrantes dispostas no filtro podem ser visualizadas na Figura 11.

Figura 11 - Configurações de meio filtrante



Fonte: A Autora

3.3 SISTEMA PILOTO

O piloto utilizado é composto por um tubo de acrílico com diâmetro interno de 115 mm e altura de 130 cm. A câmara de carga é um tubo de PVC (Policloreto de vinila) com diâmetro de 60 mm e altura de 180 cm. As instalações entre a câmara de carga e o filtro são compostas por tubos de PVC soldável para água fria de diâmetro 25 mm.

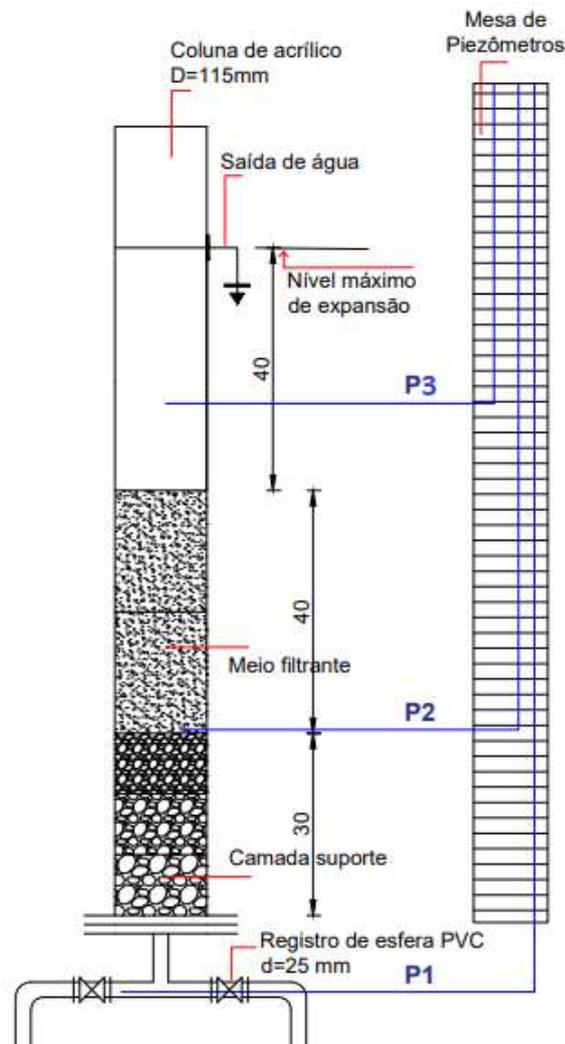
O monitoramento da perda de carga do sistema foi realizado através de 3 piezômetros instalados na lateral do filtro e conectados a mesa de piezômetros (Figura 12). A carga hidráulica do sistema foi observada pela medida do piezômetro instalado logo acima da superfície do meio filtrante (P3). Os outros piezômetros foram distribuídos entre a camada suporte e o meio filtrante (P2), e abaixo da camada suporte (P1). A perda de carga para as camadas foi calculada com o auxílio das Equações 2, 3 e 4 abaixo.

$$\Delta h_{\text{camada suporte}} = P2 - P1 \text{ (Equação 2)}$$

$$\Delta h_{\text{meio filtrante}} = P3 - P2 \text{ (Equação 3)}$$

$$\Delta h_{\text{total}} = P3 - P1 \text{ (Equação 4)}$$

Figura 12 - Disposição dos piezômetros no piloto

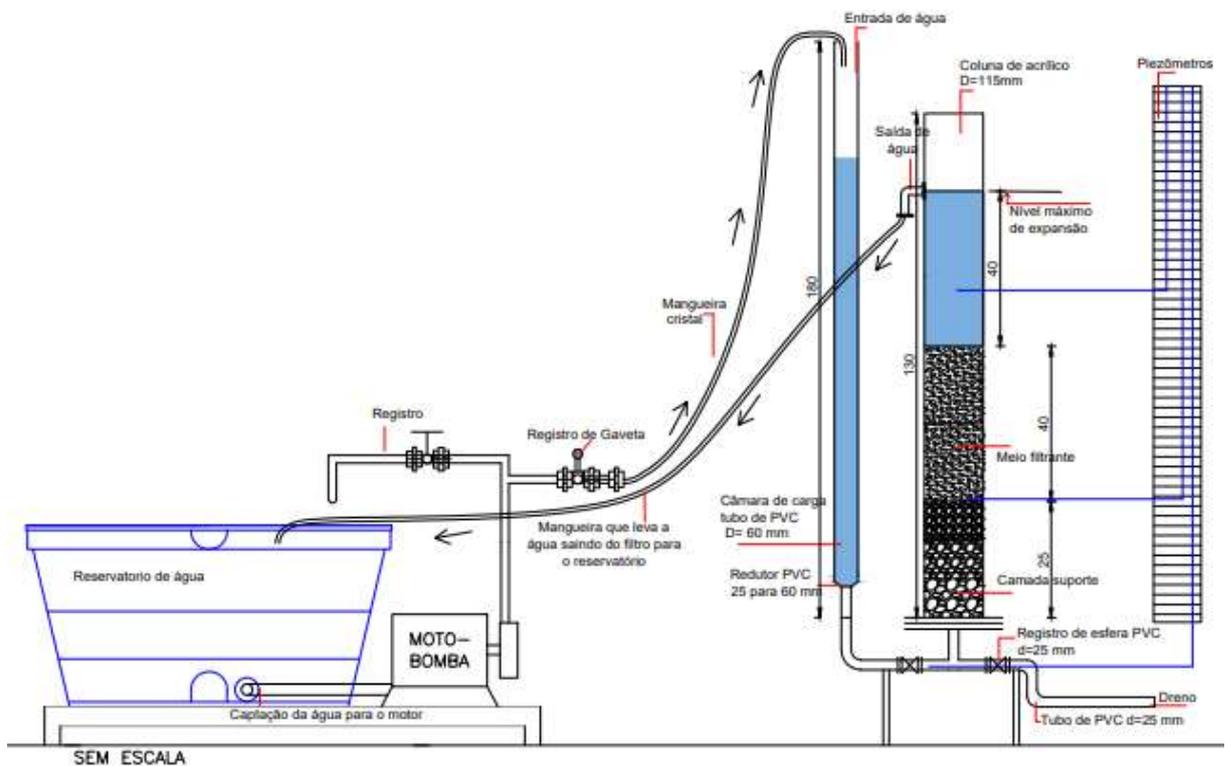


Fonte: A Autora

Para manter o nível da câmara de carga e a vazão do sistema constantes, utilizou-se um sistema de recirculação de água, o qual continha um reservatório, uma bomba centrífuga (BC-98 0,5 cv) e um registro de gaveta para o controle de vazão. Foi necessário instalar um sistema de alívio de pressão para evitar problemas de resfriamento e/ou cavitação no registro.

A bomba centrífuga captava a água no interior do reservatório, transportando-a até a câmara de carga no filtro. Durante a operação do sistema de retrolavagem, a água passa pelo meio filtrante em fluxo ascendente, a qual é direcionada para a saída, e então captada por uma mangueira e retorna para o reservatório. O esquema da Figura 13 mostra a configuração total do sistema de expansão.

Figura 13 - Configuração do sistema



Fonte: A Autora

Para aferição da vazão de alimentação da câmara de carga utilizou-se o método volumétrico, conferido diretamente na saída de água de retrolavagem. Com o auxílio de um cronômetro e uma proveta graduada, observou-se o nível da água no béquer até que atingisse um volume pré-estabelecido. A aferição volumétrica foi executada para determinar a vazão máxima e mínima suportadas. Logo, estabeleceu-se 10 vazões para serem observadas, partindo da vazão mínima do sistema e subindo gradualmente até a máxima. Na Tabela 6 podemos observar as vazões pré estabelecidas para o ensaio de expansão do meio filtrante.

Tabela 6 - Vazões estabelecidas

V (mL)	t (s)	Q (mL/s)
280	20	14
560	20	28
840	20	42
560	10	56
700	10	70
840	10	84
980	10	98
900	8	112
885	7	126
840	6	140

Fonte: A Autora

O controle da expansão do meio filtrante durante a retrolavagem foi realizado com uma fita métrica colada na parede externa do filtro (de acrílico transparente), conforme Figura 14.

Figura 14 - Controle da expansão do meio filtrante



Fonte: A Autora

Os principais parâmetros de controle durante esses ensaios foram a vazão, perdas de carga, a expansão do meio filtrante e velocidade de aproximação (calculada pela vazão medida).

3.3.1 Operação do sistema

Antes do início dos ensaios, realizou-se teste de estanqueidade para investigar a ocorrência de vazamentos e, os que surgiram foram corrigidos com silicone e cola epóxi. Posteriormente, realizou-se a primeira retrolavagem no filtro, a qual deve ser feita para analisar o comportamento do material no leito filtrante, a fim de expulsar possíveis bolhas de ar e eliminar caminhos preferencias de água.

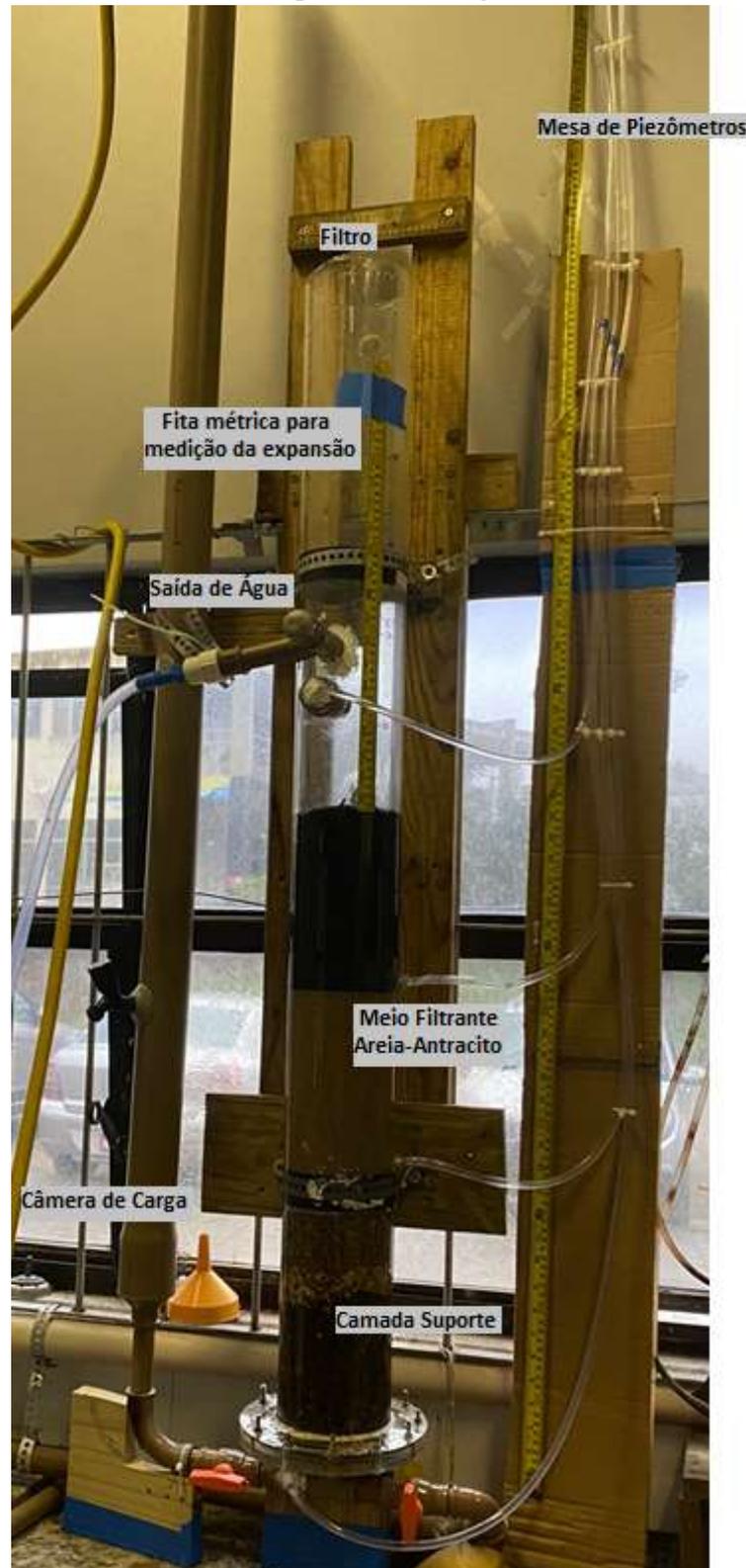
No início de cada ensaio, com o reservatório de água cheio, ligava-se a bomba centrífuga e abria-se minimamente o registro de gaveta para encher o filtro aos poucos. O filtro, antes de entrar em operação precisava estar com o nível d'água acima do material filtrante. As cotas dos piezômetros eram conferidas em comparação às condições oferecidas (vasos comunicantes). Uma vez conferidos esses passos, abria-se mais o registro regulando-o para que a primeira vazão fosse estabelecida em 14 mL/s conforme demonstrado na Tabela 5. Após a estabilização do sistema, através do método volumétrico, conferia-se se a vazão estava correta. Então, conferindo a mesa de piezômetros anotava os valores dos piezômetros P1, P2 e P3, e por fim, o valor da expansão do meio filtrante. Este procedimento era realizado para todas as vazões.

O encerramento do ensaio de expansão ocorria quando completavam-se as vazões estabelecidas. Ao fim do ensaio, fechava-se o registro de entrada de água e deixava o nível d'água baixar na coluna de filtração até o material filtrante. Os ensaios foram feitos em triplicata, a fim de se obter resultados mais precisos. Para a apresentação dos resultados, trabalhou-se com a média dos ensaios.

Ao final da realização dos três ensaios de expansão com o mesmo material filtrante, ocorria a troca deste material no filtro. Com a ajuda de uma ferramenta adaptada, o material era retirado por cima do filtro, deixava-se só a camada suporte e adicionava o novo material. Repetia-se a primeira retrolavagem a fim de se observar possíveis caminhos preferenciais de água, e então dava-se início ao ensaio de expansão com o novo material filtrante.

A Figura 15 abaixo mostra o sistema piloto já montado e pronto para o início do ensaio de expansão.

Figura 15 - Foto do sistema piloto de filtração lenta com retrolavagem



Fonte: A Autora

Figura 16 - Configuração do sistema para controle da vazão



Fonte: A Autora

3.3.2 Velocidade de Aproximação

O gráfico da velocidade de aproximação é construído com base na vazão e na área interna do leito filtrante. Tendo registrado o volume de água que saía do filtro para cada intervalo de tempo, tem-se a partir da Equação 5, a curva da vazão do início ao fim da retrolavagem.

$$Q = \frac{V}{t} \text{ (Equação 5)}$$

Onde: Q= Vazão; V= Volume e t= tempo.

Complementarmente, a partir da Equação 6 pode-se obter a velocidade de aproximação da água no leito filtrante.

$$v_a = \frac{Q}{A_f} \text{ (Equação 6)}$$

Onde: v_a = Velocidade de aproximação; Q= Vazão e A_f = Área do filtro.

A área interna do filtro pode ser calculada de acordo com a Equação 7:

$$A_f = \frac{\pi \times d^2}{4} = \frac{\pi \times 0,115^2}{4} = 0,010 \text{ m}^2 \text{ (Equação 7)}$$

Onde: d= diâmetro interno do filtro.

Logo, tendo a curva de vazão e a área do leito filtrante, a curva da velocidade de aproximação pode ser esboçada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS DE EXPANSÃO

4.1.1 Meio filtrante de areia

Os ensaios de expansão foram realizados com aumento gradativo da vazão, modificando a velocidade de lavagem e conseqüentemente a expansão do leito. Na Tabela 7 são apresentados os valores médios de vazão, as respectivas velocidades, perda de carga e a expansão da areia como camada única.

Tabela 7 - Ensaio de expansão da camada simples: areia

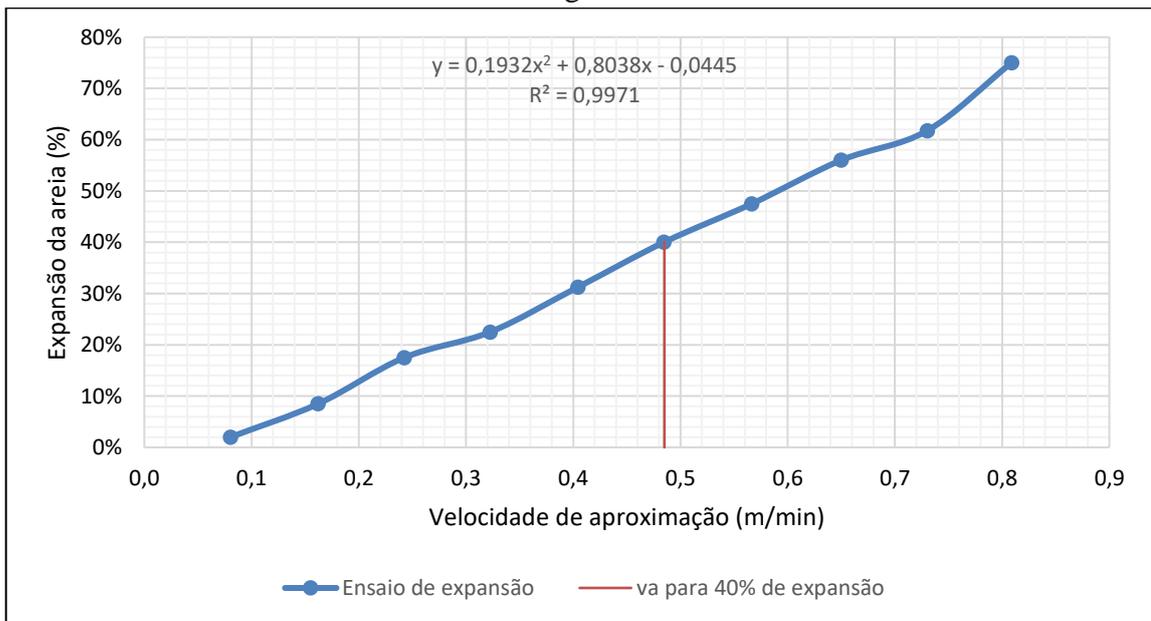
Q_{méd} (mL/s)	Q_{méd} (L/h)	Velocidade Ascensional_{méd} (m/min)	Expansão méd (%)	Perda de carga na areia_{méd} (cm)	Perda de carga total méd (cm)
14	50	0,08	2,0	9,30	26,70
28	101	0,16	8,5	15,90	36,70
42	151	0,24	17,5	17,00	42,10
56	201	0,32	22,5	15,00	43,40
70	252	0,40	31,3	14,70	47,50
84	302	0,49	40,0	14,80	51,20
98	353	0,57	47,5	15,00	53,80
112	405	0,65	56,0	14,70	57,60
126	455	0,73	61,8	14,30	60,60
140	504	0,81	75,0	11,80	69,00

Fonte: A Autora

Com base nos resultados indicados na Tabela 7 foram elaborados os gráficos de expansão versus velocidade de aproximação (Figura 17) e perda de carga na areia versus velocidade de aproximação (Figura 18). Através das curvas obteve-se a velocidade de aproximação necessária para determinada expansão da areia.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005a), a expansão considerada eficiente para retrolavagem de filtros rápidos é de 40%. Podemos observar na Figura 17 que para a areia expandir 40% é necessário uma velocidade ascensional da água de 0,49 m/min.

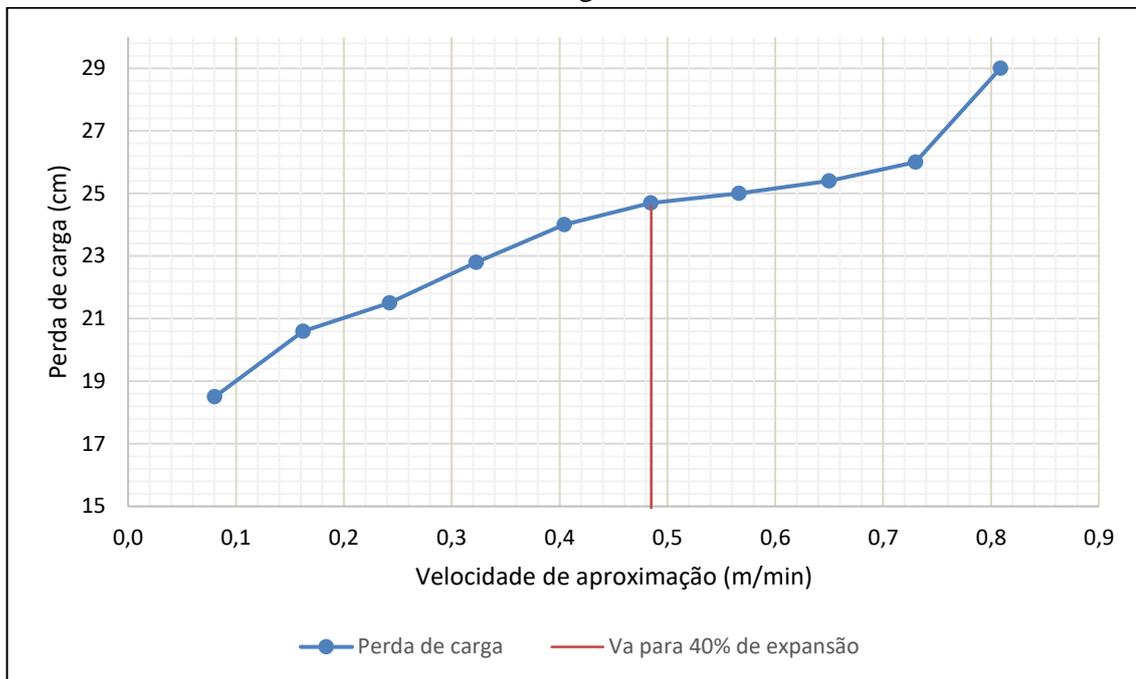
Figura 17 - Variação da expansão da areia para diferentes velocidades de aproximação da água



Fonte: A Autora

A uma velocidade ascensional de 0,49 m/min observa-se na Figura 18 que a perda de carga na areia é da ordem de 24,6 cm. Ainda na Figura 18, observa-se que a perda de carga é crescente para as velocidades de aproximação analisadas, apontando um ponto de pico para a perda de carga na última vazão analisada do sistema.

Figura 18 - Variação da perda de carga na areia para diferentes velocidades de aproximação da água



Fonte: A Autora

Emmendoerfer (2006) estudou o sistema de expansão de um filtro lento com retrolavagem, características granulométricas da areia eram diâmetro efetivo de 0,22 mm e coeficiente de uniformidade igual a 1,8. De acordo com seus estudos, para a expansão da areia em 40% bastou uma velocidade ascensional da água de 0,34 m/min. Diferentemente da velocidade ascensional de 0,485 m/min encontrada neste estudo, cujo d_{10} da areia é 0,31 mm. Logo, pode se afirmar que para um diâmetro efetivo maior da areia é necessária uma maior velocidade de aproximação para expandi-la.

Souza (2013) estudou a eficiência do diâmetro efetivo do meio filtrante em filtros lentos retrolaváveis (FLR). Os FLRs continham areias de diâmetros efetivos de 0,17 mm, 0,30 mm e 0,53 mm. A expansão desejada para o meio filtrante era de 25%. A areia de diâmetro efetivo de 0,30 mm, que é semelhante a estudada neste trabalho, necessitou de uma velocidade de aproximação da água de 0,26 m/min para expandir 25%. Observando na Figura 18, para uma expansão de 25% da areia, é necessária uma velocidade de aproximação da água de 0,34 m/min.

Michielin (2003) desenvolveu um sistema piloto de bancada que reproduzia o filtro lento retrolavável, a camada filtrante tinha espessura de 50 cm e o diâmetro efetivo da areia era de 0,2 mm. A uma vazão de retrolavagem de aproximadamente 0,100 L/s o filtro apresentou cerca de 36% de expansão do leito filtrante, considerada eficiente pelo autor. Nesta expansão,

a velocidade de aproximação da água era de 0,37 m/min. Comparando com a Figura 18, para uma expansão de 36% da areia, é necessária uma velocidade de aproximação da água de 0,44 m/min, a qual ficou bem próxima do encontrado por Michielin, visto que o d_{10} utilizado da areia nesse estudo é maior.

4.1.2 Meio filtrante de areia e antracito

Para a expansão da camada dupla de areia e antracito, repetiu-se o mesmo procedimento realizado com a areia, aumentando gradativamente a vazão para determinar os valores de expansão correspondente.

Na Tabela 8 estão descritos os valores médios do ensaio de expansão para o meio filtrante de camada dupla. Através destes resultados, foram elaborados os gráficos de velocidade ascensional versus expansão (Figura 19) e velocidade ascensional versus perda de carga no meio filtrante (Figura 20).

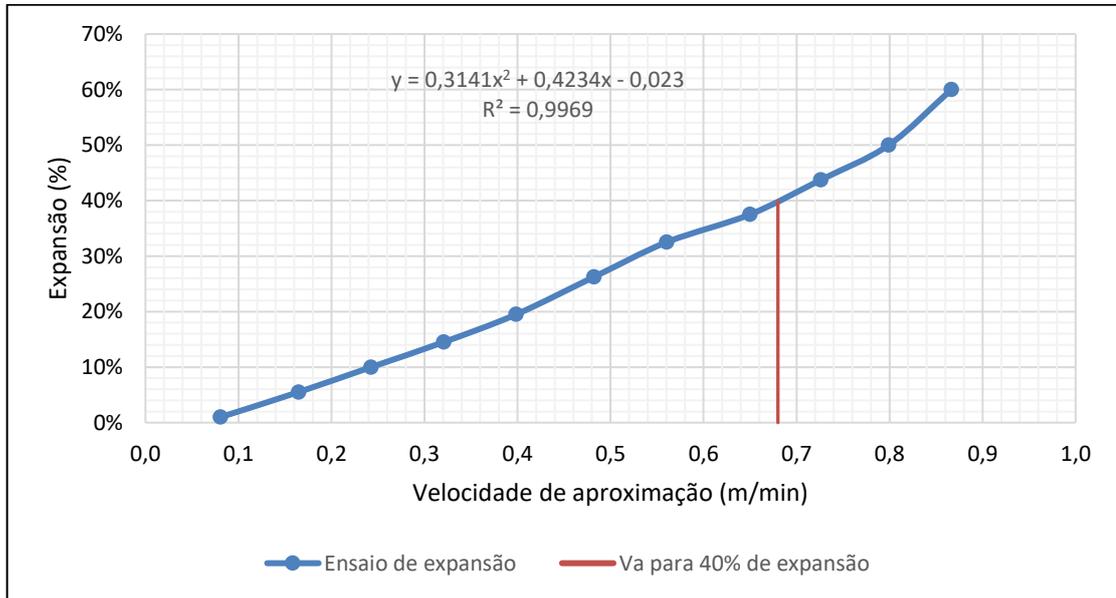
Tabela 8 - Ensaio de expansão da camada dupla: areia e antracito

$Q_{\text{méd}}$ (mL/s)	$Q_{\text{méd}}$ (L/h)	Velocidade Ascensional méd (m/min)	Expansão méd (%)	Perda de carga na camada dupla _{méd} (cm)	Perda de carga total méd (cm)
14	50	0,08	1,0	5,00	8,80
28	101	0,16	5,5	6,50	16,20
42	151	0,24	10,0	7,40	18,50
56	201	0,32	14,5	8,50	15,40
70	252	0,40	19,5	9,30	15,30
84	302	0,49	26,3	9,80	15,20
98	353	0,57	32,5	10,40	14,80
112	405	0,65	37,5	10,60	14,70
126	455	0,73	43,8	10,90	14,30
140	504	0,81	50,0	11,00	14,00

Fonte: A Autora

Conforme dados da Tabela 8 e da Figura 19, podemos observar que a velocidade de aproximação da água necessária para expandir o filtro em 40% é de 0,68 m/min.

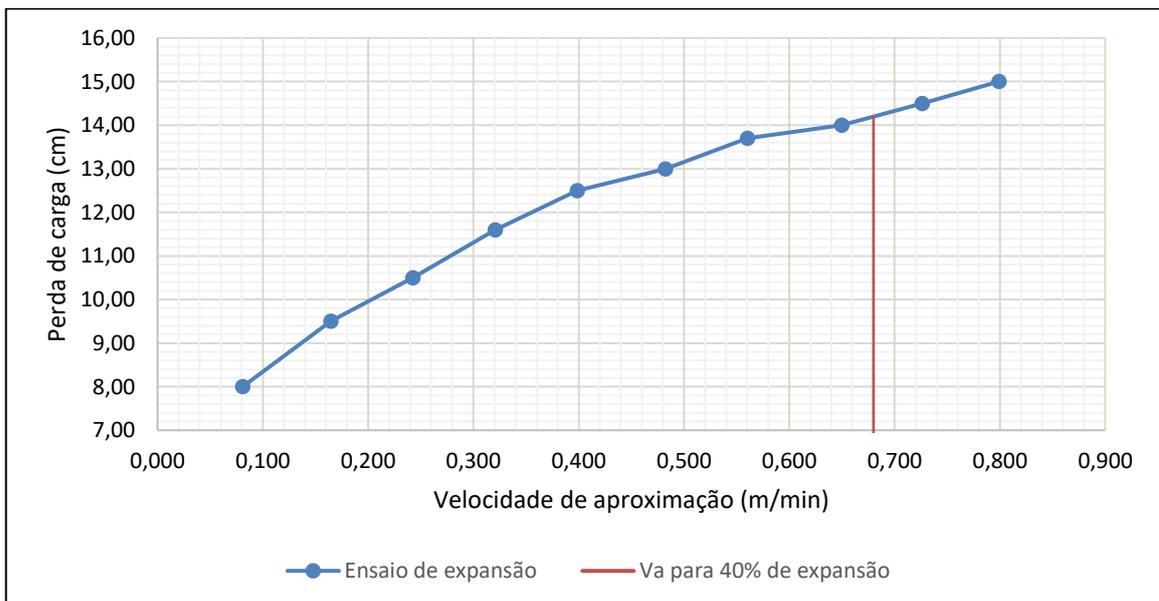
Figura 19 - Variação da expansão da camada dupla areia e antracito para diferentes velocidades de aproximação da água



Fonte: A Autora

Quando o filtro está expandido 40%, a sua respectiva velocidade de aproximação é de 0,68 m/min, e a perda de carga no meio filtrante é na casa de 14,2 cm, conforme Figura 20. Podemos observar que a perda de carga cresce conforme a velocidade de aproximação da água aumenta.

Figura 20 - Variação da perda de carga da camada dupla areia e antracito para diferentes velocidades de aproximação da água



Fonte: A Autora

O emprego de dupla camada utilizando carvão antracitoso e areia já é consistente em sistemas que utilizam a filtração rápida e direta nas estações de tratamento. A concepção do uso se fundamenta na diferença de densidade dos materiais, o que durante a limpeza realizada por retrolavagem proporciona a não homogeneização entre os grãos (RICHTER; NETTO, 1991).

Podemos observar a expansão do meio filtrante na Figura 21 abaixo. No momento da foto, a vazão medida do filtro estava em 138,33 mL/s e a camada filtrante de antracito estava expandindo cerca de 20 cm, o equivalente a 50% de expansão total do filtro e 100% de expansão do antracito.

Figura 21 - Meio filtrante expandido



Fonte: A Autora

Ao final da realização dos ensaios de expansão da camada dupla, é esperado que uma parte dos materiais filtrantes se misturem, em virtude da força que a água passa em contrafluxo pelo meio filtrante. Esta mistura pode ser observada na Figura 22. Ainda é possível observar que os materiais não se misturam completamente, sendo evidente a estratificação mesmo após

a retrolavagem. Todavia, ocorreu dos grãos de antracito com diâmetros maiores se depositarem na camada de areia e logo acima da camada suporte.

Figura 22 - Mistura do meio filtrante



Fonte: A Autora

Tal comportamento justifica-se pelo fato do carvão antracitoso possuir em média tamanho dos grãos maiores que os da areia, e por isso mais pesados, como podemos observar na Figura 23 e 24.

Figura 23 - Tamanho dos grãos



Fonte: A Autora

Figura 24 - Peso do grão de antracito e de areia



Fonte: A Autora

Segundo Brinck (2009 *apud* LUNARDI 2021, p. 59), a densidade dos grãos de carvão antracitoso propiciam maior formação de caminhos preferenciais no leito. Quando ocorre a retrolavagem, a parte de cima expande e abre espaço, e então as partículas de baixo se alocam.

Este aspecto justifica o que ocorreu durante o ensaio de expansão para a camada dupla. No decorrer da retrolavagem, a camada de antracito “abre” espaço para as partículas mais finas de areia subirem, enquanto que as partículas de antracito mais pesadas, por necessitarem de muita velocidade de aproximação pra fluidizar, acabam descendo no filtro e se misturando com a areia. Ou seja, é possível visualizar que os materiais filtrantes utilizados se comportam de forma distinta no filtro, em decorrência das suas diferentes características granulométricas. Para evitar esse processo, uma granulometria menor de antracito seria mais vantajosa, ou ainda limitar diâmetros máximos usados para o carvão antracitoso comercial.

4.1.3 Meio filtrante de antracito

Por fim, removeu-se todo o meio filtrante anterior composto de areia e antracito, e adicionou-se apenas o carvão antracitoso para o ensaio de expansão. A Tabela 9 abaixo mostra os valores correspondentes das médias da vazão, velocidade de aproximação, expansão e as perdas de carga dos ensaios realizados.

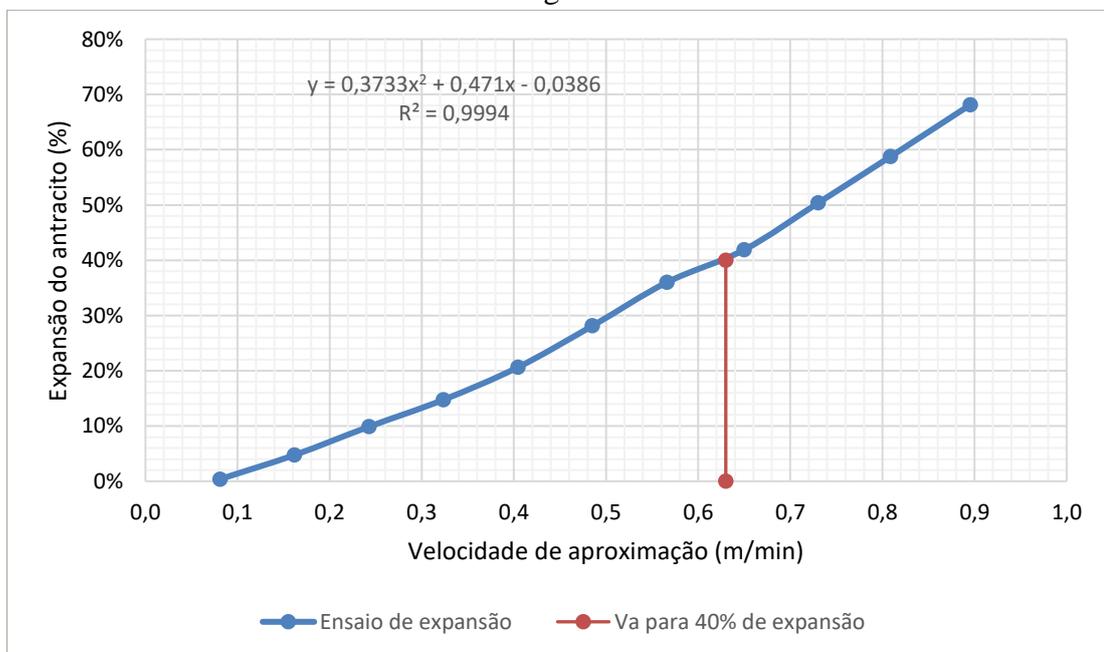
Tabela 9 - Ensaio de expansão da camada simples: carvão antracitoso

$Q_{méd}$ (mL/s)	$Q_{méd}$ (L/h)	Velocidade Ascensional méd (m/min)	Expansão méd (%)	Perda de carga no meio filtrante méd (cm)	Perda de carga total méd (cm)
14	50	0,08	0,4	1,95	6,40
28	101	0,16	4,8	3,75	12,80
42	151	0,24	9,9	6,00	17,25
56	201	0,32	14,8	5,60	19,15
70	252	0,40	20,6	6,30	23,65
84	302	0,49	28,1	6,10	27,40
98	353	0,57	36,0	5,60	32,05
112	405	0,65	41,9	5,85	35,40
126	455	0,73	50,4	6,00	39,95
140	504	0,81	58,8	6,00	42,85

Fonte: A Autora

A partir da Figura 25 obteve-se a velocidade de aproximação necessária para a expansão do antracito em 40%.

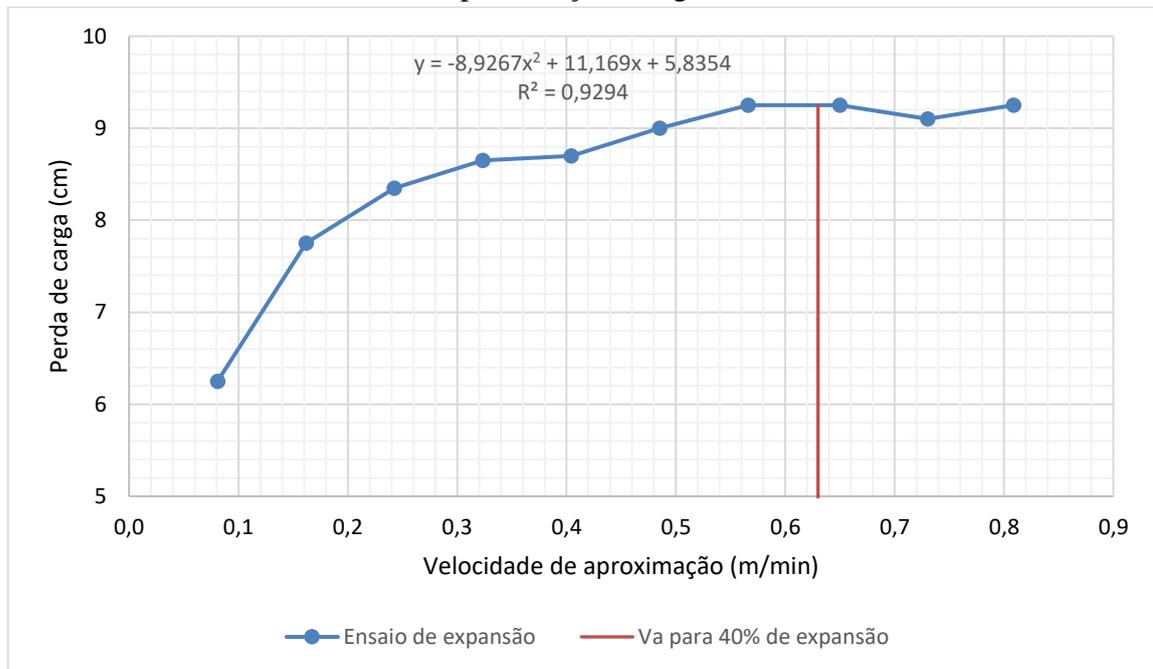
Figura 25 - Variação da expansão do antracito para diferentes velocidades de aproximação da água



Fonte: A Autora

Para a expansão do carvão antracitoso em 40% precisa-se de uma velocidade de aproximação de 0,63 m/min, e com esta velocidade observa-se na Figura 26 que a perda de carga no antracito é de 9,2 cm.

Figura 26 - Variação da perda de carga do antracito para diferentes velocidades de aproximação da água



Fonte: A Autora

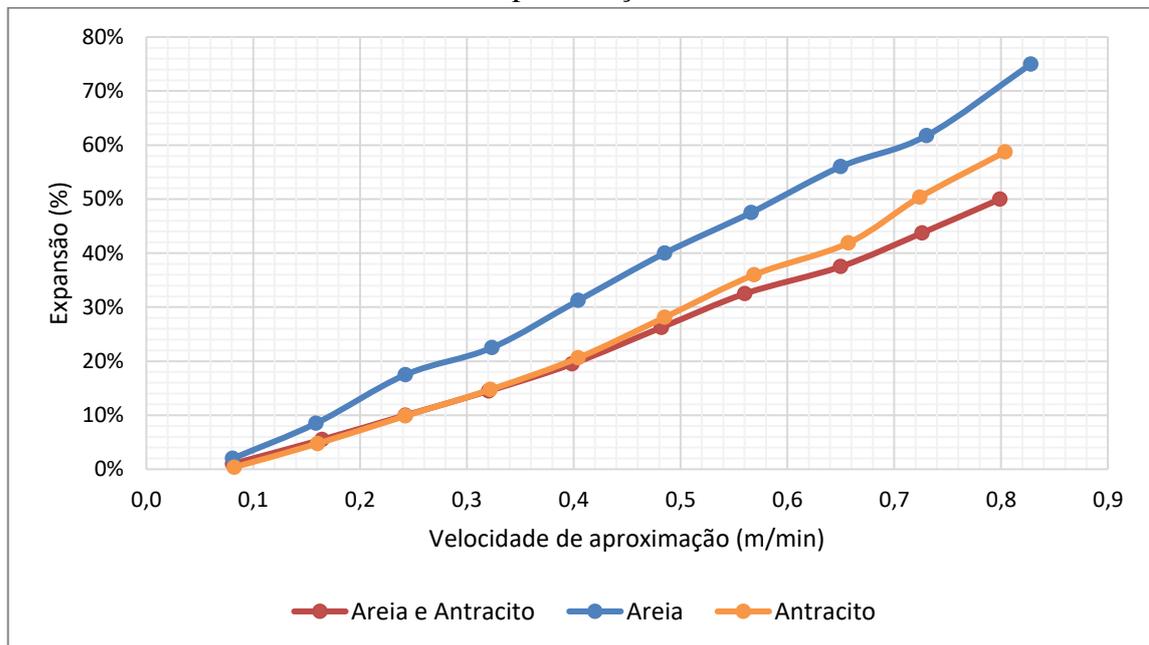
Como podemos perceber na Figura 26, a perda de carga no carvão antracitoso se comporta de maneira crescente.

4.1.4 Comparação entre os meios filtrantes

4.1.4.1 Expansão

A Figura 27 apresenta as curvas de expansão dos meios filtrantes em função das velocidades de aproximação da água para as três concepções de meio filtrante avaliados durante o estudo.

Figura 27 – Comparação entre a expansão dos meios filtrantes para diferentes velocidades de aproximação



Fonte: A Autora

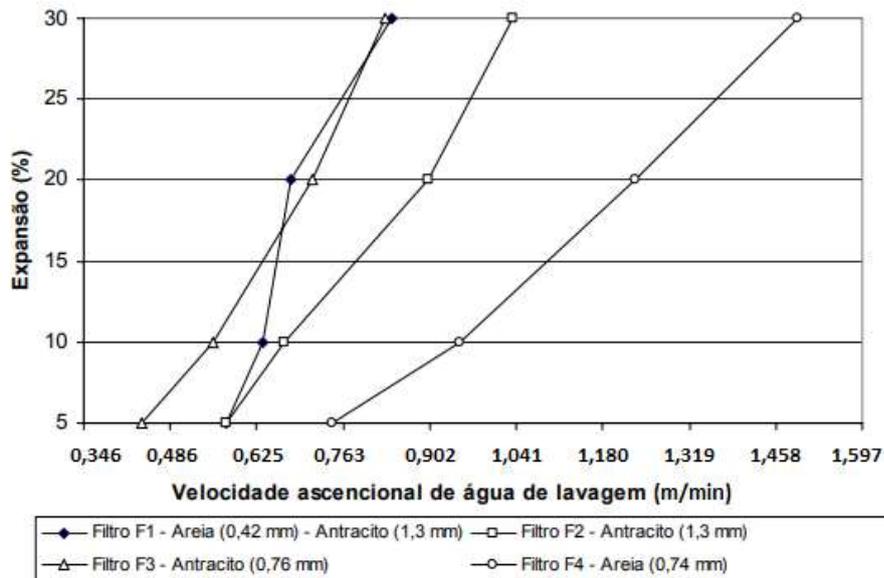
Conforme pode-se observar na Figura 27, o filtro que apresentou o menor valor de velocidade de aproximação para todas as expansões foi o com meio filtrante composto unicamente de areia. Segundo Brinck (2009) é importante determinar os valores de velocidade mínima de fluidificação pois quanto menores forem estes valores, menor serão os volumes de água de lavagem gastos no processo. Deste modo, o filtro composto exclusivamente de areia como material filtrante, tende a ser mais vantajoso com respeito a um menor consumo de água de lavagem para limpeza.

Ao observar a Figura 27, pode-se notar que o meio filtrante de camada dupla (areia e antracito), se comporta de maneira semelhante ao carvão antracito até cerca de 20% de expansão, a partir de então, a camada dupla requer uma maior velocidade de aproximação da água para continuar expandindo o meio filtrante.

O filtro com o meio filtrante composto apenas de antracito ($d_{10} = 0,79$ mm) necessita de uma velocidade de aproximação maior para uma mesma expansão quando comparado com a areia ($d_{10} = 0,31$ mm). Tal comportamento justifica-se pelo fato do carvão antracitoso possuir tamanho dos grãos maiores que os da areia. Segundo Souza et al. (2016), o material filtrante com uma maior granulometria necessita maior velocidade de aproximação para que ocorra a expansão e fluidificação durante a retrolavagem, necessitando de carga hidráulica superior, quando comparado ao material de menor granulometria.

Brinck (2009) avaliou a expansão do meio filtrante em filtros rápidos com diferentes velocidades ascensionais de água. Foram utilizados quatro filtros, um filtro F1 composto de camada dupla de areia ($d_{10}= 0,42$) e antracito ($d_{10}= 1,30$), com camada filtrante composta de 20 cm de areia no fundo e 80 cm de antracito em cima. Um filtro F2 composto de antracito ($d_{10}= 1,3$ mm), com 120 cm de camada filtrante. E o filtro F4 composto de areia ($d_{10}= 0,74$) com 120 cm de camada filtrante. Para fins de comparação, o filtro F3 não vai ser analisado. Os filtros possuíam camada suporte de 57,5 cm, altura total de 6,5 m e diâmetro da coluna de 150mm. Para chegar a uma expansão de 20% do meio filtrante, a velocidade de aproximação da água para o F1, F2 e F4 foram: 0,694 m/min, 0,902 m/min e 1,18 m/min, respectivamente. Conforme observa-se na Figura 28 abaixo

Figura 28 - Referência -Expansão x Velocidade ascensional de água de lavagem



Fonte: Adaptado de Brinck (2009)

Conforme resultados obtidos por Brinck (2009), o filtro F4 composto de areia é aquele que requer a maior velocidade ascensional da água para expandir o meio filtrante. Apesar do filtro F2 (composto somente de antracito), possuir um diâmetro efetivo maior que o da areia, este necessita de uma menor velocidade de aproximação para expandir o meio filtrante. A autora justifica este comportamento pelo fato de o antracito possuir menor valor de massa específica.

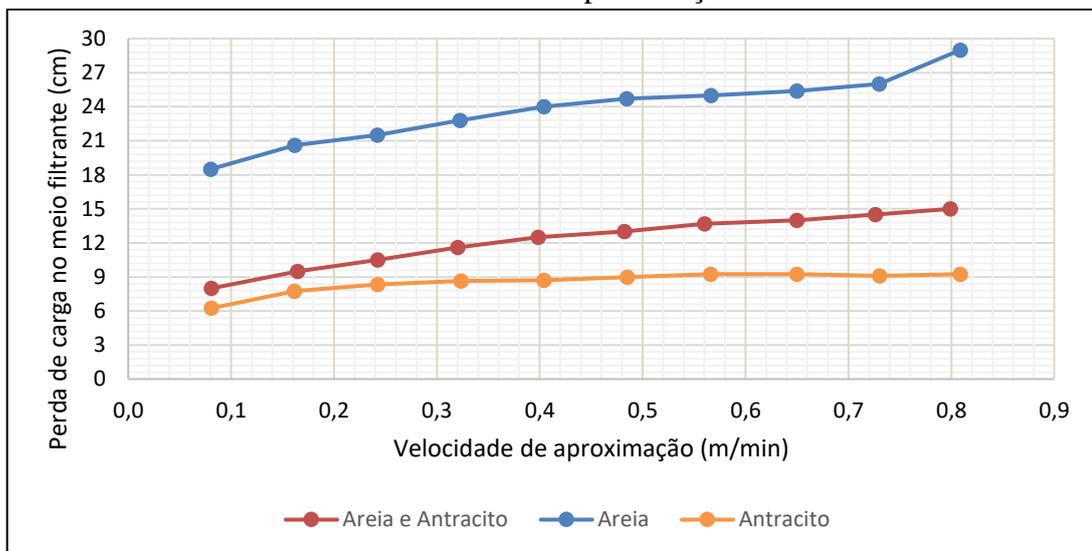
Diferentemente do ocorrido para este trabalho, onde o antracito por possuir menor valor de massa específica quando comparada com a areia, ainda apresentou valores maiores de

aproximação da água para uma mesma expansão do meio filtrante. Vale ressaltar que os grãos de carvão antracitoso utilizados neste estudo são mais pesados que os grãos da areia, e o tamanho efetivo da areia usada nesse estudo é consideravelmente menor que a utilizada no estudo de Brinck (2009), o que justifica a diferença de energia necessária para a expansão dos materiais.

4.1.4.2 Perda de carga

Os gráficos da perda de carga no meio filtrante, na camada suporte e a perda de carga total no filtro podem ser visualizadas nas Figuras abaixo.

Figura 29 - Comparação entre a perda de carga nos meios filtrantes para diferentes velocidades de aproximação



Fonte: A Autora

Comparando a perda de carga no meio filtrante para os materiais avaliados, conforme Figura 29, podemos perceber que a perda de carga é baixa quando o meio filtrante é composto unicamente de carvão antracitoso. Isto indica que a água não encontra muita dificuldade para passar neste meio filtrante durante a retrolavagem.

Quando o meio filtrante é composto de camada dupla, é esperado que a perda de carga se comporte como um meio termo das duas configurações analisadas em camada simples. Pois quando o meio é composto exclusivamente de areia, apresenta valores altos de perda de carga, e quando é composto unicamente de carvão antracitoso, apresenta baixa perda de carga. Logo, a junção dos dois materiais no filtro tenderá a se comportar como uma média das perdas de

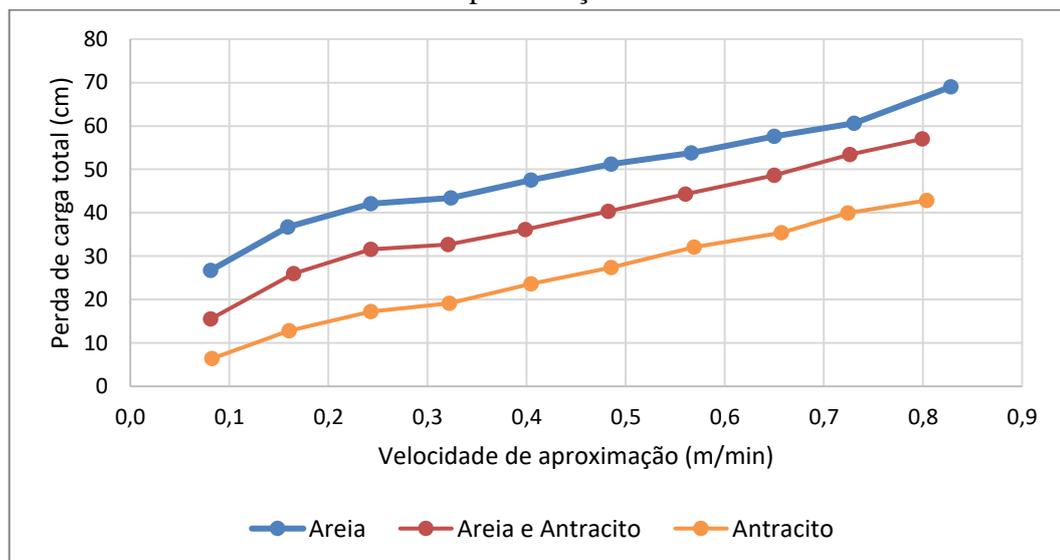
carga analisadas dos materiais em camada simples. Entretanto, podemos observar que a perda de carga da camada dupla foi mais semelhante ao do carvão antracitoso, enquanto que a da areia apresentou o dobro da perda de carga analisada em comparação a camada dupla, encontrando mais dificuldade da água em percorrer este meio filtrante.

As características granulométricas da areia e do carvão antracitoso, como o tamanho e formato dos grãos, porosidade, densidade e o modo como se acomodam no leito filtrante podem justificar as suas respectivas perdas de carga no leito.

A areia apresenta grãos de tamanhos semelhantes, com uma faixa de diâmetro compreendida em 0,21 – 0,60 mm. Quando este material filtrante é alocado no filtro, por possuírem formas e tamanhos semelhantes, os grãos se ajustam de maneira que não tenha grandes espaços vazios entre eles. Diferentemente do carvão antracitoso, no qual grãos de diâmetros variados se ajustam de maneira aleatória e originam espaços vazios maiores em relação a areia, o que tem influência na perda de carga, pois com mais espaços vazios a água percorre o meio filtrante com mais facilidade durante a retrolavagem. Segundo Cho et al (2006), grãos de superfícies ásperas induzem a decorrência de maiores porosidades devido a maior formação de espaços vazios entre os grãos, visto que há menor probabilidade de encaixe e acomodação entre eles.

A Figura 30 abaixo apresenta a comparação da perda de carga total nos filtros para as configurações analisadas.

Figura 30 - Comparação entre a perda de carga total nos filtros para diferentes velocidades de aproximação

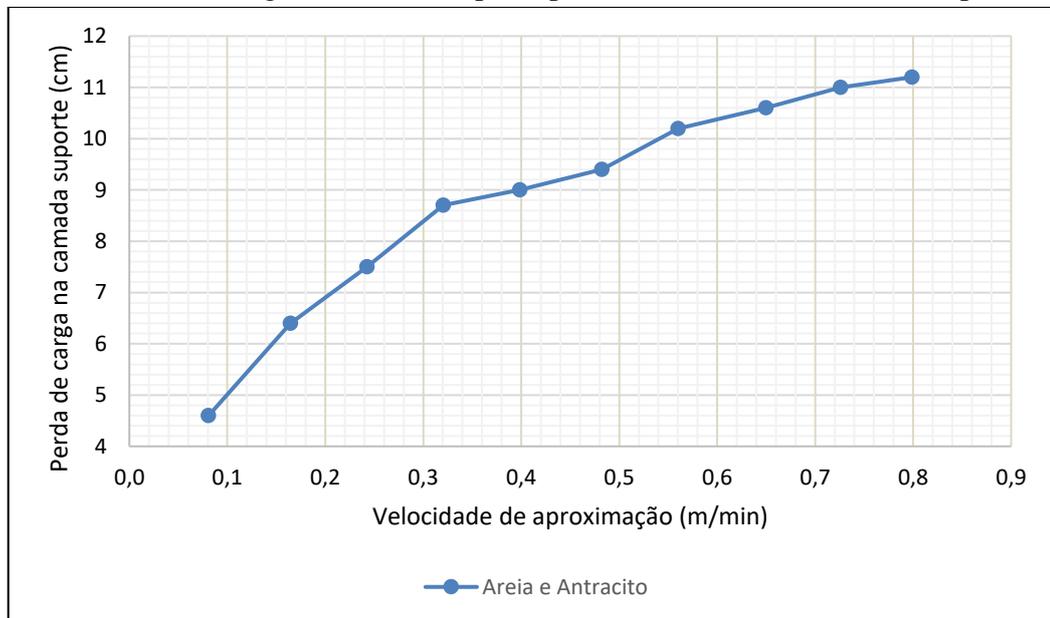


Fonte: A Autora

Como podemos observar na Figura 30, a areia apresentou a maior perda de carga total durante a retrolavagem no filtro. Como reportado por Brick (2009), esse comportamento se dá devido a maior massa específica da areia, fazendo com que apresente maior perda de carga. O meio filtrante exclusivo de antracito apresentou a menor perda de carga total, enquanto que o com 50% de areia e 50% de antracito se comportou como uma média dos dois outros, logo, em termos de perda de carga, é uma boa estratégia utilizar 50% de cada material.

A perda de carga na camada suporte em relação a velocidade de aproximação aplicada pode ser observada na Figura 31.

Figura 31 - Perda de carga na camada suporte para diferentes velocidades de aproximação



Fonte: A Autora

Podemos observar na Figura 31 a perda de carga na camada suporte para a configuração de meio filtrante em camada dupla, entretanto, a perda de carga é a mesma para todas as configurações analisadas, visto que a camada suporte utilizada foi sempre a mesma. Observa-se que a perda de carga aumenta à medida que a velocidade de aproximação da água aumenta.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos objetivos propostos e nos resultados obtidos por esse trabalho, é possível concluir que:

- A areia como material filtrante em camada simples ($d_{10}= 0,31$ mm) apresentou menor velocidade de aproximação da água de lavagem para uma determinada expansão, quando comparada com o filtro de camada simples de antracito ($d_{10}= 0,79$ mm) e com o filtro de camada dupla de areia e antracito. Como vantagem, o meio filtrante de areia apresenta uma economia nos custos de um sistema de lavagem.

- Em relação a expansão do carvão antracitoso (comercial), o mesmo demanda mais velocidade de aproximação em relação a areia para se obter os mesmos resultados de expansão. No entanto, mesmo sendo menos denso que a areia, o diâmetro efetivo do carvão antracitoso se mostrou fator determinante para a sua expansão, uma vez que os grãos de diâmetro maiores possuem maior massa em relação a areia, sendo necessário maior energia para fluidizar.

- Durante a retrolavagem da camada dupla, observou-se que os grãos de antracito se depositaram entre a camada de areia e logo acima da camada suporte. Para que isso não ocorra, deve haver um limite de diâmetro efetivo a ser utilizado no carvão, o que para este aspecto compromete a utilização do carvão antracitoso comercial.

- Para a comparação das perdas de carga analisadas, o meio filtrante composto exclusivamente de carvão antracitoso foi o que apresentou menores valores quando comparado com a areia, em decorrência das suas características granulométricas, como densidade, porosidade e formato dos grãos.

- Acredita-se que as características dos materiais filtrantes, mais explicitamente, os diâmetros efetivos, pesos das partículas e densidade, justifiquem a diferença no comportamento entre a areia e o antracito como materiais filtrantes. Tendo isso em vista, para trabalhos futuros recomenda-se trabalhar com idêntica granulometria dos materiais, ou ainda com um menor d_{10} do carvão antracitoso. Visto que na granulometria trabalhada apresentou valores positivos em relação a perda de carga, o ideal seria adequar o d_{10} para diminuir a velocidade necessária para a expansão, economizando assim a água utilizada para a limpeza do filtro.

Logo, este trabalho pode ser considerado uma avaliação inicial da expansão dos materiais filtrantes e as suas configurações de camada dupla e simples de antracito. Sugere-se para trabalhos futuros utilizar d_{10} semelhante para os materiais filtrantes.

6 REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 7217** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro - Brasil, 1987.
- ABNT. **NBR 12216** - Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro - Brasil, 1992.
- ABNT. **NBR 7181** Análise granulométrica: Método de ensaio. Brasil, 1984.
- ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Brasil, 1986.
- AMIRTHARAJAH, A. Some Theoretical and Conceptual Views of Filtration. **American Water Works Association**. v. 80, n. 12, p. 36-46, 1988. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1988.tb03147.x>.
- BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos. 2019. f. Dissertação, 2019.
- BRASIL; MINISTÉRIO DAS CIDADES; SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL - SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos** - 2013. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014.
- BRANDÃO, C. et al. Pré-filtração em pedregulho aplicada ao tratamento de águas com elevados teores de algas-Influência da granulometria e da taxa de filtração. In: 20o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- 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.
- CLEASBY, J.L & FAN, K. Predicting Fluidization and Expansion of Filter Media. **Journal of the Environmental Engineering Division**, v. 107, n. EE3, p. 455- 471, Jun. 1981.
- COSTA, R. H. R. da. **Estudos comparativos da eficiencia de filtros lentos de areia convencionais e de fluxo ascendente**. 1980. 256 f.. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1980.

CRITTENDEN, John C. et al. MWH's Water Treatment. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. v. 4 Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118131473>

DALSASSO, R.L. – **Estudo de Diferentes Materiais para Flocculação em meio granular, precedendo a filtração rápida descendente no tratamento de água para abastecimento.** Florianópolis, 2005, 272p. Dissert. (Doutoramento em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

DE SOUZA, F. H. **Tratamento de água para abastecimento por meio de filtros lentos de fluxo ascendente com limpeza por retrolavagem e descarga de fundo.** Florianópolis, 2014.

DE SOUZA, F. H.; PIZZOLATTI, B. S.; SENS, M. L. **Aplicação de um filtro lento com retrolavagem automática em uma escola municipal e custos envolvidos.** Florianópolis, 2018.

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

DI BERNARDO, L. et al. **Tratamento de Águas de Abastecimento por Filtração em Múltiplas Etapas.** Primeira ed. São Paulo, Brasil: [s.n.].

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** 2. ed. São Carlos: Rima, 2005. 1565 p. 2 v.

EMMENDOERFER, M. L. **Filtração Lenta com Retrolavagem para propriedades rurais de uso familiar.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

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

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

HELLER, L. **Relação Entre Saúde e Saneamento Na Perspectiva Do Desenvolvimento.** **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 3, n. 2, p. 73–84, 1998.

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

HUISMAN, L. **Slow sand filtration.** Belgica: World Health Organization, 1974. 120 p.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água. 3a. ed. Campinas: Editora Átomo, 2010.

LUNARDI, S. **Estudo de arranjo granulométrico e condições operacionais de pré filtração seguida de filtração lenta.** 122 p.; Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Campus de Frederico Westphalen, Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, RS, 2021.

MALDONADO, V.; VARGAS, L. C.; BARRENECHEA, A. - **Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida- Manual I - Teoría tomo II.** Capítulo 3: Filtración. pp. 83-152. CEPIS. Lima, 2004

MARNOTO, M. J. E.; et al. A influência da expansão da areia durante a retrolavagem na qualidade de água para abastecimento produzida por filtros lentos. In: Congreso Interamericano AIDIS, 2008, Santiago. **Anais do XXXI Congreso Interamericano AIDIS.** Santiago: Aidis, 2008. p. 1 - 7.

NAKAMOTO, N. et al. **Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes.** IWA Publishing, Ed. 2014.

MCNAIR, D. et al. Schmutzdecke Characterization of Clinoptilolite-Amended Slow Sand Filtration. **Journal AWWA**, n. C, 1987a.

MEDINA, L. R. Uso de filtros lentos para el tratamiento de agua a nivel domiciliario. **Ingeniería Hidráulica y Ambiental**, Nova York, p. 44-49. out. 2000.

MELO, L. C. de. **Avaliação da ozonização como pré ou pós-tratamento à filtração direta descendente na remoção de cianobactérias e saxitoxinas.** 2006b. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Tese de Doutorado, 2006.

MICHELAN, D. C. de G. S. et al. Desempenho Do Sistema Filtração Em Margem Seguida de Filtração Lenta Retrolavável Em Ituporanga Santa Catarina. Revista DAE, v. 59, n. 187, p. 28–36, 2011.

MICHIELIN, A. K. **Filtro Lento com Retrolavagem.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MURTHA, N.A; HELLER L. **Avaliação da Influência de Parâmetros de Projeto e das Características da Água Bruta no Comportamento de Filtros Lentos de Areia.** Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil, Vol. 8 – Nº 4. pp. 257 – 267, Out/Dez 2003.

MURTHA, N.A.; HELLER L.; LIBÂNIO, M. **A Filtração Lenta em areia como alternativa tecnológica para o tratamento de águas de abastecimento no Brasil.** 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. II – 085, pp. 1542 – 1556. ABES, 1997.

NETO, A. O. **Desenvolvimento de um sistema simplificado de potabilização de água combinado com as tecnologias da filtração lenta retrolavagem e adsorção para uso em propriedades rurais.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

PIZZOLATTI, B. S. **Estudos de limpeza de filtro lento por raspagem e retrolavagem.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

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

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

ROECKER, P. B. **O efeito da retrolavagem como método de limpeza de filtros lentos no desenvolvimento da biomassa no meio filtrante.** 2018. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Relatório Final apresentado ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Florianópolis, 2018.

SÁ, J. C. **Influência das características da camada filtrante e da taxa de filtração na eficiência da remoção de *Microcystis aeruginosa* e *microsistina* na filtração lenta em areia.** 2006. 190 f. Tese (Doutor) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.SÁ, J. C.; CELIA, C.; BRANDÃO, S. **Influência do diâmetro efetivo da areia na eficiência da filtração lenta no tratamento de águas contendo *Microcystis aeruginosa*.** Lloydia (Cincinnati), v. 518, 2004.

SENS, M. L. **Curso sobre filtração de água para um grupo de extensionistas rurais – UFSC – Florianópolis, SC 1992.**

SOUZA, F. H. d. **Estudo da biomassa e comunidade bacteriana em filtros lentos retrolaváveis**. 2020. 323 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2020

STUPP, A. J. **Avaliação do funcionamento de um filtro lento com retrolavagem automática para o tratamento de água de abastecimento em pequenas comunidades**. 2016. 48 f.. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

STUPP, A. J. **Avaliação de sistema de filtração lenta retrolavável com dupla camada filtrante para tratamento de água em pequenas comunidades**. 2021. 16 f. Pré-projeto submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

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).

VALENCIA, J. A. Filtracion Lenta. In: Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1981. p. 588.

UNICEF, W. **Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: 2017 update and SDG baselines**. Genebra: Ed. 2017.

USEPA. **The History of Drinking Water Treatment**. . United States Environmental Protection: [s.n.]. , 2000

WHO – **World Health Organization**. Slow sand filtration. Genebra, Suíça, 1974.

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

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

7 APÊNDICE 1

7.1 PLANILHA DE CÁLCULO DO ENSAIO GRANULOMÉTRICO DA AREIA I

Areia						
Peneira		Peso da peneira (g)	Peneira + Material (g)	Material retido (g)	Passante	Acumulada
n°	# (mm)					
16				0	0,00	100,00%
30	0,85	413,45	413,55	0,1	0,10	99,97%
40	0,6	348,25	353,07	4,82	4,92	98,48%
50	0,425	281,06	494,91	213,85	218,77	32,63%
70	0,3	362,81	439,9	77,09	295,86	8,90%
100	0,25	332,3	353,46	21,16	317,02	2,38%
200	0,212	347,36	352,95	5,59	322,61	0,66%
Fundo		317,1	319,24	2,14	324,75	0,00%
		Peso total (g)	324,75			

7.2 PLANILHA DE CALCULO DO ENSAIO GRANULOMÉTRICO DO ANTRACITO

Antracito						
Peneira		Peso da peneira (g)	Peneira + Material (g)	Material retido (g)	Passante	Acumulada
n°	# (mm)					
						100,00%
4	4,75	402	402	0	0,00	100,00%
5	4	401,75	401,75	0	0,00	100,00%
10	2	387,11	483,9	96,79	96,79	66,19%
12	1,7	375,74	409,28	33,54	130,33	54,48%
16	1,17	380,3	463,78	83,48	213,81	25,32%
18	1	383,48	394,75	11,27	225,08	21,39%
20	0,85	413,53	441,62	28,09	253,17	11,57%
25	0,71	377,66	387,87	10,21	263,38	8,01%
30	0,6	348,38	364,53	16,15	279,53	2,37%
40	0,425	281,18	287,01	5,83	285,36	0,33%
50	0,3	362,88	363,52	0,64	286,00	0,11%
60	0,25	332,38	332,48	0,1	286,10	0,07%
70	0,212	347,44	347,48	0,04	286,14	0,06%
80	0,18	354,71	354,73	0,02	286,16	0,05%
Fundo		327,94	328,09	0,15	286,31	0,00%
			Peso total (g)	286,31		