



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

MARCELO DA SILVA SCHORR

**DESEMPENHO DE SISTEMA DE FILTRAÇÃO GRANULAR NO TRATAMENTO
DOS EFLUENTES DA UFFS, CAMPUS CERRO LARGO**

CERRO LARGO

2019

MARCELO DA SILVA SCHORR

**DESEMPENHO DE SISTEMA DE FILTRAÇÃO GRANULAR NO TRATAMENTO
DOS EFLUENTES DA UFFS, CAMPUS CERRO LARGO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitário da Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: Prof. Dr. Bruno München Wenzel

CERRO LARGO – RS

2019

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Schorr, Marcelo da Silva
Desempenho de sistema de filtração granular no
tratamento dos efluentes da UFFS, campus Cerro Largo /
Marcelo da Silva Schorr. -- 2019.
54 f.:il.

Orientador: Dr Bruno München Wenzel.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, RS ,
2019.

1. Tratamento de efluentes. 2. Filtração granular. 3.
Leito fixo . 4. Rocha basáltica. I. Wenzel, Bruno
München, orient. II. Universidade Federal da Fronteira
Sul. III. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

MARCELO DA SILVA SCHORR

**DESEMPENHO DE SISTEMA DE FILTRAÇÃO GRANULAR NO TRATAMENTO
DOS EFLUENTES DA UFFS, CAMPUS CERRO LARGO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: Prof. Dr. Bruno München Wenzel

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

04, Junho, 2019

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Bruno München Wenzel – UFFS/ Campus Cerro Largo



Juliana Marques Schontag – UFFS/ Campus Cerro Largo



Márcio Antônio Vendruscolo – UFFS/ Campus Cerro Largo

À minha família, pelo carinho e apoio durante todas as etapas da minha vida, sempre me dando força e a base necessária, e ao professor Bruno M. Wenzel pelo auxílio, paciência e incentivo na orientação deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal da Fronteira Sul, pela oportunidade da realização da Graduação no curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, que me permitiu ter uma formação acadêmica e um ensino de qualidade

Agradeço ao professor Bruno München Wenzel, que sempre terei como exemplo, pelo apoio, ensinamentos, pela paciência e pela disposição e orientação, não só no trabalho de conclusão de curso, mas também ao longo de toda a minha formação acadêmica.

Agradeço a professores, técnicos e servidores da UFFS que sempre estiveram a disposição para auxiliar em todos os momentos que foram necessários.

A minha família, por acreditarem em mim, pelo incentivo e apoio em todos os momentos, em especial ao meu pai Felipe Luiz Schorr e minha mãe Abigail da Silva Schorr que estiveram sempre presentes em todas as fases de minha vida e sempre estiveram ao meu lado me dando apoio.

Aos colegas e amigos que fiz nesta caminhada, que sempre estiveram ao meu lado e que eu levarei para a vida toda.

“As circunstâncias do nascimento de alguém são irrelevantes. É o que você faz com o dom da vida que determina quem você é.”

(Pokémon o Filme: Mewtwo Contra-Ataca, 1998)

RESUMO

No contexto brasileiro atual – que apresenta déficit em relação ao tratamento de efluentes – devem ser priorizados métodos simples, de baixo custo e/ou que proporcionem uma intensificação do processo. A filtração granular (filtração rápida) pode se apresentar uma alternativa, visto que são capazes de remover partículas de um fluido pela passagem do mesmo através de um leito composto de material granular. Na filtração granular, diferentes mecanismos são responsáveis pela remoção das partículas, os quais dependem das condições operacionais e características da suspensão e do meio granular utilizados. Para este trabalho foi realizada uma corrida experimental de 23 dias, na qual foi utilizado efluente da estação de tratamento da UFFS campus Cerro Largo/RS, que foi retirado logo após a etapa de lodos ativados, com a utilização de rocha basáltica como meio filtrante, onde foi mantida uma vazão constante de 800 ccm nas primeiras horas de experimento e alterada para 400 cm após 115 horas de operação. O desempenho do sistema de filtração foi determinado através de análises de demanda química de oxigênio, sólidos total, sólidos suspensos e turbidez, na entrada e saída do sistema. Foi ajustado um modelo matemático baseado para descrição da eficiência de filtração ao longo do tempo de operação, baseado nos dados de turbidez obtidos. Apesar da grande variabilidade das características do efluente, o modelo foi relativamente bem ajustado aos dados experimentais. Ainda, a variação de carga no leito foi alvo de análise. Foram obtidas eficiências de remoção de turbidez na faixa entre 50 e 80%. Desta forma podemos concluir que o filtro granular utilizando rochas basáltica como meio filtrante é um método viável para o tratamento de efluentes, principalmente se para diminuição de parâmetros relacionados com a presença de particulados.

Palavras-chave: Filtração granular, coeficiente de filtro, leito fixo e móvel, rocha basáltica.

ABSTRACT

With regard to data flow, it is important that the process of cost reduction be more important, smaller or larger or larger is the process of intensification of the process. A granular (rapid filtration) filtration may be presented as an alternative, being able to remove light particles by passing through a bed composed of granular material. Granular filtration, the options are protected against particles, particulate carriers and the characteristics of the suspension and the granular medium used. For the field was the experimental of 23 days, in the status of the treatment of the UFFS campus Cerro Largo / RS, that was retired soon after the stage of activated sludge, with a usage of basaltic rock as to medium filter, Time of the operation was changed to 800 cm after the first hours of experiment and change to 400 cm after 115 hours of operation. The performance of the filtration filter was determined by chemical, oxygen demand, solids, solids, suspended and turbidity responses at the entrance and exit of the system. A mathematical model was used to describe the filtration efficiency over the operating time, based on the obtained turbidity data. Despite the wide variety of effluent characteristics, the model did quite well with the experimental data. Also, a load variation was not analyzed. Turbidity removal efficiencies in the range of 50 to 80% were achieved. In this way we can conclude that the granular is used as a central filter for the effluent filtration, mainly for the filtration of particles with the presence of particles.

Keywords: Granular filtration, filter coefficient, fixed and mobile bed, basaltic rock.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fotografia da estação de tratamento de efluentes do Campus Cerro Largo da UFFS.....	22
Figura 2: Estrutura do protótipo (a) esquema do módulo de filtração e (b) fotografia do sistema construído.	23
Figura 3: Bocal de saída da coluna, torneira e conexão para o piezômetro.	25
Figura 4: Rotâmetro acoplado ao módulo de filtração.	26
Figura 5: Amostras de rocha basáltica do maior para o menor, amostra 1 (a), amostra 3 (b) e amostra 6 (c).....	28
Figura 6: Curva de calibração para determinação da DQO.....	30
Figura 7: Turbidímetro TS-10.	31
Figura 8: Sistema para determinação da variação de carga de leito limpo.....	32
Figura 9: Dados operacionais: (a) turbidez na entrada da coluna ao longo do tempo; (b) velocidade superficial empregada no experimento.	35
Figura 10: Gráfico da eficiência de filtração para NTU através do tempo experimental (a), depósito específico médio (b).....	39
Figura 11: Variação de carga em função longo da velocidade superficial: experimental e modelo de MacDonald.....	41
Figura 12: Variação de carga no filtro ao longo do tempo de filtração.....	43
Figura 13: Gráfico da eficiência baseada em diferentes parâmetros de qualidade das águas em função do tempo da corrida experimental.	44
Figura 14: Gráfico da eficiência em função da concentração de entrada no filtro.....	45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Rocha basáltica utilizada como meio filtrante: distribuição granulométrica e massa utilizada na coluna de filtração.	27
Tabela 2: Amostras selecionadas para a coluna de filtração.	27
Tabela 3: Dados do leito de filtração empregado.	34
Tabela 4: Valores dos parâmetros do modelo obtidos por regressão não-linear.	38
Tabela 5: Valores dos parâmetros do modelo de MacDonald (equação de Ergum modificada).....	41
Tabela 6: Valores dos parâmetros do modelo de variação de carga relativa do filtro (G).	43

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Parâmetro do modelo
Ac	Área da coluna
B	Parâmetro do modelo
C	Concentração de partículas através de um filtro
D	Diâmetro da coluna
Dg	Diâmetro médio do material filtrante
E	Eficiência
E0	Eficiência inicial
F	Coefficiente do filtro
G	Variação de carga relativa
H	Altura da coluna
L	Comprimento do leito
p1	Peso do filtro seco
p2	Peso do filtro com a amostra pós secagem
t	Tempo
Z	Coordenada axial

Letras Gregas

ρ_p	Densidade da partícula
ε_d	Porosidade do depósito formado pelos sólidos removidos
ε	Porosidade
σ_m	Depósito específico mássico
$\bar{\sigma}_m$	Depósito específico mássico médio
λ	Coefficiente de filtro
λ_0	Coefficiente de filtro inicial
α	Vetor de parâmetros
θ	Tempo corrigido
β	Vetor
ΔP	Diferença de pressão
μ	Viscosidade do fluido
u_s	Velocidade superficial
ξ	Parâmetro ajustado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1. FILTRAÇÃO GRANULAR.....	13
3.2. MEIOS FILTRANTES.....	13
3.3 DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	15
3.3.1 Porosidade	15
3.3.2 Concentração de partículas.....	15
3.3.3 Coeficiente de filtro.....	16
3.4 VARIAÇÃO NA PERDA DE CARGA.....	17
3.5 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO	18
3.5.1 Cloretos	19
3.5.2 Matéria orgânica.....	19
3.5.3 Nitritos.....	19
3.6 UNIDADE NEFELOMÉTRICA DE TURBIDEZ	19
3.6.1 Interferentes na turbidez.....	20
3.7 SÓLIDOS TOTAIS E SUSPENSOS	20
3.7.1 Interferentes nos sólidos.....	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1 APARATO EXPERIMENTAL: EFLUENTE E MÓDULO DE FILTRAÇÃO.....	22
4.2 MEIO FILTRANTE	26
4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	28
4.4 AMOSTRAGENS E MÉTODOS ANALÍTICOS	29
4.4.1 Demanda química de oxigênio (DQO).....	29
4.4.2 Sólidos suspensos.....	30
4.4.3 Sólidos totais	31
4.4.4 Turbidez e diferença de pressão	31
4.5 TESTE HIDRÁULICO	32
4.6 AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS.....	33

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1 CORRIDA EXPERIMENTAL DE FILTRAÇÃO.....	34
5.2 MODELAGEM DA FILTRAÇÃO GRANULAR.....	36
5.3 REGRESSÃO NÃO-LINEAR DO MODELO COM BASE NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ	37
5.4 AJUSTES DE MODELOS PARA A VARIAÇÃO DE CARGA.....	40
5.4.1 Variação de carga em leito limpo.....	40
5.4.2 Variação de carga durante a filtração	42
5.5 DEMAIS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	43
6 CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos gerados pelo aumento no consumo e pelo crescimento da população se tornaram um fator preocupante, tendo em vista, entre outros, os déficits na coleta e tratamento de esgoto e efluentes. Este déficit leva à necessidade de investigação e pesquisa de sistemas de tratamento de efluentes visando o desenvolvimento de novas tecnologias e melhoramento daquelas já existentes.

Um levantamento feita pela agência Nacional de Águas (ANA) em 2017, realizada em 5.570 municípios brasileiros apontou que 43% da população brasileira urbana é atendida por sistema coletivo (rede coletora e estação de tratamento de esgotos); 12%, por solução individual (fossa séptica); 18% se enquadram na situação em que os esgotos são coletados, mas não são tratados; e 27% não possuem coleta nem tratamento de esgoto. Somando os cidadãos que não têm esgoto tratado e os que não têm coleta, correspondem há 45% da população, cerca de 93,6 milhões de habitantes.

Entre outras dificuldades, está a escala e tamanho demandado (área) pelos sistemas e reatores convencionais para que se atinja um desempenho adequado. Ainda, dependendo do sistema utilizado e a forma com que é operado, pode haver a possibilidade de despejo de lodo juntamente com o efluente a ser lançado em corpos hídricos.

Tendo em vista esse cenário os reatores de lodos ativados têm sido empregados devido ao fato de possibilitar a intensificação do tratamento, melhorando a eficiência e reduzindo o tamanho dos sistemas. O sistema de lodos ativados não exige grandes requisitos de áreas como lagoas de estabilização, por exemplo. No entanto há um alto grau de mecanização e um elevado consumo de energia. O efluente passa pelo reator, onde ocorre a remoção da matéria orgânica e depois pelo decantador, de onde sai clarificado após a sedimentação dos sólidos (biomassa) que formam o lodo de fundo (SPERLING, 1997).

Assim, nestes reatores, torna-se necessária a utilização de uma etapa de separação do lodo, possibilitando o seu reciclo para o sistema. Outra demanda importante diz respeito a implantação de etapas de pós-tratamento capaz de remover o lodo gerado nos sistemas para se atingir uma maior qualidade do efluente. Assim, um dos desafios atuais é o desenvolvimento de sistemas de tratamento simples, eficientes e adaptáveis às condições econômicas e de disponibilidade de espaço.

A aplicação de filtros granulares (filtração rápida) para o tratamento de efluentes vem sendo uma alternativa bastante estudada. Pois é considerada economicamente viável em

vista de seu baixo custo de implantação e por apresentar resultados satisfatórios. O uso de dois ou mais tipos de meios filtrantes, pode ser implantada em cadeia com mais de um filtro para uma melhor eficiência do processo.

Entretanto, quando da saturação dos meios filtrantes, os mesmos devem passar um processo de retrolavagem, de forma a remover as partículas retidas no material e recuperação do meio filtrante. Para isto, o processo de fluidização pode ser empregado. Este envolve a suspensão do sólido numa corrente ascendente de fluido a uma velocidade suficientemente elevada para causar a flutuação e movimentação vigorosa das partículas. Desta forma as partículas sólidas previamente removidas no filtro são resuspensas na água de retrolavagem, pode ser encaminhada novamente ao reator. No presente trabalho não foi realizado este processo, pois não havia condições experimentais para realizar o mesmo.

Neste trabalho é proposto, de forma geral, a utilização de um sistema de coluna de filtração granular (filtração rápida) que opera em leito fixo (filtração), filtração descendente. A coluna opera de forma que o meio filtrante vai acumulando matéria orgânica ao longo do tempo, até sua colmatação que durou cerca de 138 horas de operação. Desta forma, quando a tecnologia é aplicada para o efluente de um reator de lodos ativados, a biomassa celular removida tem a possibilidade de retornar ao reator através da retrolavagem do leito, que proporciona o aumento da concentração de bactérias e, conseqüentemente, o aumento da velocidade das reações biológicas.

O presente trabalho se propõe a investigar o desempenho da filtração granular com a utilização de fragmentos de rocha basáltica como meio filtrante. Para isto, foi confeccionado uma coluna de filtração e foram utilizadas três diferentes granulometrias de rocha basáltica como meio de filtração granular. Para os testes, foi utilizado o efluente proveniente da estação de tratamento da UFFS, Campus de Cerro Largo. O desempenho do filtro foi monitorado ao longo do tempo, com avaliações das concentrações de sólidos totais (ST), demanda química de oxigênio (DQO), perda de carga (ΔP) e turbidez. A operação utilizou velocidade superficial fixa. Foram empregados modelos matemáticos para descrição da eficiência de filtração e variação de carga em função do depósito específico mássico médio no leito.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho foi investigar o desempenho da filtração granular no efluente do Campus Cerro Largo da UFFS com a utilização de fragmentos de rocha basáltica como elemento filtrante.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Confeccionar uma coluna de filtração granular acoplada à estação de tratamento de efluentes do Campus Cerro Largo da UFFS.
- II. Caracterizar e utilizar rocha basáltica como meio filtrante, incluindo três diferentes granulometrias.
- III. Realizar testes hidrostáticos, avaliando a perda de carga no filtro em função da velocidade superficial empregada.
- IV. Caracterizar o afluente e o efluente do filtro, realizando mensuração dos seguintes parâmetros: concentrações de sólidos totais (ST), demanda química de oxigênio (DQO) e turbidez. Acompanhar a perda de carga (ΔP) durante o processo.
- V. Ajustar e aplicar modelos matemáticos para avaliar a eficiência do processo de filtração (com base no parâmetro turbidez) em função do depósito específico mássico médio.
- VI. Ajustar aos dados experimentais e aplicar modelos matemáticos para descrição da perda de carga no filtro com base na perda de carga inicial e do depósito específico mássico médio.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. FILTRAÇÃO GRANULAR

A filtração como um processo de separação de partículas e fluidos é uma prática de engenharia de longa data. A separação na filtração é efetuada passando uma mistura fluido-partícula através de um meio com partículas retidas pelo meio e passagem de fluido através dele. Para ser mais específico e descritivo do processo conduzido, dependendo de fatores como o mecanismo de retenção de partículas operativas, o tipo de meio utilizado, o fluxo, configuração e o sistema tratado. Apesar das diferenças do meio e do sistema, problemas decorrentes do fluxo de suspensões de fluidos através de meios porosos (tecido granular, fibroso) e a deposição de partículas concomitante pode ser analisada usando o mesmo conjunto de equações e procedimentos. (TIEN, 2012).

O princípio básico da filtração granular é a remoção de partículas suspensas de um fluxo que passa através do meio filtrante composto pelo material granular. As partículas do fluxo ficam retidas sobre a superfície externa dos grânulos devido à interceptação mecânica ou outros fatores como inércia, gravidade, resistência, difusão, forças eletrostáticas de wandervalls etc.

Pode se dar através de leito fixo ou leito móvel sendo que nas operações envolvendo leitos fixos, o sólido é utilizado com diferentes tamanhos de partículas, dentro de tubos ou tanques nos quais o fluido circula em um determinado conjunto de direção e sentido através do leito poroso. Nesta técnica não se verifica um escoamento uniforme do fluido pelo leito. Já nas operações de leito móvel o sólido em partículas relativamente grandes é continuamente alimentado pelo topo do leito e removido pela base. O fluido pode subir ou descer continuamente pelo leito (LEVESPIEL, 1969).

3.2. MEIOS FILTRANTES

A aplicação dos meios filtrantes para tratamento de água é feita de acordo com a água a ser tratada, objetivando adaptá-la aos padrões de potabilidade da Portaria portaria de consolidação nº 5 do do Ministério da Saúde. Os meios filtrantes são geralmente de camada simples ou dupla. Sendo assim, de acordo com as irregularidades dos padrões de potabilidade da água é indicado um determinado meio filtrante para ser colocado dentro

do filtro, desta forma são encontrados na literatura principais meios filtrantes para o tratamento de água, sendo eles: areia, carvão ativado, quartzo mineral, antracito e mantas filtrantes.

A filtração em meio granular, principalmente em areia e carvão ativado, tem ganhado destaque no meio científico por se apresentar como uma alternativa de baixo custo de instalação, fácil operação e boa eficiência para remoção de sólidos suspensos, matéria orgânica, nutrientes, microrganismos e micro poluentes, adequando o efluente final aos padrões legais de lançamento em corpos d'água e reuso (TOSSETO, 2005).

Esen *et al.* (1991) relata a eficiência da filtração lenta de areia na remoção de algas de efluentes de alto nível de lagoas. Para este estudo foi construído um sistema de lagoa piloto nas instalações da Estação de Tratamento de Efluentes Ardiya. O sistema lento de filtragem de areia foi considerado eficiente na remoção de todas as algas do lago integrado efluentes, produzindo água cristalina com turbidez de menos de 3 NTU, que é menor do que a maioria água potável. O DBO do efluente filtrado é inferior a 20 mg /l, satisfazendo assim a qualidade da água, critérios para irrigação e descarga para receber águas. A filtragem de areia também é eficaz na remoção de bactérias coliformes.

Satalles *et al.* (2015) analisou a eficiência de remoção de fibras de poliéster após a filtração por pulso reverso na remoção de partículas micrométricas de calcário dolomítico. Os ensaios de filtração foram realizados mantendo-se a velocidade de filtração constante a 4 cm/s, com variação de carga de 100 Pa e o tempo de pulso de 200ms, a cada limpeza do meio filtrante. Sendo que esta eficiência de limpeza do filtro apresentou um decréscimo, de 85,44% no primeiro ciclo e 59,76% no último ciclo avaliado. Entretanto, a eficiência de coleta do meio filtrante foi maior após os ciclos de filtração para partículas de diâmetros maiores que 3 μm . Por isso, pode-se dizer que o meio filtrante, submetido aos ciclos de filtração, torna-se mais eficiente na coleta de partículas maiores de 3 μm , porém a eficiência de remoção da sujeira do filtro por pulso de ar reverso apresenta-se menor.

Schöntag (2015) produziu um estudo para avaliar o desempenho das esferas de poliestireno como elemento filtrante, em filtração rápida descendente. As esferas de poliestireno foram caracterizadas e após simulou-se matematicamente a utilização como elemento filtrante, em aspectos como o coeficiente de permeabilidade do leito filtrante e especialmente parâmetros pertinentes à retrolavagem. Apresentou uma retenção média da perda de carga de 0,517 cm a cada minuto, um índice de remoção de 70% da turbidez e ação da profundidade de filtração ficou em 40 cm aproximadamente. Desta forma

conclui-se que o desempenho das esferas de poliestireno foi satisfatório, sendo possível a sua utilização em escalas maiores, como em estações de tratamento de água para abastecimento.

3.3 DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA

3.3.1 Porosidade

Durante o tempo de filtração, a porosidade do leito diminui pelo acúmulo de partículas nos interstícios do meio filtrante. Estas mudanças são uma função do depósito de massa específica. Na equação 3.1 ε_0 é a porosidade inicial (ou porosidade do leito limpo); ρ_p é a densidade do particulado removido; e ε_d é a porosidade do depósito formado pelos sólidos removidos. O termo $\rho_p (1 - \varepsilon_d)$, sendo ρ_p considerado a densidade da partícula, e σ_m depósito específico mássico, pode ser interpretado como a densidade de depósito aparente (ρ_d). (WENZEL, 2014)

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{\sigma_m}{\rho_p (1 - \varepsilon_d)} \quad (3.1)$$

3.3.2 Concentração de partículas

Para a modelagem do filtro foi encontrado o λ coeficiente de filtro, sendo necessário o conhecimento da eficiência inicial de coleta de partículas, a qual depende muito dos sistemas de filtração, devendo ser ajustadas individualmente para os casos que possuem diferentes tamanhos de partículas do material granular e para as diferentes suspensões a serem filtradas. Foi desenvolvida uma expressão para taxa de filtração proposta por Iwasaki (1937), que pode ser observada na equação 3.2. Esta equação mostra que o perfil de concentração de partículas através de um filtro (c) pode ser percorrida através de uma coordenada axial (z) descrito por uma lei logarítmica.

$$\frac{\partial C}{\partial z} = -\lambda C \quad (3.2)$$

O coeficiente do filtro, em geral, é uma função local dependente do tempo. Em outras palavras, varia com tempo e posição (distância axial) dentro do filtro. Assim, a partir da integração, a eficiência inicial de coleta deverá ser ajustada como um parâmetro do modelo e serem comparadas com diferentes correlações propostas na literatura, como apresentado por Tien e Ramarao (2007). A base para obtenção da eficiência inicial de coleta de partículas deve ser a distribuição granulométrica da suspensão, que deverá ser medida por meio de difração de laser. Desta forma o λ , coeficiente de filtro, é encontrado através de uma função que relaciona L , comprimento (altura) do leito e E_0 , eficiência inicial de remoção de partículas, conforme as equações 3.3 e 3.4.

$$\lambda_0 = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{1 - E_0} \right); \bar{\lambda} = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{1 - E} \right) \quad (3.3);(3.4)$$

A equação 3.5 mostra uma relação para a eficiência total em função da solução do depósito específico de massa média ao longo do tempo corrigido, que permite obter a dinâmica de E na filtração rápida.

$$E = 1 - e^{-\lambda_0 \bar{F} L} \quad (3.5)$$

3.3.3 Coeficiente de filtro

O coeficiente do filtro não permanece constante durante a filtração e muda em função do depósito de partículas. O coeficiente do filtro, em função do depósito específico, pode ser expresso como a relação entre o coeficiente do filtro real e inicial (TIEN, 2012; TIEN & RAMARAO, 2007; IVES, 1970) - adimensional. Tendo em vista as propriedades médias do filtro adotado nesta análise, o coeficiente do filtro é expresso como um coeficiente médio do filtro (\bar{F}) e é função dos depósitos médios específicos da massa, conforme a equação 3.6. α é o vetor de parâmetros de um modelo adequado para \bar{F} .

$$\bar{F} = \frac{\bar{\lambda}}{\lambda_0} = f(\alpha, \bar{\sigma}_m) \quad (3.6)$$

$\bar{\lambda}$ e λ_0 são constantes na direção z. O símbolo E é a eficiência total do filtro, definido pela equação 3.5. O subscrito "0" indica as condições iniciais do filtro. A determinação experimental do coeficiente de filtro é inevitavelmente necessária para fornecer informações suficientemente precisas para validação de análises e cálculos. O coeficiente de filtro inicial, λ_0 , u_s como velocidade superficial, fornece um ponto de referência para avaliar o desempenho da filtração (TIEN, 2012).

O tempo corrigido, neste contexto, pode ser expresso pela equação 3.7, onde L é a profundidade considerada na análise.

$$\theta = t - \frac{L}{u_s} \left(\varepsilon_0 - \frac{\bar{\sigma}_m}{\rho_p (1 - \varepsilon_d)} \right) \quad (3.7)$$

3.4 VARIAÇÃO NA PERDA DE CARGA

Com o acúmulo de partículas que ficam depositadas no meio filtrante ocorre uma diminuição da permeabilidade. Devido a isto, mantendo a taxa de filtração constante, ocorre uma variação de carga com o tempo (TIEN, 2012). A variação de carga pode ser formulada por meio da variação de carga relativa (razão entre a variação de carga atual e inicial em um leito com profundidade L), com o símbolo \bar{G} , representada pela equação 3.8. É uma função do depósito específico mássico médio, $\bar{\sigma}_m$, e de parâmetro do modelo (vetor $\underline{\beta}$). A forma específica da variação da variação de carga relativa depende do filtro (e material granular utilizado) e das características da suspensão a ser filtrada (WENZEL, 2013).

$$\bar{G} = \frac{(\Delta P/L)}{(\Delta P/L)_0} = f(\underline{\beta}, \bar{\sigma}_m) \quad (3.8)$$

$(\Delta P/L)$ é a variação de carga por unidade de comprimento e $(\Delta P/L)_0$ é a variação de carga por unidade de comprimento inicial, ou seja, de leito limpo.

A variação de carga inicial pode ser estimada pela Equação de Ergun generalizada – equação 3.9 – proposta por McDonald *et al.* (1979).

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_0 = A \frac{(1 - \varepsilon_0)^2 \mu}{\varepsilon_0^3 d_g^2} u_s + B \frac{\rho(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3 d_g} u_s^2 \quad (3.9)$$

Onde: A e B são parâmetros do modelo, que dependem das características do meio poroso e do fluido que escoar; ε_0 é a porosidade inicial do leito; μ é a viscosidade do fluido; d_g é o diâmetro médio do material filtrante; u_s é a velocidade superficial e ρ é a densidade do fluido. (WENZEL,2014)

3.5 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO

A SABESP define Demanda química de oxigênio (DQO) como sendo um teste utilizado para medir o oxigênio que se equivale à quantidade de matéria orgânica presente na amostra, que está sujeita a oxidação por um agente oxidante.

A DQO é usada como uma medida de oxigênio equivalente ao necessário para oxidar a matéria orgânica contida numa amostra. A DQO tem-se demonstrado uma análise bastante eficiente no controle de sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos sanitários e industriais. (SABESP NTS 004, 1997).

O dicromato de potássio, $K_2Cr_2O_7$, é tido como um agente oxidante prático, pois devido a sua capacidade de oxidar uma grande variedade de substâncias orgânicas em dióxido de carbono e água. Como todos os agentes oxidantes são usados em excesso, deve-se medir a quantidade remanescente no final da reação, de modo a se calcular a quantidade realmente usada na oxidação da matéria orgânica.

Para o dicromato de potássio oxidar completamente a matéria orgânica, a solução deve ser fortemente ácida e ter elevada temperatura. Como resultante, são liberados materiais voláteis, originalmente presentes e também aqueles formados durante o período de digestão, de modo a evitar a perda destes materiais. Para catalisar a reação de oxidação utiliza-se a prata, adicionando-se a mesma na forma de sulfato de prata ao ácido sulfúrico, previamente dissolvido (SABESP NTS 004, 1997). Certos compostos podem interferir ao longo da análise.

3.5.1 Cloretos

Íons orgânicos reduzidos podem ser oxidados nas condições do teste de DQO e isto pode causar grandes variâncias nos resultados. Os cloretos podem causar sérios problemas devido a sua alta concentração em muitos efluentes. Esta interferência pode ser eliminada pela adição de sulfato mercúrio, HgSO_4 , na amostra, antes da adição de outros reagentes.

3.5.2 Matéria orgânica

A eliminação de interferentes de traços de matéria orgânica da vidraria, de água deionizada e dos reagentes, deve ser feita através de uma prova em branco para cada lote de reagentes e de água deionizada.

3.5.3 Nitritos

Raramente ocorrem quantidades significativas de nitrito nos esgotos e nas águas naturais. Por isso, normalmente esta interferência é ignorada. O mesmo raciocínio é válido para outras espécies inorgânicas reduzidas como ferro ferroso, sulfeto, manganês manganoso etc.

3.6 UNIDADE NEFELOMÉTRICA DE TURBIDEZ

Turbidez é a quantificação da interferência de absorção de luz incidente em uma amostra, provocado por materiais diversos em suspensão.

A turbidez é um dos parâmetros físicos mais importantes no monitoramento de mananciais, tratamento e distribuição das águas de abastecimento público. Além do fator estético, a turbidez está intimamente relacionada com outros parâmetros químicos e biológicos. No processo das estações de tratamento de água a turbidez é o principal parâmetro para determinar a eficiência dos processos de decantação e filtração (SABESP NTS 008, 1999).

As coletas de amostras para análise de turbidez devem ser feitas em frascos de vidro ou plásticos, previamente limpos e isentos de qualquer partícula que possa permanecer em suspensão na amostra. As amostras devem ser analisadas com a maior

brevidade possível. Em águas naturais superficiais, quando não houver condições de análise imediata, devem ser preservadas sob refrigeração por um período máximo de 48 horas, minimizando-se a interferência provocada por microrganismos e transformações químicas (SABESP NTS 008, 1999).

3.6.1 Interferentes na turbidez

A turbidez pode ser determinada em qualquer amostra de água, desde que estejam ausentes materiais grosseiros em suspensão que precipitem rapidamente. A presença de bolhas de ar provoca falsos resultados. A cor não interfere de forma representativa nos resultados. Deve-se utilizar cubetas sem imperfeições em suas paredes e ter uma marca de referência na mesma para aferição do equipamento e leitura das amostras.

3.7 SÓLIDOS TOTAIS E SUSPENSOS

A qualidade do tratamento aplicado às águas naturais e residuárias está diretamente relacionada as diversas substâncias nelas existentes, seja pela variedade ou pela quantidade destas substâncias. Os dados de sólidos têm sua importância para o acompanhamento na eficiência dos sistemas de tratamento para águas naturais e residuárias. (SABESP NTS 013, 1999).

Sólido é o estado da matéria caracterizado pela rigidez, por uma forma própria e pela existência de um equilíbrio com o líquido proveniente da sua fusão. Neste estudo são trabalhadas duas definições sendo elas: sólidos totais que se refere a todas as substâncias que permaneçam na cápsula após a total secagem de um determinado volume de amostra; e sólidos em suspensão que são todas as substâncias que após filtração e secagem, permaneçam retidas na membrana.

3.7.1 Interferentes nos sólidos

A ação de interferentes em análises de sólidos é limitada pela sua própria concentração nas amostras. Águas com concentrações significativas de cálcio, magnésio, cloretos e sulfatos, requerem uma secagem mais longa, adequada dessecação e uma rápida pesagem. É necessário desconsiderar materiais que descaracterizem as amostras; como:

grandes partículas flotantes ou aglomerados submergidos de materiais não homogêneos. Pois estes podem favorecer um resultado falso na quantidade de sólidos presentes na amostra (SABESP NTS 013, 1999).

Assim como deve-se remover óleos e graxas visíveis, pois caso haja quantidade excessiva pode-se formar incrustações que absorvam água e com isso forneçam falsos resultados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 APARATO EXPERIMENTAL: EFLUENTE E MÓDULO DE FILTRAÇÃO

O efluente utilizado nos experimentos foi retirado diretamente dos tanques de tratamento, posterior a etapa de lodos ativados da estação de tratamento de efluentes (ETE) do Campus Cerro Largo da UFFS. Foi empregada uma mangueira com uma válvula de fluxo na ponta, para se evitar a entrada de ar e realizar o sifonamento do líquido. A mangueira provinda da ETE foi conectada ao módulo de filtração. O sistema de tratamentos da UFFS consiste em 5 etapas distintas, sendo elas: o tratamento preliminar, lodos ativados, decantador Dortmund, desinfecção UV e leito de secagem. A Figura 1 apresenta uma fotografia da ETE da UFFS Campus Cerro Largo.

Figura 1: Fotografia da estação de tratamento de efluentes do Campus Cerro Largo da UFFS.

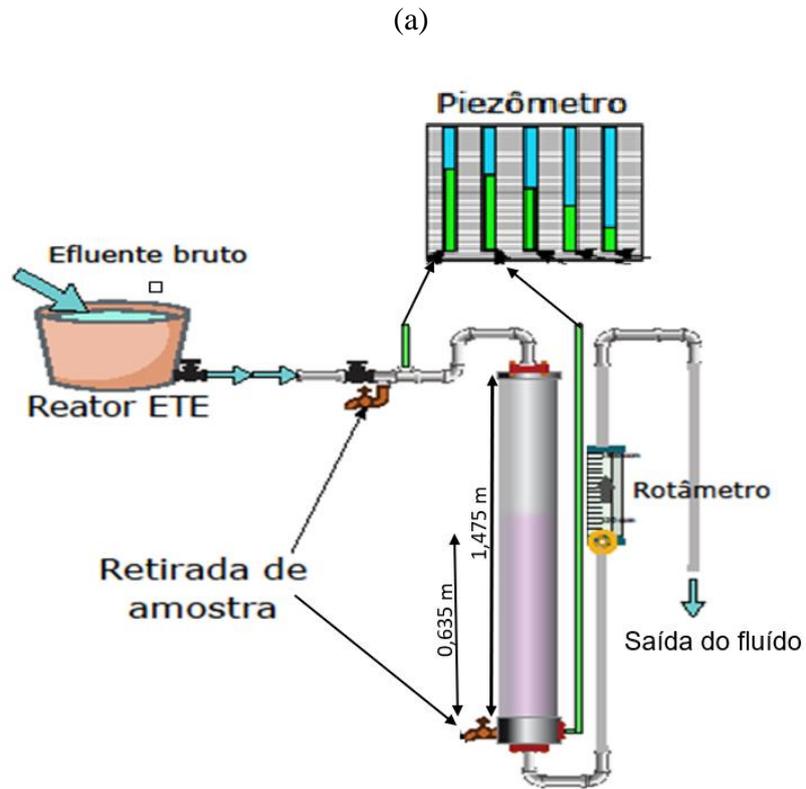


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

O sistema de filtração granular consiste em uma coluna de PVC de diâmetro interno (D) de 100mm e de altura total (H) de 1,475 metros de coluna vazia, conforme apresentado na Figura 2. O sistema pode ser resumido em três partes principais: i) captação do efluente; ii) coluna de filtração, com sistema de coleta de amostras na entrada e na saída do sistema; iii) sistema de medição da vazão volumétrica.

Na entrada, o sistema contou com uma válvula para fechamento/abertura do sistema, conectada através de uma mangueira à captação na ETE e com torneira para retirada de amostra.

Figura 2: Estrutura do protótipo (a) esquema do módulo de filtração e (b) fotografia do sistema construído.



(b)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

As mangueiras de entrada e de saída foram conectados nos bocais, e uma mangueira de menor diâmetro foi adicionada a coluna e ao cano de entrada do fluido com o intuito de conecta-la ao piezômetro que foi colocado a cima da coluna de filtração para se fazer a leitura das pressões de entrada e de saída da coluna.

A coluna de filtração é provida de bocais tipo oliva, no topo e na base, para acoplamento de mangueiras de condução do fluido. Conforme pode ser observado na Figura 3, a coluna é provida de uma torneira de coleta de amostra na base, que representa a saída do fluido da coluna.

Ainda na Figura 3, na base da coluna, pode-se observar um acoplamento do tipo “engate rápido” para a tomada de pressão na coluna em piezômetro. A entrada do sistema também conta com local para acoplamento de mangueira para tomada de pressão. A diferença de altura proporcionada no piezômetro, entre a entrada e a saída do filtro, indicou a variação de carga no leito de filtração.

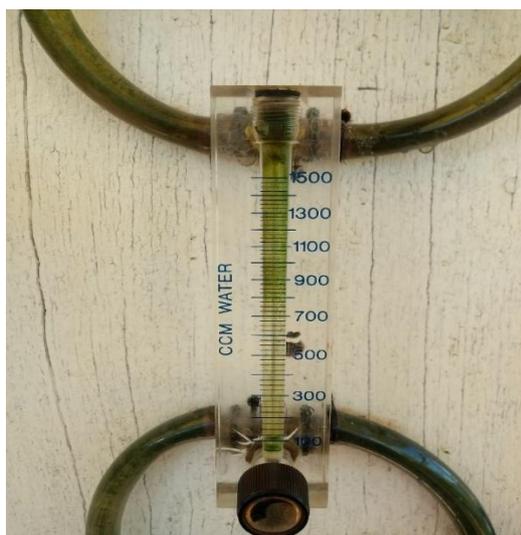
Figura 3: Bocal de saída da coluna, torneira e conexão para o piezômetro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Para a regulagem e leitura das vazões volumétricas na coluna, foi utilizado um rotâmetro na saída do módulo (Figura 4), o qual foi previamente calibrado, sendo estas leituras de vazão feitas no final do módulo de filtração. A calibração foi realizada com água e utilizou-se um béquer, balança analítica de precisão e um cronometro de precisão.

Figura 4: Rotômetro acoplado ao módulo de filtração.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

O descarte do fluído final, pós filtração, se deu através de uma mangueira conectada ao rotômetro, no qual direcionava o fluído até o local de descarte. De forma a se trabalhar com razoável diferença de pressão entre a entrada e a saída do sistema, a ponta da mangueira de descarte de fluído foi equipada com uma válvula de fluxo.

4.2 MEIO FILTRANTE

Como meio filtrante foi utilizado rocha basáltica de três diferentes granulometrias, conforme Tabela 1. A partir de uma amostra do material, este material estava disposto no laboratório da universidade, foi procedida uma distribuição de tamanhos. Foram utilizadas na base as partículas de menor tamanho (entre 2,36 e 2,80 mm), seguido por partículas com diâmetros entre 4,00 e 4,75mm e uma última camada, no topo, com partículas entre 6,30 e 8,0mm. Foi empregada uma relação mássica de aproximadamente 1:4:1. Através da literatura foi encontrado uma densidade de partícula de 2,8 a 3,0 g/cm³.

Após enchimento da coluna, a altura de meio filtrante (H) passou a ser de 0,635 metros. Para este trabalho foi utilizado uma carreira de filtração onde foi definido o diâmetro efetivo da carreira de filtração, sendo encontrado o valor de 42 para o diâmetro efetivo. Desta forma a carreira de filtração está propensa ao efeito parede, que seria a criação de caminhos preferências onde o fluído pode correr dentro do filtro.

Tabela 1: Rocha basáltica utilizada como meio filtrante: distribuição granulométrica e massa utilizada na coluna de filtração.

Amostras	Abertura (mm)	Diâmetro médio da abertura (mm)	Altura da rocha (m)	Distribuição (%)	Massa usada na coluna (kg)
1	> 6,30 < 8,0	7,15	0,1	15,38	0,946
2	> 4,75 < 6,30	5,53			-
3	> 4,00 < 4,75	4,38	0,415	66,95	4,116
4	> 3,35 < 4,00	3,68			-
5	> 2,80 < 3,35	3,08			-
6	> 2,36 < 2,80	2,58	0,12	17,67	1,106
Massa total na coluna =					6,168

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para a definição das porosidades (ϵ) foram efetuados testes com auxílio de uma balança de precisão, água destilada e proveta de volume conhecido. O valor foi encontrado através da relação de volume de vazios, do volume da proveta preenchido com as amostras (500 ml). O volume de vazios foi calculado com base na massa de água adicionada e considerando a densidade da água de 1 g/cm^3 . Para cada granulometria testada, os resultados estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2: Amostras selecionadas para a coluna de filtração.

Dados	Amostra 1	Amostra 3	Amostra 6
Massa Material (kg)	0,676	0,652	0,636
Massa pós adição H ₂ O (kg)	0,924	0,922	0,882
Massa H ₂ O (kg)	0,248	0,27	0,246
Volume de Vazios (ml)	248,74	270,81	246,74
Porosidade (ϵ)	0,496	0,54	0,492

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A coluna foi montada utilizando a maior granulometria (amostra 1) na parte superior da coluna, com o intuito de reter as maiores partículas do efluente bruto. A amostra de média granulometria (amostra 3) foi colocada no centro da coluna com uma massa 4 vezes maior que as demais, por se tratar de uma granulometria média das duas amostras. E a amostra de menor granulometria (amostra 6) foi disposta no fundo da coluna para reter as menores partículas que ainda estiverem no efluente bruto. A Figura 5 apresenta as amostras colocadas lado a lado para comparação de tamanho.

Figura 5: Amostras de rocha basáltica do maior para o menor, amostra 1 (a), amostra 3 (b) e amostra 6 (c).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A corrida experimental foi realizada por meio da preparação do módulo de filtração, e iniciou com o enchimento da coluna e a conexão das mangueiras de condução do fluido. No início da operação, a válvula de entrada no módulo foi aberta e o tempo foi

anotado. A vazão no sistema foi regulada por meio do rotâmetro instalado, esta vazão foi lida na unidade de CCM (centímetro de coluna de água) e foi mantida a 800 ccm até chegar às 115 horas de operação, após este período a vazão foi ajustada para 400 ccm, para se haver uma vazão constante do sistema. Durante o tempo de operação, foram coletadas amostras na entrada e na saída da coluna.

A operação do módulo de filtração totalizou um tempo de 138,08 horas de experimento com início no dia 02/04/2019 até o seu encerramento no dia 24/04/2019. Os experimentos foram feitos apenas em dias letivos (geralmente de segundas há sextas-feiras). Após este período a coluna chegou em seu tempo de vida útil final, ocorrendo a colmatagem do mesmo. Ainda, o sistema operou somente durante o dia, tendo em vista que as características do efluente se modificavam significativamente. A concentração de matéria orgânica do efluente bruto tende a ser menor à noite e em dias não letivos devido à diminuição da circulação de alunos e funcionários da universidade. Portanto a coluna foi colocada em operação pela manhã, em torno das 7:30 horas da manhã, e fechado à tarde, em torno das 17:00 horas.

4.4 AMOSTRAGENS E MÉTODOS ANALITICOS

Durante a corrida experimental, amostras obtidas na entrada e na saída do filtro foram mensuradas para diversos parâmetros. A turbidez e leituras de diferença de pressão e vazão foram determinadas em todos os dias de operação, efetuadas em três períodos diferentes: manhã, tarde e noite. As análises de DQO, sólidos totais e suspensos foram feitos apenas uma vez por dia.

Todas as mensurações foram feitas em triplicatas a fim de se obter o resultado experimental com melhor precisão.

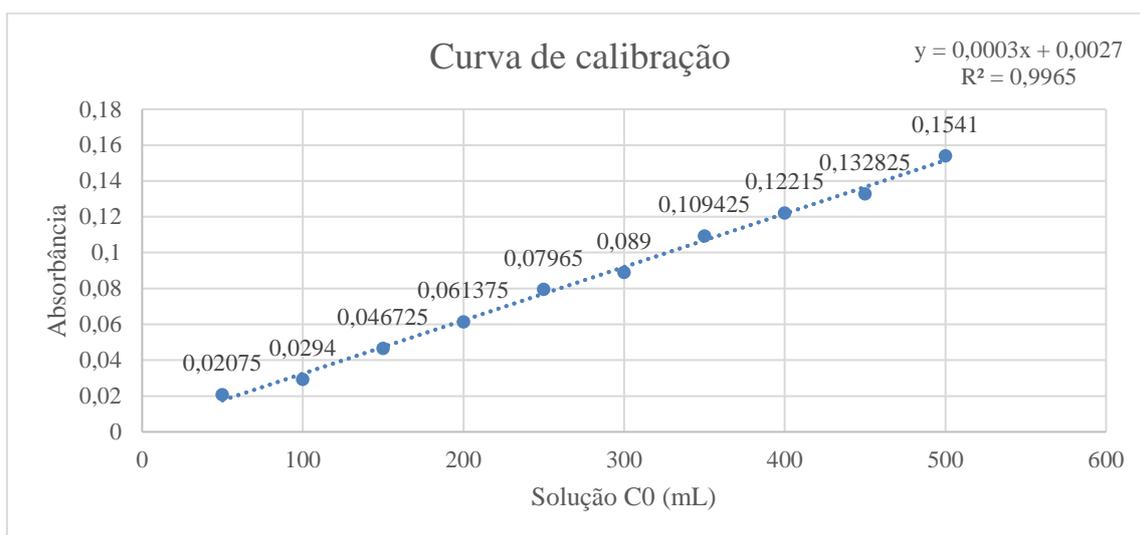
4.4.1 Demanda química de oxigênio (DQO)

As determinações de DQO foram realizadas através do método do dicromato de potássio (SABESP), que utilizou 5 ml da amostra (amostra bruta ou filtrada), 3 ml da solução digestão, 7 ml de reagente de ácido sulfúrico. A amostra foi preparada em tubos de vidro de 20x150 mm, colocado em um bloco digestor a 150 °C por 2 horas e deixado fora do bloco por mais 1 hora para esfriar.

A solução digestão foi preparada com 500 ml de água destilada, 10,216 g de $K_2Cr_2O_7$, 167 ml de H_2SO_4 e 33,3 g de K_2SO_4 , posteriormente diluído para 1L com água destilada. O reagente foi preparado com 5,5 g de $Ag_2SO_4/K_2H_2SO_4$ diluído em um balão de 100 ml.

Com o objetivo de determinar a concentração de material orgânico na amostra do efluente bruto e filtrado, utilizou-se um espectrofotômetro UV-Vis para a realização de varredura para determinação do melhor comprimento de onda, correspondendo ao maior valor da absorbância. O melhor comprimento de onda observado para o traçador foi de 600 nm. A Figura 6 apresenta a curva de calibração, bem como a equação da reta e o coeficiente de correlação R^2 , o qual mostrou-se estaticamente adequado.

Figura 6: Curva de calibração para determinação da DQO.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

4.4.2 Sólidos suspensos

Para esta determinação foram utilizados 100 ml da amostra em sistema de filtração à vácuo, com kitasato e funil de Buckner. Após o procedimento de filtração, o filtro de celulose foi seco e sua massa mensurada. A concentração de sólidos suspensos foi determinada através da razão entre a massa de partículas retidas no filtro e o volume de amostra empregada no processo de filtração.

4.4.3 Sólidos totais

Com o intuito de determinar a quantidade total de sólidos presentes na água residuária, antes e após o processo de filtração granular, foram utilizados 100 ml de amostra em um cadinho previamente pesado. Foi empregada uma estufa com circulação e renovação de ar à 105°C para evaporação completa da água presente na amostra, o que levou um tempo entre 20 e 24 horas. Após o a evaporação completa, a massa de material presente no cadinho foi mensurada em balança analítica e a concentração determinada pela razão entre a massa de sólidos totais e o volume de amostra empregado.

4.4.4 Turbidez e diferença de pressão

As leituras de turbidez foram realizadas com o uso de Turbidímetro TS-10 da Tecnoprom (ver Figura 7), cujos valores obtidos são expressados em Unidade Nefelométrica de Turbidez (NTU).

Figura 7: Turbidímetro TS-10.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

As leituras de vazão e diferença de pressão foram feitas igualmente nos horários de leitura da turbidez, mantendo sempre a vazão constante, 800 ccm nas primeiras horas de operação e 400 ccm após 115 horas de operação, ao longo do tempo de operação.

4.5 TESTE HIDRÁULICO

A determinação da perda de carga inicial no leito é de fundamental importância para a para a modelagem matemática e, conseqüentemente, para a determinação do tempo de da carreira de filtração. Estes testes utilizaram uma caixa d'água de 500 litros (Figura 8) colocada na altura do tanque da estação de tratamento, para se ter um resultado mais próximo do efeito do efluente no filtro. Foram realizadas leituras da perda de carga para diversos valores de vazão volumétrica de água utilizados no leito de filtração limpo, a fim de se criar um gráfico que representa as alterações da perda de carga da coluna para as diferentes vazões.

Figura 8: Sistema para determinação da variação de carga de leito limpo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

4.6 AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS

Com o levantamento dos dados experimentais se fez a análise dos dados mesmos para ajuste de matemáticos que descrevam a filtração em leito composto por meio granular. Para isto, foi empregado o software Matlab para confecção de algoritmos e para o uso das rotinas computacionais necessárias.

Para solução da equação diferencial foi utilizado o método de Runge-Kutta, a partir da condição inicial apropriada. Tendo em vista a forma funcional dos modelos das funções \bar{F} e \bar{G} (coeficiente de filtro médio e queda de pressão relativa), a obtenção dos parâmetros teve que ser obtida a partir de uma otimização não-linear. O problema de otimização consistiu na minimização da função objetivo dos mínimos quadrados.

O método de otimização empregado para minimização da função objetivo foi o algoritmo denominado *Trust-region-reflective optimization algorithm*, descrito por Coleman e Li (1996).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CORRIDA EXPERIMENTAL DE FILTRAÇÃO

A corrida experimental foi realizada em um intervalo de 23 dias, sendo que no período da noite e nos fins de semana a operação foi paralisada. O tempo total de experimentação foi de 138,083 horas, entre os dias 02/04/2019 a 24/04/2019.

Para confecção do leito de filtração, foram utilizadas 3 amostras de rocha basáltica (amostra 1, 3 e 6) de diferentes tamanhos (ver tabela 2). Para cálculo da porosidade média do filtro e do diâmetro médio das partículas do meio filtrante, foi utilizada a média ponderada pelo volume de cada material filtrante utilizado. Os resultados podem ser conferidos na Tabela 3. Esta tabela também apresenta outros dados que foram utilizados para modelagem matemática do sistema.

Tabela 3: Dados do leito de filtração empregado.

Parâmetro	Valor	Unidade
Porosidade média do leito (ϵ)	0,05093	-
Diâmetro médio das partículas (d_p)	0,0047	m
Comprimento da coluna	0,634	m
Área da coluna	78,54	cm ²
Volume da coluna	0,005 (5)	m ³ (L)
Densidade da carreira de filtração	1,237	kg/m ³
Massa total	6,168	kg

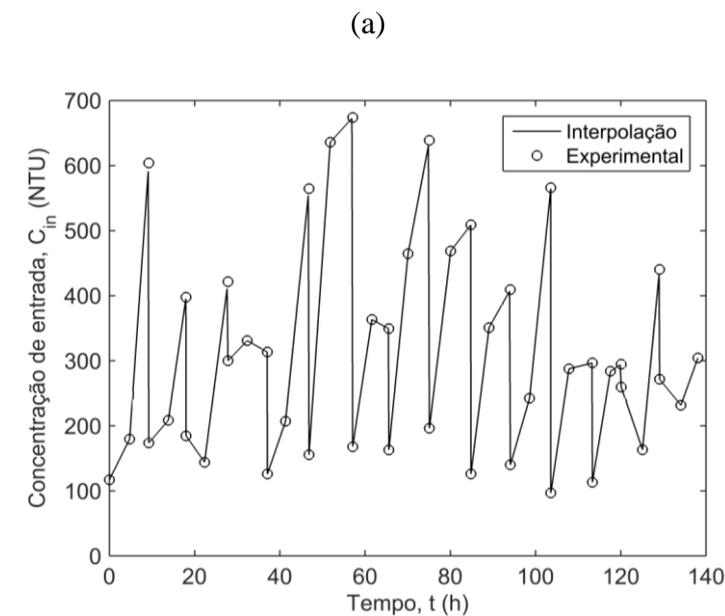
Fonte: Elaborado pelo autor 2019

Cabe destacar que, tendo em vista que o sistema empregou efluente da ETE do Campus Cerro Largo da UFFS, não foi possível a alimentação em uma concentração de carga orgânica constante em todo o tempo de operação do módulo. As condições de início de operação eram variadas a cada dia, pois a concentração de matéria orgânica dependia

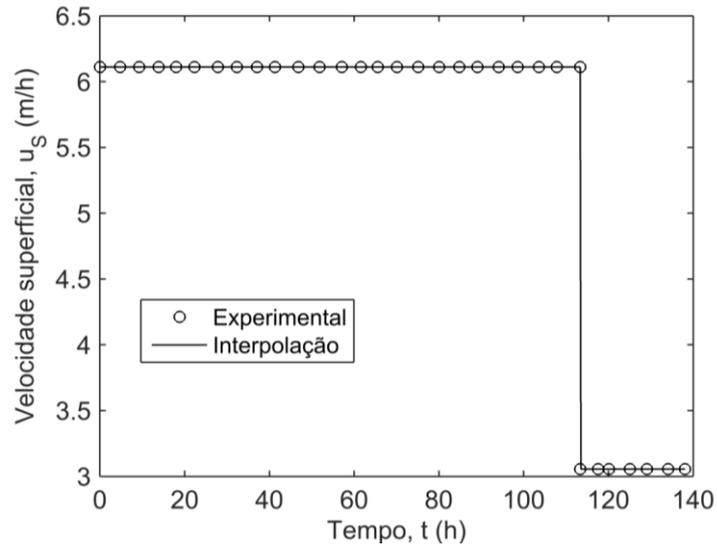
diretamente da circulação de alunos a funcionários e de suas atividades. Este comportamento do sistema pode ser observado na Figura 9 (a).

Foi observado ainda que a matéria orgânica presente dentro da coluna de filtração tende a se depositar no fundo do filtro, acarretando em um acúmulo de matéria orgânica no início das operações diárias. Esta matéria orgânica acumulada era eliminada no início de cada operação, em regime intermitente de fluido. Tendo em vista que há o acúmulo de partículas no filtro ao longo do tempo, o mesmo apresentou elevadas perdas de carga ao final da operação. Com isto, a vazão volumétrica foi alterada de 800 ccm para 400ccm a partir de aproximadamente 115h, a fim de se ter uma vazão constante do módulo, sendo que a partir deste tempo de operação a carreira de filtração apresentou um início de colmatção do processo, conforme apresentado na Figura 9 (b).

Figura 9: Dados operacionais: (a) turbidez na entrada da coluna ao longo do tempo; (b) velocidade superficial empregada no experimento.



(b)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

5.2 MODELAGEM DA FILTRAÇÃO GRANULAR

A partir de um balanço material em um elemento diferencial da coluna de filtração, a Eq. 5.1 pode ser obtida. Esta equação permite obter uma solução para o depósito específico de massa média ao longo do tempo corrigido (Wenzel *et al.*, 2014). Para isso é necessário conhecer uma função específica para o coeficiente de filtro, \bar{F} e adotar uma condição inicial apropriada. A partir desta mesma análise, é possível estabelecer uma relação entre \bar{F} e a eficiência total de filtração, conforme Eq. (5.2).

$$\frac{d\bar{\sigma}_m}{d\theta} = \frac{u_s C_{in}}{L} (1 - e^{-\lambda_0 \bar{F} L}) \quad (5.1)$$

$$E = 1 - e^{-\lambda_0 \bar{F} L} \quad (5.2)$$

O coeficiente do filtro não permanece constante durante a filtração e muda em função do depósito de partículas, e mede a habilidade do sistema em separar partículas de um fluido, sendo definida e representada genericamente pela Eq. (5.3).

$$\bar{F} = \frac{\bar{\lambda}}{\lambda_0} = f(\underline{\alpha}, \bar{\sigma}_m) \quad (5.3)$$

A partir de várias funções propostas na literatura (Tien e Ramarao, 2007), foi utilizado o modelo da Eq. (5.4) para descrição do coeficiente de filtro neste trabalho. O modelo possui quatro parâmetros ajustáveis, sendo que dependem do meio filtrante, bem como da suspensão a ser filtrada.

$$\bar{F} = (1 + \alpha_1 \bar{\sigma}_m)^{\alpha_2} (1 + \alpha_3 \bar{\sigma}_m)^{\alpha_4} \quad (5.4)$$

Apesar de ser possível a obtenção do coeficiente de filtro inicial utilizando correlações propostas na literatura, neste trabalho foi empregado um modelo empírico, conforme apresentado na Eq. (5.5), que propõe a dependência da concentração na entrada do filtro, sendo C_{in} a concentração inicial do leito.

$$\lambda_0 = \xi_1 C_{in}^{\xi_2} \quad (5.5)$$

5.3 REGRESSÃO NÃO-LINEAR DO MODELO COM BASE NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ

A partir dos dados experimentais de turbidez na entrada e na saída do sistema, foi calculada a eficiência do filtro. Estes dados foram utilizados para regressão não linear com base no modelo matemático proposto nas Eq. (5.1), (5.2), (5.4) e (5.5). A partir desta técnica, foram obtidos os parâmetros do modelo que minimizaram a função objetivo dos mínimos quadrados, conforme Tabela 4.

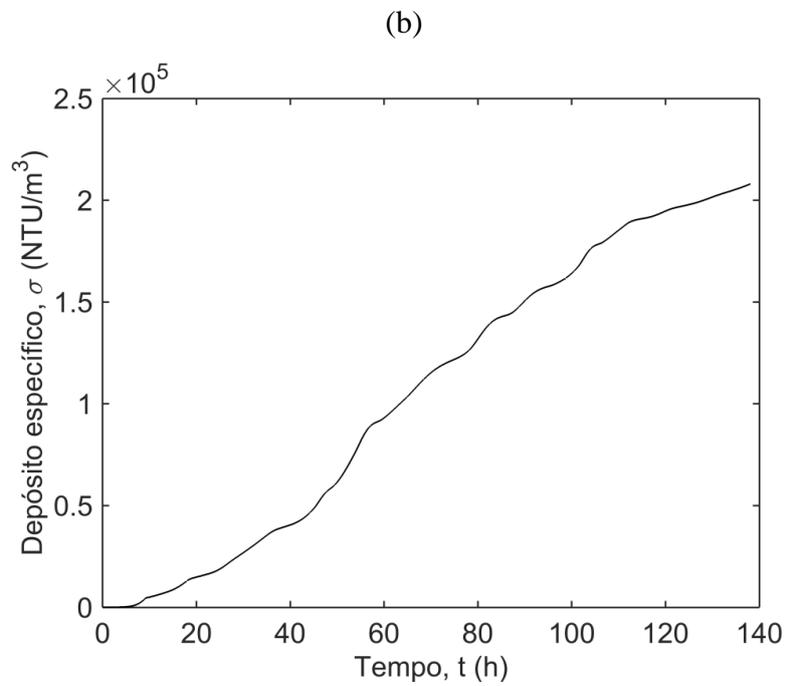
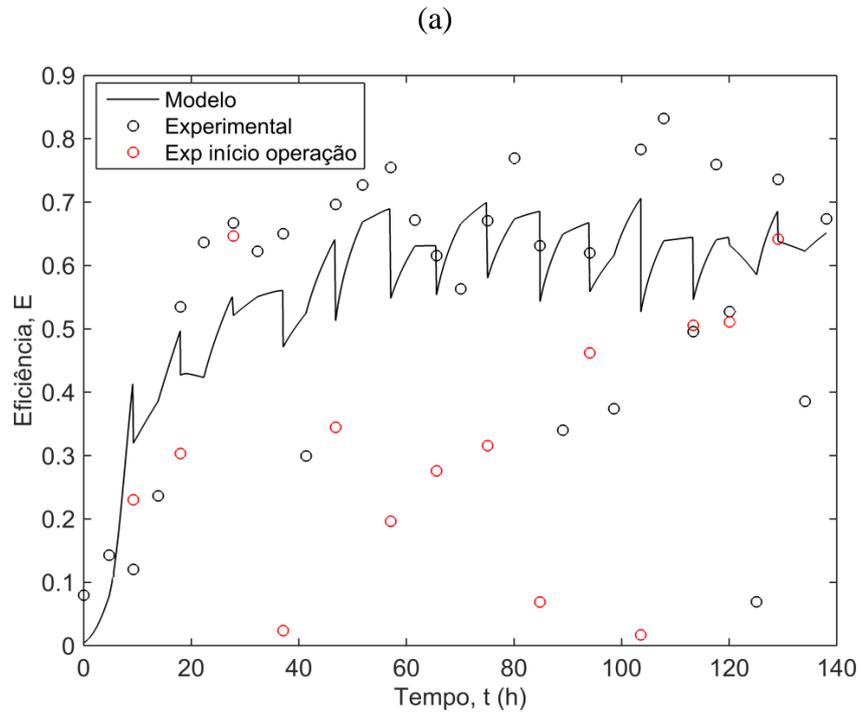
Tabela 4: Valores dos parâmetros do modelo obtidos por regressão não-linear.

Parâmetro ajustado	Valor	Unidade
ξ_1	1.798×10^{-3}	m^{-1}
ξ_2	0.2798	adm
α_1	0.4214	$m^3 NTU^{-1}$
α_2	0.6145	adm
α_3	1.612×10^{-4}	$m^3 NTU^{-1}$
α_4	-0.4986	adm

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Os resultados experimentais e aquele obtido pela solução do modelo matemático proposto, é apresentado na Figura 10, sendo que o depósito específico mássico médio obtido como solução da equação diferencial da Eq. (5.1) foi utilizado para o cálculo da eficiência de filtração (Eq. (5.2)).

Figura 10: Gráfico da eficiência de filtração para NTU através do tempo experimental (a), depósito específico médio (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Através da análise da Figura 10 (a), pode ser observado que o modelo segue os pontos experimentais de eficiência que variam em decorrer do tempo. Esta variação está atrelada ao fato de que a concentração de entrada do efluente bruto não ser constante, influenciando, desta forma, a eficiência e o poder de predição do modelo. Os pontos em vermelho são representados pelos valores experimentais de início de operação de cada dia. Estes pontos foram descartados no ajuste devido à variabilidade associada ao intervalo de tempo em que a coluna esteve parada (à noite e dias não letivos), sendo provavelmente associada aos erros experimentais e falta de uma tendência clara da eficiência ao longo do tempo de operação e conforme depósito de material no filtro.

Apesar dos picos observados, decorrentes da variação de concentração ao longo do tempo, pode-se perceber que a partir de 40 horas de operação o sistema apresentou eficiências entre 50 e 70% de remoção de turbidez.

Já a Figura 10 (b) apresenta o depósito específico em NTU/m³ ao longo do tempo, o qual foi aumentando de acordo com que o tempo de experimentação, apresentando vida útil ainda crescente do material filtrante.

5.4 AJUSTES DE MODELOS PARA A VARIAÇÃO DE CARGA

5.4.1 Variação de carga em leito limpo

MacDonald et al. (1979) revisou a equação de Ergun, onde substituiu as constantes por constantes A e B que devem ser determinados experimentalmente para cada sistema. Esta relação é apresentada na Equação 5.6.

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_0 = A \frac{(1 - \varepsilon_0)^2 \mu}{\varepsilon_0^3 d_g^2} u_s + B \frac{\rho (1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3 d_g} u_s^2 \quad (5.6)$$

Com base nos dados experimentais do teste hidrostático, foram ajustados os parâmetros A e B do modelo em função da alteração da velocidade superficial do fluido através de regressão não linear. A Tabela 5 apresenta os valores destes parâmetros.

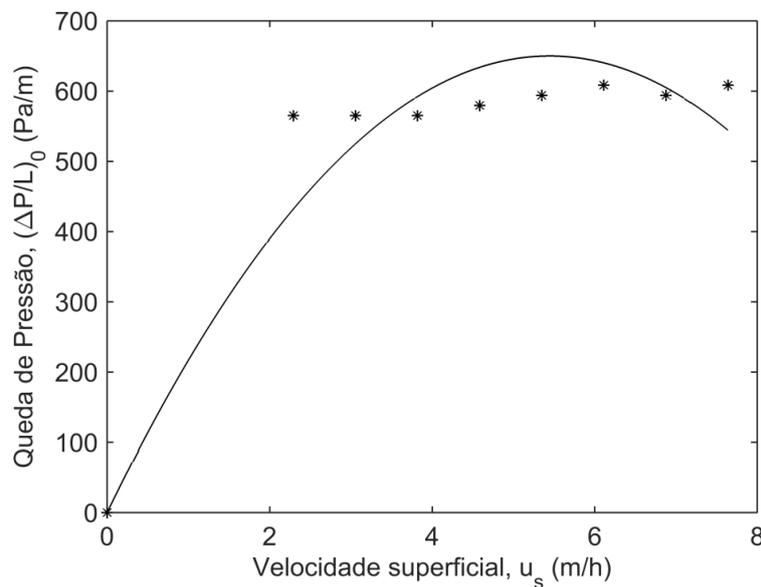
Tabela 5: Valores dos parâmetros do modelo de MacDonald (equação de Ergun modificada)

Parâmetro ajustado	Valor	Unidade
<i>A</i>	6.483×10^{-11}	Adm
<i>B</i>	-384,4	Adm

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A Figura 11 apresenta graficamente os resultados. Pode-se observar que no intervalo de vazão volumétrica que foram utilizadas nos testes hidráulicos, não há significativa alteração na variação de carga. No entanto, a equação quadrática ajustada permitiu a descrição dos dados experimentais através de uma função contínua, necessária para aplicação dos modelos matemáticos.

Figura 11: Variação de carga em função longo da velocidade superficial: experimental e modelo de MacDonald.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

5.4.2 Variação de carga durante a filtração

A partir do ajuste da variação de carga inicial do leito $(\Delta P/L)_0$, e da obtenção de uma solução para o depósito específico mássico médio, foi proposto e ajustado um modelo para a variação de carga relativa do filtro (\bar{G}) (Wenzel *et al.*, 2013). \bar{G} consiste em uma função dependente do $\bar{\sigma}_m$, conforme definição da Eq. (3.8). Ou seja, conforme ocorre o depósito de partículas no leito, ocorre alterações na variação de carga.

$$\bar{G} = \frac{(\Delta P/L)}{(\Delta P/L)_0} = f(\underline{\beta}, \bar{\sigma}_m) \quad (3.8)$$

Existem vários modelos empíricos propostos que representam o efeito de $\bar{\sigma}_m$ sobre a variação de carga. Com base nos dados experimentais obtidos, o melhor modelo é apresentado na Eq. (5.7). Os parâmetros dos modelos não lineares foram obtidos a partir da aplicação da função objetivo dos mínimos quadrados.

$$\bar{G} = (1 + \beta_1 \bar{\sigma}_m)^{\beta_2} \quad (5.7)$$

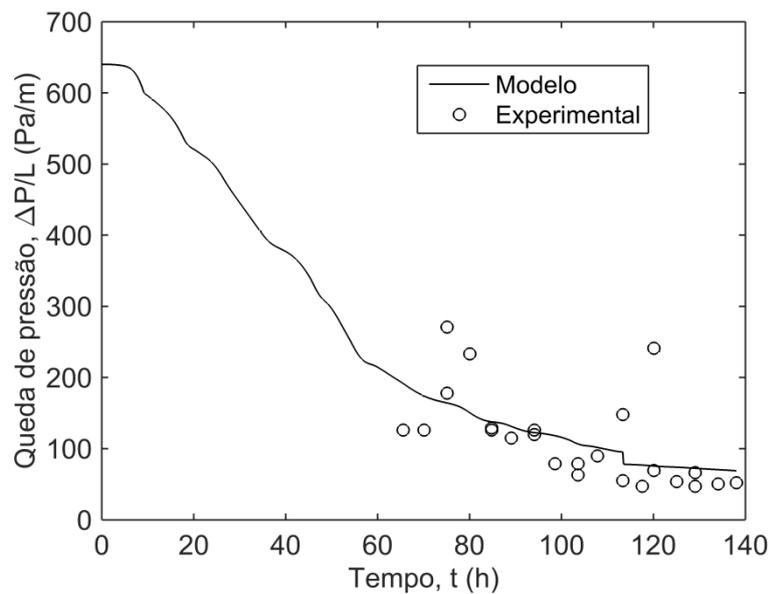
A Tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros que minimizaram a função objetivo dos mínimos quadrados, utilizando a solução para $\bar{\sigma}_m$ obtida anteriormente. Os resultados experimentais e do modelo ajustado são apresentados na Figura 12. Nesta figura pode-se observar uma diminuição da perda de carga com o tempo, a partir do modelo matemático ajustado. Entretanto este não é um comportamento esperado, já que a literatura cita um aumento da resistência ao fluxo com o aumento do depósito de partículas no meio filtrante. Este comportamento pode estar associado a erros nas medidas realizadas com o leito limpo (Figura 11), o qual forneceu as condições iniciais da solução apresentada neste tópico (ver Figura 12). Esta anomalia apresentada pode estar ligada diretamente a variação do nível do fluido dentro do tanque da estação de tratamento.

Tabela 6: Valores dos parâmetros do modelo de variação de carga relativa do filtro (\bar{G}).

Parâmetro ajustado	Valor	Unidade
β_1	$5,211 \times 10^{-6}$	$m^3 NTU^{-1}$
β_2	-2,766	Adm

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

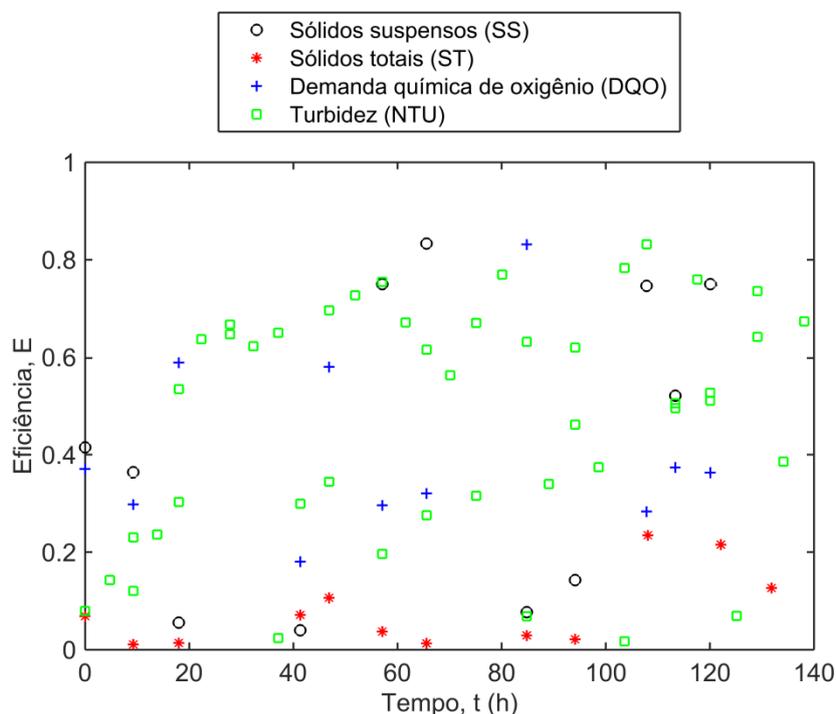
Figura 12: Variação de carga no filtro ao longo do tempo de filtração.



5.5 DEMAIS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Além das análises de turbidez foram feitos testes em laboratório com mais 3 parâmetros, sendo eles, sólidos suspensos, sólidos totais e demanda química de oxigênio. Após encontrar a melhor correlação matemática para a eficiência, foi montado o gráfico da Figura 13 onde apresenta a eficiência de cada análise ao longo do tempo de operação.

Figura 13: Gráfico da eficiência baseada em diferentes parâmetros de qualidade das águas em função do tempo da corrida experimental.



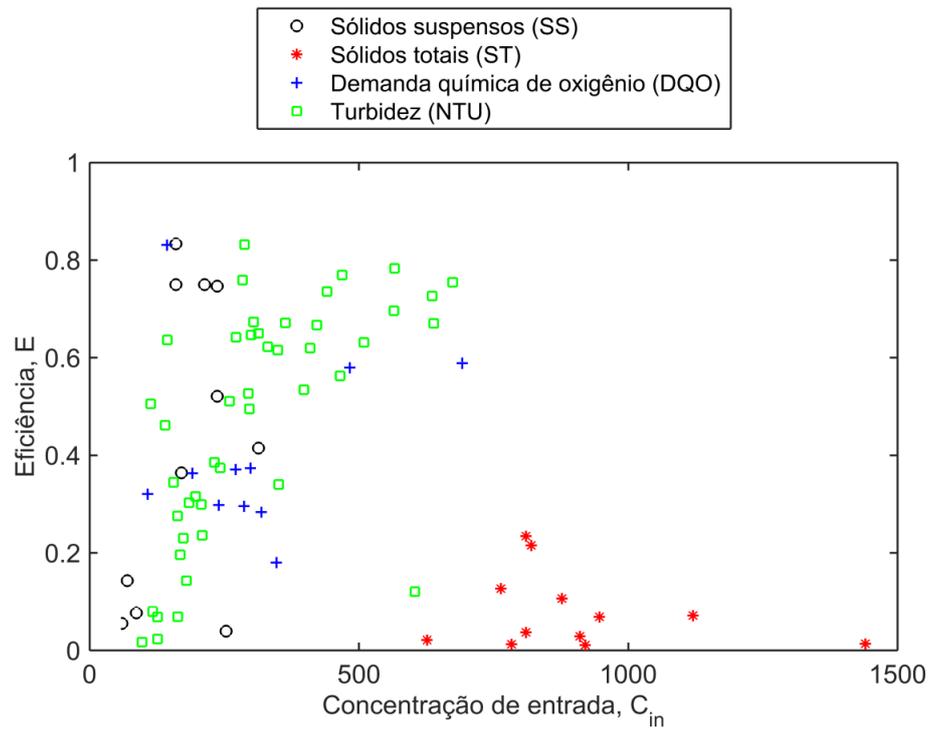
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Através análise deste gráfico pode-se perceber que os valores de sólidos suspensos variaram ao longo da corrida experimental, tendo uma melhor eficiência a partir do tempo de 50 horas de experimento, destacando-se pontos que obtiveram eficiência a cima de 70%. Para os sólidos totais, obtiveram um baixo desempenho em toda a corrida experimental, em função do tamanho das partículas e eventual solubilidade. A eficiência atingiu no máximo a cerca de 25%.

A demanda química de oxigênio seguiu um padrão similar com o de sólidos suspensos, tendo uma variação ao longo do tempo de experimento, sendo que seus valores variaram em torno de 30 a 60%, destacando um ponto que chegou a atingir cerca de 80% de eficiência. A análise de turbidez, assim como os outros parâmetros, apresentou variância ao longo do tempo mas tendo sua eficiência mais constante, com o melhores valores entre 50 e 80%.

Também pode-se obter um gráfico decorrente da eficiência de cada parâmetro ao em função da concentração de entrada no módulo experimental, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14: Gráfico da eficiência em função da concentração de entrada no filtro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Ambos os parâmetros apresentaram uma tendência de aumento em função da concentração de alimentação. A turbidez se mostrou mais próxima de um aumento linear de eficiência em função da condição de entrada, tendo sido obtidos valores entre 60 a 80%.

6 CONCLUSÕES

Diante do déficit sanitário que o Brasil vem apresentando, é fundamental o incentivo de novas tecnologias para o tratamento de efluentes, tendo em vista a sustentabilidade e o custo benefício do mesmo. Conforme foi apresentado, a adoção de filtros granulares vêm se tornando uma solução viável para o tratamento de efluentes, pois apresenta um ganho econômico muito grande devido a simplicidade do material filtrante, que tende a ser barato e de fácil acesso a quem for utilizar, além do manejo operacional ser extremamente simples. O uso da rocha basáltica como meio filtrante aparece como um recurso viável economicamente para o tratamento de efluentes, através de filtros granulométricos, sendo que este material é de fácil acesso e de baixo custo. Este material pode ser reutilizado várias vezes após a sua lavagem adequada, tendo a diminuição na geração de resíduo a ser descartado e o reaproveitamento do material como meio filtrante.

Neste trabalho foi investigada a adoção de rocha basáltica de diferentes granulometrias como meio filtrante, sendo que o desempenho do sistema foi descrito através do uso de modelos matemáticos. Foi observado uma grande variabilidade nas condições de alimentação no filtro ao longo do tempo de operação. Este fato foi associado às características do sistema, que empregou efluente da ETE do Campus Cerro Largo da UFFS.

A carreira de filtração teve uma duração de 138,08 horas de duração, sendo que após este período ocorreu a colmatção do material particulado dentro da carreira.

O sistema apresentou eficiências de remoção de turbidez entre 50 a 80%, sendo relativamente bem descritas pelo modelo matemático utilizado. Entretanto, o mesmo poder de predição dos dados não foi observado para descrição da perda de carga no sistema.

Os parâmetros sólidos suspensos e demanda química de oxigênio apresentaram uma grande variabilidade quando analisado ao longo do tempo de operação, que pode estar associado às alterações na concentração de entrada.

Desta forma podemos concluir que o filtro granular utilizando rochas basáltica como meio filtrante é um método viável para o tratamento de efluentes, principalmente se para diminuição de parâmetros relacionados com a presença de particulados.

Para o melhoramento deste sistema de filtração aconselha-se aumentar o diâmetro da carreira de filtração a fim de diminuir o efeito parede do sistema, e se analisar a perda de carga do sistema sem a sua interrupção de operação, mantendo-a constante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional das Águas (ANA) 2017, disponível em < <https://www.ana.gov.br/>>, acesso em 02/05.

ESEN, I. I; PUSKAS, K; BANAT, I.M; AL-DAHER, R. **Algae removal by sand filtration and reuse of filter material**. Department of Civil Engineering, Kuwait University. 1991.

IVES, K. J.; **Theory of Filtration**. International Water Supply Congress and Exhibition, Special subject n.7, Viena, 1970.

KUNI, D.; LEVENSPIEL, O., **Fluidization Engineering, 1ª edição**, John Wiley & Sons, Inc.; Nova Iorque, 1969.

LEVESPIEL, OCTAVE. **Engenharia das reações químicas, 3ª edição, vol. 1**; São Paulo 1969.

MACKIE, R. I.; BAI, R. **Suspended particles size distribution and the performance of deep bed filters**. Water Research, v. 26, n. 12, p. 1571-1575, 1992.

MC Donald, *et al.*, **Flow through Porous Media – the Ergun Equation Revisited**, Ind Eng. Chem. Fundament., Vol. 18, No 3, 1979

NITZ, M; GUARDANI, R. **Fluidização Gás-Sólido – Fundamentos e Avanços**. Revista Brasileira de Engenharia Química. Dez. 2008.

SABESP; **Norma Técnica Interna NTS 004, DQO – Demanda química de oxigênio, Método de ensaio**. São Paulo, Maio, 1997.

SABESP; **Norma Técnica Interna NTS 008, Turbidez, Método de ensaio**. São Paulo, Junho, 1999.

SABESP; **Norma Técnica Interna NTS 013, Sólidos, Método de ensaio**. São Paulo, Junho, 1999.

SATALLES, T.S *et. al*; **Estudo da eficiência do meio filtrante de fibras de poliéster após filtração por pulso de ar reverso**. Universidade Federal de São Carlos. Out 2015.

SCHONTAG, J.M. **Esferas de poliestireno como elemento filtrante em filtração rápida descendente**. Mar. 2015.

SPERLING, M. von. **Lodos ativados. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**; v. 4 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 1997.

TIEN, C.; RAMARAO, B.V. **Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols**. Elsevier/Butterworths, Segunda Edição, 2007.

TIEN, C. **Principles of Filtration**. Syracuse University, NY. 2012.

TIEN, C; RAMARAO, B. V. **Can filter cake porosity be estimated based on the Kozeny-Carman equation?** Powder Technology, v.237, p. 233-240, Março, 2013.

WENZEL, B. M.; PORCIUNCULA, C. B.; MARCILIO, N. R.; MENEGOLLA, H. B.; DOREMANN, G. M.; GODINHO, M.; MARTINS, C. B. **Filtration of dust in intermittent moving granular bed filter: performance and modeling**. Separation and Purification Technology, v. 133, p. 108-119, 2014.