



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA  
LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA EM DESSALINIZAÇÃO

JULYANNA DAMASCENO PESSOA

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO COMPOSTO POR UM  
HIDROCICLONE E MEMBRANAS CERÂMICAS/POLIMÉRICA PARA  
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS.**

Campina Grande-PB

2019

JULYANNA DAMASCENO PESSOA

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO COMPOSTO POR UM  
HIDROCICLONE E MEMBRANAS CERÂMICAS/POLIMÉRICA PARA  
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS.**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do título de Doutor.

Área de Concentração: Recursos Regionais e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Kepler Borges França

Campina Grande-PB

2019

P475a

Pessoa, Julyanna Damasceno.

Avaliação de um sistema híbrido composto por um hidrociclone e membranas cerâmicas/polimérica para tratamento de águas residuárias / Julyanna Damasceno Pessoa. – Campina Grande, 2019.

172 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Kepler Borges França, Prof. Dr. Howard William Pearson".

Referências.


1. Água Residuária – Reuso. 2. Irrigação. 3. Membranas Cerâmicas. 4. Hidrociclone. I. França, Kepler Borges. II. Pearson, Howard William. III. Título.

CDU 628.38(043)

JULYANNA DAMASCENO PESSOA

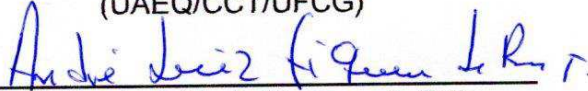
**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO COMPOSTO POR UM  
HIDROCICLONE E MEMBRANAS CERÂMICAS/POLIMÉRICA PARA  
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS.**

TESE DE DOUTORADO avaliada e aprovada em 17/09/2019, pela seguinte banca examinadora:




---

Prof.º Dr. Kepler Borges França  
Orientador  
(UAEQ/CCT/UFCG)



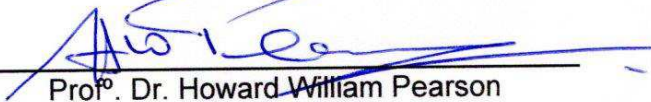
---

Prof.º Dr. André Luiz Fiquene de Brito  
Examinador Interno  
(UAEQ/CCT/UFCG)



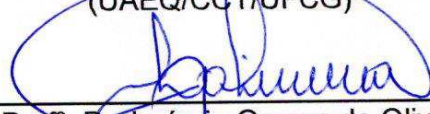
---

Prof.º Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto  
Examinador Interno  
(UAEQ/CCT/UFCG)




---

Prof.º Dr. Howard William Pearson  
Examinador Externo  
(UAEQ/CCT/UFCG)



---

Prof.º Dr. Laércio Gomes de Oliveira  
Examinador Externo  
(UAEQ/CCT/UFCG)



---

Prof.ª Dra. Shirley Waleska Cavalcante Araújo  
Examinador Externo  
(UAEQ/CCT/UFCG)

Campina Grande

2019

Dedico este trabalho primeiramente à Deus e segundo a meus amados esposo, filha, pais e irmão por todas as incontáveis ajudas e amor depositados em mim, que me estimularam a continuar essa difícil jornada.

Agradeço imensamente à Deus por sempre me levantar quando achava que não dava mais.

À minha linda e amada família por sempre acreditar em mim e por todo apoio, em especial a meu pai Luzardo e minha mãe Eneide, a meu irmão Henrique Bruno, meu esposo Janailson e, minha princesa, Ana Júlia.

Agradeço ao professor Kepler Borges França pela paciência, amizade e por tantas ideias e orientações válidas ao enriquecimento da tese proposta.

A todos os amigos do LABDES, em especial a João e Lays, assim como a tantos outros colegas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao LABDES pelo espaço liberado para realização do projeto e por todo apoio financeiro na compra dos equipamentos.

A Universidade Federal de Campina Grande pela oportunidade de realizar uma Pós-Graduação e à CAPES pela concessão da bolsa de Doutorado durante os 4 anos da pesquisa.

## RESUMO

A agroindústria é responsável por elevado consumo de água e elevadas perdas. Com a escassez de recursos hídricos, a minimização do consumo deste recurso nesse setor é de suma importância. Diante disto, este projeto objetivou analisar um sistema híbrido composto por hidrociclone da família *Bradley*, sistema de membranas cerâmicas de microfiltração em paralelo e membrana de osmose inversa. O sistema híbrido foi utilizado no tratamento de águas residuárias para reuso na irrigação. Para tal, efetuou-se, primeiramente, a construção do hidrociclone, seguido da caracterização física dos efluentes utilizados no sistema híbrido (lagoa e fossa séptica) localizados na UFCG, nas quais foram obtidos dados experimentais da concentração volumétrica e distribuição do tamanho médio de partículas. O hidrociclone foi avaliado alterando-se tanto as variáveis de processo (velocidade da vazão de alimentação e tempo de operação) como as propriedades físicas do efluente, para verificação da eficiência de separação sólido/líquido. As membranas cerâmicas confeccionadas apresentaram tamanho de poros de 1,33  $\mu\text{m}$  e porosidade aparente de 53%, trabalhando na melhor pressão obtida na caracterização, de 3,0  $\text{kgf.cm}^{-2}$ , com recuperação de aproximadamente 50% para a água residuária de menor concentração volumétrica. A eficiência total ( $\eta$ ) máxima atingida pelo hidrociclone foi de aproximadamente 40%. No sistema híbrido a remoção para nitrogênio total foi de até: 87%, 77% para DQO, 95% para  $\text{DBO}_{5,20}$ , 99% para turbidez, 89% para cor, 80% para sólidos totais dissolvidos e remoção completa de bactérias termotolerantes. Diante dos resultados obtidos as águas foram classificadas por classe de acordo com o regulamento do CONAMA nº 357 de 2005 para reutilização, variando seu reuso entre atividades recreativas, irrigação de hortaliças e plantas frutíferas, dessedentação de animais, dentre outros. O sistema híbrido tem considerável capacidade de tratamento para águas residuárias, com amplas possibilidades de aplicações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Membranas Cerâmicas. Hidrociclone. Água residuária. Reuso. Irrigação.

## ABSTRACT

Agribusiness is responsible for high water consumption and high losses. With the scarcity of water resources, minimizing water consumption in this sector is of paramount importance. Therefore, this project aimed to analyze a hybrid system composed of Bradley family hydrocyclone, parallel microfiltration ceramic membrane system and reverse osmosis membrane. The hybrid system was used to treat wastewater for reuse in irrigation. To this end, the hydrocyclone was first constructed, followed by the physical characterization of the effluents used in the hybrid system (lagoon and septic tank) located in the UFCG, in which experimental data on volumetric concentration and mean particle size distribution were obtained. The hydrocyclone was evaluated by changing both the process variables (feed rate and operating time) and the physical properties of the effluent to verify the solid / liquid separation efficiency. The prepared ceramic membranes presented pore size of 1.33  $\mu\text{m}$  and apparent porosity of 53%, working at the best characterization pressure of 3.0  $\text{kgf.cm}^{-2}$ , with recovery of approximately 50% for the smallest wastewater. volumetric concentration. The maximum total efficiency ( $\eta$ ) achieved by the hydrocyclone was approximately 40%. In the hybrid system total nitrogen removal was up to: 87%, 77% for COD, 95% for  $\text{BOD}_{5,20}$ , 99% for turbidity, 89% for color, 80% for total dissolved solids and complete bacterial removal. thermotolerant. Given the results obtained, the waters were classified by class according to the CONAMA Regulation nº 357 of 2005 for reuse, varying their reuse between recreational activities, irrigation of vegetables and fruit plants, animal desedimentation, among others. The hybrid system has considerable wastewater treatment capacity with wide application possibilities.

**KEYWORDS:** Ceramic Membranes. Hydrocyclone. Wastewater. Reuse Irrigation.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas características físicas, químicas e bacteriológicas dos esgotos domésticos.....	6
Tabela 2 – Padrão do efluente recomendado para irrigação.....	7
Tabela 3 - Análises necessárias para avaliar a água para irrigação.....	19
Tabela 4 – Classes e destinação da água segundo seu grau de contaminação por bactérias do tipo coliformes termotolerantes e limites de $DBO_{5,20}$ .....	21
Tabela 5 – Classes e destinação da água segundo seu grau de contaminação por bactérias do tipo coliformes termotolerantes e limites de OD.....	23
Tabela 6 – Classes e destinação da água segundo seu grau de contaminação por bactérias do tipo coliformes termotolerantes e limites de OD.....	24
Tabela 7 - Família de hidrociclones.....	35
Tabela 8 – Distribuição do tamanho das partículas para a água da lagoa.....	81
Tabela 9 – Distribuição do tamanho das partículas para a água da fossa.....	82
Tabela 10 – Valores obtidos variando a vazão volumétrica do SHC.....	83
Tabela 11 – Valores de SST obtidos antes e após tratamento pelo SHC.....	85
Tabela 12 – Diâmetro das partículas e diâmetro de corte reduzido das águas $A_1$ , $A_2$ e $A_3$ .....	86
Tabela 13 – Dados obtidos para o SHC nas águas estudadas.....	89
Tabela 14 – Análises físico químicas para a água $A_1$ antes e após tratamento no SHC, com a porcentagem de remoção em $v_{3t_2}$ .....	90
Tabela 15 – Análise de cor, turbidez, pH e condutividade elétrica para a água $A_1$ .....	91
Tabela 16 – Análise de cor, turbidez, pH e condutividade elétrica para a água $A_2$ .....	91

Tabela 17 – Análise de cor, turbidez, pH e condutividade elétrica para a água A <sub>3</sub> .....	91
Tabela 18 – Concentrações bacteriológicas para a água A <sub>1</sub> após tratamento no SHC.....	93
Tabela 19 – DQO obtidas para alimentação, overflow e underflow do SHC.....	94
Tabela 20 – Dados da vazão e fluxo permeado e concentrado da caracterização do SMC com água dessalinizada.....	98
Tabela 21 – Determinação da porosidade pelo método de Arquimedes para a membrana cerâmica MR01-20, em triplicata.....	101
Tabela 22 – Dados da vazão e fluxo permeado e concentrado do SMC para água A <sub>1</sub> .....	101
Tabela 23 – Dados da vazão e fluxo permeado e concentrado do SMC para água A <sub>2</sub> .....	102
Tabela 24 – Dados da vazão e fluxo permeado e concentrado do SMC para água A <sub>3</sub> .....	104
Tabela 25 – Análise de cor, turbidez, pH e condutividade elétrica para a água A <sub>1</sub> (v <sub>2</sub> t <sub>2</sub> ).....	105
Tabela 26 – Análise de cor, turbidez, pH e condutividade elétrica para a água A <sub>2</sub> (v <sub>2</sub> t <sub>2</sub> ).....	105
Tabela 27 – Análise de cor, turbidez, pH e condutividade elétrica para a água A <sub>3</sub> (v <sub>2</sub> t <sub>2</sub> ).....	106
Tabela 28 – Análises físico químicas para as águas A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> e A <sub>3</sub> , antes e após tratamento no SMC e membrana de OI, em v <sub>2</sub> t <sub>2</sub> .....	106
Tabela 29 – Análise bacteriológica quantitativa de Escherichia coli realizadas para a água A <sub>1</sub> e A <sub>2</sub> antes e após tratamento no SMC e OI.....	111
Tabela 30 – Valores de DBO <sub>5,20</sub> e DQO em (mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> ) para as águas A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> e A <sub>3</sub> .....	112

Tabela 31 – Valores do OD para a alimentação, permeados do SMC e OI, para as águas A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> e A <sub>3</sub> .....	113
---	-----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de classificação de sólidos da água.....	8
Figura 2 – <i>Escherichia Coli</i> .....	26
Figura 3 – Sistema de tratamento convencional de efluentes.....	29
Figura 4 - Esquema típico de um hidrociclone.....	32
Figura 5 – Separação de misturas em um hidrociclones.....	34
Figura 6 – Dimensões do hidrociclones.....	35
Figura 7 – Linhas de escoamento durante o curto-circuito.....	36
Figura 8 – Escoamento em um hidrociclone com destaque para a região do manto.....	37
Figura 9 - Representação dos diferentes tipos de morfologia de membranas sintéticas.....	48
Figura 10 - Representação de um sistema de permeação com membrana composto por duas fases.....	50
Figura 11 – Comparação da faixa de filtração para quatro métodos MF, UF, NF e Ol.....	52
Figura 12 - Filtração convencional – <i>Dead End</i> .....	54
Figura 13 - Filtração tangencial - <i>Cross Flow</i> .....	54
Figura 14 - Curva típica de fluxo de permeado em função do tempo.....	55
Figura 15 - Amostra contendo poros abertos e fechados.....	57
Figura 16 - Esquema da formação da camada polarizada.....	58
Figura 17 - Representação esquemática de fouling superficial e interno em membranas.....	60
Figura 18 - Membranas cerâmicas tubulares do tipo multi e monocanal feita por extrusão.....	62
Figura 19 – Fluxograma do sistema de tratamento de águas residuárias com hidrociclone, membrana cerâmica e osmose inversa.....	68
Figura 20 – (1) Ponto de coleta da fossa séptica/UFCG. (2) Prédio em que a fossa fica localizada.....	69
Figura 21 – Lagoas da UFCG.....	70
Figura 22 – Ponto de coleta da Lagoa (P <sub>3</sub> ) da UFCG. (1) Bomba centrífuga de ½ cv.....	70

Figura 23 – Tanque de armazenamento das águas coletadas.....	71
Figura 24 – Dimensões do hidrociclone utilizadas.....	72
Figura 25 - Sistema hidrociclone para separação sólido/líquido, com sentido do fluxo de água.....	72
Figura 26 – Membranas cerâmicas confeccionadas.....	74
Figura 27 – Sistema híbrido de tratamento de águas residuárias com HC, MC e Ol.....	74
Figura 28 – Fluxograma com o processo de caracterização das membranas cerâmicas.....	76
Figura 29 - Módulo da membrana cerâmica em PVC.....	77
Figura 30 – Sistema de caracterização das MC.....	77
Figura 31 - Queda de pressão em função da vazão volumétrica da alimentação para o SHC.....	84
Figura 32 – Relação do número de Euler em função da vazão volumétrica da alimentação.....	84
Figura 33 – Relação das razões de líquido em função do diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ).....	87
Figura 34 - Teor de sólidos suspensos totais obtidos para os experimentos com o hidrociclone Bradley em diferentes números de Reynolds.....	88
Figura 35 – Relação do diâmetro de corte ( $d'_{50}$ ) e a eficiência total ( $\eta\%$ ).....	89
Figura 36 – Registro das amostras da água A <sub>1</sub> pós tratamento pelo SHC: (a) <i>Underflow</i> , (b) <i>Overflow</i> .....	92
Figura 37 – DBO <sub>5,20</sub> para as águas A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> e A <sub>3</sub> para alimentação e <i>overflow</i> do SHC.....	95
Figura 38 - Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica 1 em função do tempo.....	96
Figura 39 - Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica 2 em função do tempo.....	96
Figura 40 - Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica 3 em função do tempo.....	96
Figura 41 - Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica 4 em função do tempo.....	97
Figura 42 - Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica 5 em função do tempo.....	97

Figura 43 - Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica 6 em função do tempo.....	97
Figura 44 - Variação do fluxo permeado do SMC em função do tempo, na caracterização com água dessalinizada.....	99
Figura 45 - Perfis dos diâmetros dos poros das amostras das membranas cerâmicas MR01-20 através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	100
Figura 46 - Variação do fluxo permeado do SMC em função do tempo.....	102
Figura 47 - Variação do fluxo permeado do SMC em função do tempo.....	103
Figura 48 - Variação do fluxo permeado do SMC em função do tempo.....	104
Figura 49 - Dados físico químicos da água A <sub>1</sub> , após tratamento pelo SMC e OI.....	107
Figura 50 - Dados físico químicos da água A <sub>2</sub> , após tratamento pelo SMC e OI.....	107
Figura 51 - Dados físico químicos da água A <sub>3</sub> , após tratamento pelo SMC e OI.....	108
Figura 52 – Amostras do overflow do SHC (a), permeado do SMC (b) e permeado da membrana de OI (c).....	109

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

$A$  – Área da membrana ( $m^2$ )

$\theta$  – Ângulo da Parte Cônica

$C_a$  - Concentração de Sólidos na Alimentação ( $mg. L^{-1}$ )

$C_{OF}$  - Concentração de Sólidos na Saída do *Overflow* ( $mg. L^{-1}$ )

$C_{w,i}$  - Concentração Mássica das Amostras ( $g. L^{-1}$ )

$C_{vA}$  – Concentração volumétrica de soluto na corrente de alimentação ( $g. L^{-1}$ )

$C_{vUF}$  - Concentração volumétrica no underflow ( $g. L^{-1}$ )

$(-\Delta P)$  - Queda de Pressão entre a Alimentação e *Overflow* (kPa)

$\rho_l$  - Densidade da Água ( $g.L^{-1}$ )

$\rho_{s,i}$  - Densidade de Sólido Presente na Amostra ( $g.L^{-1}$ )

$D_i$  – Diâmetro da Alimentação (cm)

$D_c$  – Diâmetro da Parte Cilíndrica (cm)

$d'_{50}$  - Diâmetro de Corte Reduzido do Dispositivo ( $\mu m$ )

$D_o$  – Diâmetro de *Overflow* (cm)

$D_u$  – Diâmetro de *Underflow* (cm)

$d_p$  – Diâmetro Médio da Partícula ( $\mu m$ )

$Eu$  – Número de Euler

$Er$  - Eficiência de Remoção (%)

$J_p$  - Fluxo Permeado ( $L. h^{-1}m^{-2}$ )

$L_1$  – Altura da Parte Cilíndrica (cm)

$l$  – Altura da Secção de *overflow* (*Vortex Finder*) (cm)

$L$  – Altura Total (cm)

$\mu_l$  - Viscosidade do líquido (cP)

$\eta$  - Eficiência Total (%)

$\eta'$  - Eficiência total reduzida (%)

P – POROSIDADE DA MEMBRANA CERÂMICA (%)

PA – Peso Aparente (g)

$P_a$  – Peso da Amostra Seca (g)

$P_i$  – Peso da Amostra Quando Imersa em Água (g)

$P_{0,i}$  - Peso do papel filtro seco (g)

$P_{1,i}$  – Peso do papel filtro após filtração das amostras (g)

$P_u$  – Peso da Amostra Úmida com Água Absorvida (g)

$Q_A$  - Vazão volumétrica na corrente da alimentação (L. h<sup>-1</sup>)

$Q_{UF}$  - Vazão volumétrica na corrente do *underflow* (L. h<sup>-1</sup>)

$Q_P$  – Vazão do permeado (L. h<sup>-1</sup>)

R – Recuperação (%)

Re – Número de Reynolds

$RL$  – Razão de líquido (%)

$Stk_{50}$  – Número de Stokes

TR – TAXA DE REJEIÇÃO (%)

$\tau$  – Tempo de residência hidráulica (h)

$u_c$  - Velocidade do escoamento da suspensão baseada no diâmetro da parte Cilíndrica (m. s<sup>-1</sup>)



$\nu_l$  - Viscosidade cinemática ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

V – Volume (L)

$W_m$  – Massa da membrana molhada (g)

$W_s$  – Massa da membrana seca (g)

$W_i$  – Massa da membrana imersa (g)

A<sub>1</sub> – Água Fossa Séptica (Data da Coleta: 20/08/2018)

A<sub>2</sub> – Água Lagoa (Data da Coleta: 23/11/2018)

A<sub>3</sub> – Água Lagoa (Data da Coleta: 04/04/2019)

CNRH – Conselho Nacional dos Recursos Hídricos

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO<sub>5,20</sub> – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

HC – Hidrociclone

LABCEM – Laboratório de Membrana Cerâmica

LABDES – Laboratório de Referência em Dessalinização

MC – Membrana Cerâmica

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MF - Microfiltração

MR01-20 – Membrana Cerâmica Tubular Monocanal de Argila e Alumina (Porosidade 53%)

NF – Nanoiltração

NMP – Número Mais Provável

OD – Oxigênio Dissolvido

OF ( $v_1t_1$ ) – *Overflow* do Hidrociclone na Menor Velocidade e Menor Tempo de Operação do SHC

OF ( $v_1t_2$ ) – *Overflow* do Hidrociclone na Menor Velocidade e Maior Tempo de Operação do SHC

OF ( $v_2t_1$ ) – *Overflow* do Hidrociclone na Maior Velocidade e Menor Tempo de Operação do SHC

OF ( $v_2t_2$ ) – *Overflow* do Hidrociclone na Maior Velocidade e Maior Tempo de Operação do SHC

OI – Osmose Inversa

PSM's – Processos de Separação por Membranas

RNF – Resíduo Não-Filtrável

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SANASA - Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento

SF – Sólidos Fixos

SHC – Sistema de Hidrociclone

SMC – Sistema de Membrana Cerâmica

SS – Sólidos Suspensos

SST – Sólidos Suspensos Totais

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

TAE – Revista especializada em tratamento de água e efluentes

TSD – Totais de Sais Dissolvidos

UF – Ultrafiltração

UF ( $v_1t_1$ ) – *Underflow* do Hidrociclone na Menor Velocidade e Menor Tempo de Operação do SHC

UF ( $v_1t_2$ ) – *Underflow* do Hidrociclone na Menor Velocidade e Maior Tempo de Operação do SHC

UF ( $v_2t_1$ ) – *Underflow* do Hidrociclone na Maior Velocidade e Menor Tempo de Operação do SHC

UF ( $v_2t_2$ ) – *Underflow* do Hidrociclone na Maior Velocidade e Maior Tempo de Operação do SHC

UFC – Unidade Formadora de Colônias

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

## SUMÁRIO

<b>CAPITULO I.....</b>	<b>1</b>
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo geral.....	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>4</b>
2. Revisão bibliográfica.....	4
2.1 Águas residuárias.....	4
2.2 Parâmetros de caracterização das águas residuárias.....	5
2.3 Água de reuso.....	11
2.3.1 Reuso de água no Brasil.....	14
2.3.2 Reuso de água na agricultura.....	15
2.3.2.1 Qualidade da água para irrigação.....	18
2.4 Legislação ambiental para tratamento de águas residuárias e seu reuso.....	20
2.5 Contaminação de águas por microrganismos patogênicos.....	24
2.6 Tratamento convencional de águas residuárias.....	27
2.7 Técnicas de separação sólido/líquido.....	29
2.8 Hidrociclone.....	31
2.8.1 Aplicações do hidrociclone.....	33
2.8.2 Funcionamento do hidrociclone.....	33

2.8.3 Modelagem matemática do hidrociclone.....	38
2.8.3.1 Concentração Volumétrica ( $C_{vi}$ ).....	39
2.8.3.2 Razão de Líquido (RL).....	39
2.8.3.3 Capacidade de Processamento (Q).....	40
2.8.3.4 Número de Euler (Eu).....	40
2.8.3.5 Número de Stokes ( $Stk_{50}$ ) e Número de Reynolds (Re).....	41
2.8.3.6 Diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ) e queda de pressão ( $-\Delta P$ ).....	42
2.8.3.7 Eficiência de remoção de sólidos ( $E_r$ ).....	44
2.8.3.8 Eficiência Total ( $\eta$ ).....	44
2.8.4 Utilização do hidrociclone para separação sólido/líquido.....	45
2.9 Membranas.....	47
2.9.1 Processos de Separação por Membranas (PSM's).....	49
2.9.2 Classificação dos processos de separação por membranas.....	51
2.9.3 Transporte através da membrana.....	53
2.9.3.1 Escoamento convencional ( <i>Dead End</i> ).....	53
2.9.3.2 Escoamento tangencial ( <i>Cross flow</i> ).....	54
2.9.5 Equacionamento.....	55
2.9.5.1 Fluxo permeado.....	55
2.9.5.1.1 Característica da curva do fluxo de permeado.....	55
2.9.5.2 Recuperação (R).....	56
2.9.5.3 Tempo de Residência Hidráulica ( $\tau$ ).....	56

2.9.5.4 Porosimetria pelo método de Arquimedes.....	57
2.9.6 Principais complicações nos PSM's.....	58
2.9.6.1 Polarização por concentração.....	58
2.9.6.2 <i>Fouling</i> .....	59
2.9.6.2.1 <i>Biofouling</i> .....	61
2.9.7 Membrana Cerâmica.....	62
2.9.7.1 Limpeza das membranas.....	64
2.9.8 Uso de membrana cerâmica na remoção de parâmetros físico-químicos e microbiológicos.....	65
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>68</b>
3. Materiais e métodos.....	68
3.1 Materiais.....	69
3.1.1 Sistema águas estudadas.....	69
3.1.2 Hidrociclone.....	71
3.1.2.1 Sistema hidrociclone (SHC) na separação sólido/líquido.....	72
3.1.3 Membranas cerâmicas – MC.....	73
3.1.4 Sistema híbrido (HC/MC/OI).....	74
3.2 Metodologia.....	75
3.2.1 Sistema de HC.....	75
3.2.1.1 Avaliação da eficiência do SHC.....	75
3.2.2. Sistema membrana cerâmica (SMC).....	76
3.2.2.1 Caracterização da membrana cerâmica com água dessalinizada.....	76

3.2.2.2 Porosimetria por método de Arquimedes.....	78
3.2.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	78
3.2.3 Sistema híbrido com HC/MC/OI.....	78
3.2.3.1 Análise bacteriológica e físico química.....	79
3.2.3.2 Análise granulométrica por difração a laser para a água da fossa e lagoa.....	79
3.3 Limpeza química das membranas cerâmicas.....	80
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>81</b>
4. Resultados e discussões.....	81
4.1 Determinação da distribuição do tamanho das partículas.....	81
4.2 Desempenho do hidrociclone.....	82
4.2.1 Capacidade de Processamento (Q).....	83
4.2.2 Consumo energético (Eu).....	84
4.2.3 Eficiência de remoção de sólidos em suspensão (Er).....	85
4.2.4 Razão de Líquido (RL).....	86
4.2.5 Cálculo da eficiência total ( $\eta$ ).....	88
4.2.6 Análises físico químicas para o SHC.....	90
4.2.7 Análise bacteriológica para o SHC.....	93
4.2.8 Análise de DQO e $DBO_{5,20}$ .....	94
4.3 Sistema Membranas Cerâmicas (SMC).....	95
4.3.1 Caracterização das membranas cerâmicas com águas dessalinizada.....	96
4.3.2 Caracterização morfológica das membranas cerâmicas.....	99

4.3.3 Porosidade.....	100
4.3.4 Análise de fluxo das membranas cerâmicas com águas residuárias.....	101
4.3.5 Análises físico químicas para o SMC e membrana de OI.....	106
4.3.6 Análise bacteriológica do permeado do SMC e da membrana de OI.....	110
4.3.7 Análise de DBO <sub>5,20</sub> e DQO.....	111
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>115</b>
5. Conclusões.....	115
<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>117</b>
6. Perspectivas.....	117
<b>CAPÍTULO VII.....</b>	<b>118</b>
7. Publicação.....	118
<b>CAPÍTULO VIII.....</b>	<b>119</b>
8. Referências bibliográficas.....	119
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>144</b>
<b>APÊNDICE A:</b> LAUDOS PARA OS DIÂMETROS DAS PARTÍCULAS DAS ÁGUAS DA LAGOA E FOSSA SÉPTICA LOCALIZADAS NA UFCG.....	145
<b>APÊNDICE B:</b> DADOS DE pH, COR, TURBIDEZ, E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA AS ÁGUAS A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> E A <sub>3</sub> , ANTES E APÓS TRATAMENTO NO SHC E PARA O PERMEADO DO SMC E MEMBRANA DE OI.....	148
<b>APÊNDICE C:</b> RESULTADOS DAS ANÁLISES BACTERIOLÓGICAS PARA A ÁGUA DA FOSSA, ANTES E APÓS TRATAMENTO NO SHC.....	151
<b>APÊNDICE D:</b> DADOS DE VAZÃO E FLUXO PERMEADO E CONCENTRADO DURANTE A CARACTERIZAÇÃO DAS MEMBRANAS CERÂMICAS COM ÁGUA DESSALINIZADA E APÓS TRATAMENTO PELO SMC (COM SEIS	



ELEMENTOS DE MEMBRANAS CERÂMICAS DE MICROFILTRAÇÃO EM PARALELO) PARA AS ÁGUAS A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> E A<sub>3</sub>.....153

**APÊNDICE E:** LAUDOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS PARA AS ÁGUAS A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub> ANTES E APÓS TRATAMENTO NO SMC E MEMBRANA DE OI NAS VAZÕES Q<sub>1</sub> E Q<sub>2</sub> DO SHC NO TEMPO DE 1 HORA.....157

**APÊNDICE F:** DADOS DAS ANÁLISES BACTERIOLÓGICAS (CONTAGEM EM PLACAS DE PETRI), ANTES E APÓS TRATAMENTO PELO SMC E MEMBRANA DE OI, PARA AS ÁGUAS A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub>.....167

## CAPITULO I

### 1. Introdução

A escassez dos recursos hídricos, seja por fenômenos naturais (condições climáticas) ou ações antrópicas (uso desenfreado e aumento da contaminação deste recurso), é uma importante pauta no cenário socioambiental atual (HENZ et al 2016). A água é o bem mais precioso que temos no mundo, sendo um recurso finito e nem sempre disponível. Seu reuso se tornou uma alternativa cada vez mais recorrente no Brasil, sendo o reaproveitamento dessas águas que foram anteriormente utilizadas no comércio, residências e indústria por meio de processos de tratamento. Embora essa água seja de qualidade inferior, ela é muito utilizada em vários setores, incluindo o meio agrícola para irrigação (ANDRADE, 2017).

Há um crescimento constante na produção de efluentes domésticos e agroindustriais, colocando ainda mais em evidência a possibilidade de reuso destes na agricultura (ROCHA et al., 2010). O emprego da água de reuso na agricultura pode ser uma estratégia bastante eficaz para preservar os recursos hídricos e diminuir sua utilização indiscriminada, haja vista que essa atividade econômica é a que mais emprega água em seu processo produtivo, com cerca de 70% de todo o consumo realizado no mundo (PENA, 2018). Além de proporcionar uma maior economia dos recursos hídricos, a reutilização de água na agricultura pode também servir para atender localidades em que a existência desses recursos é escassa ou em que a estiagem prejudica as lavouras em determinadas épocas do ano, como no Nordeste brasileiro por exemplo. Outra vantagem é o fato de que alguns dos elementos residuais que permanecem nas águas após o tratamento podem ser benéficos para as lavouras, a exemplo do nitrogênio, potássio e fósforo, funcionando como nutrientes para as plantas (PENA, 2018).

No reuso de água, os microrganismos, principalmente os patogênicos, representam a ameaça mais comum, devido sua elevada concentração no efluente de esgotos sanitários (FELIZATTO, 2017). Sob esse aspecto, os processos de separação por membranas são amplamente usados, cujo papel

principal em sistemas de recuperação de água é no auxílio da retenção desses microrganismos, pois a maioria dos processos de membranas agem como uma barreira relativamente eficaz a todos os microrganismos, como: vírus, bactérias, proteínas, emulsões, dentre outras misturas (RIPPERGER e ALTMANN, 2002), buscando a produção da água de acordo com os regulamentos do CONAMA nº 357 no que diz respeito aos aspectos químicos e físicos (matérias orgânicas e turbidez) e aspecto biológico (agentes patogênicos), para água de reuso na agricultura (WINTGENS et al., 2005).

Outro problema do reuso para a irrigação é a existência de muitas partículas em suspensão que podem causar entupimento no sistema, e um método eficiente na separação sólido-líquido são os hidrociclones, por ocuparem um menor espaço físico comparado a flotas e decantadores e por serem simples e fáceis de operar (ANDRADE, 2007). São equipamentos sem partes móveis e que exigem apenas bomba centrífuga para sua alimentação. Quando a pressão ou energia potencial deste não tem o nível de energia necessário à sua operação, os hidrociclones se tornam bastante vantajosos. Além disto, o tempo de residência que o líquido permanece no hidrociclone é pequeno, enquanto na separação de fases em outros equipamentos, o tempo de residência é maior. Estes fatos tornam o hidrociclone economicamente viável (ANDRADE, 2007).

Nesta pesquisa, utilizou-se um sistema híbrido contendo um hidrociclone e membranas cerâmicas de microfiltração e uma membrana de osmose inversa para tratamento de águas residuárias para reuso. Os ensaios foram realizados em escala de laboratório variando a velocidade e tempo de operação do sistema de hidrociclone, visando encontrar uma faixa adequada para obtenção de uma boa eficiência de remoção de partículas em suspensão. Para o sistema de membranas cerâmicas, os ensaios foram realizados à pressão constante e o sistema híbrido foi avaliado quanto aos parâmetros físico químicos e bacteriológicos e quanto ao fluxo permeado.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Estudar o desempenho de sistema híbrido piloto, composto por hidrociclone, membranas cerâmicas e membrana de osmose inversa, visando obter água para fins de reuso no campo, a partir de águas residuárias.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar a água da Lagoa e da Fossa Séptica, ambas localizadas no âmbito da UFCG, quanto a distribuição granulométrica das partículas, composição físico-química e bacteriológica.
- b) Analisar o desempenho do sistema de hidrociclone (SHC) em função da concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST) presentes nos meios aquosos estudados, avaliando também os demais parâmetros físico-químicos e os parâmetros bacteriológicos, variando a velocidade da alimentação e o tempo de operação.
- c) Estudar o comportamento da membrana cerâmica com água dessalinizada, visando obter as melhores condições de operação em função das variáveis de medidas, como pressão e tempo de operação.
- d) Caracterizar a membrana cerâmica morfológicamente.
- e) Analisar o desempenho do sistema híbrido: Hidrociclone/ Membrana Cerâmica/ Osmose Inversa (HC/MC/OI) em função dos permeados do sistema de membranas cerâmicas (SMC) e da OI, partindo do diluído (*overflow*) do SHC, com relação aos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos.
- f) Verificar se as águas tratadas pelo sistema híbrido (HC/MC/OI) estão dentro dos padrões exigido pela resolução nº 357 do CONAMA de 2005 para reuso e classificá-las de acordo.

## CAPITULO II

### 2. Revisão bibliográfica

#### 2.1 Águas residuárias

De acordo com a Resolução do Conselho Nacional dos Recursos Hídricos, CNRH nº 54/2005, águas residuárias são os esgotos, e tem como definição: águas advindas de consumo humano que podem ser de uso doméstico, por exemplo, provenientes de banhos, cozinhas, lavagens de pavimentos domésticos e também resultantes de processos de fabricação, no comércio ou industrial; e urbanas: resultante de chuvas, lavagem de pavimentos, regas, etc (GURGEL, 2011), apresentando alterações nas suas condições naturais, sendo compostas de 99,9 % água e 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos dissolvidos e suspensos, bem como, os microrganismos (VON SPERLING, 2002).

Esse tipo de água normalmente transporta uma grande quantidade de materiais poluentes que se não forem retirados podem prejudicar a qualidade das águas dos rios quando ocorre o lançamento, comprometendo não só a fauna e flora, mas também a potencialidade de utilização das águas superficiais e subterrâneas, como geração de energia, pesca, balneabilidade, dentre outros (LUNARDI & RABAIOLLI , 2013).

Em anos recentes, a preocupação com as questões ambientais vem sendo bem difundidas, uma vez que o desequilíbrio gerado de uma forma global se encaminha ao surgimento de grandes impactos ambientais negativos para a sociedade. Grande parte dessa problemática é resultante do descarte indevido de esgoto doméstico no meio ambiente que são um dos principais fatores pela degradação da qualidade do ambiente aquático, bem como pelo surgimento de efeitos tóxicos à comunidade do referido ambiente (PALMEIRA, 2014).

É válido ressaltar a importância de ter um sistema de saneamento básico bem como a relevância de se tratar os esgotos, haja vista a grande proliferação de vetores parasitários e infecciosos degradando corpos d'água, tornando-as com qualidade inferior ao natural. As substâncias presentes nos esgotos

desempenham função nociva aos corpos d'água, tais como: Diminuição do oxigênio dissolvido, aumento da turbidez da água, emanção de odores, entre outros. No Brasil, as águas residuárias, após tratamento e lançamento nos corpos d'água receptores, devem atender às Resoluções nº 357/05 do CONAMA, a qual estabelece os padrões de qualidade e de lançamento (BOSCO et. al., 2008). A legislação brasileira não permite que o efluente lançado cause (ou possua potencial para causar) efeitos tóxicos aos organismos aquáticos, sendo requerido testes de toxicidade periodicamente com espécies representativas de pelo menos dois níveis tróficos (AQUINO, 2013).

Por saneamento básico entende-se um conjunto de medidas que visam promover, proteger e preservar a saúde, a exemplo, os sistemas de abastecimento de água, sistema de esgotamento sanitário, coleta de lixo, controle da poluição ambiental, controle de vetores biológicos (ratos, moscas, baratas) e controle microbiológico de alimentos e sua implantação é tão importante quanto o abastecimento de água. Experiências mostram que comunidades onde não foi implantado o abastecimento de água e não foram coletados os esgotos, as condições sanitárias foram agravadas, pelo fato de os dejetos correrem a céu aberto. Portanto, ter um sistema de saneamento básico eficiente associado ao tratamento dos esgotos se constitui como um meio seguro para evitar as doenças transmitidas pelas excretas humanas (SOUZA, 2016).

## **2.2 Parâmetros de caracterização das águas residuárias**

As características dos esgotos são relacionadas aos usos a qual a água foi submetida. Esses usos e a forma como são exercidos variam com o clima, com a situação social e econômica, com a cultura e com os hábitos da população. Para traduzir o caráter ou o potencial poluidor dos esgotos, são utilizados parâmetros físicos, químicos e biológicos (CHERNICHARO et al, 2008).

Metcalf & Eddy (2003) classificam os esgotos conforme as características físicas, químicas e bacteriológicas, apresentadas na Tabela 1. As características biológicas dos esgotos são importantes para referenciar as necessidades de desinfecção. A legislação é restrita quanto aos índices de coliformes termotolerantes nas aplicações dos esgotos como, por exemplo, na agricultura.

**Tabela 1** – Algumas características físicas, químicas e bacteriológicas dos esgotos domésticos.

<b>Característica</b>	<b>Faixa de concentração para esgoto doméstico</b>
Sólidos Totais (mg. L <sup>-1</sup> )	700 – 1350
• Em suspensão (mg. L <sup>-1</sup> )	200 – 450
- Fixos (mg. L <sup>-1</sup> )	40 – 100
- Voláteis (mg. L <sup>-1</sup> )	165 – 350
• Dissolvidos (mg. L <sup>-1</sup> )	500 – 900
- Fixos (mg. L <sup>-1</sup> )	300 – 550
- Voláteis (mg. L <sup>-1</sup> )	200 - 350
Matéria Orgânica	
• DBO <sub>5,20</sub> (mg. L <sup>-1</sup> )	200 a 500
• DQO (mg. L <sup>-1</sup> )	400 a 800
Nitrogênio Total (mg N/L)	35 a 70
• Amônia (mg NH <sub>3</sub> /L)	20 a 40
• Nitrito (mg NO <sub>2</sub> /L)	0
• Nitrato (mg NO <sub>3</sub> /L)	0 a 2
Fósforo total (mg P /L)	5 a 25
pH	6,5 a 7,5
Cloretos (mg. L <sup>-1</sup> )	20 a 50
Sulfato (mg. L <sup>-1</sup> )	20 a 50
Alcalinidade mg CaCO <sub>3</sub> /L	110 - 170
Bactérias Totais (/100mL)	10 <sup>9</sup> a 10 <sup>10</sup>
Coliformes Totais (NMP/100mL)	10 <sup>7</sup> a 10 <sup>8</sup>
Coliformes fecais (NMP/100mL)	10 <sup>6</sup> a 10 <sup>7</sup>
Streptococos Fecais (NMP/100mL)	10 <sup>5</sup> a 10 <sup>6</sup>
Salmonella Typhosa (/100mL)	10 <sup>1</sup> a 10 <sup>4</sup>
Cistos de Protozoários (/100mL)	10 <sup>2</sup> a 10 <sup>5</sup>
Vírus (/100mL)	10 <sup>3</sup> a 10 <sup>4</sup>
Ovos de Helmintos (/100mL)	10 <sup>1</sup> a 10 <sup>3</sup>

Fonte: Metcalf & Eddy (2003).

Um dos problemas no tratamento biológico dos esgotos é o excesso de nitrogênio e fósforo pois os macronutrientes incorporam nas células que tomam parte do sistema e exige tratamento avançado quando se tem lançamento em situações mais restritivas, sobretudo em represas utilizadas para o

abastecimento público de água potável, onde o problema da eutrofização poderá ter consequências drásticas (LUNARDI & RABAIOLLI, 2013).

O uso agrícola dos efluentes de esgotos sanitários exige que os efluentes tratados tenham concentrações significativas de matéria orgânica e o máximo possível dos nutrientes e micronutrientes contidos no esgoto bruto, proporcionando uma economia significativa de fertilizantes, além de aliviar a demanda e preservar a oferta de água (TSUTIYA, 2001).

Tsutiya (2001) apresenta, na Tabela 2, os padrões para efluentes normalmente utilizados para irrigação em termos de DBO<sub>5,20</sub> e coliformes fecais.

**Tabela 2** – Padrão do efluente recomendado para irrigação.

<b>Método de reuso</b>	<b>DBO<sub>5,20</sub>** (mg. L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Coliformes fecais** (NMP/100 ml)</b>
Irrigação de árvores, algodão e outras plantações não comestíveis.	60	50.000
Irrigação de citricultura, forragens e castanhas.	45	10.000
Irrigação de cana de açúcar, campos de esportes, vegetais que não necessitam de cozimento*.	35	1.000
Irrigação irrestrita, incluindo parques e gramados.	25	100

Fonte: Tsutiya (2001).

**Notas:**

\*A irrigação deve ser interrompida duas semanas antes da colheita; além disso, nenhuma fruta deve ser pega do chão.

\*\*As concentrações de DBO<sub>5,20</sub> e coliformes fecais não devem exceder em 80% das amostras.

### ❖ **Sólidos na água**

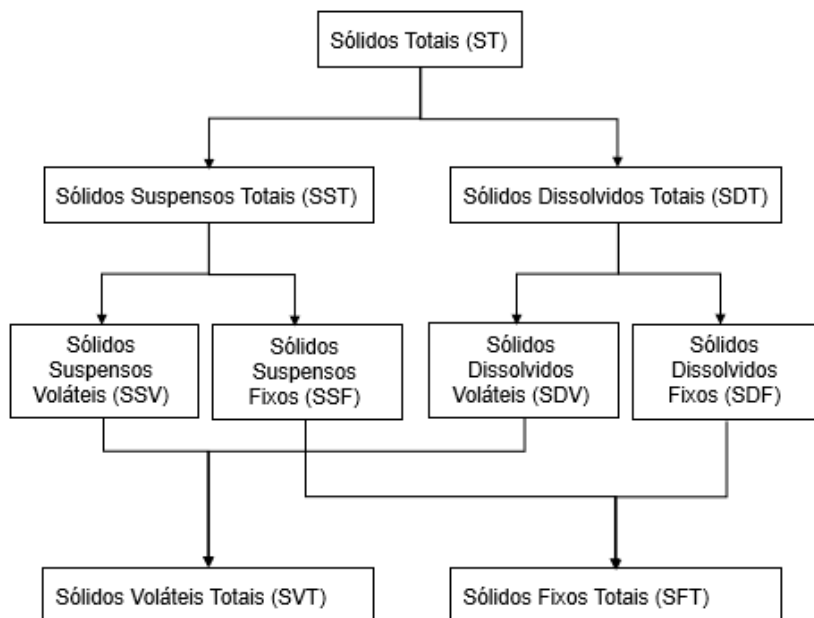
Em saneamento, sólidos nas águas correspondem a toda matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura pré-estabelecida durante um tempo fixado (DEGERING et al., 2012).

As determinações dos níveis de concentração das diversas frações de sólidos resultam em um quadro geral da distribuição das partículas com relação ao tamanho (sólidos em suspensão e dissolvidos) e com relação à natureza (fixos ou minerais e voláteis ou orgânicos) (FELDKIRCHER, 2010).



Os sólidos de uma água podem ser classificados de acordo com o Figura 1 disposto abaixo (NUNES et al., 2015):

**Figura 1** – Fluxograma de classificação de sólidos da água.



Fonte: Autora (2019).

Ainda que alguns contaminantes da água possam ser gases ou líquidos, grande parte da carga contaminante é sólida. O teor de sólidos numa água refere-se à quantidade de matéria suspensa ou dissolvida presente, podendo afetar negativamente sua qualidade. A classificação dos sólidos pode ser química ou física. Quimicamente, são classificados como fixos, que permanecem após completa evaporação da água e são geralmente sais; e voláteis, que se volatilizam em temperaturas inferiores a 550 °C, sejam substâncias orgânicas ou minerais (NERES, 2012).

Do ponto de vista físico, são classificados segundo suas dimensões; com tamanhos inferiores a 2,0 µm são chamados dissolvidos, que provém naturalmente do desgaste das rochas ou, em maior quantidade, de despejos doméstico e industrial; e com dimensões superiores a esta, são chamados sólidos em suspensão, provenientes do carregamento de solos pelas águas pluviais e efluentes domésticos e industriais. O excesso de sólidos dissolvidos na água pode causar alterações no sabor e problemas com corrosão e os sólidos em suspensão provocam turbidez que prejudica principalmente a atividade fotossintética (NERES, 2012).

Ainda de acordo com Nunes et al. (2015):

- a) Sólidos totais (ST): Resíduo que resta na cápsula após a evaporação em banho maria de uma porção de amostra e sua posterior secagem em estufa a 103-105°C até peso constante. Também denominado resíduo total.
- b) Sólidos em suspensão (ou sólidos suspensos) (SS): É a porção dos sólidos totais que fica retida em um filtro que propicia a retenção de partículas. Também denominado resíduo não filtrável (RNF).
- c) Sólidos Voláteis (SV): é a porção dos sólidos (sólidos totais, suspensos ou dissolvidos) que se perde após a ignição ou calcinação da amostra a 550-600°C, durante uma hora para sólidos totais ou dissolvidos voláteis ou 15 minutos para sólidos em suspensão voláteis, em forno mufla. Também denominado resíduo volátil.
- d) Sólidos Fixos (SF): É a porção dos sólidos (totais, suspensos ou dissolvidos) que resta após a ignição ou calcinação a 550-600°C após uma hora (para sólidos totais ou dissolvidos fixos) ou 15 minutos (para sólidos em suspensão fixos) em forno mufla. Também denominado resíduo fixo.

Com relação ao reuso de águas de irrigação, uma vez que excesso de sólidos dissolvidos pode levar a graves problemas de salinização do solo, a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece o valor máximo de 500 mg. L<sup>-1</sup>. A presença de sólidos dissolvidos relaciona-se também com a condutividade elétrica da água (SAWYER et al., 2003).

#### ❖ **Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO<sub>5,20</sub>)**

Considerado um parâmetro de imensa importância no controle da quantidade de matéria orgânica em um corpo d'água qualquer, o valor de DBO<sub>5,20</sub> aponta indiretamente o estado de contaminação do efluente (VON SPERLING, 1996). Cientificamente, a DBO<sub>5,20</sub> determina a quantidade de oxigênio que estabiliza biologicamente a matéria orgânica existente em uma amostra, depois de um tempo e temperatura previamente estipulados (adotado a quantia de 5 dias e 20°C, respectivamente, para efeito de comparação, de acordo com MOTA (2003).

Os valores de  $DBO_{5,20}$  são necessários ao dimensionamento de todo um sistema de tratamento, pois quanto maior a carga orgânica que entrar nele, maior o volume ocupado por essa construção. O valor de  $DBO_{5,20}$  é paralelo com o nível de contaminação orgânica, quanto maior seu valor mais poluído estará o corpo d'água, e vice-versa. Em efluentes de esgotos domésticos os valores de  $DBO_{5,20}$  não variam muito, permanecem entre 100 e 400  $mg. L^{-1}$  e no tratamento secundário busca-se atingir valores na faixa de 20 a 30  $mg. L^{-1}$ , dependendo da situação do esgoto. Em grande parte dos estados brasileiros a legislação exige um limite de concentração no efluente tratado. No estado do Rio de Janeiro, por exemplo, o valor máximo é de 40  $mg. L^{-1}$ , já no estado de São Paulo admite até 60  $mg. L^{-1}$  (JORDÃO e PESSÔA, 2014).

#### ❖ Demanda Química de Oxigênio (DQO)

É a quantidade de oxigênio necessária para oxidação da matéria orgânica através de um agente químico. Os valores da DQO normalmente são maiores que os da  $DBO_{5,20}$ . O aumento da concentração de DQO num corpo d'água se deve principalmente à despejos de origem industrial (JARDIM & CANELA, 2004).

A DQO é um parâmetro indispensável nos estudos de caracterização de esgotos sanitários e de efluentes industriais e muito útil quando utilizada conjuntamente com a  $DBO_{5,20}$  para observar a biodegradabilidade de despejos. Como na  $DBO_{5,20}$  mede-se apenas a fração biodegradável, quanto mais este valor se aproximar da DQO significa que mais facilmente biodegradável será o efluente (SANT'ANNA & LIPPEL, 2010).

Normalmente encontram-se valores de DQO elevados em efluentes industriais, porém podem aparecer esses valores altos em efluentes domésticos, mas a maioria fica na faixa de 200 a 800  $mg. L^{-1}$  nesses esgotos (JORDÃO e PESSÔA, 2014).

O tempo de análise laboratorial é tido como um ponto favorável em relação a  $DBO_{5,20}$ , pois o período de análise da DQO pode ser alcançado em até 2 horas, ou em aparelhos especiais em até 2 minutos (VON SPERLING, 1996; MOTA, 2003).

### ❖ **Relação DQO/DBO<sub>5,20</sub>**

A relação entre DQO/DBO<sub>5,20</sub> mais comum encontrada em efluentes domésticos varia entre 1,7 e 2,4 (NUVOLARI, 2011; VON SPERLING, 1996). Essa relação se faz muito importante, pois pode apontar a existência de efluentes industriais introduzidos no sistema, ou ainda ineficiência da tratabilidade do próprio efluente doméstico (NUVOLARI, 2011).

Para Von Sperling (1996) a relação entre DQO/ DBO<sub>5,20</sub> pode deduzir uma série de conclusões a respeito da tratabilidade de um efluente, como por exemplo: uma baixa relação desses dois parâmetros é indicativa de alta parcela biodegradável de possível tratabilidade biológica. Quando a relação for elevada, a parcela inerte do efluente se encontrará em alta concentração, porém nesses casos, para definir o tipo de tratamento a ser empregado deve-se conhecer o corpo receptor do efluente.

No andar das etapas de um tratamento biológico, o valor da relação DQO/DBO<sub>5,20</sub> tende a ser maior que 3,0, isto porque a parcela biodegradável (DBO<sub>5,20</sub>) aproxima-se de valores baixos e a DQO, que seria a parcela não biodegradável, na maioria das vezes permanece praticamente inalterada (VON SPERLING, 1996).

### ❖ **Classificação do tamanho das partículas presentes no esgoto**

Segundo Kellner et al. (2016) e Jordão e Pessôa (2005), o esgoto doméstico é classificado quanto ao tamanho das partículas (p), como segue:

- Dissolvidas:  $p < 10^{-3} \mu\text{m}$ ;
- Coloidais:  $10^{-3} \mu\text{m} < p < 1 \mu\text{m}$ ;
- Suspensas ou não filtráveis:  $p > 1 \mu\text{m}$ .

## **2.3 Água de reuso**

Água de reuso é definida pela Resolução CNRH nº 54/2005 como sendo a água residuária que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização nas modalidades pretendidas. A reutilização ou reuso de água não é um conceito novo e tem sido praticado em todo o mundo há muitos anos. Há

relatos de sua prática na Grécia Antiga, com a disposição de esgotos e sua utilização na irrigação (CARVALHO et. al. 2014).

Historicamente, o reuso de água tem sido largamente utilizado de forma segura e controlada em diversos países, como: Estados Unidos, Japão, Austrália, Israel e Tunísia, nas mais diversas aplicações, inclusive para aumentar o suprimento de água potável, como é o caso da Namíbia, desde 1968. (ASANO, 2002).

Alguns exemplos de reuso da água no mundo (TAE, 2014):

- Califórnia (EUA): O esgoto é tratado e injetado nos lençóis freáticos, ajudando a fonte a permanecer sempre com uma quantidade de água.
- Namíbia: Investiu em tratamento do esgoto e no reuso dessa água como potável.
- Cingapura: Investe-se em tratamento de esgoto e no reuso dessa água como potável, direcionando grande parte para o uso em indústrias.
- Israel: Situado em uma região com pouca água, foram desenvolvidas técnicas de irrigação mais eficientes, como o gotejamento. Os índices de tratamento de efluentes chegam a 90%, que, após tratado, é reutilizado. Há também um programa de educação ambiental para conscientização sobre o uso da água.
- Londres (Inglaterra): Há um sistema de transporte de água para áreas onde há carência desse recurso. Também investem em usinas de dessalinização.
- Austrália: Investem em reciclagem da água e reuso.
- Japão: Nesse país as indústrias só utilizam água de reuso; há utilização de sistema de encanamento duplo: um com água de reuso e outro com água potável; e, em Tóquio, nos prédios maiores de 10.000 m<sup>2</sup> é obrigatória a existência de um sistema de tratamento e reuso da água.

Com a reciclagem e o reuso das águas residuárias, tem-se vários benefícios. Dentre eles pode-se destacar os benefícios ambientais, sociais e econômicos, conforme detalhado a seguir (SILVA & SANTANA, 2014):

- Ambientais: essa prática impacta positivamente na preservação dos recursos hídricos, havendo acréscimo da disponibilidade de água para uso em setores mais necessitados (hospitais, abastecimento público, por exemplo).
- Sociais: englobam a aumento na oportunidade de negócios na cadeia produtiva, incluindo maior número de empregos diretos e indiretos disponíveis, além da melhor imagem repassada para o restante da sociedade, no que tange a aplicação do desenvolvimento sustentável.
- Econômicos: é evidente a diminuição dos custos de consumo do recurso para as atividades como, por exemplo, irrigação e lavagens.

A Resolução nº 54 de 2005 estabeleceu os critérios gerais para o reuso de água potável. No artigo 3º desta Lei são definidas cinco modalidades de reuso de água (BRASIL, 2006):

- Reuso para fins urbanos: utilização de água de reuso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações e combate de incêndio dentro da área urbana;
- Reuso para fins agrícolas e florestais: Aplicação de águas de reuso para a produção agrícola e cultivo de florestas plantadas;
- Reuso para fins ambientais: utilização de água de reuso para a implantação de projetos de recuperação do meio ambiente;
- Reuso para fins industriais: utilização de reuso em processos, atividades e operações industriais;
- Reuso na aquicultura: utilização de água de reuso para a criação de animais ou para o cultivo de vegetais aquáticos.

O reuso relaciona-se com a proteção à saúde pública e meio ambiente, saneamento ambiental e gerenciamento de recursos hídricos. Para a prática do reuso é necessário conhecer as bases legais e assim definir a forma correta do mesmo (CUNHA, 2010).

### **2.3.1 Reuso de água no Brasil**

Apesar do país ser privilegiado em termos de recursos hídricos sua distribuição é bastante irregular. No nordeste brasileiro as condições hídricas são desfavoráveis, apresentam altas taxas de evapotranspiração durante todo ano, baixa precipitação, um subsolo em muitos lugares com água salobra ou formação de cristalino e o baixo desenvolvimento econômico-social (CASTRO, 2012).

No Brasil, ao contrário de outros países, a experiência do reuso é bastante recente. No momento não se pode estabelecer padrões, o que pode ser feito é um ajuste à realidade nacional através de estudos sobre os riscos associados e os conhecimentos das condições específicas das regiões (CUNHA et al., 2011).

Com o crescimento demográfico faz-se necessário intensificar a produção de alimentos, e a agricultura é o setor que mais consome água superficial no mundo, logo, é necessário a adoção de práticas alternativas de cultivo (LIRA et al 2015).

A prática do reuso de águas no Brasil, principalmente para a irrigação de hortaliças e de algumas culturas forrageiras, constitui-se em um procedimento não institucionalizado e tem se desenvolvido, até agora, sem nenhuma forma de planejamento ou controle. Na maioria das vezes é totalmente inconsciente por parte do usuário, que utiliza águas altamente poluídas de córregos e rios adjacentes para irrigação de hortaliças e outros vegetais, ignorando que esteja exercendo uma prática danosa à saúde pública dos consumidores e provocando impactos ambientais negativos (DAMASCENO, 2015).

Já existe atividade de reuso de água com fins agrícolas em certas regiões do Brasil porém a universalização dessa prática em todos os setores está longe de se concretizar, devido à falta de normas e legislação, abundância de recursos hídricos no país e o déficit de tratamento de esgoto, tornando-se necessário institucionalizar, regulamentar e promover o setor através da criação de estruturas de gestão, preparação de legislação, disseminação de informação, e do desenvolvimento de tecnologias compatíveis com as nossas condições técnicas, culturais e socioeconômicas (GURGEL, 2011).

Pode-se citar dois fatores que inibem a prática de reuso macro no Brasil, o primeiro deles é falta de vontade política na forma de estímulo ao desenvolvimento de tecnologias, na criação de programas de pesquisas, na introdução de linhas de créditos específicos e subsídios para a prática, através da redução dos valores da cobrança pelo uso da água para entidades e empresas que invistam na conservação e reuso de água. O segundo fator é a falta de um arcabouço legal que defina as modalidades de reuso permitidas, estabelecendo padrões de qualidade da água de reuso para cada uma delas e respectivos códigos de prática e definir critérios para licenciamento, os mecanismos de controle e sistema de informações (SAMPAIO, 2012).

### **2.3.2 Reuso de água na agricultura**

O Brasil dispõe de uma área irrigada de 6,95 milhões de hectares (Mha) sendo previsto um aumento de 45% até 2030. Em contrapartida, um volume de 1.065 m<sup>3</sup>/s de águas residuárias urbanas foi gerado no ano de 2016, podendo este ser equivalente à irrigação de 5 milhões de hectares de áreas agrícolas (BRASIL, 2017). A região Sul apresenta 35% da área irrigada, seguida da região Sudeste com 30%, Nordeste com 24% e as regiões Centro-Oeste e Norte, juntas, com 11% do total (BERTONCINI, 2008).

Segundo Rocha et al. (2010), o objetivo principal da prática de reuso da água não potável para fins agrícolas é a irrigação de plantas alimentícias (a exemplo de árvores frutíferas e cereais) e plantas não alimentícias (a exemplo de pastagens e forrageiras), dessedentação de animais, na indústria para geração de energia e resfriamento de equipamentos e para fins urbanos, como a lavagem de ruas e praças. Essa água deve atender aos parâmetros de qualidade exigidos na legislação brasileira (REZENDE, 2016). Uma das principais vantagens do uso agrícola de águas residuárias é a reutilização direta de nutrientes, melhorando o rendimento de culturas, diminuindo a carga orgânica lançada nos corpos hídricos e contribuindo para redução no uso de fertilizantes químicos (LIBUTTI, 2018).

O reuso de águas residuárias para fins agrícolas pode favorecer o desenvolvimento dessa região, trazendo um aumento de área cultivada e produtividade. Portanto, deve-se atentar para a segurança alimentar tendo a



consciência da forma de tratamento do esgoto e quais culturas podem ser irrigadas com estes tipos de água (LIRA et al 2015).

Se a água contiver teores elevados de sais ou material em suspensão, poderá prejudicar o sistema de irrigação, a lavoura e inutilizar a terra para a agricultura. O reuso da água residuária em áreas irrigadas pode implicar em riscos à saúde pública devido à presença de patógenos (protozoários, bactérias, vírus, nematoides), e ao solo devido à presença de sais. Dessa forma, para o êxito na utilização de águas residuárias em áreas irrigadas é essencial analisar sua qualidade físico química e microbiológica (JARAMILLO & RESTREPO, 2017).

Segundo Rocha (2013), apesar de não termos normas para este tipo de uso, devemos seguir os padrões estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 430 de 2011 (BRASIL, 2011), onde dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes e a Resolução CONAMA nº 357 de 2005 (BRASIL, 2005) que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água.

A agricultura brasileira consome 69% da água dos mananciais, seguindo-se o abastecimento doméstico (21%) e a atividade industrial (10%). Dados semelhantes foram obtidos pelo Banco Mundial (1994), indicando que a agricultura consome 69% da água, enquanto que o consumo residencial e industrial é de 23% e 8%, respectivamente (BRASIL, 2006)

O conhecimento acumulado sobre a utilização agrícola de efluentes de ETE's é ainda pequeno, o que torna premente a necessidade de pesquisas e ações na direção do reuso controlado, incluindo sua regulamentação. Recomenda-se que os governos estaduais e federais iniciem processos de gestão para estabelecer bases políticas, legais e institucionais, pois o reuso agrícola apresenta-se como uma solução sanitariamente segura, economicamente viável e ambientalmente sustentável (TSUTIYA, 2001).

Na maioria das áreas agrícolas irrigadas o volume de água utilizado é superior ao realmente necessário para a produção. A eficiência no uso da água pode auxiliar na resolução dos diversos problemas de escassez e ainda

estabilizar e garantir a produção, contudo, torna-se necessário um tratamento eficaz, aliando técnicas de tratamentos eficientes e práticas econômicas (FAGGION, et al. 2009).

Desperdícios de água na irrigação agrícola ocorrem devido ao uso de métodos de irrigação que favorecem perdas de até 60% da água por evaporação, como a inundação, os sulcos rasos, o pivô central e a aspersão (BERTONCINI, 2008).

Azevedo (2007) conduziu um estudo sobre o efeito da irrigação com água residuária tratada sobre a produção de milho forrageiro. Os resultados da análise de fertilidade do solo realizada antes da instalação do experimento demonstraram que o solo apresentava elevada concentração de potássio, e baixos níveis de fósforo, nitrogênio e sódio. As concentrações de nitrogênio, fósforo, sódio, cálcio, potássio e magnésio encontradas na água residuária foram superiores aos resultados obtidos para água de abastecimento, o que denota o potencial do uso desta água para aumento da fertilidade do solo.

No estudo realizado por Souza et al. (2015), a água residuária urbana foi utilizada de forma complementar a adubação da cultura feijoeiro (25% de adubação química), verificaram que o uso da água residuária na irrigação da cultura proporcionou alta produtividade (3810 Kg. ha<sup>-1</sup>) apesar da utilização de menores doses de adubos químicos.

Segundo Silva (2018), com a utilização da água residuária na irrigação a produção de grãos teve um incremento de 144% em relação a irrigação com água de abastecimento. Entretanto, o teor de sódio encontrado na água residuária foi 93% maior que na água de abastecimento, evidenciando a necessidade de realizar análises periódicas da qualidade da água residuária utilizada na irrigação, a fim de prevenir problemas de salinidade e sodicidade no solo.

Barreto (2013) analisou as mudanças nos atributos químicos de um solo irrigado com água residuária. Os resultados encontrados mostraram um aumento significativo dos teores de fósforo, cálcio, potássio e matéria orgânica, principalmente na camada superficial do solo. Andrade (2012) verificou um maior crescimento da cultura do girassol quando irrigada com água residuária,

associando a este resultado, principalmente, o efeito positivo do nitrogênio presente na água residuária (30 mg. L<sup>-1</sup>), uma vez que na água de abastecimento, este elemento, que é importante ao crescimento desta cultura, é ausente.

Em Israel, 65% do efluente sanitário tratado são utilizados na irrigação agrícola. No México, 45.000 litros/por segundo, de esgoto produzidos na Cidade do México são misturados diariamente com água de chuva, sendo a mistura encaminhada por meio de canais a uma distância de 60 km, para irrigação de 80.000 hectares cultivados com cereais e forragens (BERTOCINI, 2008). No caso de Israel, a prática do reuso é planejada e controlada por meio de legislação, e no caso do México, não há tratamento, nem controle da disposição de efluentes sanitários no solo, caracterizando uma situação não recomendável.

Na Austrália, áreas de 600 hectares cultivadas com cana-de-açúcar estão sendo irrigadas com efluentes de tratamento de esgoto. A utilização dos efluentes proporcionou aumento de 45% da produção e 62,5% da produção de açúcar (BERTOCINI, 2008).

Portanto, a aplicação de água residuária pode elevar o aporte de nutrientes no solo, favorecendo o desenvolvimento das plantas. Segundo Von Sperling (2005), para uso na irrigação de hortaliças, produtos ingeridos crus e com casca recomenda-se que a água não tenha salinidade excessiva e seja isenta de substâncias químicas e organismos prejudiciais à saúde. Com relação às demais culturas o ideal é que a água não apresente substâncias prejudiciais ao solo, ao desenvolvimento das plantas, e apresente salinidade não excessiva.

### **2.3.2.1 Qualidade da água para irrigação**

A qualidade da água utilizada na irrigação deve contemplar o conjunto de características físicas, químicas e biológicas. Segundo Almeida (2010), habitualmente os parâmetros que se analisam para essa finalidade são: Potencial Hidrogeniônico (pH), Condutividade elétrica (K), Sais Totais Dissolvidos (STD), Íons: sódio (Na<sup>+</sup>), potássio (K<sup>+</sup>), cálcio (Ca<sup>++</sup>), magnésio (Mg<sup>++</sup>), cloreto (Cl<sup>-</sup>), sulfato (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>), carbonatos (CO<sub>3</sub><sup>--</sup>) e bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

A Tabela 3 apresenta os limites estabelecidos para águas de irrigação por Andrade (2017) e Almeida (2010).

**Tabela 3** - Análises necessárias para avaliar a água para irrigação.

<b>Parâmetro</b>	<b>Intervalo usual na água de irrigação</b>
Condutividade Elétrica	0 - 3000 $\mu\text{S cm}^{-1}$
Totais de Sais Dissolvidos	0 - 2000 $\text{mg L}^{-1}$
<b>Cátions e ânions</b>	
Cálcio ( $\text{Ca}^{++}$ )	0 - 20 $\text{meq L}^{-1}$
Magnésio ( $\text{Mg}^{++}$ )	0 - 5 $\text{meq L}^{-1}$
Sódio ( $\text{Na}^+$ )	0 - 40 $\text{meq L}^{-1}$
Carbonatos ( $\text{CO}_3^{-}$ )	0 - 0,1 $\text{meq L}^{-1}$
Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{-}$ )	0 - 10 $\text{meq L}^{-1}$
Cloretos ( $\text{Cl}^-$ )	0 - 30 $\text{meq L}^{-1}$
Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	0 - 20 $\text{meq L}^{-1}$
<b>Nutrientes</b>	
Nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ )	0 - 10 $\text{mg L}^{-1}$
Amoníaco ( $\text{N-NH}_4^+$ )	0 - 5 $\text{mg L}^{-1}$
Fosfato ( $\text{P-PO}_4^{3-}$ )	0 - 2 $\text{mg L}^{-1}$
Potássio ( $\text{K}^+$ )	0 - 2 $\text{mg L}^{-1}$

Fonte: Almeida (2010) apud. Andrade (2017).

De acordo com Brandão et al., (2002) o emprego de água residuárias na irrigação reduz os custos de fertilização das culturas, bem como o nível requerido de purificação do efluente e, conseqüentemente, os custos de seu tratamento, já que as águas residuárias contêm nutrientes necessárias ao solo e a diversas culturas.

De acordo com Santana et al. (2007), a condutividade elétrica da água é o parâmetro mais empregado para avaliar a salinidade de um meio aquoso. A salinidade diminui o potencial externo de água reduzindo a disponibilidade de água às culturas, que podem reduzir a produção em até 50 %. Altos níveis de sais nas águas de irrigação, tanto são prejudiciais ao desenvolvimento das culturas como causam a obstrução dos sistemas de irrigação.

A qualidade da água para irrigação é avaliada não apenas pelo seu conteúdo total de sais, mas, também, pela composição individual dos íons presentes. Alguns cátions e ânions, quando em excesso, podem trazer prejuízos

ao solo e às plantas cultivadas, dependendo do grau de tolerância destas aos sais (GARCIA *et al.*, 2008).

Além dos parâmetros elencados na Tabela 4, se faz necessário o controle sanitário de águas utilizadas para irrigação. A presença de bactérias patogênicas além de trazer riscos ao agricultor irrigante que mantém contato direto com a água, também propicia a contaminação de alimentos em especial aqueles consumidos na forma crua, quando irrigados com tais águas. A prevalência de doenças, como por exemplo Cólera, Giardíase, Amebíase, Hepatite A e B, constitui um forte indicativo da fragilidade dos sistemas públicos de saneamento básico, principalmente em regiões de menor poder aquisitivo (ANDRADE, 2017).

Segundo Mancuso e Santos (2003), os poluentes mais comuns são:

- a) A matéria orgânica, responsáveis pela demanda bioquímica de oxigênio ( $DBO_{5,20}$ ) e os sólidos totais dissolvidos (STD), responsável pela demanda química de oxigênio (DQO);
- b) Poluentes orgânicos, como agrotóxicos;
- c) Poluentes inorgânicos, como metais pesados;
- d) Macronutrientes, como nitrogênio e fósforo;
- e) Micronutrientes patogênicos, como as bactérias, vírus e os parasitas;
- f) Elementos que conferem a salinidade da água.

#### **2.4 Legislação ambiental para tratamento de águas residuárias e seu reuso**

Atualmente no Brasil, há duas resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que abordam as classificações dos corpos d'água, os padrões de qualidade e os padrões de lançamento de efluentes: a Resolução CONAMA 357 (BRASIL, 2005) e a Resolução CONAMA 430 (BRASIL, 2011).

De acordo com o CONAMA nº 357 de 2005, as águas são classificadas como doce, salobra e salina. Cada classificação se divide em classes, de acordo com suas aplicações na irrigação:

- Águas Doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 %.

- Classe 1 (< 200 UFC de coliformes termotolerantes por 100ml de amostra): Valores como  $DBO_{5,20}$  não pode ultrapassar 3 mg. L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>;

Oxigênio Dissolvido (OD), em qualquer amostra, maior que 6 mg. L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>; A turbidez não pode ultrapassar 40 unidades nefelométrica de turbidez (UNT); cor verdadeira: nível de cor natural do corpo de água em mg Pt/L; e pH: de 6,0 a 9,0.

- Classe 2 (200 a 1000 UFC de coliformes termotolerantes por 100 ml): Valores como DBO<sub>5,20</sub> não pode ultrapassar 5 mg. L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>; Oxigênio Dissolvido (OD), em qualquer amostra, maior que 5 mg. L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>; A turbidez não pode ultrapassar 100 UNT; cor verdadeira: até 75 mg Pt/L; e pH: de 6,0 a 9,0.
- Classe 3 (1.000 a 4.000 UFC de coliformes termotolerantes por 100 ml): Valores como DBO<sub>5,20</sub> até 10 mg. L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>; OD, em qualquer amostra, maior que mg. L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>; A turbidez até 100 UNT; cor verdadeira: até 75 mg Pt/L; e pH: de 6,0 a 9,0.
- Classe 4: Valores de OD, superior a 2,0 mg. L<sup>-1</sup> O<sub>2</sub> em qualquer amostra; pH: 6,0 a 9,0. Virtualmente ausentes de substâncias facilmente sedimentáveis que contribuam para o assoreamento de canais de navegação; Objeção de odor.

Na Tabela 4 estão os valores de DBO<sub>5,20</sub> em mg. L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>, a quantidade de coliformes termotolerantes toleráveis e a destinação da água, para as águas doces, de acordo com a resolução CONAMA 357/05.

**Tabela 4** – Classes e destinação da água segundo seu grau de contaminação por bactérias do tipo coliformes termotolerantes e limites de DBO<sub>5,20</sub>.

Classe (Águas Doces)	Coliformes Termotolerantes <sup>(1)</sup> (UFC/100 ml <sup>(2)</sup> )	DBO <sub>5,20</sub> (mg. L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	Destinação da Água
1	200	3	Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; Recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho); Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; Proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.

Continua

Classe (Águas Doces)	Coliformes Termotolerantes <sup>(1)</sup> (UFC/100 ml <sup>(2)</sup> )	DBO <sub>5,20</sub> (mg. L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	Destinação da Água
2	1000	5	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; Proteção das comunidades aquáticas; Recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho); Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; Aquicultura e Atividade de pesca.
3	4000	10	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; Pesca amadora; Recreação de contato secundário; Dessedentação de animais.
4	-	-	Navegação; Harmonia paisagística.

Fonte: Brasil (2005).

**NOTAS:**

<sup>(1)</sup> *E. coli* poderá ser determinada em substituição a coliformes termotolerantes de acordo com limites estabelecidos pelo órgão ambiental competente.

<sup>(2)</sup> Unidades formadoras de colônias (UFC) de coliformes por 100 mL de água em no máximo 80% de pelo menos seis amostras coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral entre amostras.

- Águas Salobras: águas com salinidade superior a 0,5 % e inferior a 30 %.

- Classe 1 (< 1000 UFC de coliformes termotolerantes por 100ml de amostra): OD, em qualquer amostra, maior que 6 mg. L<sup>-1</sup> O<sub>2</sub>; e pH: 6,5 a 8,5, não devendo haver uma mudança do pH natural maior do que 0,2 unidade; ausência de materiais flutuantes; ausência de substâncias que produzem odor e turbidez; ausência de resíduos sólidos.
- Classe 2 (1000 a 2500 UFC de coliformes termotolerantes por 100mL de amostra): OD, em qualquer amostra, maior que 5,0 mg. L<sup>-1</sup> O<sub>2</sub>.
- Classe 3 (2500 a 4000 UFC de coliformes termotolerantes por 100ml de amostra): OD, em qualquer amostra, maior que 4 mg/ L de O<sub>2</sub>; e pH: 6,5 a 8,5 não devendo haver uma mudança do pH natural maior do que 0,2

unidades; ausência de substâncias que produzem odor e turbidez; ausência de resíduos sólidos.

Na Tabela 5 estão os valores de OD (Oxigênio Dissolvido) em mg. L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>, a quantidade de coliformes termotolerantes toleráveis e a destinação da água, para as águas salinas, de acordo com a resolução CONAMA 357/05.

**Tabela 5** – Classes e destinação da água segundo seu grau de contaminação por bactérias do tipo coliformes termotolerantes e limites de OD.

Classe (Águas Salinas)	Coliformes Termotolerantes (UFC/100ml)	OD (mg. L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	Destinação da Água
1	1000	> 6	- Recreação de contato primário; - Proteção das comunidades aquáticas; - Aquicultura; - Atividade de pesca.
2	2500	> 5	- Pesca amadora; - Recreação de contato secundário.
3	4000	> 4	- Navegação; - Harmonia paisagística.

Fonte: Brasil (2005).

- Águas Salina: águas com salinidade igual ou superior a 30 %;

- Classe 1 (< 1000 UFC de coliformes termotolerantes por 100ml de amostra): OD, em qualquer amostra, maior que 5 mg/ L de O<sub>2</sub>; e pH: 6,5 a 8,5; materiais flutuantes: virtualmente ausentes; ausência de substâncias que produzem cor, odor e turbidez; resíduos sólidos objetáveis: virtualmente ausentes.
- Classe 2 (1000 a 2500 UFC de coliformes termotolerantes por 100ml de amostra): OD, em qualquer amostra, maior que 4 mg. L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>.
- Classe 3 (2500 a 4000 UFC de coliformes termotolerantes por 100ml de amostra): OD, em qualquer amostra, maior que 3 mg. L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>; pH entre 5 e 9; ausência de materiais flutuantes; ausência de cor, odor e turbidez; ausência de substâncias facilmente sedimentáveis que contribuam para o assoreamento de canais de navegação.



Na Tabela 6 estão os valores de OD (Oxigênio Dissolvido) em mg. L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>, a quantidade de coliformes termotolerantes toleráveis e a destinação da água, para as águas salobras, de acordo com a resolução CONAMA 357/05.

**Tabela 6** – Classes e destinação da água segundo seu grau de contaminação por bactérias do tipo coliformes termotolerantes e limites de OD.

Classe (Águas Salobras)	Coliformes Termotolerantes (UFC/100ml)	OD (mg. L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	Destinação da Água
1	1000	> 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recreação de contato primário;</li> <li>- Proteção das comunidades aquáticas;</li> <li>- Aquicultura e atividade de pesca;</li> <li>- Abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado;</li> <li>- Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película;</li> <li>- Irrigação de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto.</li> </ul>
2	2500	> 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pesca amadora;</li> <li>- Recreação de contato secundário.</li> </ul>
3	4000	> 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Navegação;</li> <li>- Harmonia paisagística.</li> </ul>

Fonte: Brasil (2005).

## 2.5 Contaminação de águas por microrganismos patogênicos

Sabe-se que as águas residuárias contêm uma grande quantidade de microrganismos, e que, entre eles, os agentes patogênicos podem estar presentes. O nível de concentração de organismos patogênicos nas águas residuárias varia de acordo com a localidade, em virtude das condições socioeconômicas e sanitárias da população residente (HANJRA et al., 2012),

causando restrições aos usos da água como abastecimento potável e para irrigação (STEFILER, et al., 2017).

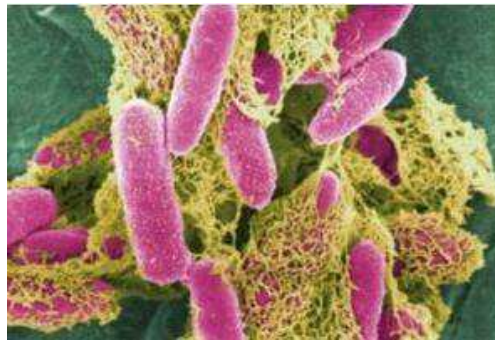
Como é inviável econômica e operacionalmente detectar todos os potenciais organismos patogênicos presentes em uma amostra devido as análises serem complexas e de custo elevado, empregam-se microrganismos indicadores de contaminação fecal por apresentarem resistência ligeiramente superior à maioria das bactérias patogênicas intestinais e por estarem presentes nas fezes humanas, nos quais está incluída a bactéria *Escherichia coli*. Dependendo da concentração destas bactérias, a água pode ser imprópria para um uso específico (REALI et al., 2013).

O limite de contaminação estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (OMS) para água destinada a irrigação de hortaliças consumidas cruas, por exemplo, é de 1.000 UFC de coliformes termotolerantes por 100 mL, portanto acima daquele estabelecido no Brasil, que é de 200 UFC/100ml de amostra. Esse padrão é similar ao adotado, por exemplo, no Chile e outros países (MAROUELLI, et al., 2014).

Doenças de veiculação hídrica como gastroenterite (desarranjos gastrointestinais); cistite (inflamação da bexiga urinária), meningite (inflamação das meninges em neonatos), sepse (une os sintomas de uma infecção generalizada preexistente à resposta inflamatória do organismo), peritonite (inflamação do peritônio: membrana que reveste parte da cavidade abdominal) podem ser transmitidas devido à irrigação de culturas hortícolas com água residuária, caso estes sejam consumidos crus (SHUVAL et al., 1997).

A *Escherichia coli* (Figura 2) é uma bactéria na forma de bastonete, e anaeróbia facultativa, com tamanho de aproximadamente 0,7  $\mu\text{m}$  (quando desidratadas) a 1,5  $\mu\text{m}$  (quando vivas), cujo habitat específico é o intestino humano e de animais homeotérmicos (de sangue quente; mamíferos e aves) (CEBALLOS & DINIZ, 2017).

**Figura 2 – *Escherichia Coli*.**



Fonte: Lodish et al (2005).

São encontradas em esgotos sanitários, águas poluídas e mesmo em efluentes tratados e águas naturais com contaminação recente por seres humanos. A presença de coliformes termotolerantes é um indicativo da existência de outras enterobactérias no ambiente, como *Salmonella ssp.* e de *Shigella ssp.*, além de *Escherichia coli* patogênica (MAROUELLI et al, 2014).

Os parâmetros microbiológicos estão inseridos na Resolução nº 357 do CONAMA (BRASIL, 2005), segundo a qual para coliformes termotolerantes ou *Escherichia coli* devem ser realizadas pelo menos seis análises da água durante o período de um ano, com frequência bimestral e sem a possibilidade de flexibilização dos valores limites de coliformes fecais quando houver dificuldades para sua detecção laboratorial (PIZELLA & SOUZA, 2007).

Confirmado o estado de contaminação fecal da água, análises microbiológicas específicas poderão ser realizadas para avaliar a presença de patógenos de interesse. Tais análises não são, no entanto, necessárias ou requeridas para fins de água para uso na irrigação. Deve-se ressaltar que a detecção de contaminação de origem fecal nos alimentos (hortaliças e frutas) é também feita por meio dos mesmos indicadores utilizados para a água, com destaque para *Escherichia coli*. A demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5,20</sub>) é indicador do nível de matéria orgânica em decomposição, porém não indica o grau de contaminação fecal da água (MAROUELLI et al, 2014).

A presença de substâncias químicas e organismos patogênicos na água destinada ao reuso é a preocupação central de seus potenciais consumidores. A remoção dos contaminantes dependerá da eficiência dos sistemas de

tratamento, cuja tecnologia, por sua vez dependerá da qualidade desejada para a água a ser produzida para reuso (IWAKI, 2015).

A desinfecção pode ser feita pela adição de produtos químicos, como cloro, dióxido de cloro, ozônio, entre outros, por processos físicos como os que utilizam as radiações, a exemplo, solar e a UV e a remoção física dos microrganismos pelas membranas filtrantes. A eficiência da desinfecção é avaliada pela redução da concentração de organismos patogênicos (STEFLE, et al., 2017).

O objetivo principal da desinfecção das águas residuárias é a proteção da saúde da população, de acordo com os possíveis usos pretendidos, a saber: abastecimento público, irrigação, uso agrícola, recreação, entre outros. Sendo que, para cada um destes usos aplicam-se critérios e padrões de qualidade, em que não apenas as incidências e concentrações máximas de organismos são consideradas, mas também os próprios organismos, grupos e tipos (STEFLE, et al., 2017).

## **2.6 Tratamento convencional de águas residuárias**

No tratamento de águas residuárias, o principal objetivo é diminuir a quantidade dos sólidos totais suspensos e dissolvidos, a demanda bioquímica de oxigênio ( $DBO_{5,20}$ ), a demanda química de oxigênio (DQO), e também exterminar o máximo possível de organismos patogênicos para adequar o lançamento desse efluente à disposição final, atendendo aos padrões da legislação vigente (BERTONCINI, 2008). É necessário realizar tratamentos mínimos e avançados de acordo com os parâmetros de qualidade específicos a cada uso destinado (CUNHA et al., 2011).

A escolha do tipo de tratamento para cada situação é feita considerando-se várias condições, desde a eficiência desejada até o custo final de operação. A variedade dos tipos de processos é grande e podem ser utilizadas uma ou mais combinações de unidades, de acordo com o tipo de efluente e das substâncias que deverão ser removidas. No entanto, é imprescindível a implantação de um sistema de tratamento preliminar em qualquer tipo de tratamento utilizado. O tratamento preliminar tem como objetivo básico remover

os sólidos grosseiros, preparando os esgotos para o tratamento posterior, evitando obstruções e danificações em equipamentos eletromecânicos (MENEZES & MENDONÇA, 2017).

De forma geral, os tratamentos convencionais de efluentes podem ser divididos em tratamento preliminar, primário, secundário e terciário (OTENIO, 2015):

- Tratamento preliminar: Serve para filtrar os resíduos mais grosseiros, flutuantes e sedimentáveis, através da utilização de grades. Este processo evita o entupimento de canalizações e o bloqueio dos equipamentos situados a jusante do processo.
- Tratamento primário: Processo físico de decantação para remover areias e gorduras. Sendo necessário, algumas vezes, a adição de químicos para ajudar na floculação, onde os sedimentos se tornam maiores sendo facilmente decantados. O efluente flui vagarosamente e os sólidos com maior densidade que o líquido sedimenta no fundo do tanque.
- Tratamento secundário: Atua diretamente na remoção de compostos solúveis e sólidos suspensos biodegradáveis. Os processos utilizados no tratamento secundário podem ser subdivididos em tratamentos biológicos aeróbios e anaeróbios. No aeróbio, a remoção se dá pela incorporação dos poluentes solúveis nas células dos microrganismos que posteriormente são removidos pelo decantador secundário. Já no anaeróbio, as bactérias consomem o substrato, produzindo gases, em especial o metano, que são removidos do sistema. O processo biológico escolhido vai depender do volume de efluente a ser tratado, de sua biodegradabilidade e disponibilidade de espaço físico.

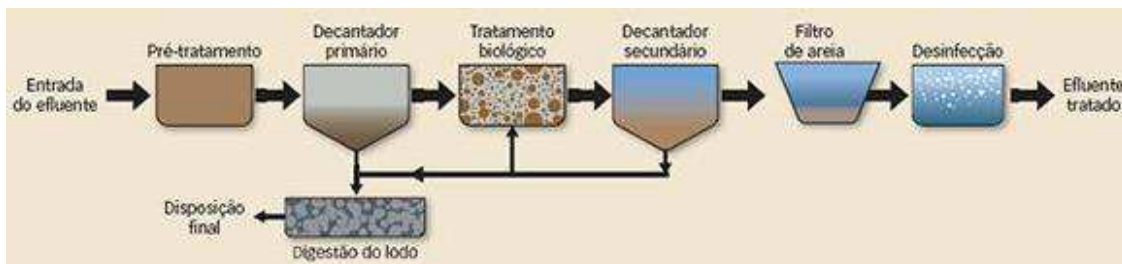
Após o tratamento convencional, a qualidade do efluente pode ser melhorada pelo tratamento terciário, visando à adequação deste efluente aos padrões de lançamento (TANJI et al., 2002; JIMENEZ, et al, 2010).

- Tratamento Terciário: Tratamento de desinfecção e controle de nutrientes, para eliminar bactérias e vírus. A adição de cloro é a mais comum, também por ser menos dispendiosa, mas a remoção de vírus não

é completamente eficaz. Existem atualmente outros processos mais avançados: membranas, ozonação, ultravioletas e filtração por areias.

Na Figura 3 está representado um sistema completo de tratamento convencional (Estação de Tratamento de Efluente – ETE) de forma sucinta, desde a entrada até o efluente tratado.

**Figura 3** – Sistema de tratamento convencional de efluentes.



Fonte: Mazzonetto (2012).

O uso de reatores com membrana pode ser aplicado em ETE's de qualquer tamanho, com uma grande economia de espaço - cerca de um quarto da área de uma estação de tratamento normal, funcionando como um tratamento primário, secundário e terciário, removendo desde sólidos em suspensão até microrganismos, bactérias e protozoários sem a necessidade de utilizar cloro, sendo vantajoso devido a área construída ser menor (MAZZONETTO, 2012).

## 2.7 Técnicas de separação sólido/líquido

Os processos de separação de sólidos em suspensão e microrganismos da água são os físicos, químicos e biológicos (LEAL, 2015):

- Os processos físicos removem os sólidos em suspensão sedimentáveis e flutuantes e também removem a matéria orgânica e inorgânica em suspensão coloidal e reduzem ou eliminam a presença de microrganismos por meio de processos de filtração por membranas
- Os processos químicos removem os poluentes por meio de reações químicas utilizando produtos químicos em seu processo, tais como: agentes de coagulação, floculação, neutralização de pH, oxidação, redução e desinfecção em diferentes etapas dos sistemas de tratamento.

- O tratamento biológico de efluentes residuais tem o objetivo de remover a matéria orgânica dissolvida e em suspensão, convertendo-a em sólidos sedimentáveis (flocos biológicos) e gases.

Alguns processos de separação sólido/líquido mais utilizados são citados por Marques (2017), como:

- a. Coagulação/Floculação: Tratamento da água a base de adição de produtos químicos coagulantes para agregar partículas dificilmente sedimentáveis em aglomerados (flocos) para que possam ser retirados com mais facilidades nos processos de sedimentação e filtração por exemplo.
- b. Decantadores: Após as operações de coagulação/floculação a etapa seguinte é a separação dos sólidos do meio no qual encontram-se suspensos. Isto é conseguido através da decantação. A decantação objetiva a separação do material mais denso do que a água.
- c. Flotação: É um processo de separação de partículas suspensas (sólidas ou líquidas) em meio líquido, através da utilização de bolhas de gás, normalmente o ar. Quando estas bolhas aderem à superfície das partículas, aumentam seu empuxo, provocando seu direcionamento para a superfície da fase líquida, de onde, ao atingirem concentrações adequadas são devidamente coletadas.
- d. Filtração por membranas: Seu objetivo básico é separar as partículas de densidade próxima à da água e microrganismos que não tenham ficado retidos no processo de decantação. Por esta razão a eficiência dos filtros depende diretamente do desempenho dos processos anteriores.
- e. Hidrociclonação: A alimentação é feita tangencialmente na secção superior cilíndrica do hidrociclone por meio de uma bomba, que utiliza a força centrípeta, gravitacional e arrasto atuando sobre as partículas. Os finos saem pela abertura existente na parte superior e os grossos saem pelo fundo da parte cônica inferior.

## 2.8 Hidrociclone

Os hidrociclones são equipamentos compactos e originalmente construídos para a separação sólido-líquido. Sua primeira patente foi depositada no final do século XIX (BRETNEY, 1891) e sua utilização foi intensificada em meados da década de 1940 na indústria de mineração. Trinta anos mais tarde esses equipamentos foram empregados na separação de águas oleosas (YOUNG et al. 1994).

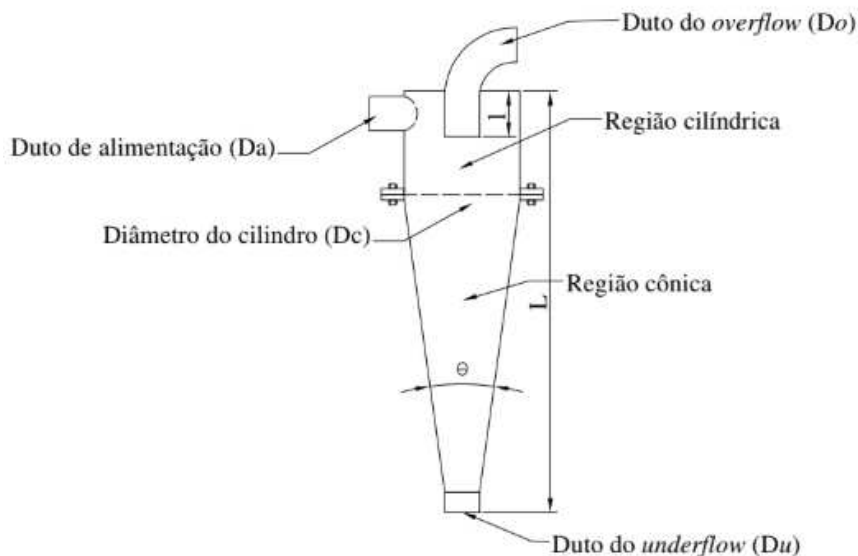
São equipamentos caracterizados por sua alta confiabilidade operacional e eficiência com o aumento das vazões, seu alto rendimento, sua estrutura simples (sem partes móveis), tamanho pequeno e baixos custos de manutenção e suporte (BAYO et al., 2015; VAKAMALLA et al., 2017), são parâmetros para sua utilização. O tamanho das partículas separadas difere entre as aplicações, mas os tamanhos na faixa de 5  $\mu\text{m}$  a vários milímetros são descritos (MULLER, 2008; NI et al., 2016).

As possibilidades de aplicação dos hidrociclones são numerosas; eles são usados em engenharia petroquímica, na indústria química ou na indústria de celulose e papel, são alguns exemplos. Outro campo de aplicação é a engenharia ambiental, em particular as aplicações no tratamento de águas residuárias e tratamento de resíduos. (MAKELA et al., 2014). Nos processos de tratamento de águas residuárias, os hidrociclones são usados principalmente para a separação de areia ou cascalho. Nas situações em que a água apresenta alta quantidade de sólidos, pode ser necessária a instalação de equipamentos como pré-filtros instalados antes do sistema de filtração (JANK et al, 2017).

O hidrociclone consiste em uma parte cônica, ligada a uma parte cilíndrica, na qual existe uma entrada tangencial para a suspensão de alimentação. A parte superior do hidrociclone apresenta um tubo para saída da suspensão diluída (*overflow*) e, na parte inferior, há um orifício de saída da suspensão concentrada (*underflow*), conforme esquema da Figura 4 (SOUZA et al., 2000).



**Figura 4** - Esquema típico de um hidrociclone.



Fonte: Cruz & Zanini (2010).

Partículas maiores e mais densas tendem a ocupar as regiões mais próximas da parede sofrendo ações das forças centrípeta e rotacional, e as partículas menores são deslocadas para a região central do hidrociclone. É de suma importância as proporções relativas das dimensões do hidrociclone sob seu efeito na eficiência de separação e queda de pressão. Assim, por exemplo, espera-se que um hidrociclone com saídas relativamente pequenas ofereça uma maior recuperação em massa, com maior resistência ao escoamento e, portanto, menor capacidade (CAVALCANTE, 2018).

Segundo Vieira (2006) a escolha da geometria do equipamento depende do objetivo da operação de hidrociclonagem, por exemplo, hidrociclones da família Bradley se caracterizam por apresentarem maior tronco de cone e menor ângulo, é um típico hidrociclone classificador de alta eficiência, porém de maior gasto energético, com *número de Euler* ( $Eu = 7500$ ) e por apresentarem menor ângulo, propiciam melhor separação de partículas finas. E hidrociclones da família Rietema possuem comprimento da parte cilíndrica maior que o tronco de cone, e é tipicamente conhecida por apresentar alta capacidade com baixo gasto energético, com *número de Euler* ( $Eu = 1200$ ) (GONÇALVES, 2016).

Além de sua geometria, as condições operacionais, como queda de pressão e concentração da alimentação, influenciam no desempenho de hidrociclones. A elevação dos níveis de queda de pressão aumenta a eficiência

de separação, entretanto, é usual operar com pressões de até 2 bar. O aumento da concentração da suspensão alimentada leva ao rápido decréscimo na eficiência, por isso a alimentação diluída é preferida quando se busca por alta recuperação mássica sólidos (SVAROVSKY, 2000).

### 2.8.1 Aplicações do hidrociclone

As principais aplicações dos hidrociclones são (ALVES, 2006):

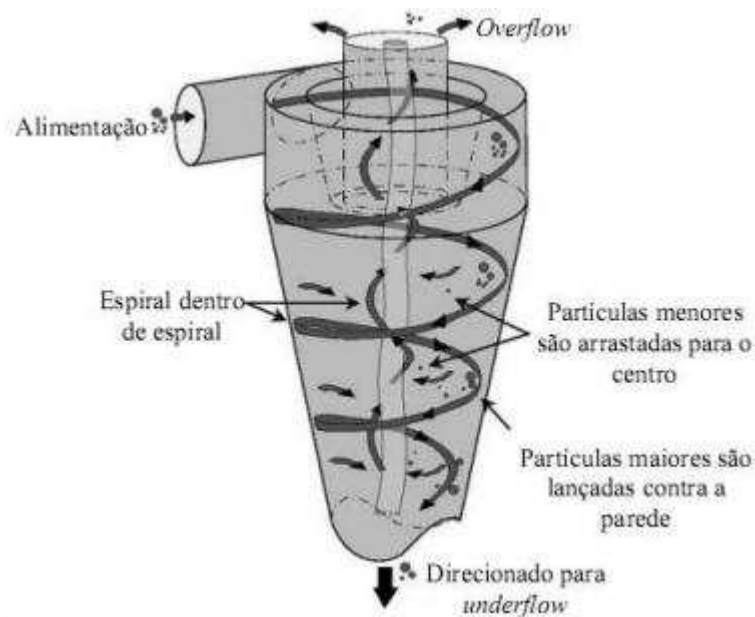
- Espessamento: tem a finalidade de concentrar uma suspensão.
- Deslamagem: visa eliminar partículas finas facilitando tratamentos sucessivos como filtração, flotação e outras operações similares.
- Classificação seletiva: objetiva a separação por diferenças entre densidades para uma alimentação não homogênea.
- Fracionamento: visa a separação em duas correntes (grossa e fina) para tratamentos posteriores.
- Pré-concentração: consiste em utilizar a diferença de densidades para aumentar a concentração da alimentação.
- Recuperação de líquidos: é uma operação utilizada para recuperação e reciclagem de águas de processo.

### 2.8.2 Funcionamento do hidrociclone

Segundo Bravim & Pereira (2007), do ponto de vista mecânico, o hidrociclone é um equipamento capaz de transformar a energia potencial do fluxo da alimentação (pressão) em energia cinética (movimento). Considerando seu funcionamento com água, esta adquire um movimento circular dentro da porção cilíndrica do hidrociclone e só pode sair pelas duas aberturas existentes: o *apex* (*underflow*) e o *vortex finder* (*overflow*). Como este último tem secção maior, por ele sairá a maior porção da água alimentada no hidrociclone.

Os hidrociclones são formados por uma parte cilíndrica superior, que é proporcional a capacidade de processamento, e outra cônica inferior, que é responsável pela eficiência de coleta de sólido. A Figura 5 mostra como ocorre o movimento das fases dentro de um hidrociclone (BRAVIM & PEREIRA, 2007).

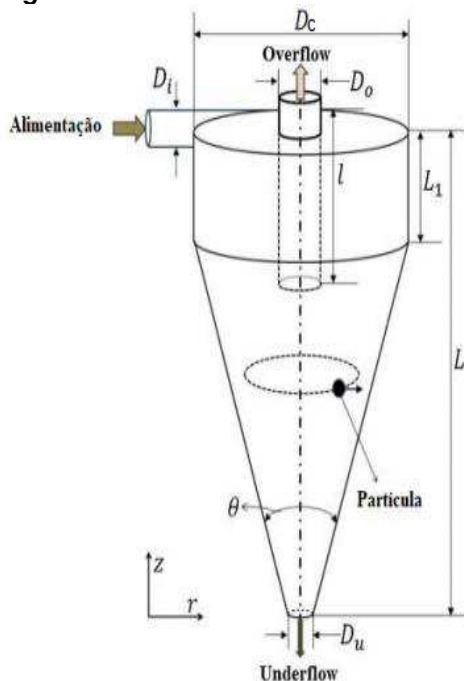
**Figura 5** – Separação de misturas em um hidrociclones.



Fonte: Silva (2012).

De acordo com a Figura 5, a alimentação é injetada tangencialmente no hidrociclone em alta velocidade para produzir um campo de força centrífuga. A fase mais densa, pela força centrífuga, se direciona para a parede do equipamento impondo um movimento circular com trajetória helicoidal, pela ação do atrito perdem velocidade e são arrastadas para baixo pelo vórtice descendente, também pela ação da gravidade, e descarregam com o *underflow*. A fase menos densa, pela ação da força de arraste na direção vertical, se movimenta em espiral e são empurradas para o interior do hidrociclone, circundando o eixo central até encontrar o fluxo ascendente em direção ao *vortex finder*, sendo arrastadas e descarregam com o *overflow* (SILVA, 2012).

As partes que compõem um hidrociclone são observadas na Figura 6. O diâmetro da parte cilíndrica,  $D_c$ , diâmetro de alimentação (injetor/inlet),  $D_i$ , os diâmetros de *overflow*,  $D_o$  e *underflow*,  $D_u$ , o ângulo  $\theta$  da parte cônica, a altura da parte cilíndrica  $L_1$ , altura total  $L$ , e altura da seção de *overflow*, denominada *córtex* ou *vortex finder*,  $l$  (CAVALCANTE, 2018).

**Figura 6** – Dimensões do hidrociclones.

Fonte: Cavalcante (2018).

Segundo Cullivan et al. (2003), uma família de hidrociclones consiste em um conjunto específico de separadores que mantém entre si uma proporção constante de suas dimensões geométricas relacionadas com o diâmetro da parte cilíndrica,  $D_c$ . Na Tabela 7 são apresentadas as principais famílias de hidrociclones estudadas na literatura.

**Tabela 7** - Família de hidrociclones.

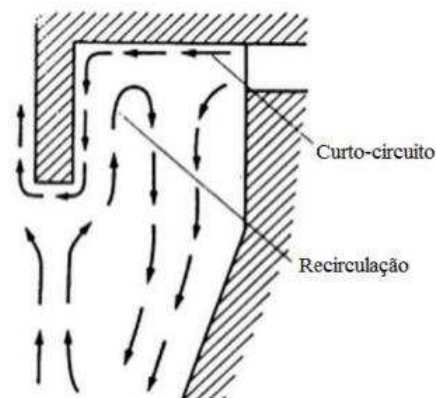
Família	$D_i/D_c$	$D_o/D_c$	$l/D_c$	$L/D_c$	$\theta$
<i>AKW</i>	0,2	0,32	0,8	6,24	15°
<i>Bradley</i>	0,133	0,2	0,33	6,85	9°
<i>DEMCO I</i>	0,217	0,5	1	4,7	25°
<i>DEMCO II</i>	0,244	0,313	0,833	3,9	20°
<i>Hi-Klone</i>	0,175	0,25	0,92	5,6	10°
<i>Krebs</i>	0,267	0,159	-	5,874	12,7°
<i>Mosley I</i>	0,154	0,214	0,57	7,43	6°
<i>Mosley II</i>	0,16	0,25	0,57	7,71	6°
<i>Rietema</i>	0,28	0,34	0,4	5	20°
<i>RW 2515</i>	0,2	0,32	0,8	6,24	15°
<i>Warman</i>	0,29	0,2	310	4	15°

Fonte: Silva (2012).

Segundo Bergstrom & Vomhoff (2007), um fenômeno importante no escoamento em hidrociclones são os efeitos de fricção causados pelas paredes.

Na parede superior do equipamento esses efeitos estão associados à alta pressão presente nessa região e baixas velocidades tangenciais que causam o denominado “curto-circuito” do fluido. Esse fenômeno é caracterizado pela passagem direta do fluido da corrente de alimentação para a corrente do *overflow* sem que o mesmo tenha sofrido ação do campo centrífugo das zonas inferiores do equipamento, como pode ser visualizado na Figura 7. Esse efeito é obviamente indesejado na separação das partículas e é também uma das razões pela qual o *vortex finder* é inserido ao longo de grande parte da seção cilíndrica (MOGNON, 2015).

**Figura 7** – Linhas de escoamento durante o curto-circuito.

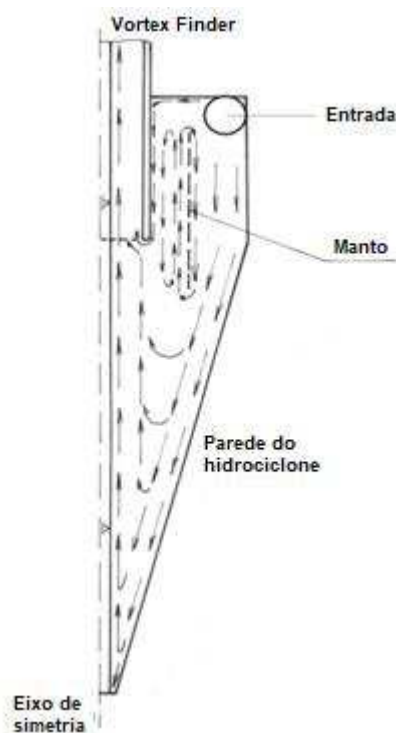


Fonte: Mognon (2015).

Outra característica interessante do escoamento no interior de hidrociclones consiste na formação de uma área caracterizada por velocidades axiais praticamente nulas. Essa região, denominada “manto”, situa-se diretamente no entorno das paredes externas do *vortex finder* no centro de uma zona de recirculação que pode ser visualizada na Figura 8 (MOGNON, 2015).

Bradley (1965) relatou a ocorrência dessa região pela primeira vez ao observar que pequenas quantidades de traçador ficavam presas em zonas de recirculação próximas ao *vortex finder*. Essa região tem efeito negativo na separação sólido-líquido, pois é responsável pela suspensão de material particulado pois interfere com o movimento em direção ao *overflow*, podendo melhorar ou prejudicar a seletividade da separação, conforme o caso (ANDRADE, 2007).

**Figura 8** – Escoamento em um hidrociclone com destaque para a região do manto.



Fonte: Mognon (2015).

Vários trabalhos foram desenvolvidos com a utilização de hidrociclones para separação sólido/líquido. Bayo et al. (2015) descreveram um hidrociclone como um dispositivo de limpeza para digestores de lodo anaeróbico para evitar a diminuição do volume disponível do reator. Yang et al. (2013) relatam a separação de partículas finas de efluentes industriais por um hidrociclone. Nayono et al. (2010) relatam sobre o uso do hidrociclone para separar a areia fina de uma suspensão de resíduos alimentares em água oriunda de um despoldador que passam por um piso de areia. Puprasert et al. (2004), estudaram a utilização do hidrociclone para a separação de sólidos suspensos na água de escoamento superficial. Yuan et al. (2015) relatam que na área de tratamento de resíduos os hidrociclones são utilizados na separação de resíduos plásticos.

Os hidrociclones apresentam grandes vantagens em relação a outros equipamentos de separação, dentre as quais podem-se destacar (CAVALCANTE, 2018):

1. Podem ser operados tanto a baixas quanto a altas temperaturas e pressões.

2. São extremamente versáteis em aplicações que podem ser usadas para clarificação de líquidos e sólidos, separação de dois líquidos imiscíveis, desgaseificar líquidos, de acordo com a densidade ou forma.
3. Estrutura simples e de fácil instalação.
4. Baixo custo de instalação e operação.
5. Requer um espaço pequeno para operar.
6. Os hidrociclones possuem baixo tempo de residência.
7. A existência de altas forças cisalhantes no fluido é uma vantagem para classificação de sólidos, pois isso resulta na quebra de qualquer aglomeração.
8. São versáteis em suas aplicações, sendo usado em separação sólido/líquido, sólido/sólido, gás/líquido, gás/sólido e líquido/líquido.

### 2.8.3 Modelagem matemática do hidrociclone

No projeto de um hidrociclone uma das características a serem focadas, são os dados das características físicas das fases a serem separadas e as relações geométricas entre as dimensões do hidrociclone (MOURA, 2015).

As condições operacionais dos hidrociclones do tipo Rietema e Bradley, que são os mais indicados para separação de líquido-sólido, segundo Moura (2015), suas eficiências individuais de coleta relativa à partícula, vai ser uma função que vai depender do diâmetro médio de partícula ( $d_p$ ) (MASSARANI, 2002).

A descrição matemática da operação de hidrociclones é bastante complexa. Pereira e Massarani (1995) observaram que a maior parte dos trabalhos de separação sólido-fluido newtoniano em hidrociclones segue a formulação clássica semi-empírica de Svarovsky (1990), embora haja grande esforço no desenvolvimento de formulações mais científicas que englobem a modelagem do campo de velocidade no interior do equipamento.

Os grupos adimensionais relevantes são o número de Stokes ( $Stk_{50}$ ), o número de Euler ( $Eu$ ) e Reynolds ( $Re$ ). Outras equações importantes também

são as de concentração volumétrica de soluto ( $C_{v,i}$ ), razão de líquido ( $RL$ ) e eficiência total ( $\eta$ ) (SOCCOL, 2003; SVAROVSY, 1990).

### 2.8.3.1 Concentração Volumétrica ( $C_{v,i}$ )

A partir da prévia aferição experimental da concentração mássica ( $C_{w,i}$ ) de determinada corrente, pode-se determinar a concentração volumétrica ( $C_{v,i}$ ) de sólidos. De acordo com a Equação (1), para o cálculo da concentração volumétrica, além da concentração mássica, é necessário conhecimento da densidade dos sólidos em suspensão ( $\rho_s$ ) e do fluido de trabalho ( $\rho$ ). Lembrando que a concentração mássica é medida com auxílio de técnicas de gravimetria (GONÇALVES, 2016).

$$C_{v,i} = \frac{1}{\left[ \frac{\rho_{s,i}}{\rho_l} \left( \frac{1}{C_{w,i}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (1)$$

Em que,

$\rho_{s,i}$  : Densidade do sólido presente na amostra, [g L<sup>-1</sup>];

$\rho_l$  : Densidade da água, [g L<sup>-1</sup>];

$C_{w,i}$  : Concentração mássica das amostras, [g L<sup>-1</sup>].

A concentração de sólidos presentes no efluente também interfere na eficiência do hidrociclone. Medronho (1984) relata que a concentrações de sólidos acima de 1 % em volume faz com que a velocidade de arraste da partícula comece a sofrer sensível decréscimo, diminuindo assim a eficiência de separação.

### 2.8.3.2 Razão de Líquido (RL)

A razão de líquido (RL) representa a fração de líquido que, inicialmente alimentada no hidrociclone é descarregada na corrente de *underflow*. O equipamento, independente da ação da força centrífuga, age como um divisor de correntes e por consequência arrasta partículas para o *underflow*. Portanto, parte da massa sólida é separada não somente devido à ação da força



centrífuga, pois a corrente inicialmente alimentada dá origem às correntes de *underflow* e *overflow*. Esse fenômeno, popularmente conhecido como “efeito T” (SILVA, 1989; SILVA, 2012), está quantificado através da resposta razão de líquido, conforme Equação (2). Os subscritos “a” e “u” indicam a corrente de alimentação e *underflow*, respectivamente (CAVALCANTE, 2017).

$$RL = 1 - \frac{Q_u}{Q_a} \quad (2)$$

em que,

- ✓  $Q_U$ : vazão volumétrica na corrente do *underflow*,  $L h^{-1}$ ;
- ✓  $Q_A$ : vazão volumétrica na corrente da alimentação,  $L h^{-1}$ ;

Quanto menor for o valor da razão de líquido ( $RL$ ), menor será a quantidade de líquido saindo no *underflow* (MASSARANI; 2002)

### 2.8.3.3 Capacidade de Processamento (Q)

Define-se capacidade de processamento de um hidrociclone como sendo a vazão volumétrica alimentada ( $Q_a$ ) no equipamento em determinada queda de pressão. Por sua vez a vazão volumétrica ( $Q_i$ ), definida através da Equação (3), é a razão entre o volume de efluente coletado no *underflow* e/ou no *overflow* e o tempo de coleta de *underflow* e/ou *overflow* ( $t$ ), onde o subscrito  $i$  indica uma corrente genérica (alimentação, *overflow* ou *underflow*) (GONÇALVES, 2016).

$$Q_i = \frac{V}{t} \quad (3)$$

Onde:

- $Q$  = Vazão da alimentação, *underflow* e/ou *overflow* ( $L/s$ );
- $V$  = Volume de efluente coletado na alimentação, *underflow* e /ou *overflow* ( $L$ );
- $t$  = Tempo de coleta de *underflow* e *overflow* ( $s$ ).

### 2.8.3.4 Número de Euler (Eu)

O número de Euler ( $Eu$ ) tem uma relação direta com o consumo energético deste equipamento, definido pela razão entre a queda de pressão e

a energia cinética por unidade de volume. Dessa maneira, quanto menor o valor do número de Euler, menor a perda de carga para uma mesma vazão, o que leva a um menor consumo energético (SILVA, 2012).

Para o cálculo desse adimensional, de acordo com Equação (4), devem ser conhecidas a queda de pressão ( $-\Delta P$ ), a densidade do fluido de trabalho ( $\rho_l$ ) na temperatura de operação e a velocidade na seção cilíndrica, calculada pela razão entre a vazão volumétrica de alimentação ( $Q_a$ ) e o diâmetro da seção cilíndrica ( $D_c$ ), Equação (5).

$$Eu = \frac{2(-\Delta P)}{\rho_l u_c^2} \quad (4)$$

A queda de pressão ( $-\Delta P$ ) é determinada pela Equação (9), de Plitt (1976).

$$u_c = \frac{4Q_a}{\pi D_c^2} \quad (5)$$

Onde ( $-\Delta P$ ) é a queda de pressão entre a alimentação e o *overflow* do equipamento [Pa],  $\rho_l$  é a densidade do líquido, [g L<sup>-1</sup>],  $u_c$  é a velocidade de escoamento da suspensão baseada no diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone [m s<sup>-1</sup>],  $Q_a$  a vazão da alimentação [m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>] e  $D_c$  é o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone [m].

### 2.8.3.5 Número de Stokes ( $Stk_{50}$ ) e Número de Reynolds (Re)

Pai Neto et al. (2000) afirmam que uma alternativa utilizada para quantificar o desempenho de hidrociclones, baseia-se na obtenção experimental da relação entre os números adimensionais relevantes à operação dos mesmos. Silva (1989) cita que os números adimensionais de importância no estudo de hidrociclones são: o número de Stokes ( $Stk_{50}$ ), o número de Euler (Eu) e o número de Reynolds (Re) e estão relacionados com o poder de classificação, gasto energético e tipo de escoamento, respectivamente (VIEIRA, 2001).

Segundo Svarovsky (1984), as expressões para os números adimensionais, Stokes e Reynolds, são as Equações de (6) e (7):

$$Stk_{50} = \frac{(\rho_s - \rho_l) u_c (d'_{50})^2}{18 \mu_l D_c} \quad (6)$$

$$Re = \frac{D_c u_c}{\nu_l} \quad (7)$$

Onde  $\rho_s$  é a densidade do sólido, [g L<sup>-1</sup>],  $\rho_l$  é a densidade do líquido, [g L<sup>-1</sup>],  $u_c$  é a velocidade de escoamento da suspensão baseada no diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone [m s<sup>-1</sup>], ( $d'_{50}$ ) é o diâmetro de corte reduzido do dispositivo [μm],  $\mu_l$  é a viscosidade do líquido [cP],  $D_c$  é o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone [m],  $\nu_l$  é a viscosidade cinemática [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>].

### 2.8.3.6 Diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ) e queda de pressão ( $-\Delta P$ )

Segundo Machaca (2010) e Silva et al. (2012), dentre os modelos empíricos utilizados para o dimensionamento de hidrociclones, o mais utilizado é o modelo de Plitt (1976), que foi obtido por meio de um programa de regressão linear múltipla que testou diferentes tipos de formas funcionais das variáveis (linear, potencial e exponencial) e de suas diferentes combinações, onde apenas variáveis com grau de significância maior ou igual a 99% foram incluídas no modelo.

As variáveis consideradas são: diâmetro de corte, divisão de fluxo, capacidade, eficiência de separação, bem como variáveis geométricas e operacionais do hidrociclone. Tal modelo pode ser utilizado sem a necessidade da obtenção de dados experimentais adicionais para a predição da operação de hidrociclones para uma ampla faixa de condições operacionais, devido ao volume de dados experimentais utilizados na validação e pela inclusão das variáveis supracitadas no modelo (SILVA et al., 2012).

Na validação de seu modelo, Plitt (1976) utiliza 297 ensaios individuais em hidrociclones, destes, 123 foram realizados por Lynch e Rao (1975) em hidrociclones Krebs de 20" de diâmetro, trabalhando com lamas e porcentagem de sólido variando de 15% a 70%.

Seu modelo é formado pelas seguintes equações (8) e (9) (SOCCOL, 2003):

✓ Diâmetro de corte ( $d'_{50}$ ):

$$d'_{50} = \frac{50,5 D_c^{0,46} D_i^{0,6} D_o^{1,21} \mu_l^{0,5} e^{(0,063 C_{v,a})}}{D_u^{0,71} (L-l)^{0,38} Q_a^{0,45} (\rho_s - \rho_l)^{0,5}} \quad (8)$$

De acordo com Silva (2012) e Massarani (2002), o diâmetro de corte,  $d'_{50}$ , representa uma referência ao potencial de classificação dos hidrociclones e é definido como o tamanho de partículas que podem ser separadas da fase contínua pelo hidrociclone com 50% de eficiência. Silva (2012) descreve que de acordo com a definição apresentada, partículas maiores que o diâmetro de corte possui maiores probabilidades de serem coletadas com uma eficiência superior a 50 %, enquanto que as menores serão coletadas com uma eficiência abaixo disso.

✓ Queda de pressão ( $-\Delta P$ ):

$$(-\Delta P) = \frac{1,88 Q_a^{1,78} e^{(0,0055 C_{v,a})}}{D_c^{0,37} D_i^{0,94} (L-l)^{0,28} (D_u^2 + D_o^2)^{0,87}} \quad (9)$$

Onde:  $d'_{50}$ : Diâmetro de corte ( $\mu m$ );  $D_c$ : Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone ( $cm$ );  $D_i$ : Diâmetro da entrada da alimentação ( $cm$ );  $D_o$ : Diâmetro do *overflow* ( $cm$ );  $\mu_l$ : Viscosidade do fluido ( $cP$ );  $C_{v,a}$ : Concentração volumétrica (%);  $D_u$ : Diâmetro do *underflow* ( $cm$ );  $L$ : Comprimento do hidrociclone ( $cm$ );  $l$ : Comprimento do *vortex finder* ( $cm$ );  $Q_a$ : Vazão da alimentação ( $L/min$ );  $\rho_s$ : Densidade do sólido ( $g/cm^3$ );  $\rho_l$ : Densidade do líquido ( $g/cm^3$ );  $(-\Delta P)$ : Queda de pressão ( $kPa$ ).

### 2.8.3.7 Eficiência de remoção de sólidos ( $E_r$ )

A eficiência de remoção representa a capacidade que o sistema tem de remover sólidos suspensos. Segundo Zorzo (2012), a eficiência de remoção do hidrociclone pode ser calculada pela equação (10):

$$E_r = \frac{SST_a - SST_{of}}{SST_a} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

- $E_r$  = Eficiência de remoção (%)
- $SST_a$  = Concentração de sólidos na alimentação ( $\text{mg. L}^{-1}$ )
- $SST_{of}$  = Concentração de sólidos na saída (*overflow*) ( $\text{mg. L}^{-1}$ )

Onde o cálculo dos Sólidos Suspensos Totais (SST), segundo Zorzo (2012), pode ser realizado pela Equação (11).

$$SST(\text{mg} / \text{L}) = \frac{(P_{1,i} - P_{0,i}) * 10^6}{V_{\text{Amostra}}(\text{mL})} \quad (11)$$

Sendo,

- $P_{0,i}$  - o peso do papel filtro seco, (g);
- $P_{1,i}$  - o peso do papel após filtração das amostras, (g).

### 2.8.3.8 Eficiência Total ( $\eta$ )

Representa o percentual de massa de sólidos coletado na corrente de *underflow* frente à quantidade inicialmente introduzida na alimentação do hidrociclone, independentemente se a separação se deu por mero arraste ou centrifugação (VIEIRA, 2006; SILVA et al., 2014). O cálculo da eficiência total pode ser visualizado através da Equação (12).

$$\eta = \frac{C_{vUF} \times Q_{UF}}{C_{vA} \times Q_A} \quad (12)$$

Onde:  $\eta$ : eficiência total (adimensional) (%);  $C_{vUF}$ : Concentração volumétrica no *underflow* (g/L);  $C_{vA}$ : Concentração volumétrica na alimentação (g/L);  $Q_{UF}$ : Vazão volumétrica do *underflow* (L.h<sup>-1</sup>);  $Q_A$ : Vazão volumétrica da alimentação (L.h<sup>-1</sup>).

#### 2.8.4 Utilização do hidrociclone para separação sólido/líquido

Pecarevic et al., (2018) trabalharam com tratamento de água de lastro utilizando hidrociclone (HC) e reator ultravioleta (UV) para remoção de espécies-teste de fitoplâncton (*Tetraselmis suecica*) e zooplâncton (cisto *Artemia salina*). Foi utilizado o HC para redução do teor de sólidos suspensos e também para inativação de organismos vivos em água de lastro. A aplicação da radiação UV após o tratamento no HC contribuiu para uma redução no número de organismos vivos. O HC foi operado com água do mar em duas pressões de entrada de 2,4 e 4,8 bar.

Como resultados obtiveram remoção no HC de 35% de fitoplâncton e 84% de Cistos de zooplâncton (*Artemia salina*), obtidos com maior pressão de entrada e nos quais foram utilizados organismos com maior massa e densidade.

Os autores concluíram que o uso do HC foi bem-sucedido para inativação de alguns organismos planctônicos e fornece uma alternativa ao propósito tradicional de um HC, ou seja, separação ou redução de matéria suspensa e organismos na água de lastro.

Jank et al (2017) investigaram a eficiência de hidrociclones para a separação de impurezas. Dois hidrociclones em duas plantas diferentes foram investigados em relação à sua capacidade de separar as pequenas impurezas inertes dos resíduos biológicos pré tratados. Na planta A, o hidrociclone faz parte do sistema digestor (reciclo). Na planta B, o hidrociclone faz parte da linha de pré-tratamento de resíduos biológicos (após moagem e peneiramento dos resíduos biológicos), antes do sistema digestão.

Os hidrociclones investigados da planta B separaram mais de 80% das impurezas inertes no fluxo de resíduos. Essas impurezas tinham uma faixa de

tamanho de 0,5 a 4 mm. Já o hidrociclone integrado no sistema digestor da planta A apresentou taxas de separação de até 80% apenas na faixa de tamanho de 2 a 4 mm.

Bayo et al (2015) utilizaram hidrociclone para atuar como um dispositivo de limpeza para digestores anaeróbios em estações de tratamento de águas residuárias como uma alternativa para a remoção de lodo. O sistema continha um digestor anaeróbico, seguido de peneiras para remoção de partículas grosseiras ( $\phi$  1 mm), que seguia para um tanque de recirculação, e por fim para o hidrociclone que recirculava o material diluído para o digestor anaeróbico e o material concentrado seguia para uma peneira de partículas finas ( $\phi$  0,5 mm), cujo produto seguia para o tanque de recirculação.

O hidrociclone era feito de poliuretano, com um diâmetro interno de 10 cm, um ângulo de cone de 4º e um ponto de corte de 20  $\mu$ m. O fluxo de alimentação foi introduzido sob pressão de 100 kPa, entrando tangencialmente no hidrociclone.

Os resultados obtidos para o sistema hidrociclone foi uma redução da concentração de sólidos totais de 76 para 52 mg/g no *overflow*, os sólidos em suspensão caíram de 49 para 25 mg/g, os sólidos voláteis, de 32 para 28 mg/g. Com esta metodologia, um processo contínuo de limpeza é garantido. Isso evita a necessidade de interromper o processo de digestão e não acarreta riscos à saúde dos trabalhadores envolvidos na limpeza do reator anaeróbico, tornando o hidrociclone mais inovador e competitivo.

Moura (2015) e Moura et al (2014) projetaram, analisaram e simularam a fluidodinâmica de hidrociclones do tipo Rietema e Bradley para o espessamento do lodo produzido por uma indústria têxtil.

Foi realizada a caracterização física do lodo do efluente através da obtenção da massa específica da fase fluida e da parte sólida, da sua viscosidade, da sua concentração de sólidos, e da sua distribuição do tamanho médio de partículas. Também foi feita a caracterização química através das medidas do pH, da DQO, da quantidade de matéria orgânica e condutividade elétrica.

Ambos hidrociclones projetados apresentaram eficiência de separação de 74 % para tamanho de partículas de 586  $\mu\text{m}$ . A vazão de alimentação do modelo Bradley foi de 0,014  $\text{m}^3/\text{s}$ , número de Euler de 75000 e RL de 16,7%.

## 2.9 Membranas

Uma membrana é definida como sendo um filme fino sólido que separa duas soluções e que atua como barreira seletiva para transporte de componentes entre essas soluções, quando aplicada algum tipo de força externa. São meios filtrantes que apresentam poros de dimensões variadas. Estes poros são responsáveis por todas as propriedades que tornam as membranas úteis em suas diversas aplicações, tanto para separar partículas como para fracionar moléculas de diferentes massas molares (VITAL & SOUSA, 2013).

As membranas sintéticas surgem como uma tentativa de simular as membranas naturais, especificamente devido suas características únicas de seletividade e permeabilidade. Dessa forma houve a necessidade de observação e compreensão do fenômeno de permeação e desenvolvimento de novas técnicas no preparo de membranas sintéticas (HABERT et al, 2006). Uma particularidade das membranas quando comparadas com os processos de separação é que, em grande maioria, não envolve mudanças de fases e, portanto, são altamente seletivas e podem em várias circunstâncias realizar separações com muito menos energia quando comparados com outros métodos (CUNHA, 2017).

Segundo Rocha et al. (2000) a partir de 1974 as características das membranas tubulares foram sendo exploradas por elas apresentarem vantagens sobre as membranas planas para certas aplicações analíticas. As vantagens dessa geometria são alta seletividade, resistentes a entupimentos, são tipicamente utilizadas quando o fluxo de alimentação contém grandes quantidades de sólidos em suspensão ou componentes fibrosos e apresentam elevada resistência à pressão (ZHOU et al, 2012).

As membranas podem ser classificadas quanto à origem, ao tipo de material empregado em sua fabricação, a estrutura e a morfologia. Em relação

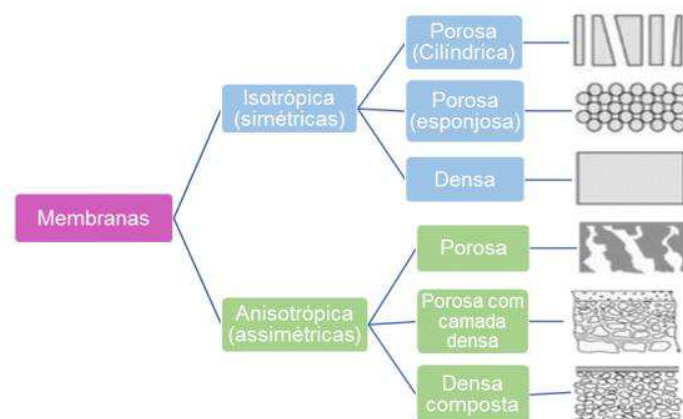


à origem, as membranas podem ser naturais ou sintéticas. Quanto aos materiais empregados podem ser orgânicas (poliméricas) ou inorgânicas (cerâmicas) (CUNHA, 2017). Quanto à estrutura, podem ser isotrópicas ou anisotrópicas. Quando a membrana possui estrutura uniforme ao longo de toda espessura é chamada simétrica ou isotrópica, apresentando baixos fluxos através desse tipo de membrana, já que toda a estrutura contribui para resistência do transporte (ANADÃO, 2010). Quando a estrutura varia ao longo da espessura da membrana esta é chamada anisotrópica (assimétrica). Acima da membrana anisotrópica é possível depositar uma fina camada de outro material, formando uma membrana composta (ANADÃO, 2010).

Quanto a morfologia as membranas são classificadas de acordo com a sua estrutura em densas e porosas. No caso das membranas densas, isto é, que não possuem poros na superfície em contato com a solução a ser processada, o transporte de moléculas envolve uma etapa de dissolução (sorção dos componentes na superfície da membrana), difusão através do material que constitui a membrana com posterior dessorção do componente. Já nas membranas porosas, o transporte é fundamentalmente convectivo e a capacidade seletiva está diretamente associada à relação entre o tamanho das espécies a serem separadas e o tamanho dos poros da membrana (FLORIDO, 2011).

A Figura 9 ilustra uma representação dessas diferentes morfologias.

**Figura 9** - Representação dos diferentes tipos de morfologia de membranas sintéticas.



Fonte: Vital & Sousa (2013).

Segundo Florido et al. (2004), a geometria da membrana bem como a sua forma é fundamental na eficiência do processo. A configuração ótima para um

elemento de membrana deve possuir características como: alta área de membrana por volume dos módulos, alto grau de turbulência para promover transferência de massa, baixo custo por unidade de área da membrana, projeto com facilidade de limpeza e instalação em módulos.

Quanto as aplicações, as membranas se enquadram nos diversos setores industriais, por exemplo, na área de laticínios (HAUSMANN, 2014), em cervejarias (CIMINI & MORESI, 2016) e em indústrias têxteis (BUSCIO et al., 2015), separação óleo-água (RAJASEKHAR et al, 2015) separação de íons e metais pesados (RAJASEKHAR et al, 2015) e separação de proteínas e microrganismos (XINGYI et al, 2012).

A principal limitação de muitos processos, que utilizam o gradiente de pressão como força motriz, é a redução do fluxo permeado com o tempo. Isto é consequência do fato de componentes orgânicos ou inorgânicos dissolvidos, coloides, bactérias ou sólidos em suspensão se depositarem na superfície da membrana, causando incrustação (*fouling*) (ELLOUZE et al., 2011).

A seletividade de uma membrana pode ser obtida por diferentes mecanismos (ELLOUZE et al., 2011):

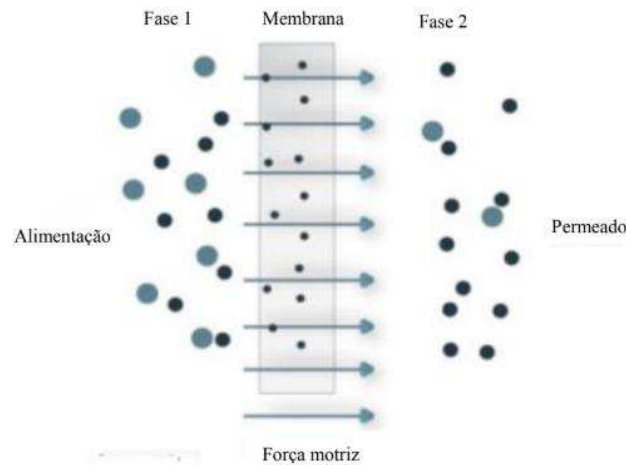
- Exclusão por tamanho (peneiramento) – a separação ocorre quando as partículas no meio a ser filtrado têm tamanho maior que os poros da membrana.
- Diferenças no coeficiente de difusão – movimento aleatório a que as pequenas partículas estão sujeitas.
- Diferenças nas cargas elétricas – atração elétrica entre a partícula e o meio filtrante.
- Diferenças na adsorção e/ou na reatividade superficial: forças físico-químicas que fazem com que as partículas ou moléculas fiquem imobilizadas na superfície de um meio poroso.

### **2.9.1 Processos de Separação por Membranas (PSM's)**

Os processos de separação por membranas (PSM), os quais incluem a Osmose Inversa, a nanofiltração, a ultrafiltração, a microfiltração, a diálise e a eletrodiálise, são utilizados em diversos segmentos da indústria, tais como o

biomédico, farmacêutico, alimentício e no tratamento de águas e efluentes (REBELLO et al., 2015). Nesses processos, a membrana atua como uma barreira permeável e seletiva que separa duas fases, restringindo de forma total ou parcial o transporte de uma ou mais espécies químicas presentes nas fases (HABERT et al., 2006), conforme mostrado na Figura 10.

**Figura 10** - Representação de um sistema de permeação com membrana composto por duas fases.



Fonte: Mulder (1996).

Desta forma, uma solução ou suspensão atravessa a membrana, sob o efeito de uma força motriz que proporcione o transporte de matéria, e seus componentes são separados seletivamente em duas correntes, denominadas de permeado e de concentrado. O permeado consiste na parcela que permeia a membrana enquanto que o concentrado é a parcela que fica enriquecida com solutos, ou sólidos retidos pela membrana (MULDER, 1996). As forças motrizes mais comumente utilizadas são gradientes de pressão, campo elétrico ou ainda de potencial químico. Entretanto, a maioria dos processos de separação utilizam o gradiente de pressão pois não ocorre transformação química ou biológica de componentes durante a filtração (DEL COLLE et al., 2011).

Esses processos ocorrem basicamente em duas formas, isso quando relacionados ao fluxo aplicado, que pode ser:

- Filtração frontal: a solução ou suspensão é alimentada e pressionada perpendicularmente contra a membrana, o permeado percola pela membrana e o soluto em suspensão são retidos na parede, onde ficam

depositados na superfície da membrana e esse acúmulo pode ser traduzido como formação de depósito ou de uma “torta” de filtração, uma vez que a polarização aumenta (PETER-VARBANETS et al., 2009).

- Filtração tangencial: a solução escoia paralelamente à superfície da membrana enquanto que o permeado é percolado transversalmente à mesma e esse tipo de fluxo impede o acúmulo de material retido sobre a membrana, sendo mais atraente sua utilização em processo de separação (CHAKRABARTY et al., 2010).

Considerando-se a capacidade de incrustação elevada de certos tipos de água, a introdução de processos de pré-tratamento apropriados deve ser considerada, pois a incrustação requer limpeza química frequente, impondo assim um aumento econômico sobre a operação do processo (HERZBERG *et al.*, 2010). O pré-tratamento ameniza o decaimento do fluxo, que pode ser justificado pela polarização por concentração, fenômenos como adsorção das moléculas na superfície da membrana, entupimento dos poros ou acúmulo das espécies na membrana, denominados de “*fouling*”, como consequência da diminuição de fluxo, normalmente o fluxo tangencial é bastante aplicado, pois apresenta uma tendência de fluxo constante, sem que haja uma queda de fluxo acentuada (SINGH, 2006 e MULDER, 1991).

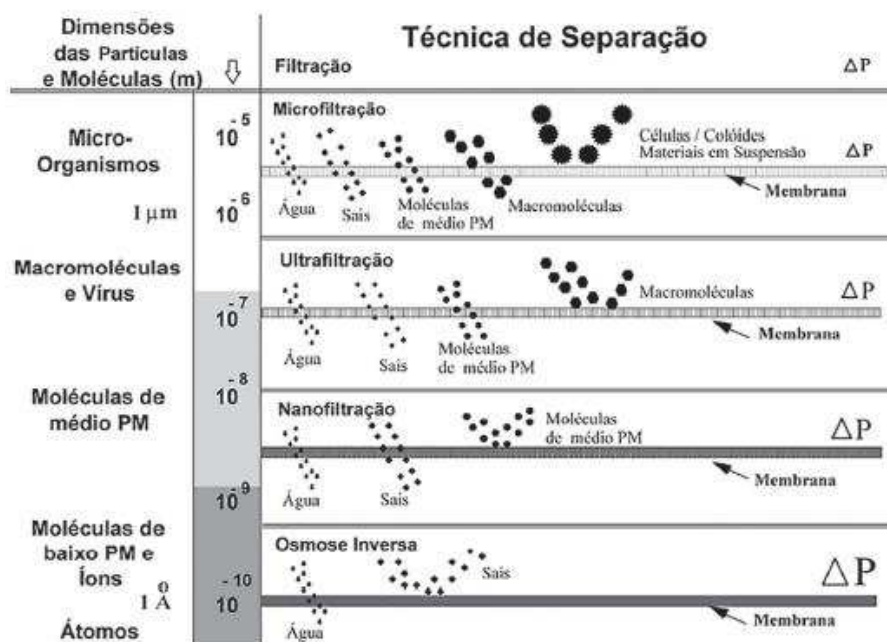
### **2.9.2 Classificação dos processos de separação por membranas**

Segundo Metcalf & Eddy (2016) as classificações das membranas porosas podem ser pelo tamanho dos poros, força motriz, material, configuração da membrana, mecanismo e capacidade de separação de contaminantes. Em relação à origem, as membranas podem ser naturais ou sintéticas. Quanto aos materiais empregados podem ser orgânicas (poliméricas) ou inorgânicas (metálicas e cerâmicas) (ANADÃO, 2010).

Quando a força motriz é a pressão transmembrana ( $\Delta P$ ), existem quatro tipos de PSM, são eles: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI).

A Figura 11 mostra a membrana adequada para a remoção de cada faixa de contaminante (HABERT et al. 2006).

**Figura 11** – Comparação da faixa de filtração para quatro métodos MF, UF, NF E OI.



A Microfiltração é usada para separar pequenas partículas insolúveis, bactérias e materiais em suspensão de córregos aquosos cujo tamanho dos poros é na faixa entre 0,1 e 10  $\mu\text{m}$  e devido ao tamanho de seus poros, os sistemas de microfiltração oferecem proteção completa contra microrganismos. A taxa de remoção de bactérias, por exemplo, atinge 99,99% em testes laboratoriais (PETER-VARBANETS et al., 2009). Apresentam porosidade variando de 5 a 70%. O fluido passa através de canais tortuosos, enquanto as partículas são barradas na superfície da membrana. A força motriz é o gradiente de pressão (ANADÃO, 2010). A eficiência de uma membrana de microfiltração depende diretamente da uniformidade do tamanho dos poros, densidade dos poros e a espessura da camada na qual os poros têm diâmetro mínimo (camada ativa) (MACÊDO, 2018).

A Ultrafiltração é um processo de separação por membranas utilizado quando se deseja purificar e fracionar soluções contendo macromoléculas. Apresentam poros na faixa entre 1 a 100 nm (0,001 a 0,1  $\mu\text{m}$ ), portanto mais fechadas do que as membranas de microfiltração e com permeabilidade consideravelmente inferior. Como os poros das membranas de ultrafiltração são menores, é necessária uma maior força motriz para se obter fluxos permeados elevados o suficiente para que o processo possa ser utilizado industrialmente

(BETANCOURT & ROSE, 2004). Vem sendo bastante empregada na indústria alimentícia, na produção de bebidas e laticínios, tratamento de água, concentração e purificação de proteínas, recuperação de corantes e pigmentos, etc. (SILVA, 2008).

A Nanofiltração refere-se ao processo com membranas capaz de efetuar separações de moléculas de peso molecular médio entre 500 e 5000 Daltons, situando-se, portanto, entre o limite superior da ultrafiltração e o limite inferior da osmose inversa (HABERT et al., 2006). Na nanofiltração os poros variam entre 0,1 e 1,0 nm. Espécies iônicas maiores, incluindo íons bivalentes e multivalentes, e moléculas mais complexas são amplamente retidas (GEOFILTRATION, 2019). A nanofiltração é também um processo movido pela diferença de pressão, que pode variar entre 5,0 e 25,0 bar. Algumas aplicações típicas da nanofiltração são: dessalinização, concentração de produtos de fermentação, purificação de enzimas, entre outros (MACÊDO, 2018).

A Osmose Inversa é um processo natural, no qual a água passa através de uma membrana semipermeável. Neste caso não há fluxo de um soluto de um lado de menor concentração para um lado de maior concentração, para reverter o fluxo de água, uma diferença de pressão maior que o gradiente pressão osmótica é aplicada, assim a separação da água dos solutos se torna possível. O processo de Osmose Inversa é empregada em membrana densa semipermeável, altamente permeável à água e altamente impermeável à microrganismos, coloides, sais dissolvidos e orgânicos. A força motriz envolvida é o gradiente de pressão (MOURA, 2008).

### **2.9.3 Transporte através da membrana**

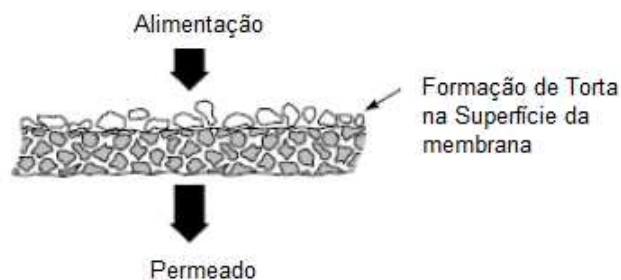
Uma das principais características dos PSM's é que eles podem ser operados em escoamento convencional (*Dead End*) e o escoamento tangencial (*Cross Flow*) (SANTOS, et al., 2014).

#### **2.9.3.1 Escoamento convencional (*Dead End*)**

Uma das características dos processos de separação com membranas é que eles podem ser operados em filtração convencional (*dead end*), ou filtração tangencial (*cross flow*) (TREVISOLI, 2010).

Na filtração *dead end*, mostrado na Figura 12, onde representa um corte da secção transversal de uma membrana plana, uma solução ou suspensão é perpendicularmente pressionada contra a membrana causando um grande acúmulo de partículas na superfície microporosa, fenômeno chamado de formação de torta. Esta torta aumenta a resistência do meio filtrante e causa a diminuição do fluxo permeado de forma contínua (HABERT et. al., 2006).

**Figura 12 - Filtração convencional – *Dead End*.**

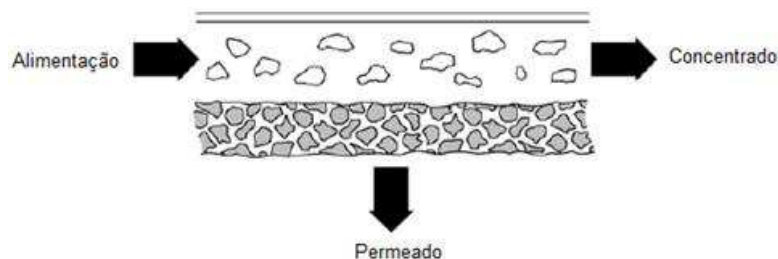


Fonte: Habert et. al. (2006).

### 2.9.3.2 Escoamento tangencial (*Cross flow*)

Na filtração tangencial mostrada na Figura 13, que representa um corte da secção transversal de uma membrana tubular ou plana, a solução de alimentação flui paralelamente à membrana e perpendicularmente ao fluxo de permeado, o que permite o escoamento de grandes volumes de fluidos, pois esse tipo de escoamento, a altas velocidades, tem o efeito de arrastar os sólidos que tendem a se acumular sobre a superfície da membrana (HABERT et. al., 2006). O equipamento necessário para o escoamento tangencial é mais complexo quando comparado a um processo de filtração convencional (*dead end*), porém a vida útil da membrana é muito maior (BAKER, 2004).

**Figura 13 - Filtração tangencial - Cross Flow.**



Fonte: Habert et. al. (2006).

## 2.9.5 Equacionamento

### 2.9.5.1 Fluxo permeado

Um dos indicadores da eficiência da membrana é o fluxo permeado (ou taxa de filtração). O fluxo da membrana (Equação 13) é definido como o volume capaz de atravessar uma área da membrana em um determinado tempo (HABERT et al., 2006).

$$J_p = \frac{Q_p}{A} \quad (13)$$

$J_p$ : Fluxo do permeado ( $L.m^{-2}.h^{-1}$ )

$Q_p$ : Vazão volumétrica ( $L.h^{-1}$ )

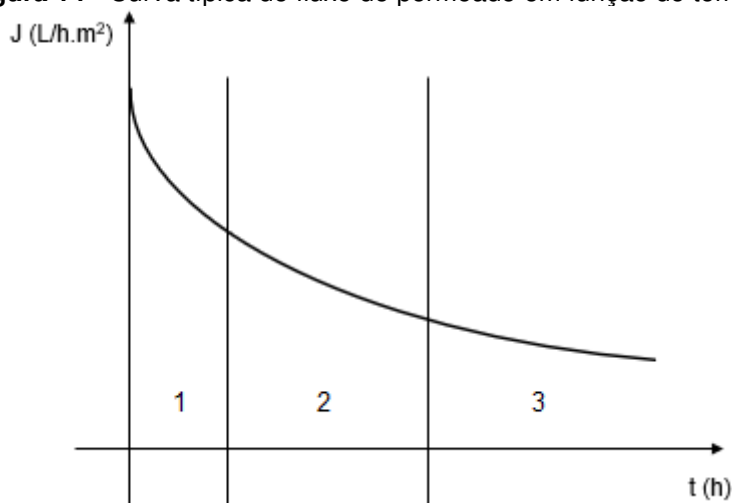
$A$ : Área da membrana ( $m^2$ )

#### 2.9.5.1.1 Característica da curva do fluxo de permeado

A curva do fluxo de permeado apresenta um comportamento característico no qual Marshall e Daufin (1995) dividem em três estágios (Figura 14).

O primeiro é caracterizado por uma perda reversível do fluxo causada pela polarização de concentração. Neste estágio há uma queda brusca do fluxo nos primeiros minutos.

**Figura 14** - Curva típica de fluxo de permeado em função do tempo.



Fonte: Trevisoli (2010).



No segundo estágio, a variação do fluxo é decrescente, variando com o diâmetro do poro da membrana (GIRARD & FUKUMOTO, 2000). Inicia-se a precipitação dos solutos acumulados na polarização que leva ao bloqueio dos poros e à adsorção dos componentes na membrana, ocasionando a formação da camada polarizada e do *fouling* (USHIKUBO, 2006). A perda de fluxo causada por *fouling* geralmente é irreversível.

O terceiro, e último estágio, é a consolidação do *fouling* no qual o fluxo decresce contínua e lentamente. Quando a filtração é do tipo tangencial, ocorre uma contínua redução do fluxo de permeado. A redução do fluxo permeado com o tempo é inevitável. Para recuperar o fluxo permeado parcial ou totalmente é necessário que se apliquem nas membranas processos físicos como retrolavagem e variação da pressão transmembrana; e métodos químicos como aplicação de soluções ácidas ou alcalinas, e também surfactantes (HABERT, et. al. (2006).

### 2.9.5.2 Recuperação (R)

A recuperação de água ( $R$ ) (Equação 14), descreve o quanto de água foi tratado pelo sistema e pode ser calculada como a razão entre a vazão do permeado ( $Q_p$ ) e a vazão da alimentação ( $Q_A = Q_p + Q_c$ ). É interessante que a recuperação seja a maior possível, pois maior será a produção de água tratada, mas também maior será o risco de ocorrência de *fouling* (MARQUES, 2017).

$$R\% = \left[ \frac{Q_p}{Q_A} \right] * 100 \quad (14)$$

Onde,

$Q_A$  : Vazão da alimentação (L/h).

$Q_p$  : Vazão do permeado (L/h).

### 2.9.5.3 Tempo de Residência Hidráulica ( $\tau$ )

Um dos parâmetros importantes no dimensionamento de unidades de tratamento é o tempo médio de residência hidráulica ( $\tau$ ) (Equação 15). Conceitualmente o  $\tau$  representa o tempo médio de permanência das moléculas

de água em uma unidade de tratamento. Se a vazão (Q) e o volume (V) são constantes, o  $\tau$  pode ser calculado como: (PESSOA, 2015)

$$\tau = V/Q \quad (15)$$

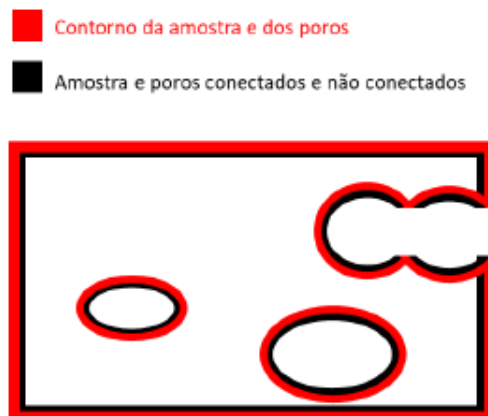
Onde,

- V: L;
- Q: L h<sup>-1</sup>;
- $\tau$  : h.

#### 2.9.5.4 Porosimetria pelo método de Arquimedes

É definida como o percentual volumétrico de poros conectados e não conectados (Figura 15) existente na amostra, e é definida pela Equação (16) (SILVA, 2005).

**Figura 15** - Amostra contendo poros abertos e fechados.



Fonte: Silva (2005).

O volume total da amostra é representado pelo contorno da amostra e o volume da porosidade, é a soma dos volumes de poros conectados e não conectados (SILVA, 2005).

$$P(\%) = \left( \frac{W_m - W_s}{W_m - W_i} \right) * 100 \quad (16)$$

Onde:

- P : Porosidade da membrana cerâmica (%);
- $W_m$  : Massa da membrana molhada (g);

- $W_s$ : Massa da membrana seca (g);
- $W_i$ : Massa da membrana imersa (g).

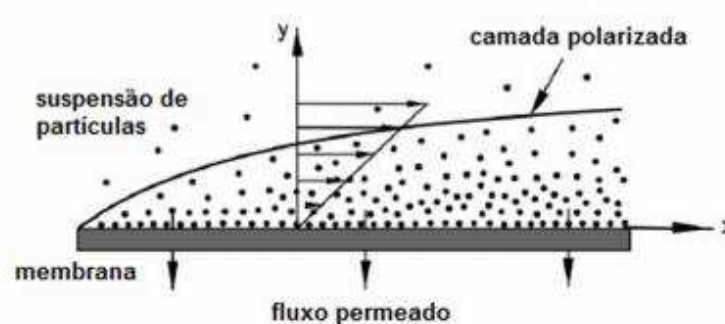
## 2.9.6 Principais complicações nos PSM's

### 2.9.6.1 Polarização por concentração

A polarização por concentração (Figura 16) é um fenômeno de camada limite, que se caracteriza pelo acúmulo de soluto retido próximo à superfície da membrana (VASAN & FIELD, 2006).

Devido essa formação provoca uma resistência adicional ao transporte através da membrana, causando redução no fluxo permeado. A concentração de soluto pode ser tão alta a ponto de formar uma camada gel na superfície da membrana, quando determinados solutos (por exemplo, proteínas e látex) atingem concentração de gel (MULDER, 1996).

**Figura 16** - Esquema da formação da camada polarizada.



Fonte: Chen et al. (2004).

Segundo Rebello et al. (2016) os fatores que provocam a polarização por concentração são:

- Concentração da alimentação;
- Condições de escoamento da corrente da alimentação, quantificadas pelo número de Reynolds ( $Re$ );
- Aumento da concentração de espécies retidas na superfície da membrana que provoca um movimento difusivo deste soluto no sentido de retornar ao seio da solução

- Aumento do fluxo permeado aumenta a concentração das espécies retidas próximo à superfície da membrana, o que tende a provocar uma queda no fluxo permeado.
- Aumento da pressão aumentará também a resistência ao transporte de solvente de forma equivalente para compensar a resistência ao transporte do solvente, logo não alterará o fluxo permeado.

Os possíveis efeitos negativos da polarização por concentração são (COSTA, 2009):

- Decréscimo do fluxo de permeado devido ao aumento na pressão osmótica na superfície da membrana;
- Aumento da passagem de soluto através da membrana;
- Precipitação de soluto se a concentração exceder o limite de solubilidade do sal;
- Favorecimento de incrustações por deposição.

Embora a polarização de concentração seja reversível, a sua ocorrência pode dar origem a outros tipos de fenômenos que prejudicam irremediavelmente o desempenho da membrana, como incrustações por deposição, incrustações por precipitação e bioincrustações (*biofouling*), os quais serão comentados mais adiante (REBELLO, 2016).

Em escala laboratorial, pode ser minimizada aumentando-se a velocidade de escoamento do fluido. No entanto, em escala industrial, este método possui limitações. Para minimizar o efeito de camada polarizada, deve-se melhorar o design dos módulos de membrana e se desenvolver métodos de controle da vazão de fluido nos módulos (BAKER, 2004).

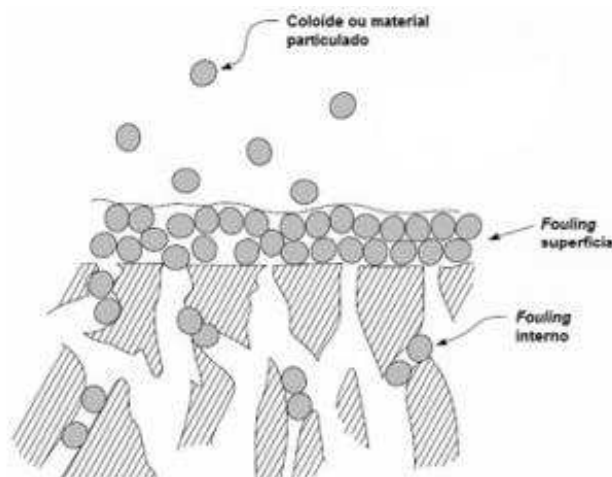
### **2.9.6.2 Fouling**

O *fouling* é caracterizado pelo acúmulo de sólidos na superfície ou na matriz da membrana (Figura 17), causando diminuição da permeabilidade e do fluxo permeado e não tem efeito na qualidade da água permeada (GAO et al., 2011) e ao contrário da polarização por concentração, o fenômeno permanece quando cessada a operação do sistema, porém pode ser reversível ou

irreversível. Se o *fouling* permanecer, mesmo após a lavagem química da membrana, ele é dito irreversível (GHIGGI, 2011).

Pode ocorrer de diversas maneiras, entre elas: bloqueio de poros por partículas com tamanho semelhante ao do poro; adsorção de partículas na superfície ou na matriz da membrana, que causa redução do tamanho ou bloqueio do poro; adesão de microrganismos na superfície da membrana (*biofouling*), que se desenvolvem produzindo um biofilme; precipitação de sais na membrana (*scaling*) e todos os tipos de *fouling* podem ocorrer no mesmo sistema de membranas (BAKER, 2004).

**Figura 17** - Representação esquemática de *fouling* superficial e interno em membranas.



Fonte: Baker (2004).

Os principais métodos de redução de fouling são o pré-tratamento da água de alimentação, escolha apropriada da membrana ou modificação da superfície, escolha apropriada do módulo e condições de processo e realização de limpezas periódicas (MULDER, 1996).

Galjaard et al. (2001) estudaram técnicas para minimizar o *fouling* fazendo modificações na superfície da membrana utilizando um pré-revestimento que diminui a área de contato com a solução. No início de cada ciclo de filtração, uma suspensão de partículas selecionadas é dosada na membrana, por um curto período. Essas partículas formam uma camada facilmente removível, permeável e incompressível na membrana. Após esse período, o ciclo de filtração começa, e a matéria orgânica suspensa será absorvida pela camada de pré-revestimento

em vez da membrana. Quando a pressão transmembrana atinge um determinado valor, é feita a retrolavagem.

O pré-revestimento com a torta então se desprende e é retirado da membrana. Foram testados diversos materiais, e os que apresentaram as melhores características para serem utilizados com pré-revestimento foram a diatomita, o carvão ativado em pó, a caulinita e o óxido de ferro. Concluiu-se que o pré-revestimento aumenta a taxa de *fouling*, que se estabiliza depois de vários ciclos de filtração, porém resulta em uma melhor restauração da permeabilidade após a retrolavagem (GALJAARD et al., 2001).

#### **2.9.6.2.1 Biofouling**

Segundo BAKER e DUDLEY (1998), as bioincrustações (*biofouling*) ocorrem devido ao acúmulo de material orgânico na superfície da membrana, incluindo fragmentos celulares, substância polimérica extracelular e microrganismos, que resulta na formação de biofilmes. A formação de biofilme aumenta a resistência ao transporte, reduzindo o fluxo permeado ou levando a necessidade de maior consumo de energia pelo aumento da pressão de operação. Para a melhor compreensão dos efeitos das bioincrustações é importante entender os processos naturais da formação e desenvolvimento do biofilme.

As bactérias crescem e se reproduzem ao longo da superfície, formando o biofilme. Conforme o biofilme vai crescendo, as bactérias vão morrendo e servindo de alimento para outras bactérias. A formação do biofilme é iniciada pela adesão de microrganismos à superfície da membrana, que passa a ser uma superfície condicionada. Terminado o processo de adesão, as células começam a crescer pela conversão de matéria orgânica e outros nutrientes em materiais extracelulares, denominados substâncias poliméricas extracelulares, gerando, por fim, o biofilme. Os principais fatores que podem afetar o desenvolvimento do biofilme são: disponibilidade de nutrientes; temperatura; velocidade e turbulência (BYRNE, 2002).

Os resultados combinados dos vários tipos de incrustantes contribuem para reduzir o tempo de vida útil das membranas e aumentar os gastos com

procedimentos de operação e manutenção da planta, pois poderão ser necessários pré-tratamentos com custos mais elevados (por exemplo, dosagem periódica de biocida, ozonização, filtração multimídia, etc.) e limpezas químicas mais frequentes, para combater mais efetivamente a formação das incrustações e recuperar as características nominais da membrana (OLIVEIRA, 2007).

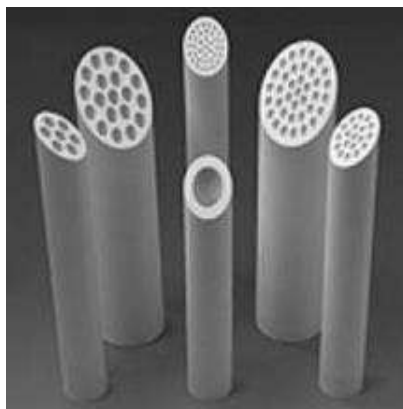
Oliveira (2012) avaliou o desempenho de um sistema de pré-tratamento para água do mar constituído por um filtro lento de areia, com uma etapa prévia de filtração por um filtro de discos. O sistema removeu 97% dos sólidos suspensos totais presentes na água bruta, causadores de *fouling* em membranas de Osmose Inversa. E 90% das concentrações de microrganismos, principais fatores causadores da formação de *biofouling*. Em sistemas de dessalinização de água do mar por Osmose Inversa, o pré-tratamento da água de alimentação constitui a principal estratégia no controle da formação do *biofouling*.

### 2.9.7 Membrana Cerâmica

Segundo Randon et al. (1993), as membranas cerâmicas (Figura 18) são obtidas pela associação de várias camadas e cada camada é caracterizada pela sua espessura, porosidade e diâmetro médio de poros.

A maior aplicação atual das membranas cerâmicas microfiltrantes é no tratamento da água de abastecimento e os principais materiais cerâmicos utilizados são alumina, óxido de silício, zircônia, titânia, mulita e cordierita (SILVA e LIRA, 2006).

**Figura 18** - Membranas cerâmicas tubulares do tipo multi e monocanal feita por extrusão.



Fonte: Diel (2010).

O crescente uso das membranas inorgânicas se dá ao fato de possuírem elevada estabilidade química, térmica e estrutural; maior resistência a produtos químicos corrosivos, deterioração microbiana, e a abrasão da superfície causada por uma circulação de partículas grosseiras (MUHAMMAD et al., 2009), durabilidade e atividade eletroquímica facilmente realizável, ainda com controle adequado da distribuição do tamanho e dimensão de poros (SANTOS, 1999).

A  $\alpha$ -alumina como material base é muito utilizada na elaboração de membranas, pois representa um material cerâmico de baixo custo e com uma variabilidade de propriedades possíveis de obtenção em função do tipo, forma de sinterização e composição química da fonte de extração (argila). Com a combinação de variedades deste material, pode-se compor um conjunto membrana-substrato, utilizando  $\alpha$ -alumina e aditivos (modeladores de poros, agentes fundentes) adequados à microfiltração (UMEBARA, 2010).

Os materiais cerâmicos são ótimos materiais para a produção de tubos filtrantes. Segundo Magalhães (2017), as principais vantagens das membranas cerâmicas comparadas às membranas poliméricas são:

- ✓ Resistência a temperaturas acima de 500°C;
- ✓ Boa resistência a corrosão: resistente a solventes orgânicos e vasta faixa de pH (de 1 a 14);
- ✓ Fácil limpeza e esterilização;
- ✓ Alta resistência mecânica: a possibilidade de suportar pulso de pressão, resultando na eficiente remoção da camada de sujeira e a possibilidade de tratamento de fluidos de alta viscosidade;
- ✓ Quimicamente inerte: amplo espectro de aplicação na indústria química;
- ✓ Longa vida de operação.

A remoção de microrganismos por membranas, depende do tamanho dos poros como parâmetro crítico para desinfecção. O diâmetro do poro da membrana deve ser menor do que o tamanho dos microrganismos. Entretanto, testes com membranas têm demonstrado que, em razão da propriedade de rejeição das membranas, microrganismos menores que o tamanho do poro também podem sofrer retenção significativa (GONÇALVES, 2003).



Atualmente, na área de Saneamento Ambiental e mais particularmente no tratamento de águas e águas residuárias, as membranas filtrantes aparecem como uma alternativa interessante, por estarem na vanguarda do avanço tecnológico, especialmente pelo fato de que mais recentemente os aspectos de competitividade de custos e de implementação das membranas tenham tornado as membranas mais favoráveis (GRULL, 2013).

### **2.9.7.1 Limpeza das membranas**

#### **❖ Limpeza Química**

Do ponto de vista teórico, as limpezas químicas são capazes de restaurar a pressão transmembrana após cada limpeza, ou seja, o fluxo de permeado inicial seria sempre recuperado. Na prática, após longos períodos de operação e à medida que o número de ciclos de filtração aumenta, o grau de colmatção não reversível por limpezas também aumenta (BRACEIRO, 2014).

A eficácia do processo de limpeza química tem como fonte principal de informação, as características físico-químicas da água de alimentação do sistema. Através dela, pode-se aplicar uma solução preparada adequadamente para os tipos de *fouling*s potencialmente depositados (PESSOA, 2015).

As soluções de limpeza alcalinas (fosfatos, carbonatos e hidróxidos) são utilizadas com a finalidade de emulsionar e dispersar os depósitos e são utilizadas na remoção de incrustações à base de sílica (SCOTT, 1998). As soluções alcalinas são também eficazes na remoção de depósitos orgânicos e biológicos, o uso de hidróxido de sódio (NaOH) é recomendado.

As incrustações inorgânicas são geralmente removidas com uma solução de limpeza de pH ácido, à temperatura ambiente e a baixa pressão. O ácido cítrico é especialmente eficaz neste processo e amplamente utilizado, já que é capaz de atuar também como agente quelante, formando assim fortes complexos com cátions carregados, impedindo-os de voltarem a precipitar antes de serem removidos do sistema (BRACEIRO, 2014).

### 2.9.8 Uso de membrana cerâmica na remoção de parâmetros físico-químicos e microbiológicos

Silva et al. (2018) confeccionaram membranas cerâmicas assimétricas de alumina, para serem utilizadas no tratamento de água do rio Gramame/PB. Os resultados mostraram que as membranas foram confeccionadas com sucesso. O fluxo permeável foi de 137,2 L/h.m<sup>2</sup>. A água permeada apresentou redução de cor, da turbidez, redução de teores de ferro, sulfatos e óxidos. A turbidez caiu de 5,2 para 1,8 UNT, a cor de 100 para 25 mg Pt-Co/L e STD de 195 para 190 mg.L<sup>-1</sup>. A membrana foi eficiente na separação de diferentes tipos de sólidos suspensos na água do rio, redução de cor e turbidez e é promissora para aplicações no tratamento e recuperação de águas, na busca de auxiliar na problemática da escassez de água.

Stefler et al. (2017) avaliaram a eficiência da tecnologia de membranas filtrantes de microfiltração e ultrafiltração (MF e UF) para a remoção de microrganismos indicadores de contaminação fecal como método alternativo ao uso de desinfetantes químicos, bem como, avaliar a interferência da turbidez no desempenho do processo, utilizando água bruta de um rio utilizado como manancial de abastecimento público municipal. A efetividade da desinfecção foi verificada através dos exames dos microrganismos indicadores de contaminação fecal: Coliformes Totais (CT), *Escherichia coli*, *colifagos* e *Clostridium perfringens*.

Para a bactéria *E. coli* obteve-se 100% de eficiência de remoção para 120 minutos de operação na unidade piloto de filtração, para coliformes totais a eficiência de remoção na membrana de MF foi de 94,1% e na UF a remoção chegou a 98,8%. Para o indicador de protozoário *C. perfringens* a membrana de UF propiciou remoção de 99,5%, comparado com 99,0% obtido na MF. Para a remoção de *colifagos* ambas as membranas foram eficientes, removendo 100% nos primeiros 60 minutos de operação. E remoção da turbidez, para os tempos de operação de 0 e 120 minutos, foi de 36 para 0,22 uT.

Marques (2017) mapeou oportunidades de reuso de água dentro da indústria têxtil. A partir desse mapeamento foi proposto o reuso de água para lavagem de pisos e equipamentos; irrigação de jardim; preparo de banhos de

tingimento e banho químico; preparo de goma; uso nas caixas de lavagem do processo de tingimento; torre de resfriamento; e descarga em vasos sanitários.

O maior consumo de água ocorre no tingimento dos fios. Atualmente todo efluente gerado por esse processo é encaminhado para a Estação de Tratamento de Águas Residuárias (ETAR) e tratado por flotação por ar dissolvido (FAD). O efluente da ETAR não apresenta características que possibilitem o reuso, para isso foi estudado o uso de filtração por membranas. Foram testadas cinco combinações diferentes de membrana envolvendo membranas de microfiltração (MF), ultrafiltração (UF) e nanofiltração (NF). A melhor configuração foi usando membranas de MF e NF.

A água obtida após a filtração em membrana de MF apresenta qualidade compatível com reuso para lavagens de pisos e equipamentos e descargas em vasos sanitários.

Cardoso (2017) realizou um estudo com sistema híbrido para remover cor, turbidez e o índice de densidade de sedimentos (IDS) utilizando membranas cerâmicas de microfiltração como pré-tratamento de um sistema de osmose inversa utilizando água de abastecimento público da cidade de Campina Grande e bentonita. Observou-se uma diminuição da turbidez em torno de 51% após 30 minutos de operação com as membranas cerâmicas. Quanto a cor, foi removido 100%. A vazão, após 15 minutos, reduziu em 50% para as membranas estudadas. Foi observado que as membranas cerâmicas apresentaram grande importância para fins de pré-tratamento da água, com eficiência de remoção de cor e turbidez e a de Osmose Inversa apresentou boa eficiência na remoção de condutividade elétrica e pH.

Marques et al. (2016) estudaram a eficiência de membrana cerâmica tubular, na remoção de cor, turbidez e indicadores de microrganismos. As fontes hídricas, escolhidas para o desenvolvimento desta pesquisa, são de origem subterrânea. O uso da membrana cerâmica demonstrou ser eficaz na taxa de remoção de turbidez entre 79% e 100% e 94% e 100% para a cor, com fluxo estável entre  $78 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$  e  $183 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ . Com relação as análises bacteriológicas, verificou-se que a membrana possuiu potencial de remoção de bactérias do tipo coliformes totais e *E.coli*. O estudo da caracterização identificou

que a pressão de 2,0 bar se adequou a morfologia da membrana possibilitando um maior fluxo ( $250 \text{ L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ), as pressões de 3,0 bar ( $200 \text{ L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) e 4,0 bar ( $200 \text{ L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) foram praticamente iguais e para 1,0 bar ( $121 \text{ L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) obteve o menor fluxo.

Ramos (2015) projetou e construiu um sistema em escala piloto para avaliar o desempenho de duas membranas cerâmicas na filtração de água para obter a melhor recuperação e qualidade para alimentar um sistema de purificação que requer águas com parâmetros mais abrandados. As membranas atenderam todas as expectativas de funcionamento, podendo ser aplicada em sistemas de purificação na remoção de cor e turbidez, removendo 66% e 41%, respectivamente, para a MC20, operando com pressão de 0,9 bar e vazão de 209 L/h. A MC10 também operou com pressão de 0,9 bar fornecendo vazão permeado de 11,8 L/h, removendo com e turbidez na faixa de 81% e 71%, respectivamente.

Os resultados mostraram que a MC10 pode ser empregada no pré-tratamento para alimentação de destiladores e sistemas de deionização de laboratórios e que um sistema de filtração seriado com as duas membranas, MC20 e MC10, operam com intervalos de lavagem maiores e percentuais de remoção melhores que os encontrados.

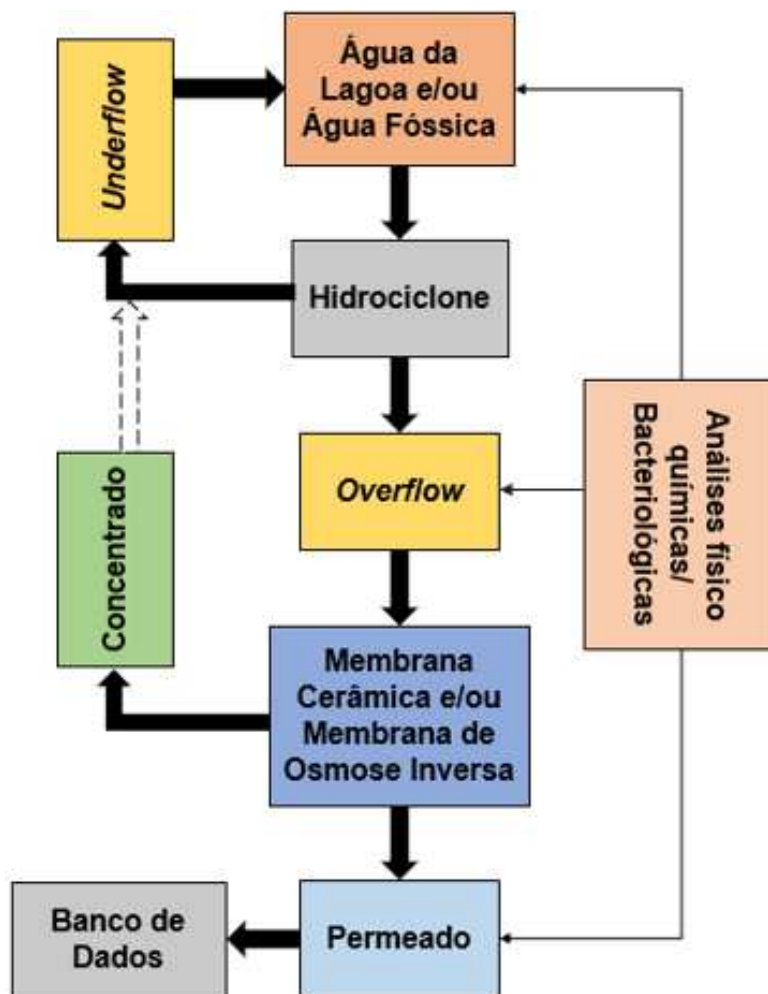
## CAPÍTULO III

### 3. Materiais e métodos

As atividades desenvolvidas no presente trabalho foram realizadas no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES, UFCG – PB) em conjunto com o Laboratório de Membranas Cerâmicas (LABCEM, UFCG – PB).

A Figura 19 apresenta o fluxograma do sistema de tratamento de águas residuárias com hidrociclone, membrana cerâmica e membrana de osmose inversa.

**Figura 19** – Fluxograma do sistema de tratamento de águas residuárias com hidrociclone, membrana cerâmica e osmose inversa.



Fonte: Autora (2019).

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Sistema de águas estudadas

O campus sede, localizado na cidade de Campina Grande-PB, com coordenadas  $7^{\circ} 12' 58.7'' S$  e  $35^{\circ} 54' 35.7'' W$ , possui uma área física de 62,6 ha (ANDRADE, 2017).

O sistema de águas estudadas foram os seguintes:

- a) Água oriunda de uma fossa séptica (água  $A_1$ ), Figura 20, proveniente do Laboratório Interdisciplinar de Ciências e Tecnologia Agroambientais, também no âmbito da UFCG, de concentração volumétrica 0,106%, determinada pela Equação (1) e coletada em agosto de 2018.
- b) Águas da Lagoa (P3), Figura 21, localizada no âmbito da UFCG, que tem o papel de uma lagoa de retenção das águas vindas da lagoa ( $P_1$ ), foram coletadas em novembro de 2018 (água  $A_2$ ) e abril de 2019 (água  $A_3$ ), com concentrações volumétricas de 0,045% e 0,064%, respectivamente, (ANDRADE, 2017).

**Figura 20** – (1) Ponto de coleta da fossa séptica/UFCG. (2) Prédio em que a fossa fica localizada.



Fonte: Autora (2019).

**Figura 21 – Lagoas da UFCG.**



Fonte: Andrade (2017).

Pela Figura 21, o P<sub>1</sub> representa uma lagoa que capta os efluentes advindos dos bairros Monte Santo e Bela Vista, além de efluentes do próprio campus e águas de chuva, que seguem pelo canal (P<sub>2</sub>) canalizando essas águas e demais efluentes provenientes das atividades do campus, para a lagoa 2 (P<sub>3</sub>) (ANDRADE, 2017).

➤ **Coleta de amostras de águas**

As coletas eram realizadas no período da manhã, geralmente nas quintas-feiras.

Na Figura 22 está o ponto de coleta da água A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>, realizadas com auxílio de bomba centrífuga e mangueiras. As águas eram armazenadas em um tanque de fibra de vidro com capacidade de 1000 L (Figura 23).

**Figura 22 – Ponto de coleta da Lagoa (P<sub>3</sub>) da UFCG. (1) Bomba centrífuga de ½ cv.**



Fonte: Autora (2019).

**Figura 23** – Tanque de armazenamento das águas coletadas.



Fonte: Autora (2018).

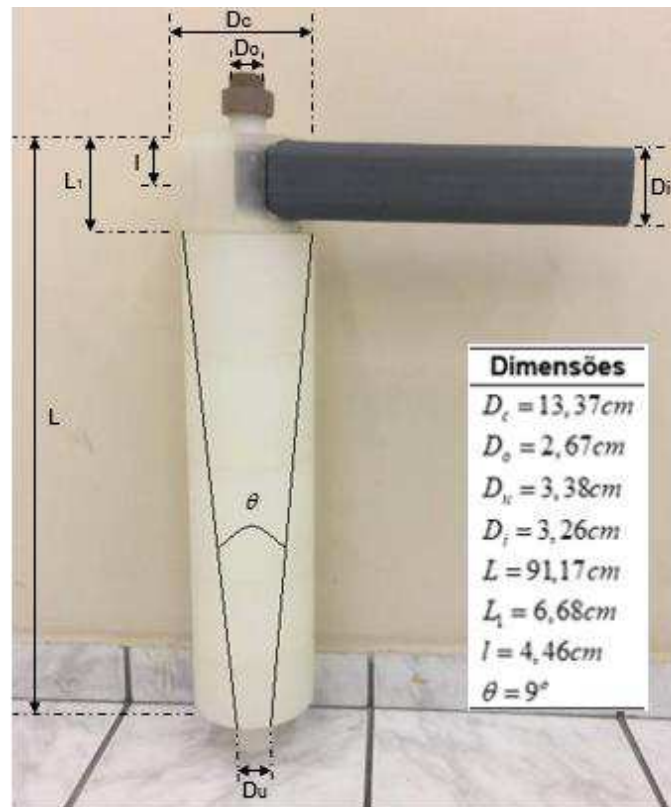
### 3.1.2 Hidrociclone

A geometria do hidrociclone de Bradley utilizado, foi adaptada de Moura et al. (2014), que o construiu com a finalidade de espessamento de lodo produzido em indústria têxtil. O sistema estudado por Moura et al., (2014) apresentou eficiência de 73% para sólidos com diâmetro de partículas de 586  $\mu\text{m}$ , com vazão de alimentação (Q) de 0,014  $\text{m}^3/\text{s}$ , número de Euler 75000 e RL de 16,7%.

A construção do hidrociclone usado neste trabalho se deu com a utilização dos seguintes itens: (1) Peça rígida de nylon; (2) Torno CNC Romi Centur 30D. As dimensões do equipamento são mostradas na Figura 24. O papel do hidrociclone construído para essa pesquisa era remover partículas sólidas em suspensão para as diferentes águas utilizadas no sistema.



**Figura 24** – Dimensões do hidrociclone utilizadas.

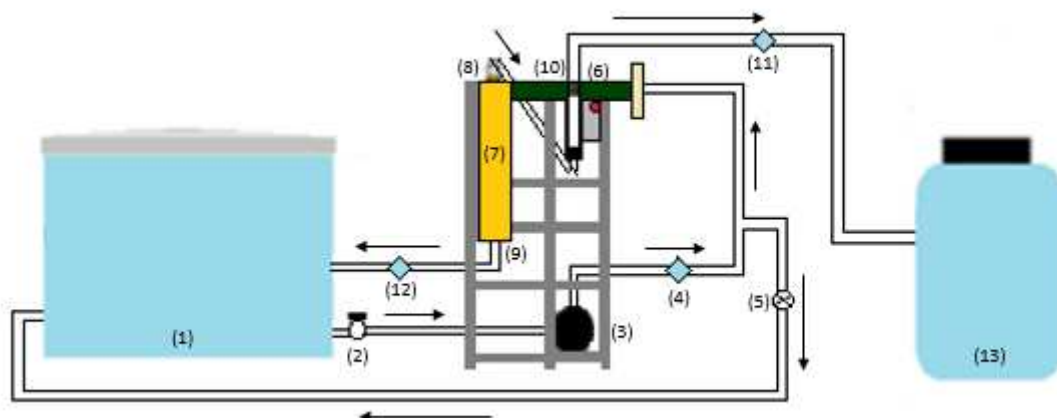


Fonte: Autora (2019).

### 3.1.2.1 Sistema hidrociclone (SHC) na separação sólido/líquido

A Figura 25 mostra o SHC para a separação de sólidos suspensos totais (SST)/ água.

**Figura 25** - Sistema hidrociclone para separação sólido/líquido, com sentido do fluxo de água.



Fonte: Autora (2019).

O SHC é composto das seguintes unidades:

- 1) Tanque de alimentação (1000L);

- 2) Válvula de saída da alimentação
- 3) Motor-bomba centrífuga Dancor CAM-W10 M 3,0 CV monofásico;
- 4) Ponto de coleta da alimentação para análises;
- 5) Válvula de by-pass para diminuir a pressão no hidrociclone ao ligar o sistema e também para controle da velocidade de sua operação;
- 6) Manômetro (0-10Kgf/cm<sup>2</sup>);
- 7) Hidrociclone de Nylon;
- 8) Saída do *Overflow*;
- 9) Saída do *Underflow*;
- 10) Rotâmetro (0-150 LPM);
- 11) Ponto de coleta do *Overflow* para análises;
- 12) Ponto de coleta do *Underflow*;
- 13) Tanque de armazenamento do *overflow*.

Para estudo do hidrociclone, foram adicionadas uma válvula na saída *underflow* e uma válvula de *by-pass*, onde pôde-se controlar as velocidades de operação, alterando a pressão interna do hidrociclone.

### 3.1.3 Membranas cerâmicas - MC

As membranas cerâmicas de microfiltração foram fabricadas no LABCEM (Laboratório de Membranas Cerâmicas), que faz parte do LABDES na UFCG. Para o estudo foram produzidas membranas cerâmicas modelo MR01-20, compostas de alumina/argila, com tamanho de poros aproximadamente de 1,3 µm, com intuito de verificar a produção e qualidade da água permeada no tratamento de águas residuárias.

O SHC foi utilizado como pré-tratamento físico das águas, visando diminuir os efeitos de polarização por concentração em termos de *fouling* e partículas em suspensão nas membranas cerâmicas e/ou polimérica.

Os principais materiais para a preparação das membranas (Figura 26) foram  $\alpha$ -alumina ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), cedida pela empresa Treibacher Schleifmittel Brasil Ltda e argila plástica, proveniente do município de Boa Vista – PB.

O diâmetro da parte tubular e comprimento das MC utilizadas são:

- MR01-20 (Membrana cerâmica tubular, monocanal, de argila e alumina).  
Diâmetro: 2,3 cm; Comprimento: 20 cm.

**Figura 26** – Membranas cerâmicas confeccionadas.



Fonte: Laboratório de Referência em Dessalinização (2019).

### 3.1.4 Sistema híbrido (HC/MC/OI)

A Figura 27 descreve o sistema híbrido proposto para o tratamento de águas residuárias com Hidrociclone/ Membranas Cerâmicas de Microfiltração/ Osmose Inversa.

**Figura 27** – Sistema híbrido de tratamento de águas residuárias com HC, MC e OI.



Fonte: Autora (2019).

(1): Tanque de alimentação – 1000L;

- (2): Água do *Overflow* do SHC;
- (3): Tanque de armazenamento do *Overflow* do SHC;
- (4): Motor elétrico de ½ cv acoplado a uma bomba de alta pressão PROCON de deslocamento positivo;
- (5) e (7): Manômetros glicerizados (0 – 10 Kgf/cm<sup>2</sup>);
- (6): Sistema de membranas cerâmicas (MR01-20);
- (8): Coleta do permeado do SMC;
- (9): Coleta do concentrado SMC;
- (10): Membrana de Osmose Inversa (TW30-4040)
- (11): Coleta do concentrado da membrana de OI;
- (12): Coleta do permeado da membrana de OI.

O SHC já foi descrito no item 3.1.2.1, sendo o sistema híbrido da Figura 27 descrito a partir do *overflow* produzido e armazenado na bombona (3). O tratamento segue com o SMC e de OI.

## 3.2 Metodologia

As análises físico-químicas e bacteriológicas foram realizadas no Labdes/UFCG seguindo a metodologia e os padrões do *Standard Methods* (APHA, 1998).

### 3.2.1 Sistema de HC

#### 3.2.1.1 Avaliação da eficiência do SHC

Foi determinada a eficiência do SHC para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>. Para isso foi determinado o SST, pela Equação (11), variando no processo a velocidade e tempo de operação.

- 1) Velocidades de operação:

$$v_1 = 0,92 \text{ m/s e } v_2 = 1,3 \text{ m/s}$$

- 2) Tempos de operação:

$$t_1 = 0,5 \text{ hora e } t_2 = 1,0 \text{ hora}$$

As análises de SST foram realizadas nas águas da alimentação, *overflow* e *underflow* do SHC e foram coletadas nas seguintes condições:

- Amostra 1:  $v_1t_1$ , Amostra 2:  $v_1t_2$  - para a menor velocidade, nos dois tempos de operação;
- Amostra 3:  $v_2t_1$ , Amostra 4:  $v_2t_2$  - para a maior velocidade, nos dois tempos de operação.

Também foram analisados os seguintes parâmetros: pH; cor; turbidez e condutividade elétrica, para a água do *overflow* e *underflow*, a cada 5 minutos durante 1 hora de operação, compondo um banco de dados para avaliação do SHC. As vazões volumétricas foram determinadas pela Equação (3), a partir dos tempos decorridos durante a coleta do efluente e pelo volume coletado no *underflow* e no *overflow*.

❖ *Teste de SST:*

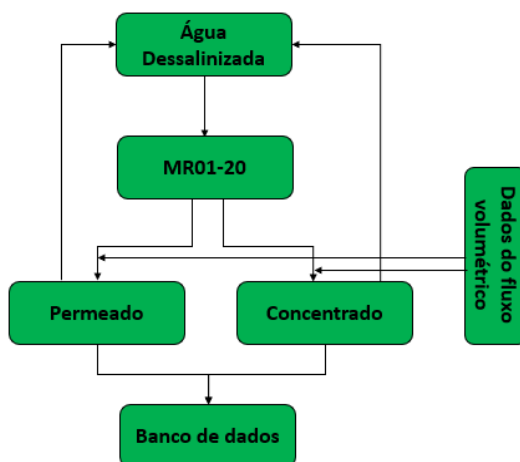
Os filtros de papel utilizados para determinação do SST possuíam 8  $\mu\text{m}$  de tamanho de poros. Foram filtrados um volume de 100 mL de cada amostra e realizado os cálculos pela Equação (11).

### 3.2.2. Sistema membrana cerâmica (SMC)

#### 3.2.2.1 Caracterização da membrana cerâmica com água dessalinizada

Foi realizada a caracterização de 6 membranas de microfiltração modelo MR01-20, quanto a MEV, volume de poros e fluxo volumétrico. A Figura 28 exhibe o fluxograma do processo de caracterização das membranas do presente estudo.

**Figura 28** – Fluxograma com o processo de caracterização das membranas cerâmicas.



Fonte: Autora (2019).

O módulo da membrana cerâmica (Figura 29) foi caracterizado utilizando água dessalinizada.

**Figura 29** - Módulo da membrana cerâmica em PVC.

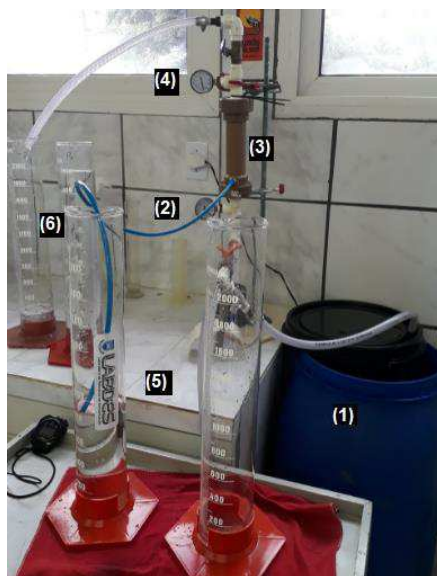


Fonte: LABDES (2019).

O cálculo do fluxo, pela Equação (13), consiste em alimentar tangencialmente o sistema de membrana cerâmica com água dessalinizada, operando com pressões de alimentação de 1,0; 2,0 e 3,0 kgf/cm<sup>2</sup>, verificando a vazão do permeado e concentrado a cada 5 minutos durante 120 minutos de operação. Com os dados obtidos, tornou-se possível a verificação da pressão ótima de atuação da membrana, a ser utilizada no sistema híbrido.

Os componentes do sistema de determinação do comportamento do fluxo permeado (Figura 30) são: (1) Tanque de alimentação de 200 L; (2) e (4) Manômetros glicerizados; (3) Módulo de PVC e membrana cerâmica de microfiltração (MR01-20); (5) e (6) provetas graduadas de 2 L para medição do volume do permeado e concentrado.

**Figura 30** – Sistema de caracterização das MC.



Fonte: Autora (2019).

Também foi utilizado motor elétrico de ½ CV acoplado a uma bomba de alta pressão PROCON de deslocamento positivo, válvula de *by-pass* e válvulas de esfera monobloco para controle da pressão.

### 3.2.2.2 Porosimetria por método de Arquimedes

A porosidade das membranas cerâmicas foi determinada pelo método de Arquimedes, utilizando a Equação (16).

### 3.2.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As membranas cerâmicas após sinterização, foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), usando equipamento VEGA3 Tescan, instalado no Laboratório de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal de Campina Grande. Com esta técnica, foi avaliada a seção transversal das membranas MR01-20 produzidas. Foram realizadas fotomicrografias da seção transversal e do detalhe da seção transversal próximo à superfície externa e interna para observar suas homogeneidades, possíveis formações de trincas e tamanho dos poros.

Informações do MEV utilizadas:

- Amplitude máxima de diferença de potencial aplicada: 15 kV;
- Faixa de magnitude: 40 a 5000x.

### 3.2.3 Sistema híbrido com HC/MC/OI

No sistema híbrido composto pelo hidrociclone, membrana cerâmica e membrana de osmose inversa, o procedimento ocorreu da seguinte forma:

1. Foi realizado a distribuição granulométrica por difusão de raios laser para as águas da lagoa e fossa séptica;
2. A água residuária ( $A_1$ ,  $A_2$  e/ou  $A_3$ ) foi bombeada para o SHC;
3. A corrente do *underflow* retorna para o tanque de alimentação;
4. A corrente do *overflow*, produzida nas condições  $v_1 t_2$  e  $v_2 t_2$ , é armazenada em uma bombona que irá alimentar o sistema de membranas cerâmicas de microfiltração (SMC) (6 unidades) e/ou a membrana de Osmose Inversa (modelo TW30 4040);

5. Os concentrados das membranas também retornam para o tanque de alimentação.
6. Realizou-se o estudo dos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos nas águas da alimentação estudadas, no permeado do sistema de membranas cerâmicas (SMC), na pressão de 3,0 kgf/cm<sup>2</sup> (constante), e no permeado da membrana de osmose inversa, na pressão de 8,0 kgf/cm<sup>2</sup> (constante);
7. Foram avaliados os parâmetros pH, cor, turbidez e condutividade elétrica, medidos a cada 5,0 minutos durante 1,0 hora de operação, nos permeados do SMC e da OI;
8. Foram analisados também o fluxo permeado ( $J_P$ ), Recuperação (R%) do SMC para o permeado das águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>;
9. As águas tratadas pelo sistema híbrido foram analisadas de acordo com as normas do CONAMA 357/2005 para reutilização na irrigação.

#### **3.2.3.1 Análise bacteriológica e físico química**

Após os experimentos, foram coletadas amostras da alimentação e dos permeados do SMC e da OI, nas quais foram feitas análises bacteriológicas. Para a análise da DBO<sub>5,20</sub> utilizou-se o método Winkler - azida sódica. Toda metodologia utilizada foi baseada nas recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998).

#### **3.2.3.2 Análise granulométrica por difração a laser para a água da fossa e lagoa**

Foi utilizado o sistema de espalhamento de luz laser de baixo ângulo para determinação de tamanho de partículas, com o equipamento Mastersizer 2000® da marca Malvern, versão 5.60, no Laboratório de Tecnologia de Materiais, no âmbito da UFCG.

O Malvern Mastersizer 2000 é utilizado para medição da distribuição do tamanho das partículas pela técnica da difração do laser, com capacidade para caracterização de tamanhos no intervalo de 0,02 a 2000 micrometros. É controlado por um computador, com software apropriado para aquisição dos sinais e tratamentos estatísticos.



Os percentis  $d(0,1)$ ;  $d(0,5)$  e  $d(0,9)$  foram utilizados como medidas estatísticas de tamanho de partículas. Na etapa experimental adotou-se o percentil  $d(0,5)$  como tamanho médio por ser a mediana da distribuição, ou seja, é o tamanho da partícula que separa a população de estudo em duas partes iguais, tal que 50% são menores que o valor de  $d(0,5)$ . A distribuição do tamanho das partículas, sendo assimétrica, devem ser ajustadas por uma distribuição de probabilidade Log-normal.

### **3.3 Limpeza química das membranas cerâmicas**

A limpeza química das membranas é fundamental para estudar sua recuperação em termos de produção de permeação.

- ✓ A limpeza química se deu pela submersão em soluções básicas por um período de 24 horas;
- ✓ Em seguida foram submergida em soluções ácidas também por 24 horas.
- ✓ As MC foram submersas em equipamento de ultrassom (UltraSonic Cleaner USC 2850), com água deionizada por 1 hora para remoção do excesso de base e ácido;
- ✓ As MC's são mantidas submersas em água deionizada em recipiente coberto com papel filme para evitar possíveis contaminações.

## CAPÍTULO IV

### 4. Resultados e discussões

#### 4.1 Determinação da distribuição do tamanho das partículas

Foi realizado um estudo da distribuição do tamanho das partículas para as águas da lagoa e fossa séptica. Os laudos foram emitidos pelo Laboratório de Tecnologias de Materiais no âmbito da UFCG e estão no APÊNDICE A.

Para a água da lagoa, a distribuição do tamanho das partículas é apresentada na Tabela 8.

**Tabela 8** – Distribuição do tamanho das partículas para a água da lagoa.

<i>Tamanho (μm)</i>	<i>% Acumulada</i>	<i>Tamanho (μm)</i>	<i>% Acumulada</i>	<i>Tamanho (μm)</i>	<i>% Acumulada</i>	<i>Tamanho (μm)</i>	<i>% Acumulada</i>	<i>Tamanho (μm)</i>	<i>% Acumulada</i>
0,356	0,00	1,589	2,85	7,096	16,35	31,698	45,15	141,589	89,28
0,399	0,00	1,783	3,43	7,962	17,89	35,566	49,37	158,866	90,90
0,448	0,01	2,000	4,06	8,934	19,49	39,905	54,15	178,250	92,14
0,502	0,06	2,244	4,72	10,024	21,13	44,774	58,80	200,000	93,35
0,564	0,14	2,518	5,44	11,247	22,85	50,238	63,27	224,404	94,53
0,632	0,24	2,825	6,22	12,619	24,60	56,368	67,52	251,785	96,39
0,710	0,36	3,170	7,02	14,159	26,51	63,246	71,36	282,508	97,67
0,796	0,51	3,557	8,15	15,887	28,58	70,963	74,83	316,979	98,80
0,893	0,71	3,991	9,41	17,825	30,79	79,621	77,95	355,656	99,75
1,002	1,00	4,477	10,71	20,000	33,25	89,337	80,00	399,052	99,95
1,125	1,36	5,024	12,01	22,440	35,83	100,237	82,48	447,744	100,00
1,262	1,81	5,637	13,43	25,179	38,76	112,468	84,83	502,377	100,00
1,416	2,31	6,325	14,88	28,251	41,94	126,191	87,10	563,677	100,00

Fonte: Laboratório de Tecnologia de Materiais/UFCG (2019).

Pela análise da Tabela 8, a água da lagoa apresentou um percentil mediano,  $d(0,5)$ , de tamanho das partículas aproximadamente de 36 μm, o que representa um volume de 50% da amostra, representando o tamanho médio das partículas da água da lagoa.

Para a água da fossa, a distribuição do tamanho das partículas está na Tabela 9.

**Tabela 9** – Distribuição do tamanho das partículas para a água da fossa.

<i>Tamanho (μm)</i>	<i>% Acumulada</i>	<i>Tamanho (μm)</i>	<i>% Acumulada</i>	<i>Tamanho (μm)</i>	<i>% Acumulada</i>	<i>Tamanho (μm)</i>	<i>% Acumulada</i>
0,564	0,00	3,991	5,04	28,251	21,88	200,000	90,62
0,632	0,00	4,477	5,70	31,698	24,71	224,404	92,20
0,71	0,01	5,024	6,41	35,566	27,54	251,785	93,42
0,796	0,06	5,637	7,16	39,905	29,85	282,508	94,55
0,893	0,15	6,325	7,95	44,774	33,28	316,979	95,63
1,002	0,27	7,096	8,77	50,238	37,92	355,656	96,71
1,125	0,42	7,962	9,65	56,368	43,78	399,052	97,77
1,262	0,61	8,934	10,57	63,246	50,44	447,744	98,62
1,416	0,84	10,024	11,52	70,963	55,92	502,377	99,20
1,589	1,12	11,247	12,51	79,621	61,19	563,677	99,46
1,783	1,45	12,619	13,54	89,337	66,13	632,456	99,60
2,000	1,84	14,159	14,62	100,237	70,51	709,627	99,76
2,244	2,29	15,887	15,75	112,468	74,58	796,214	99,90
2,518	2,78	17,825	16,92	126,191	78,56	893,367	100,00
2,825	3,29	20,000	18,11	141,589	82,13	1002,374	100,00
3,170	3,84	22,440	19,34	158,866	85,56	1124,683	100,00
3,557	4,42	25,179	20,60	178,250	88,24	1261,915	100,00

Fonte: Laboratório de Tecnologia de Materiais/UFCG (2019).

Pela análise da Tabela 9, a água da fossa apresentou um percentil mediano,  $d(0,5)$ , de tamanho das partículas aproximadamente de 62  $\mu\text{m}$ , o que representa um volume de 50% da amostra, representando o tamanho médio das partículas da água da fossa.

Os dados granulométricos do esgoto sanitário obtidos nesta pesquisa estão de acordo com o descrito por Jordão e Pessôa (2005) e Kellner et al. (2016), descrito no tópico 2.2 em “Classificação do tamanho das partículas presentes no esgoto”.

## 4.2 Desempenho do hidrociclone

O Hidrociclone Bradley como separador sólido/líquido foi avaliado pela determinação experimental da capacidade de processamento (Q), número de Euler (Eu), número de Reynolds (Re), eficiência de remoção de sólidos em suspensão (Er), razão de líquido (RL), eficiência total ( $\eta$ ), análises físico químicas e bacteriológicas.

#### 4.2.1 Capacidade de Processamento (Q)

A vazão volumétrica de alimentação, determinada pela Equação (3), é uma variável importante na operação de hidrociclonagem, pois quantifica a capacidade de processamento do equipamento.

Os ensaios da capacidade de processamento foram conduzidos com água da rede de distribuição, cuja temperatura variou entre 20°C e 25°C.

Para determinação da capacidade de processamento foram realizadas 6 bateladas com diferentes velocidades de operação do SHC. A partir dos valores da vazão volumétrica, obteve-se diferentes valores para velocidade de operação na entrada da alimentação ( $v$ ), velocidade da alimentação na parte cilíndrica ( $u_c$ ), queda de pressão ( $-\Delta P$ ) e Euler ( $Eu$ ), como mostra a Tabela 10.

**Tabela 10** – Valores obtidos variando a vazão volumétrica do SHC.

	1	2	3	4	5	6
Q (L/min)	127,1	142,3	154,1	164,3	172,8	178,0
$v$ (m/s)	0,92	1,02	1,10	1,18	1,24	1,30
$u_c$ (m/s)	0,15	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21
( $-\Delta P$ ) (kPa)	30,5	37,3	42,9	48,2	52,7	55,6
$Eu$	2683,2	2619,7	2569,6	2542,7	2515,4	2435,3
Re	$1,9 \times 10^4$	$2,1 \times 10^4$	$2,3 \times 10^4$	$2,5 \times 10^4$	$2,7 \times 10^4$	$2,9 \times 10^4$

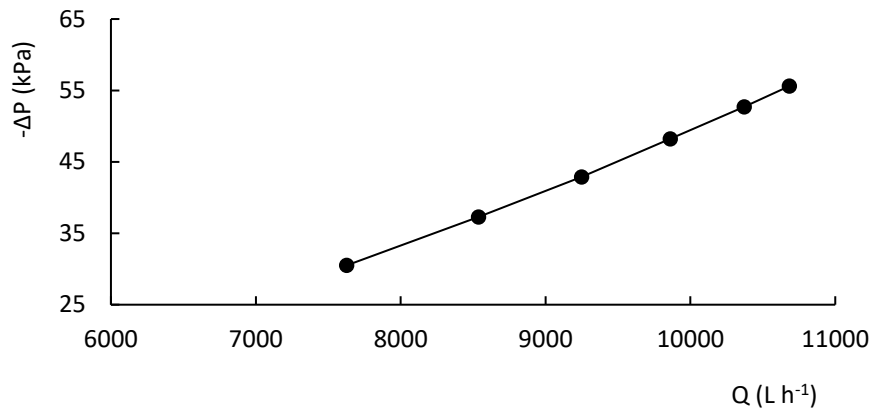
Pela Tabela 10 observa-se que com o aumento da vazão volumétrica (Q), os outros parâmetros também aumentaram, com exceção do número de Euler, justificado no item 4.2.2, a seguir.

Nos experimentos realizados foram determinados os valores para o número de Reynolds pela Equação (7) e apresentados na Tabela 10. Os valores obtidos, para todas as vazões volumétricas estudadas, foram obtidos números de Reynolds em regime de escoamento turbulento.

No presente projeto, as maiores eficiências de remoção ( $Er$ ) foram obtidas para maiores números de Reynolds, observado pela Tabela 10. Dados semelhantes foram obtidos por Zorzo (2012), que trabalhou com o hidrociclone Bradley no tratamento de efluentes de uma marmoraria, obtendo eficiência de remoção de 85%, com número de Reynolds em 36.882.

A relação da queda de pressão no hidrociclone em função da vazão volumétrica aplicada está na Figura 31.

**Figura 31** - Queda de pressão em função da vazão volumétrica da alimentação para o SHC.



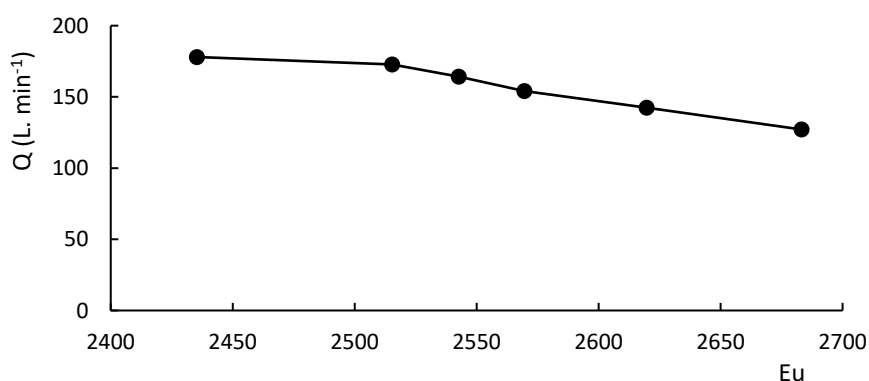
Pode-se observar que  $(-\Delta P)$  sofre um aumento significativo, conforme esperado, com o aumento da  $Q$  para o hidrociclone construído. Resultados semelhantes foram encontrados por Moura et al. (2014).

#### 4.2.2 Consumo energético (Eu)

O consumo energético foi determinado pelo número de Euler, variando as vazões volumétricas da alimentação.

Na Figura 32 é representada a relação do número de Euler em função da vazão volumétrica da alimentação.

**Figura 32** – Relação do número de Euler em função da vazão volumétrica da alimentação.



Sabe-se que, quanto maior a vazão no hidrociclone maior também será a entrada de suspensão devido ao aumento no fornecimento de energia sob a forma de pressão, aumentando o número de Euler (GONÇALVES, 2016). Porém, pela Figura 32, notou-se um comportamento oposto, devido as características geométricas do equipamento.

Para o hidrociclone utilizado no presente projeto, a área lateral da parte cônica foi de  $A_{L(CON)} = 1780,2\text{cm}^2$  e a área lateral da parte cilíndrica de  $A_{L(CIL)} = 280,6\text{cm}^2$ , logo a relação entre elas foi de 6, justificando a diminuição do número de Euler com o aumento da queda de pressão, de acordo com a afirmação dita por Arruda (2003), verificou que para hidrociclones Bradley se a relação entre a área lateral da parte cônica e a área lateral da parte cilíndrica for maior que a unidade, ocorre um aumento significativo na vazão volumétrica de alimentação e, por consequência, decréscimos no número de Euler. Quando a relação entre as áreas é menor que a unidade, como ocorre para o hidrociclone Rietema, verifica-se uma redução na vazão, com consequente aumento do número de Euler.

Segundo Gonçalves (2016) os resultados apresentados pelo número de Euler para hidrociclones com geometria Bradley devem ser menores que 7500, portanto os resultados apresentados estão de acordo.

Logo, de acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o hidrociclone estudado pode ser operado com máxima capacidade de processamento não implicando em maiores gastos energéticos.

#### 4.2.3 Eficiência de remoção de sólidos em suspensão (Er)

As concentrações de sólidos em suspensão foi determinada para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>, antes e após tratamento pelo SHC, determinada pela Equação (11), analisados na menor ( $v_1$ ) e maior ( $v_2$ ) velocidade de operação e nos tempos  $t_1 = 0,5$  hora e  $t_2 = 1,0$  hora, cujas amostras foram coletadas nas seguintes condições:  $v_1t_1$ ,  $v_1t_2$ ,  $v_2t_1$  e  $v_2t_2$ .

Na Tabela 11 estão os valores de SST, para a alimentação, *overflow* e *underflow* das águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>.

**Tabela 11** – Valores de SST obtidos antes e após tratamento pelo SHC.

Alimentação	Sólidos Suspensos Totais (mg. L <sup>-1</sup> )										
	OF ( $v_1t_1$ )	OF ( $v_1t_2$ )	OF ( $v_2t_1$ )	OF ( $v_2t_2$ )	ER (%)	UF ( $v_1t_1$ )	UF ( $v_1t_2$ )	UF ( $v_2t_1$ )	UF ( $v_2t_2$ )	ER (%)	
A <sub>1</sub>	1059	498	466	445	424	60	530	552	584	612	42,2
A <sub>2</sub>	450	337	311	295	276	38,7	116	142	152	176	60,8
A <sub>3</sub>	640	506	461	419	395	38,3	132	177	223	245	61,7

As maiores eficiências de remoção (ER%), vistos na Tabela 11, de SST foram obtidos para as maiores velocidades e tempos de operação do SHC (OF em  $v_2t_2$ ), com remoção de aproximadamente 60% para a água A<sub>1</sub>, 38,7% para a água A<sub>2</sub> e 38,3% para a água A<sub>3</sub>. Maiores velocidades implicam maiores forças centrífugas, conseqüentemente maiores remoções de partículas em suspensão.

Outro fato importante a ser observado é quanto ao diâmetro das partículas ( $d_p$ ) e diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ), apresentado na Tabela 12. Quanto maior o diâmetro das partículas, maior a eficiência de remoção, como observado na Tabela 11.

**Tabela 12** – Diâmetro das partículas e diâmetro de corte reduzido das águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>.

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
$d'_{50}$ ( $\mu\text{m}$ ) ( $v_2t_2$ )	59	80,5	72,9
$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	62	36	36

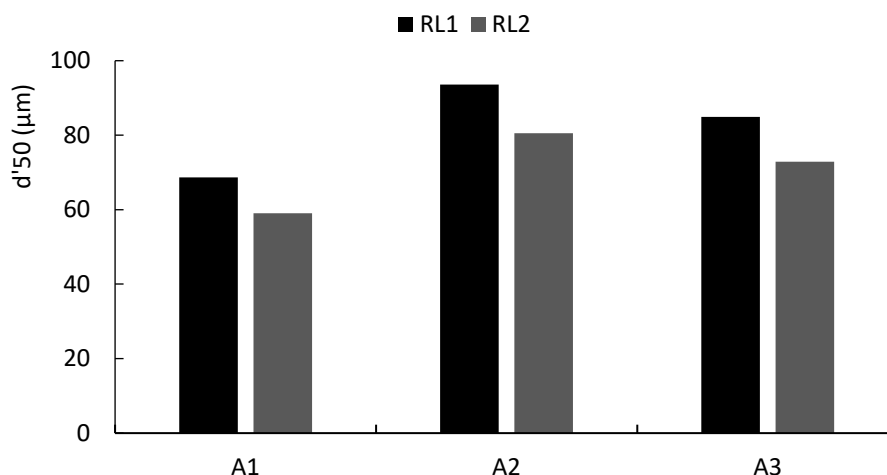
Portanto, as eficiências de remoção encontradas estão de acordo com o dito na literatura quando leva-se em consideração o diâmetro de corte e diâmetro das partículas, visto que a água A<sub>1</sub> apresentou menores diâmetros de corte e maior diâmetro da partícula, conseqüentemente maior eficiência de remoção no SHC.

#### 4.2.4 Razão de Líquido (RL)

A Figura 33 relaciona o diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ) do SHC com as razões de líquido estudadas. Nesse experimento, as razões de líquido obtidas foram:

- RL<sub>1</sub> de 23,6%, para a menor vazão volumétrica da alimentação;
- RL<sub>2</sub> de 44,9%, para a maior vazão volumétrica da alimentação.

**Figura 33** – Relação das razões de líquido em função do diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ).



Observa-se pela Figura 33 que os menores diâmetros de corte reduzido são para a água A<sub>1</sub>, cuja concentração volumétrica é a maior. Para as maiores razões líquidas obteve-se os menores diâmetros, como esperado.

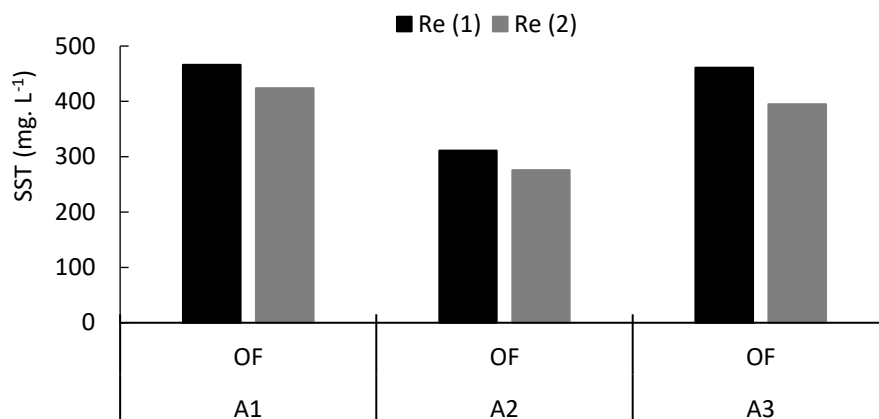
A água de maior concentração volumétrica, conforme observado para a água A<sub>1</sub>, apresentou o menor diâmetro de corte reduzido, de acordo com Ghodrat et al. (2014b) que afirma que o diâmetro de corte reduzido sofre decréscimos com o hidrociclone sendo alimentado com água de maior concentração.

Comportamento semelhante da relação entre diâmetro de corte e razão líquida, foi obtido por Vieira (2001) e Alves (2006). Os autores ressaltam também que o desempenho do hidrociclone Bradley melhora com o uso desses equipamentos instalados em série. Os autores também comentam que quanto maior a razão de líquido maior é o arraste de sólidos para a corrente de *underflow* e, conseqüentemente, são obtidos maiores diâmetros de corte reduzido, logo, pela análise da Figura 33, os resultados apresentados estão de acordo com a literatura.

A Figura 34 apresenta o gráfico da concentração de sólidos suspensos totais ( $\text{mg. L}^{-1}$ ) na corrente de *overflow*, para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>, com os números de Reynolds determinados na menor e maior velocidades de operação do SHC ( $\text{Re}_1 = 20.108$  e  $\text{Re}_2 = 28.498$ ).



**Figura 34** - Teor de sólidos suspensos totais obtidos para os experimentos com o hidrociclone Bradley em diferentes números de Reynolds



Analisando a Figura 34, nota-se que as maiores porcentagens de remoção de SST no *overflow* foi para o maior Reynolds (28.498), estando dentro do esperado devido o maior número de Reynolds corresponder a maiores velocidades centrífugas no SHC e maiores remoções. Dados semelhantes foram apresentados por Zorzo (2012) que obteve melhores remoções para Reynolds maiores, como já mencionado.

#### 4.2.5 Cálculo da eficiência total ( $\eta$ )

Para determinação das eficiências foi utilizada a menor e maior vazão volumétrica ( $Q_i$ ) trabalhadas, com as respectivas velocidades de operação.

- $Q_1 = 127,1 \text{ L. min}^{-1}$ ;  $v_1 = 0,92 \text{ m/s}$ ;
- $Q_2 = 178 \text{ L. min}^{-1}$ ;  $v_2 = 1,3 \text{ m/s}$ .

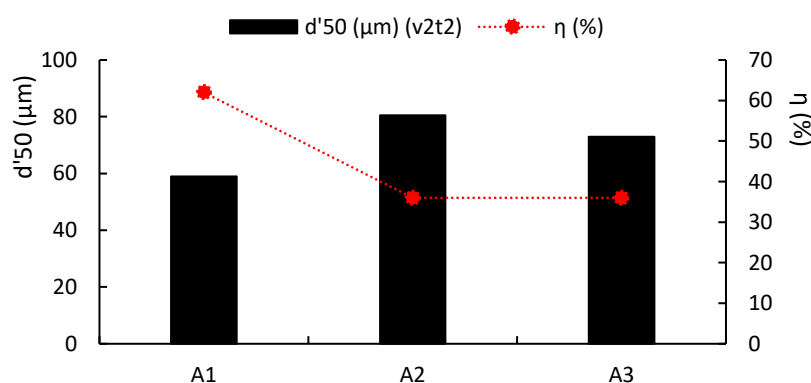
Na Tabela 13 são mostrados os resultados experimentais para a concentração volumétrica ( $C_{v,i}$ ), eficiência total ( $\eta$ ) e massa específica ( $\rho$ ), para o *underflow* do SHC, em que os índices 1, 2, 3 e 4 referem-se as condições em que as amostras foram coletadas,  $v_{1t1}$ ,  $v_{1t2}$ ,  $v_{2t1}$  e  $v_{2t2}$ , respectivamente.

**Tabela 13** – Dados obtidos para o SHC nas águas estudadas.

	A <sub>1</sub>			A <sub>2</sub>			A <sub>3</sub>		
	C <sub>vUF</sub> (%)	η (%)	ρ <sub>s</sub> (kg.m <sup>-3</sup> )	C <sub>vUF</sub> (%)	η (%)	ρ <sub>s</sub> (kg.m <sup>-3</sup> )	C <sub>vUF</sub> (%)	η (%)	ρ <sub>s</sub> (kg.m <sup>-3</sup> )
UF <sub>1</sub>	0,0523	38,2	1004,5	0,0115	20,0	1002,1	0,0131	17,7	1002,5
UF <sub>2</sub>	0,0545	39,8	1004,8	0,0141	24,0	1002,7	0,0176	21,5	1003,3
UF <sub>3</sub>	0,0577	30,4	1004,9	0,0151	19,0	1002,9	0,0222	16,2	1003,8
UF <sub>4</sub>	0,0605	31,8	1005,2	0,0175	22,0	1003,3	0,0244	21,0	1004,1

Na Tabela 13 é observado, de UF<sub>1</sub> para UF<sub>3</sub>, no tempo t<sub>1</sub> de 0,5 horas, e de UF<sub>2</sub> para UF<sub>4</sub>, no t<sub>2</sub> de 1,0 hora, uma diminuição no valor da eficiência total (η) para o hidrociclone estudado, fenômeno reportado também por Moura et al (2014). Quanto ao diâmetro da partícula do meio estudado, quanto maior for, maior a eficiência total (η), o que foi observado por Massarani (2002) e apresentado na Tabela 13, para a água A<sub>1</sub>.

A Figura 35 ilustra a relação do diâmetro de corte (d'50) e a eficiência total (η) do hidrociclone.

**Figura 35** – Relação do diâmetro de corte (d'50) e a eficiência total (η %).

Foi observado que quanto menor o diâmetro de corte maior a eficiência total, o que ocorreu para a água A<sub>1</sub>. Já as águas A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>, apresentaram maiores diâmetros de corte, portanto menores eficiências totais. As águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub> apresentaram valores para o diâmetro de corte de 59 μm, 80,5 μm e 72,9 μm e eficiências totais de 31,8%, 22,0% e 21,0%, respectivamente, para a maior velocidade e tempo de operação do SHC. Relações semelhantes entre esses parâmetros foram obtidos por Moura (2015), Gonçalves (2016), Cruz e Zanini (2010), que utilizaram suspensão aquosa com solo verificando um decréscimo na eficiência total para os maiores diâmetros de corte reduzido, justificado pelas diferenças texturais do material particulado usado.

Peçanha & Massarani (1980) comentam que hidrociclones bem projetados operam com eficiência total na faixa de 80 a 90%, contudo o hidrociclone utilizado no presente projeto apresentou eficiência total de aproximadamente 40%, valor justificado pelo tamanho das partículas suspensas nas águas residuárias estudadas serem muito pequenas, dificultando sua remoção pela ação da força centrífuga.

#### 4.2.6 Análises físico químicas para o SHC

Foram realizadas análises físico químicas da água A<sub>1</sub> antes e após o tratamento no SHC. Foram analisados os parâmetros nitrogênio na forma de nitrato, nitrito e amônia, potássio e fósforo, por se tratarem de importantes nutrientes para o cultivo de plantas sendo utilizados como adubos naturais.

As análises foram feitas nas velocidades  $v_1 = 0,92$  m/s, correspondendo a vazão de alimentação  $Q_1 = 127,1$  L. min<sup>-1</sup>;  $v_2 = 1,18$  m/s, correspondendo a vazão de alimentação  $Q_2 = 164,3$  L. min<sup>-1</sup> e  $v_3 = 1,44$  m/s, correspondendo a vazão de alimentação  $Q_3 = 200,3$  L. min<sup>-1</sup>, e nos tempos de operação  $t_1$  e  $t_2$ .

Na Tabela 14 estão os resultados das análises mencionadas com as porcentagens de remoção (R) para o *overflow* na maior velocidade e tempo de operação.

**Tabela 14** – Análises físico químicas para a água A<sub>1</sub> antes e após tratamento no SHC, com a porcentagem de remoção em  $v_3t_2$ .

	$NO_3^-$ (mg. L <sup>-1</sup> )	$NO_2^-$ (mg. L <sup>-1</sup> )	$NH_3$ (mg. L <sup>-1</sup> )	P (mg. L <sup>-1</sup> )	K (mg. L <sup>-1</sup> )
Alimentação (A <sub>1</sub> )	6,1	0,94	116,1	71,6	66,5
OF ( $v_1t_1$ )	12	8,2	121,1	86,8	70,7
OF ( $v_1t_2$ )	10,3	5	116,1	80	69
OF ( $v_2t_1$ )	8,5	1,08	113,6	77,9	68,2
OF ( $v_2t_2$ )	6,7	0,52	110,3	77,4	59,5
OF ( $v_3t_1$ )	6,1	0,44	109,1	71,1	58,7
OF ( $v_3t_2$ )	4,2	0,38	106,6	65,8	58
R - OF ( $v_3t_2$ ) (%)	31,1	59,6	8,2	8,1	12,8

Pela Tabela 14 observa-se uma razoável porcentagem de remoção no *overflow* do SHC para a maior velocidade e tempo de operação. Com destaque para o nitrito e nitrato, cujas porcentagens de remoção foram 59,6 e 31,1%, respectivamente.

Nas Tabelas 15 a 17 estão as médias dos valores das análises de pH, cor, turbidez e condutividade elétrica medidas a cada cinco minutos durante uma hora de operação do SHC, nas velocidades  $v_1 = 0,92$  m/s e  $v_2 = 1,3$  m/s e tempo de operação ( $t_2$ ) de 1,0 hora. Os resultados completos estão no APÊNDICE B.

**Tabela 15** – Análise de cor, turbidez, pH e condutividade elétrica para a água A<sub>1</sub>.

	T (NTU)	Cor (mg Pt/L)	K ( $\mu$ S/cm)	pH
Alimentação	36,4	204,0	2323,0	8,1
OF ( $v_2t_2$ )	26,9	181,6	2155,7	7,9
(%) Remoção	26,1	11,0	7,2	2,5

**Tabela 16** – Análise de cor, turbidez, pH e condutividade elétrica para a água A<sub>2</sub>.

	T (NTU)	Cor (mg Pt/L)	K ( $\mu$ S/cm)	pH
Alimentação	114,4	196,0	1629,0	7,4
OF ( $v_2t_2$ )	98,3	185,4	1544,3	7,4
(%) Remoção	14,1	5,4	5,2	0,0

**Tabela 17** – Análise de cor, turbidez, pH e condutividade elétrica para a água A<sub>3</sub>.

	T (NTU)	Cor (mg Pt/L)	K ( $\mu$ S/cm)	pH
Alimentação	485	653,4	1212,7	7,4
OF ( $v_2t_2$ )	401,1	593,9	1116,9	7,4
(%) Remoção	17,3	9,1	7,9	0,0

A turbidez no sistema de hidrociclone é influenciada pelo fato de ocorrer agitação do efluente dentro do hidrociclone, pela força centrífuga, quebrando as partículas dos sólidos.

Pelas Tabelas 15 a 17, observa-se que o SHC, na condição  $v_2t_2$ , obteve uma remoção na faixa de 14% a 26% na turbidez, portanto o hidrociclone não é um método muito favorável para remover turbidez, sendo necessário pós tratamento da água. Resultados semelhantes foram obtidos por Zorzo (2012), em que trabalhou com o hidrociclone Bradley para remoção de SST e turbidez de efluentes de marmoraria, obtendo remoções de até 29,5%.

Na Figura 36, tem-se o registro das amostras pós tratamento pelo SHC para a água A<sub>1</sub>, onde observa-se uma leve remoção de cor e turbidez pelo SHC na condição  $v_2t_2$ .

Pode-se notar que a remoção de turbidez através do hidrociclone é influenciada pelo regime turbulento de escoamento, quanto maior for, maior a remoção desse parâmetro.

**Figura 36** – Registro das amostra da água A<sub>1</sub> pós tratamento pelo SHC: (a) *Underflow*, (b) *Overflow*.



Fonte: Autora (2019).

Para a condutividade elétrica, o hidrociclone obteve remoções de até 8% para a água A<sub>3</sub>, sendo necessário pós tratamento para adequá-las ao reuso na irrigação, para minimizar prejuízos ao cultivo e solo. Pelos dados obtidos pode-se dizer que a água A<sub>1</sub> foi classificada como salobra e as demais, doce, segundo APHA (1999) e SWRCB (2002).

Segundo Almeida (2010), o intervalo usual de condutividade em águas de irrigação varia de 0 a 3000  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , porém, também ressalta que elevadas concentrações salinas podem prejudicar o solo, caso a irrigação seja feita de modo inadequado, conforme observado por Cerqueira et al. (2008). Sandri et al. (2006), em seu trabalho, utilizou água de reuso para irrigação da alface, com valores de condutividade entre 520  $\mu\text{S cm}^{-1}$  e 630  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , obtendo boa produtividade.

Sousa et al. (2005) utilizou em seus experimentos água de reuso cuja condutividade elétrica ficou entre 1.500  $\mu\text{S cm}^{-1}$  e 1.600  $\mu\text{S cm}^{-1}$  para a cultura do pimentão, obtendo bons resultados em termos de produção. O mesmo ocorreu com o trabalho de Lucena et al. (2006), no qual os valores de condutividade de água de reuso era de 1.360  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Talvez pelo fato de os experimentos não terem se estendido por longos períodos, os autores não observaram mudanças no solo após a aplicação da água de reuso. Logo, de

acordo com os dados apresentados por Almeida (2010) e Sousa et al. (2005) para a condutividade elétrica, os efluentes tratados pelo SHC no presente projeto estariam adequados para o reuso.

Quanto ao parâmetro cor, nenhuma das três águas estudadas está dentro dos limites estabelecidos pela norma do CONAMA nº 357 de 2005 para reuso, que é de até 75 mg Pt L<sup>-1</sup>. O SHC removeu até 11% da cor cujo valor ficou acima do limite máximo permitido, sendo necessário pós-tratamento para sua remoção.

Os limites estabelecidos pelas normas do CONAMA para o pH, permite o reuso com valores entre 6,0 a 9,0, portanto, pela análise das Tabelas 15 a 17, pode-se dizer que as águas estudadas estão dentro nas normas.

#### 4.2.7 Análise bacteriológica para o SHC

A análise bacteriológica foi realizada na água A<sub>1</sub>, antes e após tratamento pelo SHC, para a maior velocidade ( $v_2 = 1,3$  m/s) e no maior tempo de operação ( $t_2 = 1$  h).

Na Tabela 18 estão as concentrações bacteriológicas em número mais provável (NMP) da água A<sub>1</sub> para a alimentação, *overflow* e *underflow* do SHC. As análises foram realizadas em duplicata. Os registros das análises estão no APÊNDICE C.

**Tabela 18** – Concentrações bacteriológicas para a água A<sub>1</sub> após tratamento no SHC.

Amostra	<i>Escherichia coli</i>		
	Alimentação	OF ( $v_2t_2$ )	UF ( $v_2t_2$ )
A <sub>1</sub>	$34 \times 10^3$	$39 \times 10^2$	$32 \times 10^3$

A água da alimentação A<sub>1</sub> apresentou uma concentração bacteriológica de  $34 \times 10^3$  UFC e no *overflow* a concentração caiu para  $39 \times 10^2$  UFC, diminuindo, portanto, 1 log. No *underflow* a concentração ficou em  $32 \times 10^3$  UFC, podendo concluir que as bactérias estão sendo separadas da água da alimentação através da corrente do *underflow*. Logo, se a água estudada apresentar baixas concentrações de colônias bacteriológicas, o SHC proposto pode ser viável para sua remoção.

#### 4.2.8 Análise de DQO e DBO<sub>5,20</sub>

A Tabela 19 apresenta os valores para DQO em mgO<sub>2</sub>. L<sup>-1</sup> para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>, antes e após tratamento no SHC, na menor e maior velocidades e tempos de operação, para a alimentação, *overflow* e *underflow*.

As porcentagens de remoção foram de 21% a 24%, para *overflow* nas maiores velocidades e tempos de operação, com maiores remoções para a água A<sub>1</sub>, uma explicação para tal fato é devido essa água ter apresentado a maior eficiência total de separação no SHC.

**Tabela 19** – DQO obtidas para alimentação, *overflow* e *underflow* do SHC.

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
Alimentação	437,5	578,9	169,5
OF (v <sub>1</sub> t <sub>1</sub> )	365,3	491,7	146,9
OF (v <sub>1</sub> t <sub>2</sub> )	375	504,5	149
OF (v <sub>2</sub> t <sub>1</sub> )	354,9	483,5	139,7
OF (v <sub>2</sub> t <sub>2</sub> )	333,3	454,1	134,3
UF (v <sub>1</sub> t <sub>1</sub> )	413,2	552,6	158,6
UF (v <sub>1</sub> t <sub>2</sub> )	395,8	536,1	155,6
UF (v <sub>2</sub> t <sub>1</sub> )	422,2	571,4	163,2
UF (v <sub>2</sub> t <sub>2</sub> )	418,8	563,9	161,9

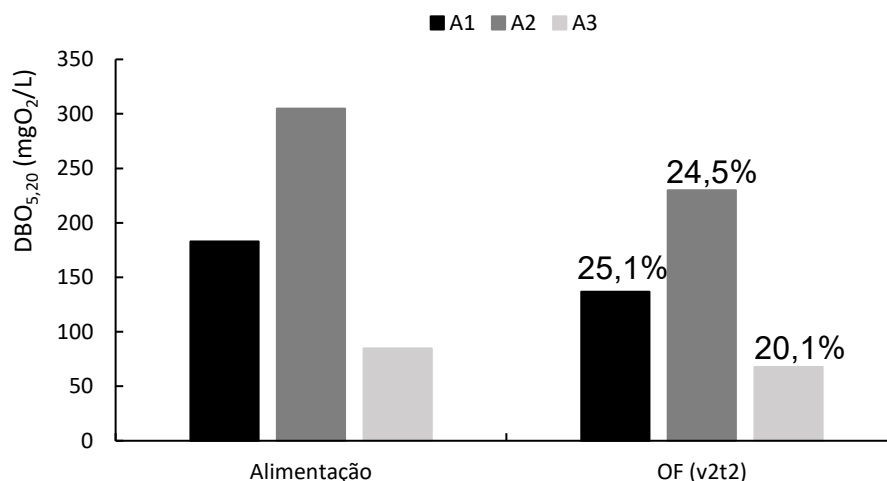
Os valores mais elevados de DQO apresentado na Tabela 19 foi para a água A<sub>2</sub>, devido à alta concentração de matéria orgânica biodegradável, correspondente aos sólidos orgânicos dissolvidos, somado a matéria orgânica não biodegradável, relativa aos sólidos suspensos no meio líquido. Para a água A<sub>1</sub>, o valor elevado é devido à presença em maior concentração da matéria orgânica não biodegradável, como cloretos e amônia, por exemplo.

A partir dos resultados pode-se observar também que a eficiência de separação aumenta com o incremento da velocidade do *overflow*. Dados semelhantes foram obtidos por Oliveira et al. (2008) que utilizou o hidrociclone para tratamento de água residuária cuja eficiência de remoção da DQO aumentou com o aumento da velocidade de operação, na faixa de 30%.

Pode-se notar o decaimento mais acentuado da DQO para o OF (v<sub>2</sub>t<sub>2</sub>), de 437,5 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> para 333,3 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>, e um aumento no *underflow*, presumindo que as parcelas inertes e/ou não inertes estão sendo eliminadas pela corrente do *underflow*.

Valores de  $DBO_{5,20}$  para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub> foram determinados para a alimentação e *overflow* no maior tempo e velocidade de operação do SHC. Os resultados estão na Figura 37.

**Figura 37** –  $DBO_{5,20}$  para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub> para alimentação e *overflow* do SHC.



Porcentagens de remoção da  $DBO_{5,20}$  de 25,1%, 24,5% e 20,1% foram observados pelo SHC, para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>, respectivamente, nas maiores velocidades e tempos de operação, pela Figura 37.

A maior concentração de  $DBO_{5,20}$  foi para a água A<sub>2</sub>, devido apresentar a maior concentração de matéria orgânica biodegradável, sendo as águas nessas condições de velocidade e tempo de operação utilizadas para alimentar o SMC e membrana de Ol.

### 4.3 Sistema Membranas Cerâmicas (SMC)

O sistema de membranas cerâmicas é composto por seis (06) elementos de membranas cerâmicas de microfiltração em paralelo, que, primeiramente, foram caracterizadas individualmente, nas pressões 1,0; 2,0 e 3,0 kgf.cm<sup>-2</sup>.

#### 4.3.1 Caracterização das membranas cerâmicas com águas dessalinizada

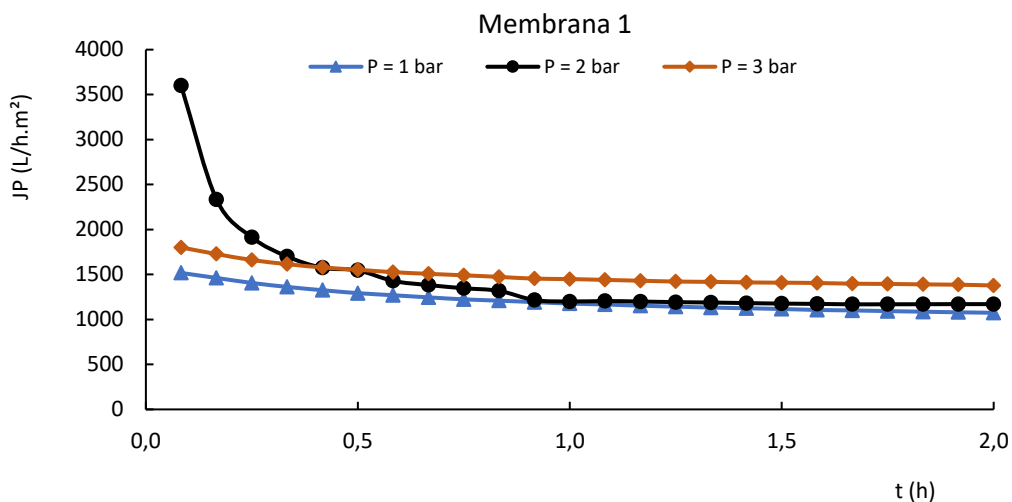
A caracterização das membranas cerâmicas foi realizada com água dessalinizada para seis elementos de membranas modelo MR01-20, variando a pressão de operação (1,0; 2,0 e 3,0 kgf/cm<sup>2</sup>) para estudar o melhor desempenho.

As Figuras 38 a 43, são referentes aos seis elementos de membrana cerâmica.

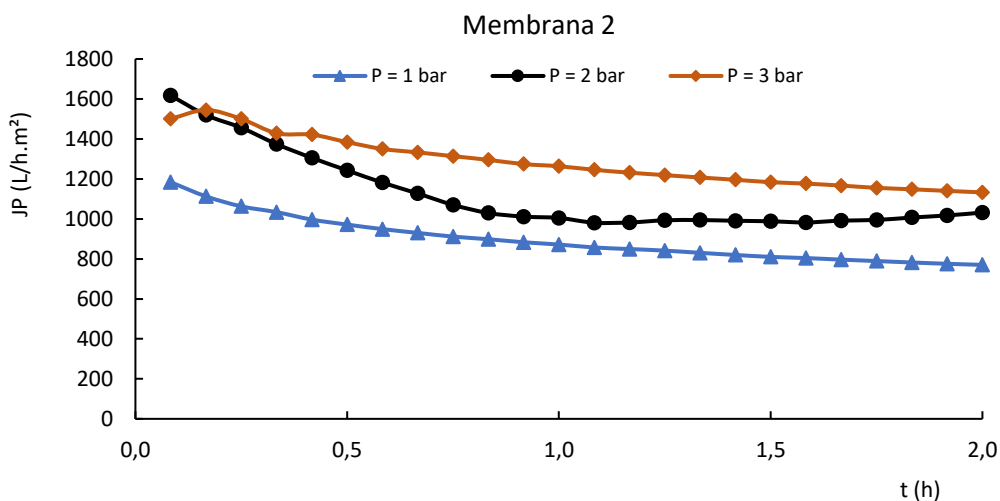


Todos os valores referentes à caracterização estão no APÊNCIDE D.

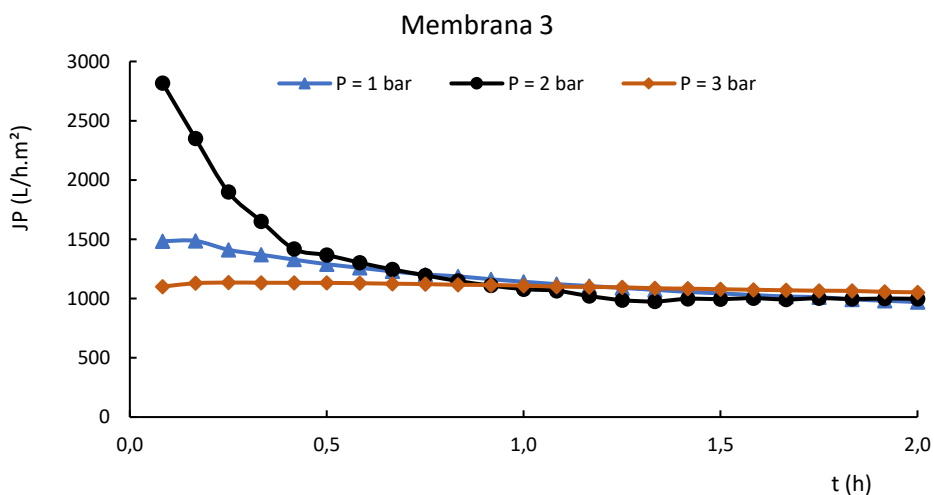
**Figura 38** - Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica 1 em função do tempo.



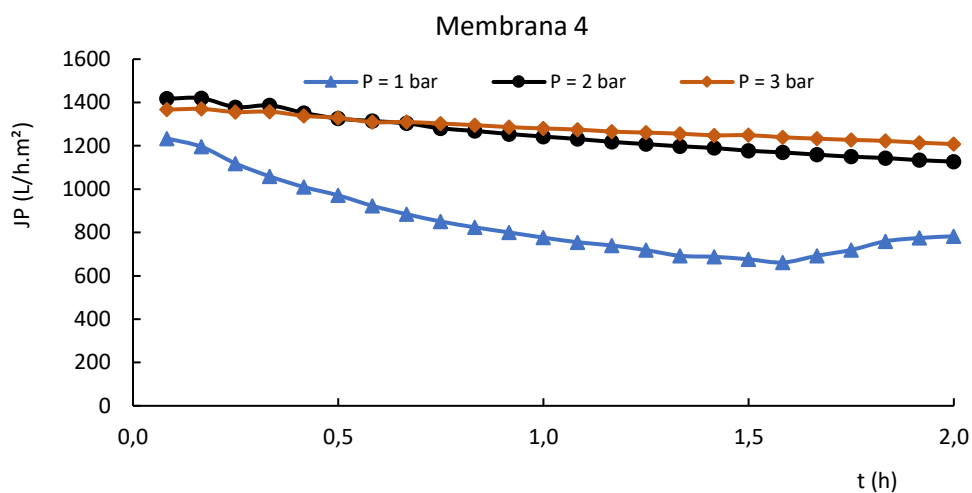
**Figura 39** - Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica 2 em função do tempo.



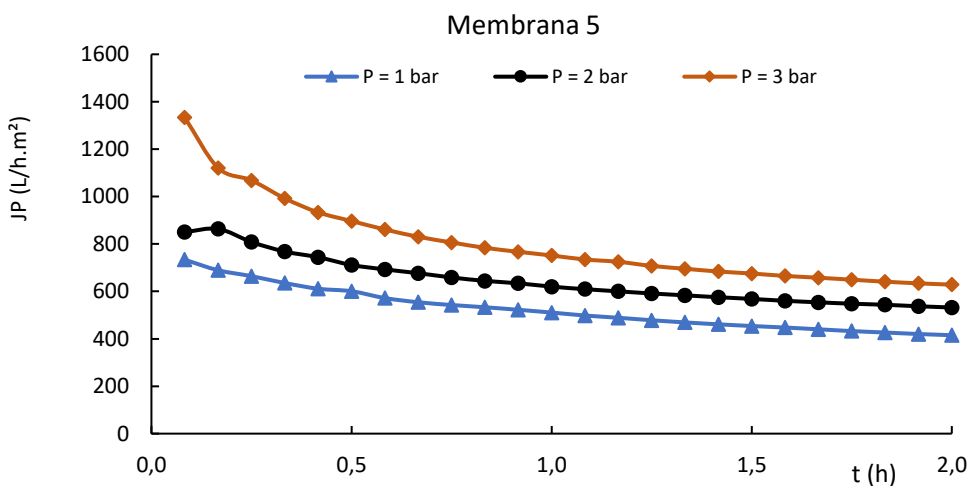
**Figura 40** - Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica 3 em função do tempo.



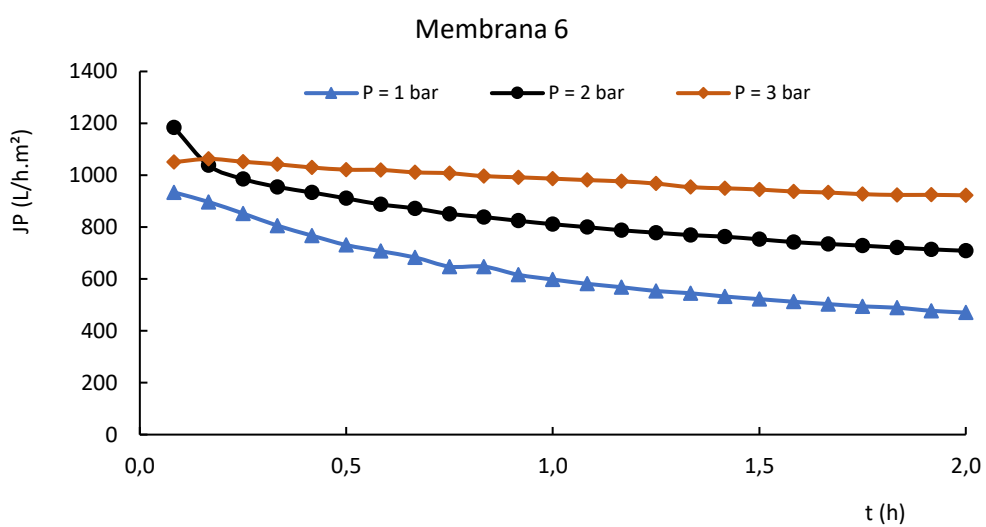
**Figura 41** - Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica 4 em função do tempo.



**Figura 42** - Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica 5 em função do tempo.



**Figura 43** - Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica 6 em função do tempo.



Observa-se pelas Figuras 38 a 43 que os resultados mostraram uma estabilização do fluxo de permeado após 1,0 hora de filtração e os maiores fluxos de permeado ocorreram a maiores pressões, apresentando um valor médio de  $1225,6 \text{ L.h}^{-1}\text{m}^{-2}$  para a pressão de  $3,0 \text{ kgf cm}^{-2}$ . Comportamento semelhante foi apresentado por Souza et al. (2015) e Macêdo (2018), para o tempo de estabilização do fluxo permeado pelas membranas cerâmicas de microfiltração. Valores próximos foram obtidos por Pelegrin (2004) que utilizou membrana cerâmica com água de torneira nas pressões de 1,0 a 2,0 Bar, obtendo melhores fluxos, de  $1177,5 \text{ L.h}^{-1}\text{m}^{-2}$ , para a maior pressão.

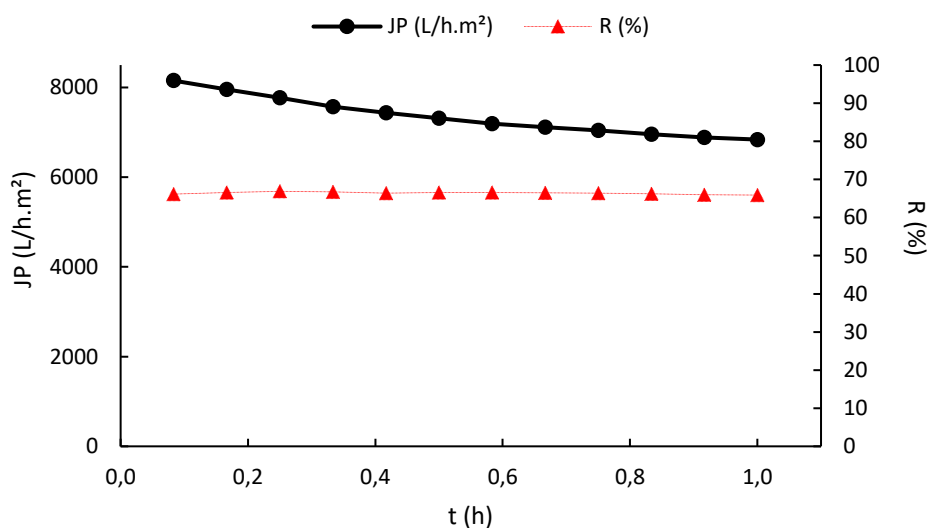
Na Tabela 20 estão os dados da vazão e fluxo volumétricos para o permeado e concentrado, referentes a caracterização do SMC com água dessalinizada, contendo seis elementos de membranas cerâmicas de microfiltração em paralelo.

**Tabela 20** – Dados da vazão e fluxo permeado e concentrado da caracterização do SMC com água dessalinizada.

t (h)	Permeado do SMC		Concentrado do SMC		
	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	R (%)
0,08	117,83	8153,58	60,24	4168,5	66,2
0,17	114,96	7954,98	57,72	3994,1	66,6
0,25	112,32	7772,30	55,61	3848,1	66,9
0,33	109,38	7568,86	54,60	3778,2	66,7
0,42	107,42	7433,23	54,24	3753,3	66,4
0,50	105,72	7315,59	53,12	3675,8	66,6
0,67	102,84	7116,30	51,78	3583,1	66,5
0,75	101,79	7043,64	51,54	3566,5	66,4
0,83	100,59	6960,61	51,35	3553,3	66,2
0,92	99,52	6886,57	51,31	3550,5	66,0
1,00	98,84	6839,51	51,14	3538,8	65,9
Média	106,3	7353,5	53,7	3718,8	66,4

O gráfico referente aos resultados apresentados na Tabela 20 estão na Figura 44, na pressão de  $3,0 \text{ kgf cm}^{-2}$ , com as respectivas recuperações.

**Figura 44** - Variação do fluxo permeado do SMC em função do tempo, na caracterização com água dessalinizada.



Pela Figura 44 observa-se que o fluxo permeado inicial ficou em torno de  $8153,6 \text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2}$ , com leve decaimento nos primeiros 20 minutos (próximo de  $7568,9 \text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2}$ ), finalizando com o fluxo próximo a  $6839,5 \text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2}$  no tempo de 60 minutos. Observa-se ainda que o valor médio do fluxo para o SMC foi de  $7353,5 \text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2}$ , com uma área de permeação, para cada elemento de MC, de  $0,01 \text{ m}^2$ , e comprimento de 20 cm, cuja recuperação média foi de 66,4%.

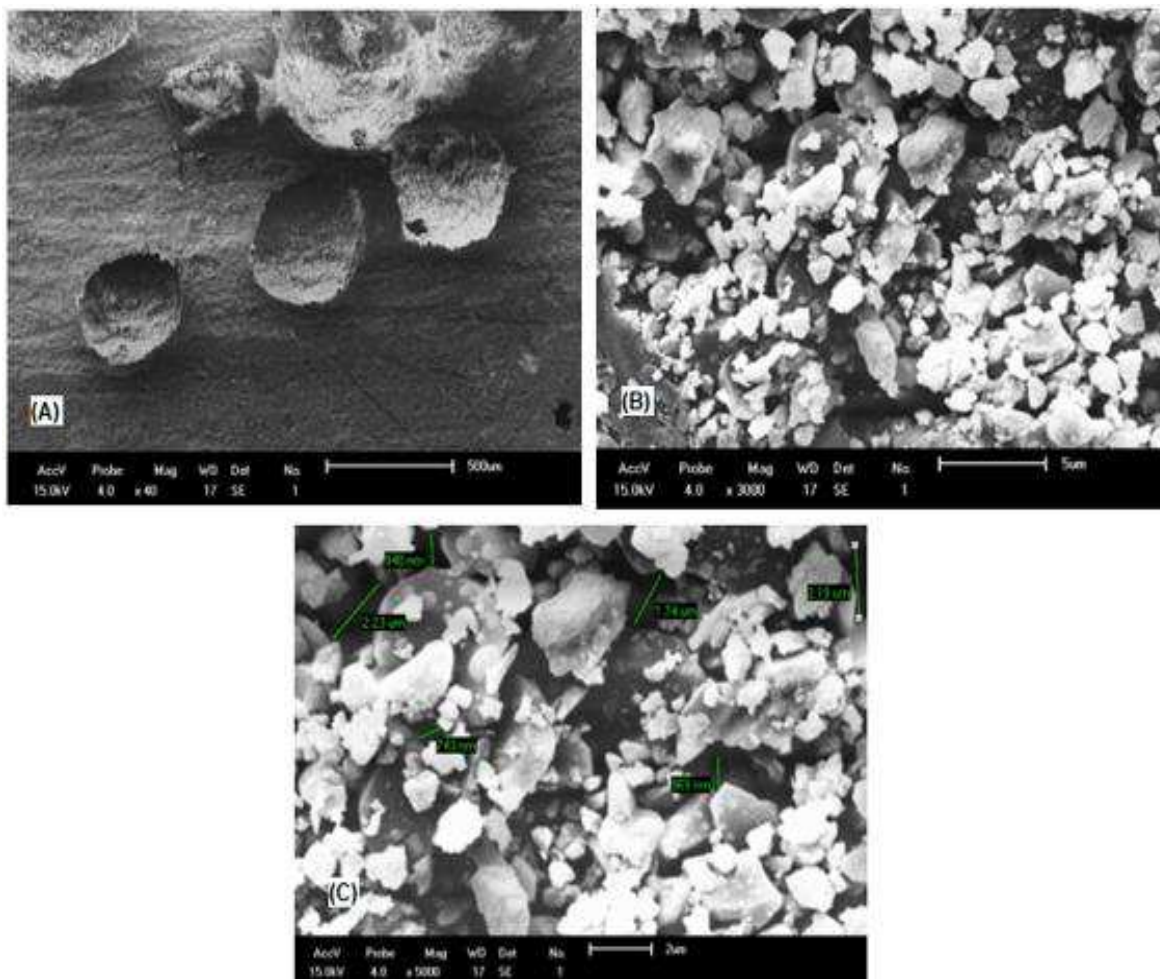
Foram obtidas curvas de desempenho semelhantes, para todas as membranas, caracterizando-se por uma queda do fluxo permeado nos primeiros minutos de filtração, seguido de um período onde ocorre declínio gradual, com tendência ao equilíbrio.

#### 4.3.2 Caracterização morfológica das membranas cerâmicas

As membranas cerâmicas foram caracterizadas morfológicamente, através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no Laboratório de Tecnologia de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais no âmbito da UFCG.

A Figura 45 mostra a micrografia dos poros das amostras das membranas cerâmicas, onde (A) vê-se o MEV da superfície da membrana cerâmica MR01-20 com magnitude 40x e amplitude de 15 kV, (B) magnitude 3000x e amplitude de 15 kV, (C) magnitude 5000x e amplitude de 15 kV com o valor dos poros.

**Figura 45** - Micrografia dos poros das amostras das membranas cerâmicas MR01-20 através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).



Fonte: Laboratório de Tecnologia de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais/ UFCG.

O valor médio dos poros obtidos através da análise de microscopia eletrônica de varredura foi de 1,33  $\mu\text{m}$ , sendo classificada como membrana cerâmica de microfiltração.

### 4.3.3 Porosidade

A porosidade das membranas estudadas foi realizada pelo método de Arquimedes utilizando a Equação (18) para sua determinação.

A Tabela 21 fornece os dados obtidos durante a análise da porosidade de amostras das membranas cerâmicas modelo MR01-20 feitas em triplicata.

**Tabela 21** – Porosidade para a membrana cerâmica MR01-20, pelo método de Arquimedes.

Membrana	Massa Seca (g)	Massa Imersa (g)	Massa Úmida (g)	P (%)
MR01-20 (1)	10,62	7,63	13,97	52,84
MR01-20 (2)	11,39	8,12	14,85	54,41
MR01-20 (3)	9,52	6,8	12,43	51,69

Onde massa imersa é o peso da membrana submersa em água destilada. O valor médio, apresentado na Tabela 21, para a porosidade (P%) da membrana cerâmica utilizada foi de aproximadamente 53%.

#### 4.3.4 Análise de fluxo das membranas cerâmicas com águas residuárias

Foi analisado a vazão e fluxo do permeado e concentrado do SMC alimentado com o *overflow* do SHC, na melhor condição estudada,  $v_2t_2$ , para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>.

Na Tabela 22 são apresentados os dados obtidos utilizando a água A<sub>1</sub>.

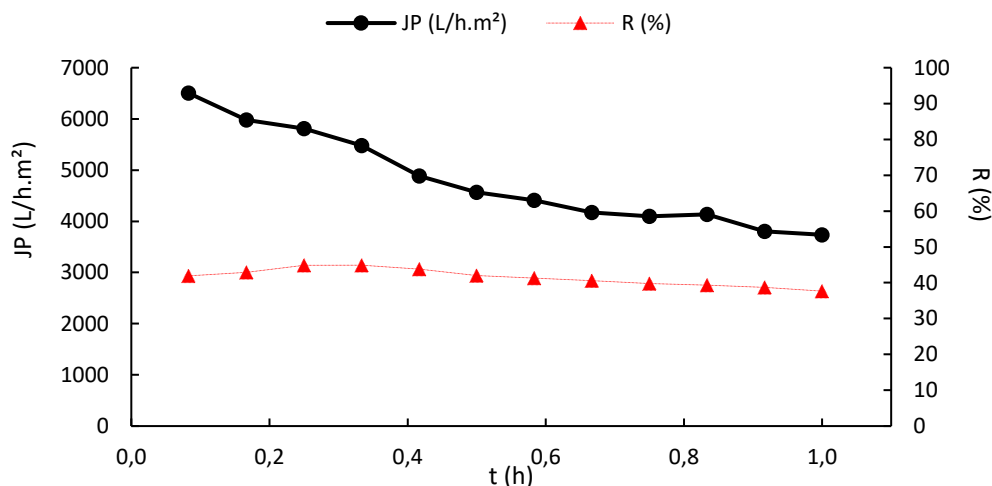
**Tabela 22** – Dados da vazão e fluxo permeado e concentrado do SMC para água A<sub>1</sub>.

t (h)	Permeado		Concentrado		R (%)
	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	
0,08	93,98	6502,9	130,12	9004,1	41,9
0,17	86,4	5978,7	115,2	7971,6	42,9
0,25	84	5812,6	103,2	7141,2	44,9
0,33	79,2	5480,5	97,2	6726	44,9
0,42	70,56	4882,6	90,72	6277,6	43,8
0,5	66	4567,1	91,2	6310,8	42
0,67	60,3	4172,6	88,2	6103,3	40,6
0,75	59,2	4096,5	89,6	6200,1	39,8
0,83	59,76	4135,3	92,16	6377,3	39,3
0,92	54,98	3804,6	87,05	6024	38,7
1	54	3736,7	89,4	6186,3	37,7
Média	69,3	4798,6	97	6715,5	41,5

O comportamento do fluxo permeado do SMC apresentou um rápido decaimento inicial e posterior estabilização. O fluxo inicial ficou em torno de 6502,9 L h<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>, com queda acentuada nos primeiros 10 minutos (próximo de 5978,7 L h<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>), finalizando com o fluxo próximo a 3736,7 L h<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup> no tempo de 60 minutos.

Os fluxos permeados do SMC para a água A<sub>1</sub>, com as respectivas recuperações, estão na Figura 46.

**Figura 46** - Variação do fluxo permeado do SMC em função do tempo.



Avaliando a Figura 46, vê-se que a média de fluxo permeado foi de 4798,6 L h<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>, com recuperação média de 41,5%. Esse decaimento da recuperação e vazão se dá pelo fato das partículas muito pequenas presentes na água A<sub>1</sub> não terem sido removidas do SHC, portanto houve formação de *biofouling* e/ou polarização por concentração que proporciona uma resistência por difusão devido ao gradiente de concentração nas vizinhanças da membrana. Fenômenos esses que após limpeza química das membranas recuperaram a permeação inicial.

Na Tabela 23 são apresentados os dados de vazão e fluxo volumétrico para o permeado e concentrado, referentes a caracterização do SMC com a água A<sub>2</sub>, na pressão de 3,0 kgf cm<sup>-2</sup>.

**Tabela 23** – Dados da vazão e fluxo permeado e concentrado do SMC para água A<sub>2</sub>.

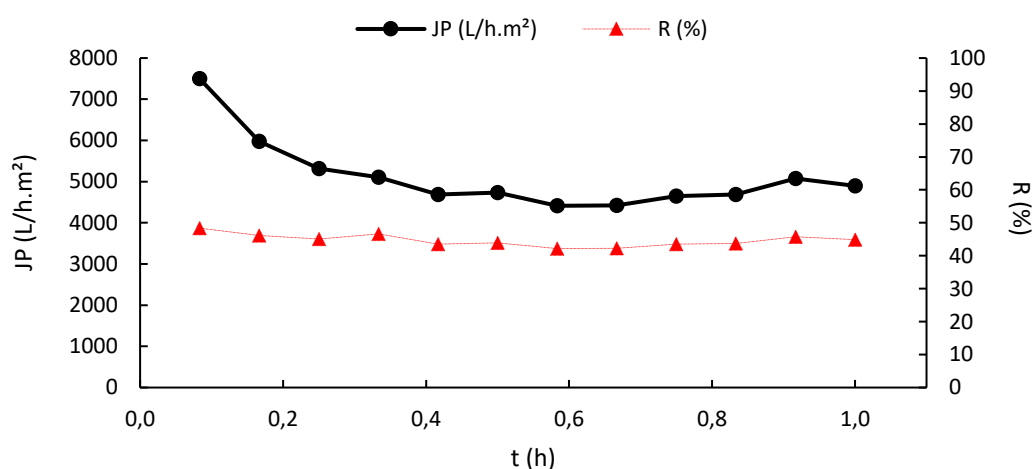
t (h)	Permeado		Concentrado		
	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	R (%)
0,08	108,43	7503,38	115,66	8003,60	48,4
0,17	86,40	5978,69	100,80	6975,14	46,2
0,25	76,80	5314,39	93,60	6476,91	45,1
0,33	73,80	5106,80	84,60	5854,13	46,6
0,42	67,68	4683,31	87,70	6068,37	43,6
0,5	68,40	4733,13	87,36	6045,12	43,9
0,58	63,77	4412,84	87,43	6049,86	42,2
0,67	63,90	4421,74	87,30	6040,97	42,3

Continua

t (h)	Permeado		Concentrado		R (%)
	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	
0,75	67,20	4650,09	87,20	6034,05	43,5
0,83	67,68	4683,31	87,12	6028,51	43,7
0,92	73,31	5072,83	87,05	6023,98	45,7
1	70,80	4899,20	87,00	6020,21	44,9
Média	74,0	5121,6	91,1	6301,7	44,7

Os fluxos permeados do SMC, com as respectivas recuperações, estão na Figura 47, para a água A<sub>2</sub>.

**Figura 47** - Variação do fluxo permeado do SMC em função do tempo.



Avaliando a Figura 47 vê-se que o comportamento do fluxo permeado do SMC apresentou um decaimento mais acentuado nos 10 primeiros minutos de operação (próximo de 5978,7 L h<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>), até estabilizar em 25 minutos. O fluxo inicial ficou em torno de 7503,4 L h<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>, finalizando com o fluxo próximo a 4899,2 L h<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup> no tempo de 60 minutos. A média de fluxo permeado foi de 5121,6 L h<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>, com recuperação média de 44,7%. O motivo pelo qual há um decréscimo do fluxo de permeado nos instantes iniciais para em seguida uma estabilização do fluxo é devido ao início da camada polarizada que favorece o aumento contínuo da resistência ao fluxo de permeado e que devido ao escoamento da água no lado concentrado estabiliza a camada de concentração por polarização deixando o fluxo praticamente constante.

Estudos anteriores mostram que sistemas com maior carga orgânica na alimentação apresentam resultados maiores de retenção, bem como maiores quedas no fluxo. Analisando a água A<sub>2</sub>, cuja concentração de carga orgânica foi



a maior, verificou-se maior remoção de  $DBO_{5,20}$  e baixos fluxos permeados devido aos efeitos da polarização por concentração e/ou *biofouling*, estando, portanto, de acordo com os estudos realizados por Sir et al., (2012).

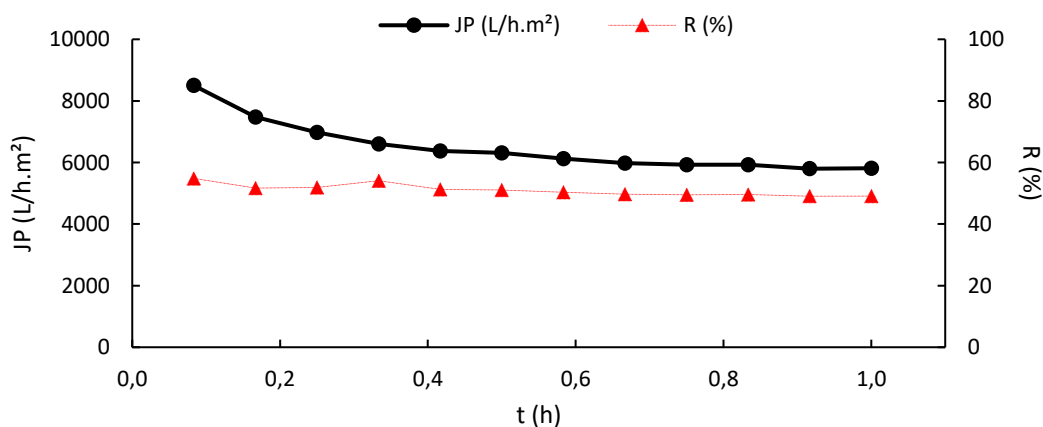
Na Tabela 24 são apresentados os dados de vazão e fluxo volumétrico para o permeado e concentrado, referentes a caracterização do SMC na pressão de  $3,0 \text{ kgf cm}^{-2}$ , com a água  $A_3$ .

**Tabela 24** – Dados da vazão e fluxo permeado e concentrado do SMC para água  $A_3$ .

t (h)	Permeado		Concentrado		R (%)
	Q (L/h)	$J_P$ (L/h.m <sup>2</sup> )	Q (L/h)	$J_P$ (L/h.m <sup>2</sup> )	
0,08	122,89	8503,83	101,20	7003,15	54,8
0,17	108,00	7473,36	100,80	6975,14	51,7
0,25	100,80	6975,14	93,60	6476,91	51,9
0,33	95,40	6601,47	81,00	5605,02	54,1
0,42	92,16	6377,27	87,70	6068,37	51,2
0,5	91,20	6310,84	87,36	6045,12	51,1
0,58	88,46	6121,04	87,43	6049,86	50,3
0,67	86,40	5978,69	87,30	6040,97	49,7
0,75	85,60	5923,33	87,20	6034,05	49,5
0,83	85,68	5928,87	87,12	6028,51	49,6
0,92	83,78	5797,52	87,05	6023,98	49,0
1	84,00	5812,62	87,00	6020,21	49,1
Média	93,70	6483,66	89,56	6197,61	51,01

Os fluxos permeados do SMC, com as respectivas recuperações, estão na Figura 48, para a água  $A_3$ .

**Figura 48** - Variação do fluxo permeado do SMC em função do tempo.



Avaliando o gráfico da Figura 48 vê-se que o comportamento do fluxo permeado do SMC apresentou um suave decaimento inicial e posterior

estabilização no fluxo permeado com aproximadamente 30 minutos de operação. O fluxo inicial ficou em torno de  $8503,8 \text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2}$ , com queda acentuada nos primeiros 10 minutos (próximo de  $6601,5 \text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2}$ ), finalizando com o fluxo próximo a  $5812,6 \text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2}$  no tempo de 60 minutos. A média de fluxo permeado foi de  $6483,7 \text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2}$ , com recuperação média de 51,01%.

A água  $A_3$  apresentou o menor decaimento dentre as três águas estudadas, devido a menor carga orgânica apresentada.

No presente projeto, os fluxos reduziram em média de 12% a 35% ao utilizar as águas residuárias após tratamento pelo SHC. Portanto, tornando importante o uso de pré-tratamento para o SMC.

#### 4.3.5 Análises físico químicas para o SMC e membrana de OI

Os laudos emitidos pelo Labdes/UFCG referentes as análises físico-químicas para os permeados do SMC e da membrana de OI, nas águas  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ , para a menor e maior velocidades e no maior tempo de operação do SHC, estão no APÊNDICE E.

Nas Tabelas 25 a 27 apresentam-se as médias dos valores das análises de pH, cor, turbidez e condutividade elétrica que foram medidas a cada cinco minutos durante uma hora de operação do SMC, na pressão constante de  $3,0 \text{ kgf cm}^{-2}$ , e para a membrana de OI, na pressão constante de  $8,0 \text{ kgf cm}^{-2}$ . A água que alimentou o SMC foi o *overflow* nas condições ( $v_2t_2$ ), para as águas  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ . Todos os valores estão no APÊNDICE B.

**Tabela 25** – Análise de cor, turbidez, pH e condutividade elétrica para a água  $A_1$  ( $v_2t_2$ ).

	T (NTU)	Cor (mg Pt/L)	K ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH
OF ( $v_2t_2$ )	26,9	181,6	2155,7	7,9
MR01-20 ( $v_2t_2$ )	0,5	47,9	1142,9	7,5
OI ( $v_2t_2$ )	0	0	318,3	7,4
(%) Remoção (MR01-20)	98,1	73,6	47,0	2,5

**Tabela 26** – Análise de cor, turbidez, pH e condutividade elétrica para a água  $A_2$  ( $v_2t_2$ ).

	T (NTU)	Cor (mg Pt/L)	K ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH
OF ( $v_2t_2$ )	98,3	185,4	1544,3	7,4
MR01-20 ( $v_2t_2$ )	3,5	48,9	749,2	7,3

Continua

	Conclusão			
	T (NTU)	Cor (mg Pt/L)	K ( $\mu$ S/cm)	pH
OI ( $v_{2t_2}$ )	0	0	201,3	7,3
(%) Remoção (MR01-20)	96,4	73,6	51,5	1,4

**Tabela 27** – Análise de cor, turbidez, pH e condutividade elétrica para a água A<sub>3</sub> ( $v_{2t_2}$ ).

	T (NTU)	Cor (mg Pt/L)	K ( $\mu$ S/cm)	pH
OF ( $v_{2t_2}$ )	401,1	593,9	1116,9	7,4
MR01-20 ( $v_{2t_2}$ )	8,1	69,3	636,9	7,3
OI ( $v_{2t_2}$ )	0	0,5	296,1	7,3
(%) Remoção (MR01-20)	98,0	82,4	43,0	1,4

Analisando as Tabelas 25 a 27 observa-se que a maior porcentagem de redução para turbidez, pelo SMC, foi para a água A<sub>1</sub>, cujo valor foi de 98,1%, e a cor, de 88,3%, para a água A<sub>3</sub>, dado ao fato dessas águas terem obtido as melhores eficiência de remoção de partículas suspensas pelo SHC. Dados semelhantes foram apresentados por Fappi (2015) e Pessoa (2015) quanto a remoção da turbidez operando com membrana cerâmica.

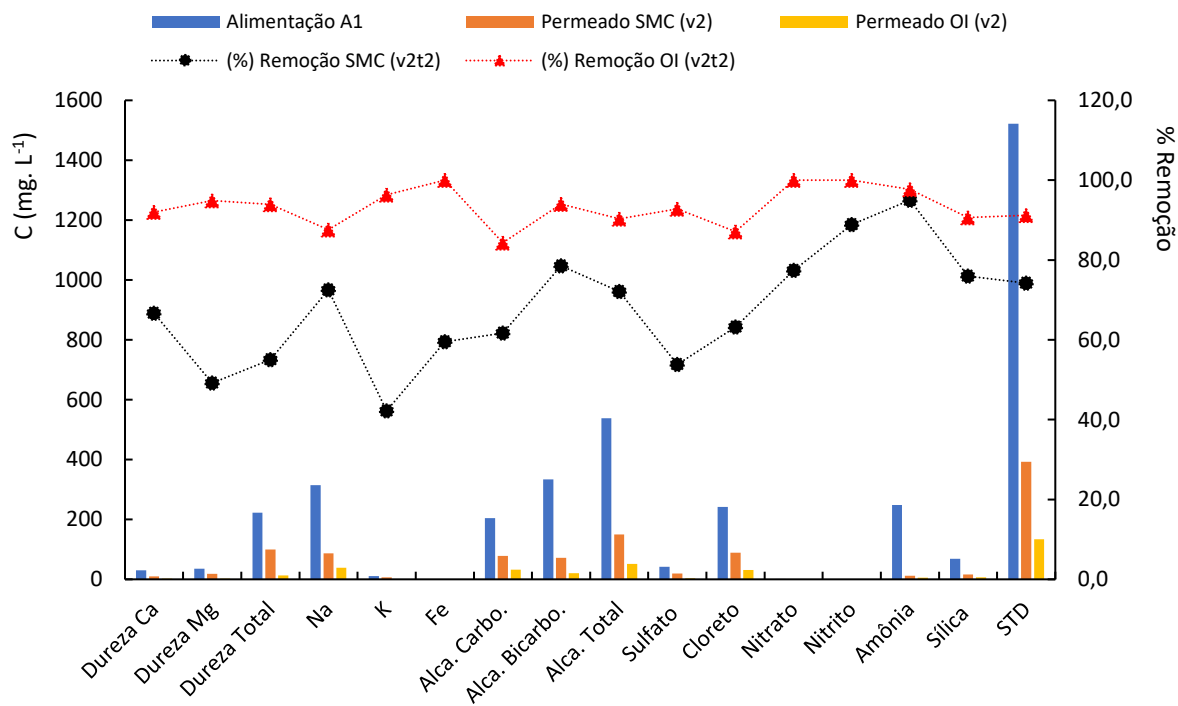
A Tabela 28 apresenta as análises físico químicas realizadas para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>, antes e após tratamento no SMC e membrana de OI, para o maior tempo e velocidade de operação ( $v_{2t_2}$ ) do SHC.

**Tabela 28** – Análises físico químicas para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>, antes e após tratamento no SMC e membrana de OI, em  $v_{2t_2}$ .

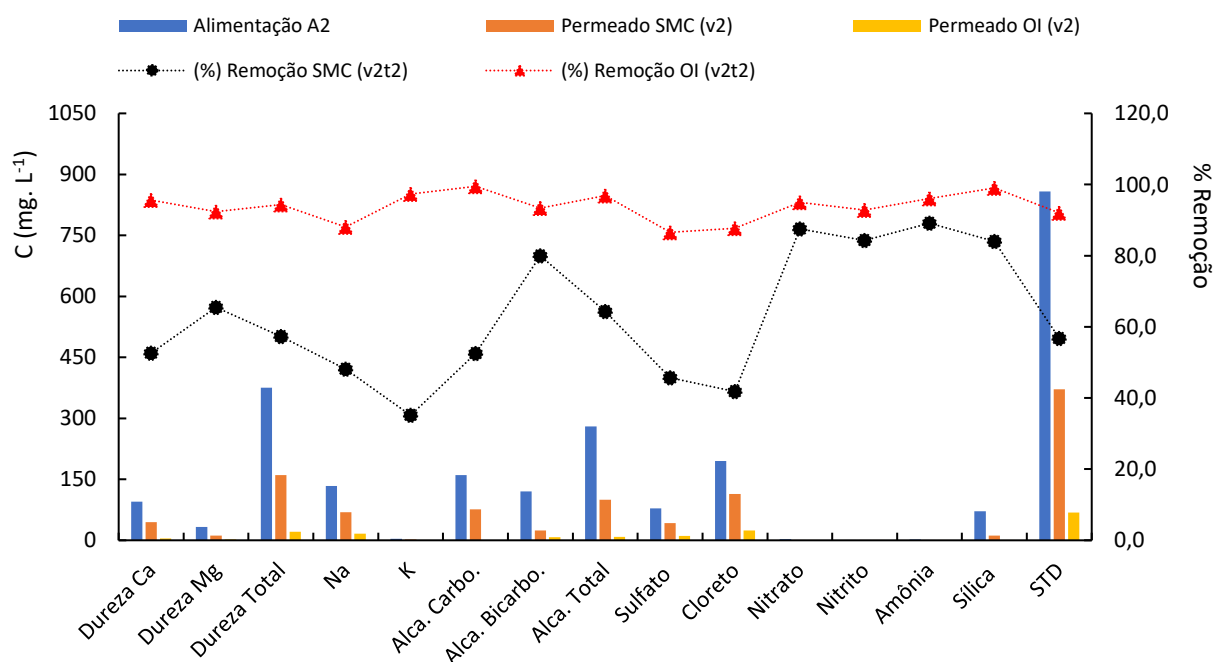
Parâmetros (mg. L <sup>-1</sup> )	A <sub>1</sub>			A <sub>2</sub>			A <sub>3</sub>		
	Alim.	Permeado SMC ( $v_{2t_2}$ )	Permeado OI ( $v_{2t_2}$ )	Alim.	Permeado SMC ( $v_{2t_2}$ )	Permeado OI ( $v_{2t_2}$ )	Alim.	Permeado SMC ( $v_{2t_2}$ )	Permeado OI ( $v_{2t_2}$ )
Dureza Ca	30	10	2,4	95	45,0	4,2	60,0	31,8	6,0
Dureza Mg	35,4	18	1,8	33	11,4	2,5	24,0	10,9	1,1
Dureza Total	222,5	100	13,5	375	160,0	21	250,0	125,0	19,5
Na	314,1	86,3	39,1	133,6	69,3	16	110,3	34,9	19,8
K	10,9	6,3	0,4	3,7	2,4	0,1	2,2	1,2	0,3
Fe	0,42	0,17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Alca. Carbo.	204	78,2	32	160	76,0	0,8	154,0	64,8	24,0
Alca. Bicarbo.	334	71,8	20	120	24,0	8,0	86,0	32,0	4,0
Alca. Total	538	150	52	280	100,0	8,8	240,0	96,8	28,0
Sulfato	41,8	19,3	3	78,2	62,8	10,5	35,0	16,3	2,7
Cloreto	241,4	88,8	31,2	195,3	113,6	24,1	133,1	63,9	21,3
Nitrato	1,33	0,3	0	2,8	0,35	0,14	1,13	0,14	0,18
Nitrito	0,054	0,006	0	0,21	0,033	0,015	0,129	0,008	0,01
Amônia	247,9	12,4	5,79	2,3	0,25	0,09	1,44	0,17	0,05
Silica	68,3	35,7	6,4	71,4	11,4	0,7	50,7	8,4	1,4
STD	1521,4	411,8	133,8	858	391,5	68,6	615,4	245,7	72,2

Nas Figuras 49 a 51 estão as análises físico químicas com as porcentagens de remoção dos permeados do SMC e membrana de OI para os parâmetros analisados, em v2t2.

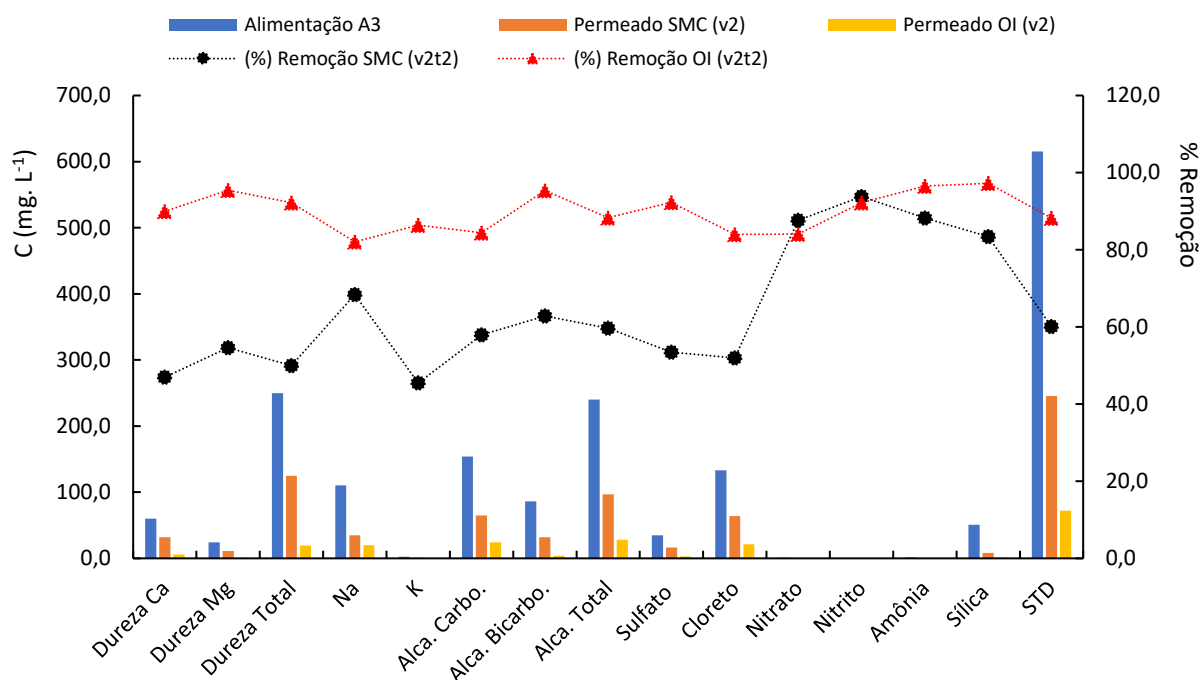
**Figura 49** - Dados físico químicos da água A<sub>1</sub>, após tratamento pelo SMC e OI.



**Figura 50** - Dados físico químicos da água A<sub>2</sub>, após tratamento pelo SMC e OI.



**Figura 51** - Dados físico químicos da água A<sub>3</sub>, após tratamento pelo SMC e OI.



Observa-se nas Figuras 49 a 51 uma boa remoção dos parâmetros analisados pelo SMC, como a turbidez, cor, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal e STD, cujas porcentagens de remoção foram de (98,1; 73,6; 77,4; 88,9; 93,7 e 74,2) %, respectivamente, para a água A<sub>1</sub>, (96,4; 75,1; 87,5; 84,3; 89,1; 56,7) %, respectivamente, para a água A<sub>2</sub> e (97,9; 88,3; 87,6; 93,8; 88,2; 60,1) %, respectivamente, para a água A<sub>3</sub>. Boas porcentagens de remoção também foram observadas para o permeado da membrana de OI. Para os outros parâmetros as porcentagens de remoção ficaram na faixa de 30% a 70%, permanecendo dentro dos valores estipulados no regulamento do CONAMA nº 357 de 2005 para reuso.

Comportamentos semelhantes de remoção para turbidez, cor, nitrato, nitrito e nitrogênio amoniacal são apresentados por Fappi (2015), Galvão & Gomes (2018) e Pessoa (2015) que também trabalharam com membrana de MF cujas eficiências se mantiveram na faixa entre 75 a 100%.

A Figura 52 apresenta um registro das amostras dos permeados do SMC e membrana de OI, a partir do *overflow* do SHC.

**Figura 52** – Amostras do *overflow* do SHC (a), permeado do SMC (b) e permeado da membrana de OI (c).



Fonte: Autora (2019).

Analisando o parâmetro nitrogênio amoniacal, segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005), deve ser analisado de acordo com o valor do pH. Os valores do pH obtidos para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>, após tratamento no sistema híbrido, já apresentados nas Tabelas 25 a 27, foram de 7,4; 7,3 e 7,3, respectivamente, apresentando valores de nitrogênio amoniacal de 5,8; 0,09 e 0,05 mg. L<sup>-1</sup>, estando de acordo com o padrão estabelecido pelo CONAMA. Silva et al (2011) alertam para a aplicação de quantidades excessivas de nitrogênio com a irrigação, o que pode causar colheitas de baixa qualidade.

Em relação a condutividade elétrica da água, Almeida (2010), Ayers & Westcot (1991) relatam que se este parâmetro for elevado, acima de 3000  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , pode provocar alterações na concentração de sais no solo, o que prejudica o desenvolvimento das hortaliças, e conseqüentemente a produtividade.

A turbidez é considerada um dos principais parâmetros responsáveis pelo entupimento de emissores para irrigação (PATERNIANI, 1994). A redução da transparência da água pode ser provocada pela presença de algas, matéria orgânica e outras substâncias como o zinco, ferro, manganês e areia, resultantes do processo natural de erosão e de despejos domésticos e industriais. Analisando as Tabelas 25 a 27, percebe-se que em todas as águas tratadas pelo SMC e membrana de OI, a turbidez está dentro do padrão estabelecido pelo órgão competente, ou seja, até 40 unidades nefelométrica de turbidez (UNT) (BRASIL, 2005), reduzindo riscos de entupimento do sistema de irrigação.

Vale salientar que os baixos resultados da turbidez obtidos para a água da alimentação A<sub>1</sub>, concorda com o proposto por Clifford et al. (1995), onde relatam que os turbidímetros têm sua sensibilidade diminuída a medida em que se aumenta o tamanho das partículas. Assim, quanto maior as partículas, e mais alta a concentração, maior a dispersão dos dados, condizente para a água A<sub>1</sub> que apresenta maior tamanho e concentração de partículas.

Quanto ao parâmetro cor, observa-se pelas Tabelas 25 a 27, que após tratamento pelo SMC e pela membrana de OI, todas as águas estão dentro dos padrões máximos permitidos pelo CONAMA nº 357 para reuso, de 75 mg Pt/L.

Trevisoli (2010) utilizou o processo de microfiltração tangencial com membranas tubulares cerâmicas para clarificar vinhaça, obtendo remoção de turbidez e cor de aproximadamente 100% e 90%, respectivamente, cujo tamanho de poros foi de 1,2 µm.

Em relação aos sólidos dissolvidos totais (STD) em águas de irrigação, a resolução CONAMA nº 357/2005, estipula um valor máximo de 0,5 g L<sup>-1</sup>, logo, todas as águas residuárias estudadas e tratadas pelo sistema híbrido proposto, estão de acordo com a resolução.

Segundo Andrade (2008), a irrigação com águas de elevado teor de STD podem provocar alterações na capacidade de infiltração do solo e de germinação devido a formação de uma crosta na superfície.

O sistema híbrido proposto mostrou-se eficiente na purificação de águas e conseqüentemente abrandar ou remover os sais presentes no meio aquoso.

#### **4.3.6 Análise bacteriológica do permeado do SMC e da membrana de OI**

As análises bacteriológicas foram realizadas antes e após serem tratadas pelo SMC e pela membrana de OI, para as águas A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub>.

A Tabela 29 apresenta os valores referentes às análises quantitativas das bactérias do grupo coliforme fecal: *Escherichia coli*. As análises foram realizadas em duplicata para a alimentação das águas A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub> e em triplicata para os permeados do SMC e OI, seguindo a metodologia do Standard Methods (APHA, 1998). Os registros referentes à análise bacteriológica estão no APÊNDICE F.

**Tabela 29** – Análise bacteriológica quantitativa de *Escherichia coli* realizadas para a água A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub> antes e após tratamento no SMC e OI.

Amostras	<i>Escherichia coli</i>	
	Alimentação	Permeado do SMC e OI
A <sub>1</sub>	34 x 10 <sup>3</sup>	0
A <sub>2</sub>	38 x 10 <sup>6</sup>	0

Em relação aos resultados microbiológicos, os coliformes termotolerantes (*Escherichia coli*) é aceito um limite máximo de 200 a 4000 coliformes por 100 mL de amostra, variando entre as Classes 1 a 3. Vale ressaltar que a Classe 4 não faz menção a nenhum limite, conforme Resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005).

Sabe-se que quanto maior o índice de presença de coliformes, mais a água (ou o alimento), estão contaminados. Observando a Tabela 29, pode-se dizer que houve completa remoção da bactéria termotolerante, *Escherichia coli*, logo, a membrana cerâmica de microfiltração produzida pode ser utilizada para descontaminar águas contendo bactérias nocivas à saúde, tornando-as dentro dos padrões de reuso na irrigação descritas pela resolução do CONAMA nº 357 de 2005 (BRASIL, 2005).

Pesquisas realizadas por Pelegrin (2004) envolvendo microfiltração tangencial com membrana de material cerâmico no tratamento terciário de efluente doméstico, gerou um permeado de boa qualidade, reduzindo DQO, sólidos suspensos totais, turbidez, cor e coliformes totais e fecais em 87; 92; 98; 85; 100 e 100%, respectivamente.

#### 4.3.7 Análise de DBO<sub>5,20</sub> e DQO

Os resultados das análises de DBO<sub>5,20</sub> e DQO estão na Tabela 30 e foram realizadas para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub> antes e após tratamento no SMC e membrana de OI.



**Tabela 30** – Valores de DBO<sub>5,20</sub> e DQO em (mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>) para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>.

	Alimentação			OF (v <sub>2t2</sub> )			SMC			OI		
	DBO <sub>5,20</sub>	DQO	DQO/ DBO <sub>5,20</sub>	DBO <sub>5,20</sub>	DQO	DQO/ DBO <sub>5,20</sub>	DBO <sub>5,20</sub>	DQO	DQO/ DBO <sub>5,20</sub>	DBO <sub>5,20</sub>	DQO	DQO/ DBO <sub>5,20</sub>
A <sub>1</sub>	182,9	437,5	2,4	136,9	333,3	2,4	7,8	78,5	10,1	5,0	21,5	4,3
A <sub>2</sub>	304,8	578,9	1,9	230	454,1	1,9	9,3	120,3	12,9	4,4	37,6	8,5
A <sub>3</sub>	84,9	169,5	2,0	67,8	134,3	2,0	4,8	38,5	8,0	2,8	9,6	3,4

Fonte: Autora (2019).

Pela Tabela 30 pode-se dizer que os valores estão dentro dos limites estudados por Von Sperling (2005) para esgotos domésticos, valores esses para DBO<sub>5,20</sub> (mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>) variando de 100 a 500 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> e para DQO variando de 400 a 800 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>. Os valores para a água A<sub>3</sub> foram baixos por esta água apresentar baixa carga de matéria biodegradável e não biodegradável.

Observa-se que a água A<sub>2</sub> apresenta maiores valores para este parâmetro devido à alta concentração de matéria orgânica biodegradável, seguido da água A<sub>1</sub>, por apresentar alta concentração de matéria orgânica não biodegradável.

As porcentagens de remoção da DQO, pela membrana de OI, como visto na Tabela 30, foi na faixa de 92% a 94% sendo a maior remoção para a água A<sub>1</sub>. O SMC, foi na faixa de 70% a 80%, sendo a maior remoção também para a água A<sub>1</sub>, um motivo é devido essa água ter apresentado a maior porcentagem de remoção de partículas em suspensão pelo SHC.

A utilização de águas com alta concentração de DBO<sub>5,20</sub>, acima dos valores máximos permissíveis, pode prejudicar o crescimento de hortaliças devido à grande concentração de matéria orgânica e pelo baixo teor de oxigênio.

Em relação ao parâmetro DQO, não existe nenhum padrão que estabelece um limite, mas é sabido que os valores da DQO são maiores que os da DBO<sub>5,20</sub>. Conforme mencionado por Minghini (2007), esta comparação é esperada porque a DBO<sub>5,20</sub> está relacionada apenas à matéria biodegradável, enquanto a DQO a qualquer material presente no meio que possa sofrer uma oxidação.

Como já dito, para águas residuárias de origem doméstica, as relações entre DQO/DBO<sub>5,20</sub> variam de 1,7 a 2,4, valores observados na Tabela 30. Um tratamento de efluentes eficiente consiste na remoção da poluição presente, seja

inorgânica ou orgânica, e quanto maior for a relação DQO/DBO<sub>5,20</sub>, após tratamento, mais matéria orgânica está sendo removida, ao passo que quanto menor a relação, mais matéria não biodegradável está sendo removida. Logo, o tratamento pelo SMC se mostrou eficiente na remoção da matéria orgânica, enquanto a membrana de OI na remoção tanto da matéria orgânica como a matéria inerte. Todos os resultados estão de acordo com a resolução do CONAMA nº 357/2005.

Segundo Chernicharo (2008) os esgotos tratados apresentam DBO<sub>5,20</sub> e SST (sólidos em suspensão) inferiores a 20 mg. L<sup>-1</sup>. Hespanhol (2002) mencionou que valores de DBO<sub>5,20</sub> inferiores a 100 mg L<sup>-1</sup> não afetariam a absorção de água pelas raízes das plantas. Já Usepa (2005), recomenda que os valores não devem ser superiores a 30 mg L<sup>-1</sup> para irrigação de culturas consumidas cozidas e 10 mg L<sup>-1</sup> para plantas consumidas cruas. Portanto, de acordo com esses autores, todos os efluentes tratados pelo sistema híbrido, no presente projeto, podem ser reutilizados na irrigação.

Valores semelhantes foram obtidos por Galvão & Gomes (2018) para tratamento de efluentes de indústria de laticínios utilizando membrana cerâmica de microfiltração, obtendo valores de redução de DQO e DBO<sub>5,20</sub> de 89% e 91%, respectivamente.

Os valores para o oxigênio dissolvido (OD) estão na Tabela 31.

**Tabela 31** – Valores do OD para a alimentação, permeados do SMC e OI, para as águas A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>.

	Alimentação (mg. L <sup>-1</sup> )	OF (v <sub>2</sub> t <sub>2</sub> )	MR01-20 (mg. L <sup>-1</sup> )	OI (mg. L <sup>-1</sup> )
A <sub>1</sub>	7,7	7,9	7,5	7,7
A <sub>2</sub>	6,6	6,8	6,1	6,2
A <sub>3</sub>	7,4	7,7	7,0	6,8

Fonte: Autora (2019).

Em relação ao parâmetro oxigênio dissolvido, a Resolução CONAMA nº 357/2005 estipula valores superiores a 6 mg L<sup>-1</sup> de O<sub>2</sub>. Através da análise da Tabela 31, evidencia-se que todas as amostras estão com o índice adequado para este parâmetro.

É observado pela Tabela 31 que não há praticamente variação no teor de oxigênio dissolvido, tendo em vista o tamanho das moléculas serem menor do que o diâmetro dos poros, possibilitando, assim, a manutenção do permeado de oxigênio ser praticamente o que há na alimentação.

## CAPÍTULO V

### 5. Conclusões

Com base nos dados experimentais obtidos, pode-se citar às seguintes conclusões:

#### ❖ Sistema hidrociclone (SHC)

- ✓ O desempenho do hidrociclone melhorou com o aumento da vazão volumétrica na alimentação e tempo de operação;
- ✓ O hidrociclone foi eficiente na remoção de partículas sólidas para água com os maiores diâmetros de partículas, podendo ser utilizado como pré-filtro em sistemas de irrigação;
- ✓ Com o acréscimo da vazão houve uma diminuição do número de Euler, indicando que o equipamento deve ser recomendado para operar com máxima vazão não implicando em maiores custos energéticos;
- ✓ Pela resolução do CONAMA nº 357 de 2005, a água A<sub>1</sub> é classificada como salobra e se enquadra na Classe 3;
- ✓ Águas A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub> se enquadram na Classe 4.

#### ❖ Sistema de membranas cerâmicas (SMC)

- ✓ O SMC de microfiltração tangencial apresentou-se como uma alternativa eficaz para o tratamento final de esgotos sanitários;
- ✓ O efluente final obtido pelo SMC (permeado) apresenta baixos valores para os parâmetros físico químicos e bacteriológicos analisados;
- ✓ Pela resolução do CONAMA nº 357 de 2005, a água A<sub>1</sub> se enquadra na Classe 4;
- ✓ Água A<sub>2</sub> se enquadra nas Classes 3 e 4;
- ✓ Água A<sub>3</sub>, se enquadra na Classe 2 a 4.

#### ❖ Sistema híbrido (HC/MC/OI)

- ✓ O sistema híbrido proposto apresenta ser eficiente no tratamento de águas residuárias para reuso na irrigação;

- ✓ Pela resolução do CONAMA nº 357 de 2005, a água A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub> enquadram-se nas Classes 2 a 4;
- ✓ Água A<sub>3</sub>, se enquadra nas Classes de 1 a 4.

## CAPÍTULO VI

### 6. Perspectivas

Sugere-se que em trabalhos futuros sobre este tema sejam abordados os seguintes itens:

- Verificar o potencial do uso da água produzida pelo sistema híbrido na irrigação de fruticultura, plantas forrageiras, etc;
- Propor ajustes nas geometrias para melhorar a eficiência do hidrociclone construído;
- Adaptação do sistema híbrido à novos modelos de membranas como pós tratamento ao SHC;
- Desenvolver um sistema híbrido SHC/SMC/biodigestor para produção de biogás.

## CAPÍTULO VII

### **7. Publicação**

PESSOA, J. D.; GUIMARÃES. B. S.; JOVELINO, J. R.; PORTO, K. F.; FRANÇA, K. B. Análise da qualidade da água do açude Epitácio Pessoa no município de Boqueirão – PB. Revista Semiárido Brasileiro. Volume 2, 1ªEdição. Editora Poisson. Belo Horizonte - MG. 2019.

## CAPÍTULO VIII

### 8. Referências bibliográficas

(APHA) AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOC. AMERICAN WATER WORKS ASSOC. & WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (20th ed.). Baltimore, MD: American Public Health Association, 1999.

(APHA). Standard Methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 20th ed. Washington. 1998.

ALMEIDA, O. A. Qualidade da água de irrigação. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 227p. 2010.

ALVES, A. F. Separação de leveduras de fermentação alcoólica em hidrociclones. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Uberlândia – MG. 2006.

ANADÃO, P. Ciência e Tecnologia de Membranas. Artliber Editora Ltda. São Paulo, 2010.

ANDRADE, L. R. S. Avaliação da qualidade das águas superficiais e seu reuso na irrigação de áreas verdes do campus sede da Universidade Federal de Campina Grande - PB. Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e recursos Hídricos. Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Mestrado em Recursos Naturais. Campina Grande - PB. 2017.

ANDRADE, L. O. Crescimento de Girassóis Ornamental em Sistema de Produção Orgânica e Irrigada com Água Residuária Tratada. v. 1, n. 01, p.69-82. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. Botucatu-SP.2012.

ANDRADE, A. P. A. Avaliação da utilização de protetor físico de germinação e semeadura direta das espécies *Copaifera Langsdorffii* Desf e *Enterolobium Contortisiliquum* (Vell.) Morong. em área degradada pela mineração. Dissertação



(Mestrado em Ciências Florestais). Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília. Brasília - DF. 2008.

ANDRADE, V. T. Construção e avaliação de modelos de hidrociclone para tratamento de água residuária. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. Campinas - SP. 2007.

AQUINO, D. S. Avaliação Eco Toxicológica de Esgotos de redes coletoras de um campus e da área urbana da cidade de Viçosa – MG e sua influência na qualidade dos corpos receptores. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, MG, 46 p., 2013.

ARRUDA, E. B. Performance de hidrociclones filtrantes de geometria demco. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

ASANO, T. Water from (waste) water – the dependable water resource. Water Science and Technology. IWA Publishing. v. 45. n 8. p 23-33 2002.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade de água na agricultura. Tradução de H. R. Gheyi; J. F. de Medeiros; F. A. V. Damasceno. Campina Grande – PB. UFPB. 208p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29). 1991.

AZEVEDO, A. Q. R. M. Efeito da irrigação com água residuária tratada sobre a produção de milho forrageiro. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, Recife, v. 2, n. 1, p. 63-68, janeiro-março, 2007.

BAKER, J. S., DUDLEY, L. Y. "Biofouling in membrane systems – a review". Desalination, v.118, pp. 81-90, 1998.

BAKER, R. W. Membrane Technology and applications, 2ª Ed. John Wiley & Sons, Ltd. v.90-96, p.4-7, 2004.

BANCO MUNDIAL. La ordenación de los recursos hídricos. 1994.

BARRETO, A. N. Changes in chemical attributes of a Fluvent cultivated with castor bean and irrigated with wastewater. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande. FapUNIFESP (SciELO). v. 17, n. 5, p.480-486, maio 2013.

BAYO, J.; LÓPEZ-CASTELLANOS, J.; MARTÍNEZ-GARCÍA, R.; ALCOLEA, A.; LARDÍN, C. Hydrocyclone as a cleaning device for anaerobic sludge digesters in a wastewater treatment plant. Depart. of Chemical and Environmental Engineering. SpainJournal of Cleaner Production. Technical University of Cartagena. J. Clean. Prod. 87, 550–557. Cartagena. 2015.

BERGSTROM, J., VOMHOFF, H. Experimental hydrocyclone flow field studies. Separation and Purification Technology 53, 8–20. 2007.

BERTONCINI, E.I. Tratamento de efluentes e reuso de água no meio agrícola. Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária, v.1, n.1, p.152-169. Piracicaba, SP. 2008.

BETANCOURT, W. Q.; ROSE, J. B. Drinking water treatment processes for removal of Cryptosporidium and Giardia. Veterinary Parasitology 126, 219-234, 2004.

BOSCO, T. C. D.; SAMPAIO, S. C.; IOST, C.; SILVA, L. N.; CARNELLOSI, C. F.; EBERT, D. C.; SCHREINER, J. S. Utilização de Água Residuária de Suinocultura em propriedade Agrícola – Estudo de Caso. Departamento Engenharia Agrícola. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. v. 13, n. 1, p. 139-144, Cascavel, PR, 2008.

BRACEIRO, A. P. S. Utilização da tecnologia de separação por membranas na reabilitação de sistemas de tratamento de água. Licenciatura em Ciências de Engenharia do Ambiente. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente – Perfil Engenharia Sanitária. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Dezembro, 2014.

BRADLEY, D. The Hydrocyclone, Pergamon, Oxford, 1965.

BRANDÃO, L. P.; MOTA, S.; MAIA, L. F. Perspectivas do Uso de Efluentes de Lagoas de Estabilização em Irrigação. In: VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002, Vitória, ES. Anais do VI SIBESA. Rio de Janeiro: ABES, 2002.

BRASIL. Resolução COEMA nº 2 de 2 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes

poluidoras, revoga as Portarias SEMACE no 154, de 22 de julho de 2002 e nº 111, de 05 de abril de 2011, e altera a Portaria SEMACE nº 151, de 21 de fevereiro de 2017.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Brasília, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO Nº 54, DE 28 DE NOVEMBRO DE 2005. Estabelece critérios gerais para reuso de água potável. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direito não potável de água, e dá outras providências. 2006.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília, 2005.

BRAVIM, E. C.; PEREIRA, R. A. Mapeamento de zonas de desgaste em hidrociclones na classificação de polpa de minério. Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Engenharia Mecânica. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica. Vitória - ES. 2007.

BRETNEY, E. Water purifier, U.S. patent nº 453,105A. 1891.

BUSCIO, V.; CRESPI, M.; GUTIÉRREZ-BOUZÁN, C. Sustainable dyeing of denim using indigo dye recovered with polyvinylidene difluoride ultrafiltration membranes. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 91, p.201-207. 2015.

BYRNE, W. Reverse Osmosis – A practical guide for industrial users. Tall Oaks Publishing, Inc., 2nd edition, USA, 2002.

CARDOSO, M. K. B. Avaliação do IDS de águas em sistemas de pretratamento de membranas cerâmicas para osmose inversa. Universidade Estadual da Paraíba. Curso de Química Industrial. Campina Grande - PB. 2017.

CARVALHO, N. L.; HENTZ, P.; SILVA, J. M.; BARCELLOS, A. L. Reutilização de águas residuárias. *Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas* -

Universidade Federal de Santa Maria. Revista Monografias Ambientais - REMOA. e-ISSN 2236 1308 - V. 14, N. 2, p. 3164 - 3171. Santa Maria. 2014.

CASTRO, C. N. Gestão das Águas: Experiências Internacionais e Brasileira. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA. Brasília - DF. Junho de 2012.

CAVALCANTE, I. R. M. Modelagem e simulação numérica de escoamento bifásico para estudo de hidrociclone através do software Ansys®. Universidade de Brasília - UnB. Faculdade UnB Gama - FGA. Curso de Engenharia de Energia. Brasília, DF. 2018.

CAVALCANTE, D. C. M. Estudo da fluidodinâmica do processo de separação partícula sólida/água via hidrociclone filtrante: modelagem e simulação. Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos. Campina Grande - PB. 2017.

CEBALLOS, B. S. O.; DINIZ, C. R. Técnicas de microbiologia sanitária e ambiental. Editora da Universidade Estadual da Paraíba - EDUEPB. Campina Grande - PB. 2017.

CERQUEIRA, L. L.; FADIGAS, F. S.; PEREIRA, F. A.; GLOAGUEN, T. V.; COSTA, J. A. Desenvolvimento de Heliconia psittacorum e Gladiolus hortulanus irrigados com águas residuárias tratadas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v. 12, n. 6, p.606-613. Campina Grande - PB. 2008.

CHAKRABARTY, B.; GHOSHAL, A.K.; PURKAIT, M.K. Cross-flow ultrafiltration of stable oilin-water emulsion using polysulfone membranes. Chemical Engineering Journal, v.165, p.447–456, 2010.

CHEN, J. C.; LI, Q.; ELIMELECH, M. In situ monitoring techniques for concentration polarization and fouling phenomena in membrane filtration. Advances in Colloid and Interface Science, v. 107, p. 83-108, 2004.

CHERNICHARO, C. A. L.; NOUR, E. A. A.; LOBATO, L. C. S.; FREITAS, I. C.; MOREIRA, T. B. G.; SOUZA, R. S. Processos de tratamento de esgotos: guia do profissional em treinamento: nível 1 / Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). – Brasília: Ministério das Cidades, 2008.

CIMINI, A.; MORESI, M. Assessment of the optimal operating conditions for pale lager clarification using novel ceramic hollow-fiber membranes. *Journal Of Food Engineering*, [s.l.], v. 173, p.132-142. 2016.

CLIFFORD, N.J.; RICHARDS, K.S.; BROWN, R.A.; LANE, S.N. Laboratory and field assessment of an infrared turbidity probe and its response to particle size and variation in suspended sediment concentration. *IAHS Publication*. v.40, p. 771–791. 1995.

COSTA, A. C. M. Desenvolvimento de membranas de osmose inversa resistentes à deposição de matéria orgânica e bioincrustações. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ. 2009.

CRUZ, O. C.; ZANINI, J. R. Eficiência de um hidrociclone de geometria "Rietema" para pré-filtragem de água para irrigação. *Departamento de Engenharia Rural, FCAV/UNESP. Engenharia Agrícola*, v.30, n.4, p.637-645. Jaboticabal - SP. 2010.

CULLIVAN, J. C.; WILLIAMS, R.A.; CROSS, C. R. Understating the hydrocyclone separator through computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Reserch and Desing*, V. 81, n-4, pag 455-456, 2003.

CUNHA, R. S. S. Preparação e caracterização de membranas compósitas tubulares aplicadas a separação de emulsão óleo/água. Universidade federal de Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia. Unidade Acadêmica em Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em engenharia Química. Campina Grande - PB. 2017.

CUNHA, A. H. N.; OLIVEIRA, T. H. D.; FERREIRA, R. B.; MILHARDES, A. L. M. & SILVA, S. M. D. C. O reuso de água no Brasil: a importância da reutilização de água no país. *ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, Centro Científico Conhecer-Goiânia, 7(13), 2011.

CUNHA, A. H. N. O reuso de água no brasil: A importância da reutilização de água no país. *Enciclopédia biosfera*. Centro Científico Conhecer. Nº13, vol.7, pág. 1225 à 1248. Goiânia – GO. 2010.

DAMASCENO, A. P. A. B. Desinfecção de águas servidas através de tratamento térmico utilizando coletor solar. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba - SP. 2015.

DEGERING, A. D.; HOFFMANN, A. S.; RUEDIGER, A. C.; TRENTINI, A. B.; ZANELLA, A. B. Análise da qualidade da água do córrego da UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro tecnológico. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis, 2012.

DEL COLLE, R.; FORTULAN, C. A.; FONTES, S. R. Manufacture and characterization of ultra and microfiltration ceramic membranes by isostatic pressing. *Ceramics International*, v. 37, p. 1161-1168, 2011.

DIEL, J. L. Caracterização Funcional de Membranas Cerâmicas de Micro e Ultrafiltração. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2010.

ELLOUZE, E.; TAHRI, N.; AMAR, R. B. Enhancement of textile wastewater treatment process using Nanofiltration. *Desalination*, [s.l.], v. 286, p.16-23. 2011.

FAGGION, F.; OLIVEIRA, C. A. S.; CHRISTOFIDIS, D. Uso eficiente da água: uma contribuição para o desenvolvimento sustentável da agropecuária. *Universidade de Brasília – Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia*, Volume 2, Número 1. 2009.

FAPPI, D. A. Micro e ultrafiltração como pós-tratamento para reuso de efluentes de abatedouro e frigorífico de suínos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Dissertação. Medianeira - PR. 2015.

FELDKIRCHER, T. Avaliação de um sistema de tratamento de efluentes de laboratório de análises físico-químicas e microbiológicas. Centro Universitário UNIVATES. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Curso de engenharia Ambiental. Lajeado, 2010.

FELIZATTO, M. R. Tratamento de esgotos sanitários usando reator UASB seguido de microfiltração por membrana submersa. 2017. xxxix, 186 f., il. Tese

(Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) — Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

FLORIDO, P. L. Tratamento de efluente de refinaria pelo processo combinado de adsorção em carvão ativado e biorreator com membranas. 155 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Rio de Janeiro-RJ. 2011.

FLORIDO, P.; SABÓIA, A. E.; SUHETT, R.; TORRES, A. P.; MACHADO, M.; HUDSON, F. C. Avaliação de tecnologias visando ao reuso de efluentes. Efluentes hídricos: resultados em P&D, 2 (1), 1-2, 2004.

GALJAARD, G.; BUIJS, P.; BEERENDONK, E.; SCHOONENBERG, F.; SCHIPPERS, J. C. Pre-coating (EPCE ®) UF membranes for direct treatment of surface water. Desalination, v. 139, p. 305-316, 2001.

GALVÃO, D. F.; GOMES, E. R. S. Pós-tratamento de efluentes de indústria de laticínios por processos de separação por membranas. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais; Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Medianeira, UTFPR. v.14 n.3 p. 594 - 613, ISSN 1808 - 0251. DOI:10.5935/ambiencia.2018.03.12. Guarapuava - PR. 2018.

GAO, W; LIANG, H.; MA, J.; HAN, M.; CHEN, Z.; HAN, Z.; LI, G. Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: A review. Desalination, v. 272, p. 1-8, 2011.

GARCIA, G. O.; FILHO, M. S.; REIS, E. F.; MORAES, W. B.; NAZÁRIO, A. A. Alterações químicas de dois solos irrigados com água salina. Revista Ciência Agronômica, v.39, p.7-18, 2008.

GEOFILTRATION. Nanofiltração. Disponível em: [http://www.geofiltration.com/portuguese/tecnologia/nanofiltracao .htm](http://www.geofiltration.com/portuguese/tecnologia/nanofiltracao.htm)>. Acesso em: 18/09/2019.

GHIGGI F. F. Tratamento de águas para consumo doméstico com membranas de ultrafiltração. Trabalho de diplomação em Engenharia Química, UFRS, Rio Grande do Sul - RS, 2011.

GHODRAT, M.; KUANG, S.B.; YU, A.B.; VINCE, A.; BARNETT, G.D.; BARNETT, P.J. Numerical analysis of hydrocyclones with different conical section designs. *Minerals Engineering* 62, p. 74-84, 2014b.

GIRARD, B; FUKUMOTO, L. R. Membrane processing of fruit juices and beverages: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 40, n. 2, p. 91-157, 2000.

GONÇALVES, S. M. Efeito da concentração de sólidos e de variáveis operacionais no desempenho de um hidrociclone concentrador. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Uberlândia - MG. 2016.

GONÇALVES, R. F. Desinfecção de efluentes sanitários. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, ABES, RiMa, 422 p. 2003.

GRULL, D. Remediação e readequação de sistemas aquáticos superficiais contaminados. In: *Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão/ coordenadores Maria do Carmo Calijuri, Davi Gasparini Fernandes Cunha*. Rio de Janeiro: Elsevier, 789p. 2013.

GURGEL, V. Projeto de Lei Nº 2874/2011. Estabelece normas gerais e critérios básicos para a promoção da conservação e uso racional da água nas edificações. Procuradoria da República do Amapá, PR/AP. Macapá - AP, 2011.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NÓBREGA, R. *Processo de Separação com Membranas*. 1a ed. E-papers Serviços Editoriais Ltda. Rio de Janeiro - RJ. 2006.

HANJRA, M. A.; BLACKWELL, J.; CARR, G.; ZHANG, F.; JACKSON, T. M. Wastewater irrigation and environmental health: Implications for water governance and public policy. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 215, 255-269. 2012.

HAUSMANN, A. Performance assessment of membrane distillation for skim milk and whey processing. *Journal Of Dairy Science*, [s.l.], v. 97, n. 1, p.56-71. American Dairy Science Association. 2014.



HENZ, F. M.; PAULA, L. R.; NEVES, M. I. R.; RIBEIRO, N. T.; BORTOLINI, J. Reuso da Água Para Fins Agrícolas. Anais da X Semana - Agronomia - FAG. Cascavel - PR. 13 e 14 de Junho de 2016.

HERZBERG, M.; BERRY, D.; RASKIN, L. Impact of microfiltration treatment of secondary wastewater effluent on biofouling of reverse osmosis membranes. *Water Research*, v. 44, p. 167-176, 2010.

HESPANHOL, I. Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, município e recarga de aquíferos. In: MANCUSO, P. C. S., SANTOS, H. F. (ed.). Reúso de água. São Paulo: Manole, cap. 13, p. 37-95. 2002.

IWAKI, G. P. Reuso de Água: Tipos, Processos Específicos e Contaminantes Publicado em 27/08/2015 às 17:29:23. Portal Tratamento de Água. Disponível em: <<https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/reuso-de-agua-tipos-processos-especificos-e-contaminantes/>>. Acesso em 22 de janeiro de 2019.

JANK, A.; MULLER, W.; WALDHUBER, S.; GERKE, F.; EBNER, C.; BOCKREIS, A. Hydrocyclones for the separation of impurities in pretreated biowaste. Unit of Environmental Engineering. Section of Waste Treatment and Resource Management. Universität Innsbruck. Institute of Microbiology. Universität Innsbruck. Innsbruck, Austria. 2017.

JARAMILLO, M. F.; RESTREPO, I. Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. *Sustainability*, [s.l.], v. 9, n. 10, p.1734-1753. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su9101734>. Out. 2017.

JARDIM, W.F.; CANELA, M.C. Caderno temático volume 1: fundamentos da oxidação química no tratamento de efluentes remediação de solos. Campinas - SP. 2004.

JIMENEZ, B.; MARA, D.; CARR, R.; BRISSAUD, F. Wastewater treatment for pathogen removal and nutrient conservation: suitable systems for use in developing countries. In: *Wastewater Irrigation and Health – Assessing and mitigating risk in low-income countries*. Earthscan, IDRC. 2010.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. 7ª ed. 1087p. Rio de Janeiro - RJ. 2014.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. 4ª ed, SEGRAC. Rio de Janeiro - RJ. 2005.

KELLNER, E.; AKUTSU, J.; ACHON, C. L. Subsídios para gestão de esgotamento sanitário: abordagem da fase líquida. Recursos Hídricos: gestão e sustentabilidade – 81 Capítulo 4. Engenharia Hidráulica e Saneamento (EESC/USP). 1ª Ed. Recursos hídricos: gestão e sustentabilidade ANAP. Tupã – SP. 2016.

LEAL, M. S. Separação de fases de fluidos em perfuração base água utilizando tensoativos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Natal, julho de 2015.

LIBUTTI, A. Agro-industrial wastewater reuse for irrigation of a vegetable crop succession under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, [s.l.], v. 196, p.1-14. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.015>. Jan. 2018.

LIRA, R., M.; SANTOS, A. N.; SILVA, J. S.; BARNABÉ, J. M. C.; BARROS, M. S. B.; SOARES, H. R. A utilização de águas de qualidade inferior na agricultura irrigada. *Revista Geama (ISSN 2447-0740) – Environmental Sciences*. Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, 2015.

LODISH, H.; DARNELL, J. E.; BALTIMORE, D. "Biologia Celular e Molecular", 5ª edição. Artmed Editora SA. Porto Alegre-Brasil. 2005.

LUNARDI, J.; RABAIOLLI, J. A. Valorização e preservação dos recursos hídricos na busca pelo desenvolvimento rural sustentável. Universidade Federal de Santa Maria. *Revista OKARA: Geografia em debate*, v.7, n.1, p. 44-62. ISSN: 1982-3878. João Pessoa, PB. 2013.

LYNCH, A. J.; RAO, T. C., 1975, "Modeling and scale-up of hydrocyclone classifiers". In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 11., Cagliari. Proceeding Cagliari: Istituto di Arte Mineraria, p. 245-269. 1975.

MACÊDO, C. R. Avaliação de um sistema hidrociclone/ membrana cerâmica para fins de tratamento de águas oleosas. Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia. Unidade Acadêmica de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Tese de doutorado. Campina Grande - PB. 2018.

MACHACA, Y.Y.C. "Modelagem matemática da classificação de polpas de fosfato e bauxita em hidrociclones", Dissertação de mestrado, PEMM-COPPE, UFRJ. 2010.

MAGALHÃES, H. L. F. Estudo da termofluidodinâmica do tratamento de efluentes usando membranas cerâmicas: modelagem e simulação. Universidade federal de Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Dissertação. Campina Grande - PB. 2017.

MAKELA, M.; GELADI, P.; LARSSON, S. H.; FINELL, M. Pretreatment of recycled paper sludge with a novel high-velocity pilot cyclone: effect of process parameters on convective drying efficiency. Appl. Energy 131, 490–498. 2014.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. Reuso de água. 1ª ed. Manole, 576 p. São Paulo - SP. 2003.

MARQUELLI, W. A.; MALDONADE, I. R.; BRAGA, M. B.; SILVA, H. R. Qualidade e segurança sanitária da água para fins de irrigação. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. EMBRAPA. Brasília, DF. Outubro, 2014.

MARQUES, A. F. Pós-tratamento por membranas da água residuária do processo de tingimento de indústria têxtil com vistas ao reuso. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia De São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos - SP. 2017.

MARQUES, F. A. R.; ALVES, R. V.; FRANÇA, K. B. Uso de membrana cerâmica para remoção de cor, turbidez e indicadores de microrganismos em águas

subterrâneas. v. 18, n. 2. Disponível em <<http://periodicos.uff.br/engevista/article/view/9077>>. DOI: <https://doi.org/10.22409/engevista.v18i2.753>. 2016.

MARSHALL, A. D.; DAUFIN, G. Physico-chemical aspects of membrane fouling by dairy fluids. Fouling and cleaning in pressure driven membrane processes, International Dairy Federation, cap. 1, p. 8-35, 1995.

MARTINEZ, L.F., LAVÍN, A.G., MAHAMUD, M.M., BUENO, J. L., “Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation.” Chemical Engineering and Processing, Vol.47, p. 192-199, 2008.

MASSARANI, G. Fluidodinâmica em sistemas particulados. Rio de Janeiro: Editora Papers Serviços Editoriais, 2002.

MASSARANI, G. Desempenho de ciclones e hidrociclones. CETEM/CNPq. 14p. Série de Tecnologia Mineral: 62. Rio de Janeiro - RJ. 1992.

MAZZONETTO, C. Sabesp e Sanasa adotam MBR para tratar efluente industrial. Infraestrutura urbana, projetos, custos e construção. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/19/artigo267599-2.aspx>>. Edição 19 - Outubro/2012. Acesso em: 12/01/2019.

MEDRONHO, R. A.; SCHUETZE, J.; DECKWER, W. D. Numerical Simulation of Hydrocyclones for Cell Separation. Latin American Applied Research, vol. 35, pag. 1 - 8, 2005.

MEDRONHO, R.A. Scale-Up of Hydrocyclones at Low Feed Concentrations. 323 p. Thesis (Ph.D.) - University of Bradford, United Kingdom. Inglaterra, 1984.

MENEZES, I. S. & MENDONÇA, L. C. Avaliação do tratamento preliminar da estação de tratamento de efluentes do campus de São Cristóvão da Universidade Federal de Sergipe. VOL. 13, NUM. 10 2017. Scientia Plena. São Cristóvão - SE; 2017.

METCALF, L.; EDDY, H. Inc. Wastewater Engineering: Treatment and Disposal Reuse. 4<sup>a</sup> ed. Revisado por George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. David Stensel. New York: McGraw -Hill Book, 1815p. 2003.

METCALF, L.; EDDY, H. P. Tratamento de Efluente e Recuperação de Recursos. Tradução de HESPANHOL, I.; MIERZWA, J. C. - 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MINGHINI, I. Avaliação qualitativa da água residuária de abatedouro de aves para fins de reuso em irrigação. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Departamento de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu - SP. 2007.

MOGNON, J. L. Mini-hidrociclones aplicados ao sistema de controle de sólidos na perfuração de poços de petróleo. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Uberlândia – MG. 2015.

MOSSI, G. Aplicação de Hidrociclone na Remoção de Sólidos Suspensos de Efluente de Marmoraria. Projeto de Pesquisa. UPF, Passo Fundo - RS. 2010.

MOTA, S. Introdução a engenharia ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

MOURA, A. D. Análise e projeto de hidrociclones para o espessamento do lodo gerado no tratamento de efluentes de indústrias têxteis. Universidade Federal do Pampa. Programa de Pós-graduação em Engenharia. Bagé - RS. 2015.

MOURA, A. D.; MOURA, T. R.; ALMEIDA, A. R. F. Análise e projeto de hidrociclones para o processamento de lodo provido da indústria têxtil. Universidade Federal do Pampa. Programa de Pós-Graduação em Engenharias. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis - SC. 2014.

MOURA, J. M. L. N.; RIBEIRO, A. P. B.; GRIMALDI, R.; GONÇALVES, L. A. G. Reator de membrana enzimático e fluidos supercríticos: associação de processos. Quim. Nova, v. 30, n. 4, p. 965-969, 2008.

MUHAMMAD, N., SINHA, R.; KRISHNAN, E.R.; PATTERSON, C.L. Ceramic filter for small system drinking water treatment evaluation of membrane pore size and importance of integrity monitoring, *Journal Environmental Eng*, v. 135, p. 1181–1191, 2009.

MULDER, M. *Basic principles of membrane technology*. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Pub, 564 p. 1996.

MULDER, M., *Basic Principles of Membrane Technology*. 1st Ed., Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 75, 1991.

MULLER, W. *Mechanische Grundoperationen und ihre Gesetzmäßigkeiten (Mechanical Unit Operations and Their Principles)*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München. 2008.

NAYONO, S. E.; GALLERT, C.; WINTER, J. Co-digestion of press water and food waste in a biowaste digester for improvement of biogas production. *Bioresour. Technol.* 101, 6998–7004. 2010.

NERES, L. *Determinação de sólidos: sólidos totais, fixos, voláteis, dissolvidos e suspensos*. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. Departamento de Engenharias e Computação. Engenharia Química. São Mateus - ES. 2012.

NI, L.; TIAN, J.; ZHAO, J. Experimental study of the effect of underflow pipe diameter on separation performance of a novel de-foulant hydrocyclone with continuous underflow and reflux function. *Sep. Purif. Technol.* 171, 270–279. 2016.

NUNES, R. I.; SOUZA, W. W.; SANTOS, P. R. F.; OLIVEIRA, J. B.; SANTANA, J. M.; MACIEL, O. S.; BEZERRA, D. P. *Análise dos Parâmetros Físicos: Sólidos Totais, Sólidos Sedimentáveis, Sólidos Totais Dissolvidos e Sólidos Suspensos nas Águas do Vale do Açu*. Curso de Química. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN. 5º Encontro Regional de Química & Blucher Chemistry Proceedings. 4º Encontro Nacional de Química, Volume 3, Número 1. Natal - RN. 2015.

NUVOLARI A. Esgoto Sanitário - Coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola. 2. Ed. rev., atual. e ampl. São Paulo: Blucher; 2011.

OLIVEIRA, C.F. Influência do Teor de Feldspato Espodumênio e Albita na Sinterização de Uma Massa Cerâmica Triaxial. Pós-graduação em engenharia mecânica. São João del-Rei, 2012.

OLIVEIRA, S. M.; KAMEYAMA, O.; ALEGRE, R. M. Modificações e avaliação de hidrociclone para tratamento de água residuária. Faculdade de Engenharia de Alimentos - FEA, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. XVI Congresso Interno de Iniciação Científica. Campinas - SP. 2008.

OLIVEIRA, D. R., Pré-tratamento do processo de osmose inversa utilizando microfiltração e investigação de técnicas de limpeza e recuperação de membranas, Dissertação (Mestrado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro), 129p, 2007.

OTENIO, M. H. Reaproveitamento de água residuária em sistemas de produção de leite. Sustentabilidade ambiental, social e econômica da cadeia produtiva do leite: Desafios e perspectivas. Brasília, DF: Embrapa, 2015.

PAI NETO, E.D.; VALENTE, M.; CARDOSO, V.L.; DAMASCENO, J.J.R. Análise do desempenho de hidrociclones com fundo chato (compact disc). In: INTERAMERICAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING, 19., e CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 19., Águas de São Pedro, 2000. Proceedings, 13., e 19., Águas de São Pedro: UNICAMP, 2000.

PALMEIRA, G. F. Tratamento Conjugado de Esgoto Doméstico e Lixiviado de Aterro Sanitário em Lagoas de Estabilização. TCC (Graduação) – Curso de Química Industrial, Química, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande – PB, 44p., 2014.

PATERNIANI, J. E. S. Diagnóstico da qualidade da água de irrigação em propriedades produtoras de hortaliças da região de Campinas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, SBEA. Campinas - SP. 1994.

PEÇANHA, R.P.; MASSARANI, G. Avaliação do desempenho de hidrociclones. Revista Brasileira de Tecnologia, v.11, n.4, p.289-299. Rio de Janeiro - RJ. 1980.

PELEGRIN, D. C. MICROFILTRAÇÃO TANGENCIAL DE EFLUENTE. Florianópolis – SC. 2004.

PENA, R. F. A. "Água de reúso na agricultura"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/agua-reuso-na-agricultura.htm>. Acesso em 24 de junho de 2018.

PEREIRA, C. M. S.; MASSARANI, G. Separação sólido-fluido não newtoniano em hidrociclones. In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2., p. 719 – 726, 1995, Maringá. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de sistemas particulados. Maringá: UEM, 1995.

PESSOA, J. D. Avaliação de um sistema híbrido de tratamento de águas: membrana cerâmica de microfiltração com resina trocadora iônica. Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Ciência e Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Campina Grande - PB. 2015.

PETER-VARBANETS, M.; ZURBRU, C.; SWARTZ, C.; PRONK, W. Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology. Water Research, v. 43, p. 245-265, 2009.

PIZELLA, D. G.; SOUZA, M. P. Análise da Sustentabilidade Ambiental do Sistema de Classificação das Águas Doces Superficiais Brasileiras. Rev Eng Sanit Ambient12: 139-148, 2007.

PLITT, I. R. "A mathematical model of the hydrocyclone classifier". CIM Bulletin, v. 69, n. 776, p. 114-123. 1976.

PUPRASERT, C.; HEBRARD, G.; LOPEZ, L.; AURELLE, Y.; Potential of using hydrocyclone and hydrocyclone equipped with grit pot as a pre-treatment in runoff water treatment. Chem. Eng. Process. 43, 67–83. 2004.

RAJASEKHAR, T.; TRINADH, M.; BABU, P.V.; SAINATH, A. V. S.; REDDY, A. V. R. Oil–water emulsion separation using ultrafiltration membranes based on



novel blends of poly (vinylidene fluoride) and amphiphilic tri-block copolymer containing carboxylic acid functional group. *Journal of Membrane Science*, 481 (1), 82–93, 2015.

RAMOS, R. O. Avaliação de membranas cerâmicas como pré tratamento para processos de produção de água ultra purificada. Universidade Estadual da Paraíba. Curso de Química Industrial. Campina Grande - PB. 2015.

RANDON, J.; JULBE, A.; DAVID, P.; JAAFARI, K.; ELMALEH, S. Computer Simulation of Inorganic Membrane Morphology, *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 161, p. 384-388, 1993.

REALI, M. A. P.; PAZ, L.; SABOGAL, P.; DANIEL, L. A. Tratamento de água para consumo humano. *Engenharia ambiental: conceitos, tecnologia e gestão*. p. 405-453. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

REBELLO, M. V. F.; SILVA, M. A. T.; FONSECA, M. J. C. Avaliação do efeito de tensoativos no processo de tratamento da água produzida por membranas cerâmicas. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Química e de Petróleo. Niterói - RJ. 2016.

REBELLO, L. F.; LACERDA, F. F.; SPURI, F. M. R.; ANDREOLI, P. T. D. J.; LOBENBERG, R.; BOU-CHACRA, N. Design space approach for preservative system optimization of an anti-aging eye fluid emulsion. *The Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, v. 18, n.3, p.551-561. 2015.

REZENDE, A., T.; Reuso Urbano de Água para Fins Não Potáveis no Brasil. Universidade Federal de Juiz de Fora. Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária. Juiz de Fora - MG, 2016.

RIPPERGER, S., ALTMANN, J. Crossflow microfiltration – state of the art, *Separation and Purification Technology*, 26. 19–31. 2002.

ROCHA, E. L. Reuso de águas residuárias na agricultura irrigada. Faculdade Metropolitana de Camaçari (FAMEC), Bacharelado em Engenharia Ambiental, 2013.

ROCHA, F. A.; SILVA, J.; BARROS, F. M. Reuso de águas residuárias na agricultura: A experiência israelense e brasileira. Enciclopédia Biosfera, v. 6, p. 1-9, 2010.

ROCHA, E. C.; VALENTE, A. L. P.; AUGUSTO, F. Extração e pré-concentração de compostos orgânicos voláteis por permeação em membrana para análise cromatográfica. Química Nova, 23 (1), 94-97, 2000.

SAMPAIO, A. de O. Cia. Revista DAE. Mercado de Reuso de Água no Brasil: É possível assegurar seu crescimento sem a definição de um arcabouço normativo e legal? ISSN 0101-6040. São Paulo - SP. Janeiro 2012.

SANDRI, D.; MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. Teores de nutrientes na alface irrigada com água residuária aplicada por sistemas de irrigação. Engenharia Agrícola, Jaboticabal - SP. v. 26, n. 1, p. 45-57, 2006.

SANT'ANNA, JR.; LIPPEL, G. Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações; Editora Interciência; 2010.

SANTANA, M. J.; CARVALHO, J. A.; SOUZA, K. J.; SOUSA, A. M. G.; VASCONCELOS, C. L.; ANDRADE, L. A. B. Efeitos da salinidade da água de irrigação na brotação e desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) e em solos com diferentes níveis texturais. Revista Ciência Agrotécnica, v.31, p.1470-1476, 2007.

SANTOS, J. S; MACIEL, L. G.; SEIXAS, V. N. C. Processo de separação por membrana (PSM): Aplicação da Tecnologia na Indústria Láctea. DESAFIOS: Revista Interdisciplinar da Universidade Federal de Tocantins, v.1, n. 01, p. 208-225. 2014.

SANTOS, L. R. B. dos. Membranas para ultrafiltração a base de dióxido de estanho preparadas pelo processo sol-gel. 1999. 217 f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 1999.

SAWYER, C. N.; MCCARTY, P.L.; PARKIN, G.F. Chemistry for environmental engineering and science. 5<sup>a</sup> ed. New York: McGraw-Hillcap. 29, p. 670-676. 2003.

SCOTT, K. Handbook of industrial membranes. Oxford, Elsevier Advanced Technology. 1998.

SHUVAL, H.; LAMPERT Y.; FATTAL, B. Development of a risk assessment approach for evaluating wastewater reuse standards for agriculture. Water Science and Technology, Oxford. v.35, n.11-12, p.15-20, 1997.

SILVA, T. L. Qualidade da Água Residuária Para Reuso na Agricultura Irrigada. Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrônomicas. Universidade Estadual Paulista (UNESP). Edição Especial 30 anos PG Irriga v. 1, nº. 1, p. 101-111. Botucatu, SP. 2018.

SILVA, M. C.; LIMA, R. C. O.; FREITAS, N. L.; LIRA, H. L. Confecção de Membranas Cerâmicas para Tratamento de Água do Rio Gramame/PB. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 13, n. 2 (2018) 114-118. ISSN 1809-8797. Coordenação de Engenharia Civil, Centro universitário UNIFACISA. Campina Grande - PB. 2018.

SILVA, M. A.; SANTANA, C. G.; Reuso de água: possibilidades de redução do desperdício nas atividades domésticas. Revista do CEDS. Disponível em: <<<http://www.undb.edu.br/ceds/revistadoceds>. Periódico do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da Unidade de Ensino Superior Dom Bosco - UNDB. Nº 1 agosto/dezembro 2014.

SILVA, M. C.; OLIVEIRA, R. C.; LIRA, H. L.; FREITAS, N. L. Obtenção de membrana cerâmica para tratamento de efluente da indústria têxtil. Universidade Federal de Campina Grande. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 9, n. 2 (2014) 81-85, ISSN 1809-8797. Campina Grande – PB. 2014.

SILVA, D. O. Otimização da separação sólido líquido em hidrociclones mediante a modificações geométricas. 189p. Tese (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2012.

SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M.; LOBATO, F.S.; BARROZO, M. A. S. Optimization of the design and performance of hydrocyclones by Differential Evolution technique. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v.61, p.1-7, 2012.

SILVA, I. N., FONTES, L. O., TAVELLA, L. B., OLIVEIRA, J. B., OLIVEIRA, A. C. Qualidade de água na irrigação. *Agropecuária Científica no Semi-Árido – ACSA*, v. 07, n 03, p. 01-15. 2011.

SILVA, S.K. Sistema de Dessalinização da comunidade de Uruçu – São João do Cariri – PB: Análises, Monitoramento e Avaliação de um Misturador para o uso do Concentrado. Dissertação de mestrado em Engenharia Química, UFCG, Campina Grande – PB, 2008.

SILVA, F. A., LIRA, H. L., Preparação e caracterização de membranas cerâmica de cordierita. *Cerâmica*, São Paulo. v 52. n 324. p 276-282. 2006.

SILVA, J. R. R. Caracterização físico-química de massas cerâmicas e suas influências nas propriedades finais dos revestimentos cerâmicos. 66f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

SILVA, M. A. P. Hidrociclones de Bradley: dimensionamento e análise do desempenho. 81p. Dissertação (M.S.) – Coordenação de Pós-graduação e pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ. 1989.

SINGH, R. *Hybrid Membrane Systems for Water Purification: Technology, Systems Design and Operations*. Elsevier Science & Technology Books, 2006.

SIR, M.; PODHOLA, M.; PATOCKA, T.; HONZAJKOVA, Z.; KOCUREK, P.; KUBAL, M.; KURAS, M. The effect of humic acids on the reverse osmosis treatment of hazardous landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, v. 207-208, p. 86-90, 2012.

SOCCOL, O. J. Construção e avaliação de hidrociclone para pré-filtragem da água de irrigação. Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Piracicaba - SP. 2003.

SOUZA, M. U. Análise físico química e microbiológica do esgoto de uma universidade pública com proposta de tratamento biológico para reuso na própria instituição. Universidade Estadual da Paraíba – UEPB. Campina Grande - PB. 2016.

SOUZA, J. A. R. de.; MOREIRA, D. A.; CONDÉ, N. M.; CARVALHO, W. B de.; CARVALHO, C. V. M. Análise das condições de potabilidade das águas de urgências em Ubá, MG. Revista Ambiente & Água, v. 10, n. 3, p. 614-622, 2015.

SOUZA, F.J.; VIEIRA, L.G.M.; DAMASCENO, J.J.R.; BARROZO, M.A.S. Analysis of the influence of the filtering medium on the behavior of the filtering hydrocyclones. Power Technology, Lausanne, v. 107, n. 3, p. 259-67, 2000.

STEFER, V.; PEDROSO, C. R.; SOUZA, J. B.; VIDAL, C. M. S. Remoção dos microrganismos indicadores: E. coli, colifagos e Clostridium perfringens com membranas de microfiltração e ultrafiltração. Universidade Estadual do Centro-Oeste (Unicentro). Departamento de Engenharia Ambiental. Congresso ABES, FENASAN. Irati - PR. 2017.

SVAROVSKY, L. Hidrociclones. Tecnomix Publishing Co. 1984.

SVAROVSKY, L. Solid-liquid separation. 2. ed. London: Butterworths. PMID:20478191. 2000.

SVAROVSKY, L. Solid-Liquid Separation. 3rd Ed., Butterworths, London, 1990.

SWRCB. Electrical Conductivity/Salinity Fact Sheet. In: The Clean Water Team Guidance Compendium for Watershed Monitoring and Assessment State Water Resources Control Board, 2002. Disponível em: [http://www.swrcb.ca.gov/water\\_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130en.pdf](http://www.swrcb.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130en.pdf) Acesso em: 25 ago. 2018.

TAE Revista. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/8103-noticias>. Bons exemplos de outros países de gestão de água. Data:29/08/2014- Fonte: [www.revistafatorbrasil.com.br](http://www.revistafatorbrasil.com.br). Acesso em: 31 de março de 2019.

TANJI, Y., MIZOGUCHI, K., AKITSU, T., MORITA, M., HORI, K., UNNO, H.. Fate of coliphage in waste water treatment process and detection of phages carrying the Shiga toxin type 2 gene. *Water Science and Technology*, v. 46 (11-12), p. 285-289, 2002.

TREVISOLI, A. M. D. S. Estudo Experimental da Microfiltração tangencial com Membrana Cerâmica Aplicada na Clarificação da Vinhaça. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

TSUTIYA, M. T. Uso Agrícola dos Efluentes das Lagoas de Estabilização do Estado de São Paulo. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Engenharia Civil. Escola Politécnica da USP. São Paulo – SP. 2001.

UMEBARA, T. Microfiltração de caldo de cana: caracterização do caldo permeado e retentado. 2010, 100 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

USEPA. Membrane filtration guidance manual. Washington, D. C., United States Environmental Protection Agency, Office of Water. 2005.

USHIKUBO, F. Y. Efeito do tratamento enzimático, da velocidade tangencial e da pressão transmembrana na microfiltração da polpa diluída de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.). 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

VAKAMALLA, T. R.; KORUPROLU, V. B. R.; ARUGONDA, R.; MANGADODDY, N. Development of novel hydrocyclone designs for improved fines classification using multiphase CFD model. *Sep. Purif. Technol.* 175, 481–497. 2017.

VASAN, S. S.; FIELD, R. W. On maintaining consistency between the film model and the profile of the concentration polarisation layer. *Journal of Membrane Science*, v. 279, p. 434-438, 2006.

VIEIRA, L. G. M. Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes. 2006. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. 2006.

VIEIRA, L. G. M. Estudo da performance de hidrociclones filtrante de rietema. 2001. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. 2001.

VITAL, J.; SOUSA, J. M. Polymeric membrane for membrane reactors. Handbook Cap. 1, Woodhead Publishing Limited, 2013.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA. 452 p. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG. 2005.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. 4ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 243p. 2002.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento e destinação de efluentes líquidos da agroindústria. Brasília – DF: ABEAS, Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior, 92p. 1996.

WINTGENS, T.; MELIN, T.; SCHÄFER, A. I.; MUSTON, M.; BIXIO, D.; THOEYE, C. The role of membrane processes in municipal wastewater reclamation and reuse. *Desalination*, v. 178, p. 1-11, 2005.

XINGYI, L. I.; NAN, K.; SHI, S.; CHEN, H. Influence of Nphthaloyl chitosan on poly (ether imide) ultrafiltration membranes and its application in biomolecules and toxic heavy metal ion separation and their antifouling properties. *Jornal Internacional de macromoléculas biológicas*, 50 (1), 43-49, 2012.

YANG, Q.; LI, Z. M.; LV, W. J.; WANG, H. L. On the laboratory and field studies of removing fine particles suspended in wastewater using mini-hydrocyclone. *Sep. Purif. Technol.* 110, 93–100. 2013.

YOUNG, G.A.B; WAKLEY, W.D.; TAGGART, D.L.; ANDREWS, S.L.; WORREL, J.R.; “Oil water separation using hydrocyclones: an experimental search for optimum dimensions”, *Journal Of Petroleum Science and Engineering* 11, 37-50, 1994.

YUAN, H.; FU, S.; TAN, W.; HE, J.; WU, K. Study on the hydrocyclonic separation of waste plastics with different density. *Waste Manage.* 45, 108–111. 2015.

ZHOU, Y.; ZHAO, H.; BAI, H.; ZHANG, L.; TANG, H. Papermaking effluent treatment: a new cellulose nanocrystalline/polysulfone composite membrane procedia *environmental Science*, 16 (1), 145-151. 2012.

ZORZO, M. E. Hidrociclone na remoção de sólidos suspensos de efluentes de marmoraria. Universidade de Passo Fundo. Faculdade de Engenharia e Arquitetura. Curso de Engenharia Ambiental. Passo Fundo - RS. 2012.



## APÊNDICES

**APÊNDICE A**

---

**LAUDOS PARA OS DIÂMETROS DAS PARTÍCULAS DAS ÁGUAS DA  
LAGOA E FOSSA SÉPTICA LOCALIZADAS NA UFCG**

## Result Analysis Report

**Sample Name:**  
Água fossa/UFCG

**SOP Name:**

**Measured:**  
Monday, May 27, 2019 3:10:32 PM

**Sample Source & type:**

**Measured by:**  
Malvern

**Analysed:**  
Monday, May 27, 2019 3:10:32 PM

**Sample bulk lot ref:**

**Result Source:**  
Averaged

**Particle Name:**

Fraunhofer

**Accessory Name:**

Hydro 2000MU (A)

**Analysis model:**

General purpose

**Sensitivity:**

Normal

**Particle RI:**

0.000

**Absortion:**

0

**Size range:**

0,020 to 2000.000 um

**Obscuration:**

6,41 %

**Dispersant Name:**

Water

**Dispersant RI:**

1.330

**Weighted Residual:**

2.395 %

**Result Emulation:**

Off

**Concentration:**

0.0083 %Vol

**Span:**

2.962

**Uniformity:**

0,887

**Result units:**

Volume

**Specific Surface Area:**

0.677 m<sup>2</sup>/g

**Surface Weighted Mean D[3,2]:**

13.762 um

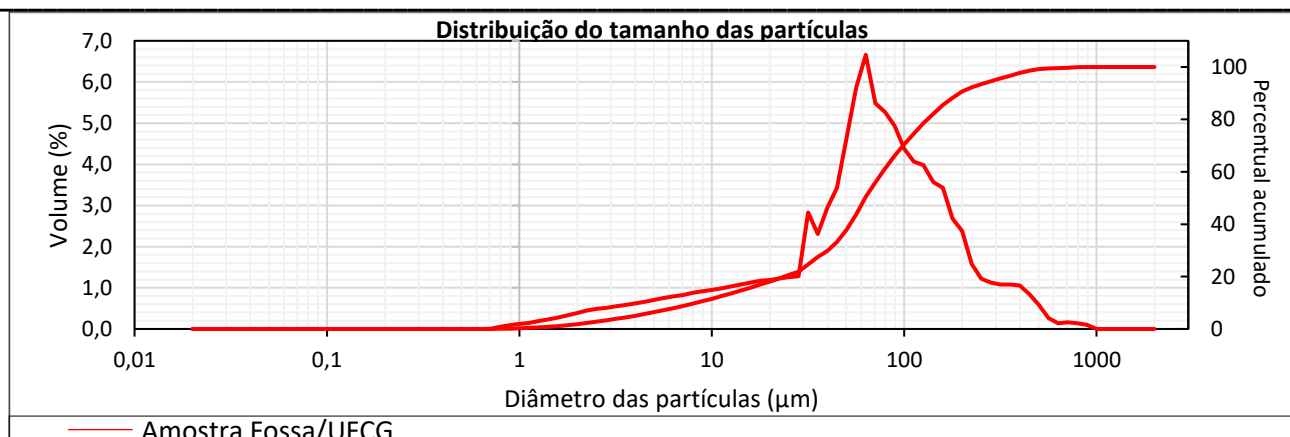
**Vol. Weighted Mean D[4,3]:**

137.176 um

**d(0.1): 8.332 um**

**d(0.5): 62.791 um**

**d(0.9): 194.334 um**



Volume (%)	Tamanho (µm)	Volume (%)	Tamanho (µm)	Volume (%)	Tamanho (µm)	Volume (%)	Tamanho (µm)	Volume (%)	Tamanho (µm)	Volume (%)	Tamanho (µm)
0,00	0,02	0,00	0,142	0,12	1,002	0,82	7,096	4,64	50,238	1,08	355,656
0,00	0,022	0,00	0,159	0,15	1,125	0,88	7,962	5,86	56,368	1,06	399,052
0,00	0,025	0,00	0,178	0,19	1,262	0,92	8,934	6,66	63,246	0,85	447,744
0,00	0,028	0,00	0,2	0,23	1,416	0,95	10,024	5,48	70,963	0,58	502,377
0,00	0,0320	0,00	0,224	0,28	1,589	0,99	11,247	5,27	79,621	0,26	563,677
0,00	0,036	0,00	0,252	0,33	1,783	1,03	12,619	4,94	89,337	0,14	632,456
0,00	0,04	0,00	0,283	0,39	2,000	1,08	14,159	4,38	100,237	0,16	709,627
0,00	0,045	0,00	0,317	0,45	2,244	1,13	15,887	4,07	112,468	0,14	796,214
0,00	0,05	0,00	0,356	0,49	2,518	1,17	17,825	3,98	126,191	0,1	893,367
0,00	0,056	0,00	0,399	0,51	2,825	1,19	20,000	3,57	141,589	0,00	1002,374
0,00	0,063	0,00	0,448	0,55	3,170	1,23	22,440	3,43	158,866	0,00	1124,683
0,00	0,071	0,00	0,502	0,58	3,557	1,26	25,179	2,68	178,250	0,00	1261,915
0,00	0,08	0,00	0,564	0,62	3,991	1,28	28,251	2,38	200,000	0,00	1415,892
0,00	0,089	0,00	0,632	0,66	4,477	1,28	31,698	1,58	224,404	0,00	1588,656
0,00	0,1	0,01	0,71	0,71	5,024	1,28	35,566	1,22	251,785	0,00	1782,502
0,00	0,112	0,05	0,796	0,75	5,637	1,28	39,905	1,13	282,508	0,00	2000,000
0,00	0,126	0,09	0,893	0,79	6,325	1,28	44,774	1,08	316,979		

## Result Analysis Report

**Sample Name:**  
Água lagoa/UFCG

**SOP Name:**

**Measured:**  
Thursday, May 23, 2019 2:20:48 PM

**Sample Source & type:**

**Measured by:**  
Malvern

**Analysed:**  
Thursday, May 23, 2019 2:20:48 PM

**Sample bulk lot ref:**

**Result Source:**  
Averaged

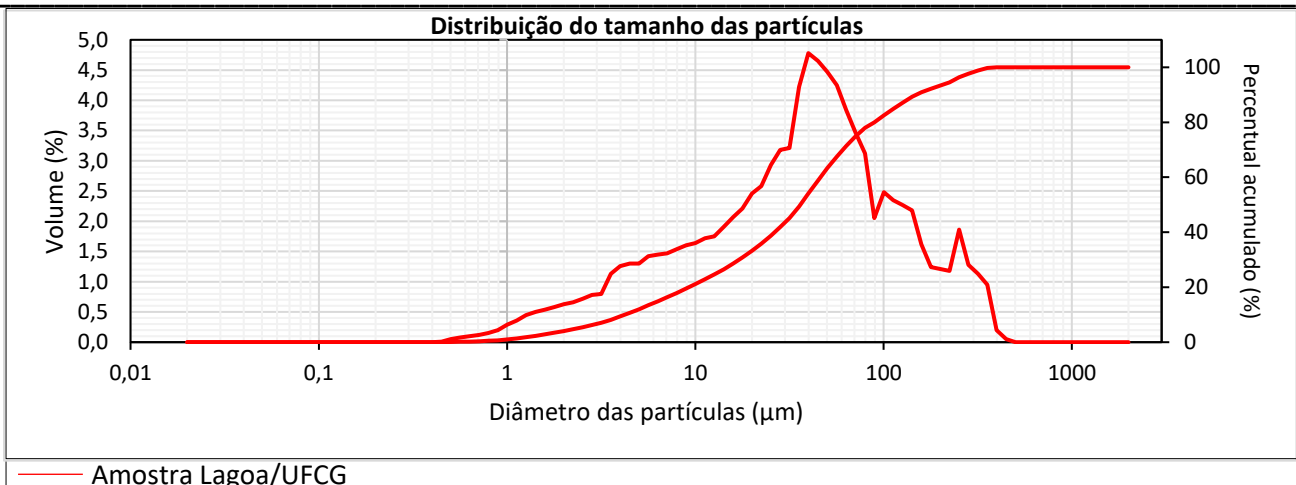
<b>Particle Name:</b> Fraunhofer	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle RI:</b> 0.000	<b>Absortion:</b> 0	<b>Size range:</b> 0,020 to 2000.000 um	<b>Obscuration:</b> 5.33 %
<b>Dispersant Name:</b> Water	<b>Dispersant RI:</b> 1.330	<b>Weighted Residual:</b> 1.493 %	<b>Result Emulation:</b> Off

<b>Concentration:</b> 0.0038 %Vol	<b>Span:</b> 4.014	<b>Uniformity:</b> 1.112	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 1.23 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 6.885 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 39.375 um	

**d(0.1): 4.198 um**

**d(0.5): 36.138 um**

**d(0.9): 149.267 um**



Volume (%)	Tamanho (µm)	Volume (%)	Tamanho (µm)	Volume (%)	Tamanho (µm)	Volume (%)	Tamanho (µm)	Volume (%)	Tamanho (µm)	Volume (%)	Tamanho (µm)
0,00	0,02	0,00	0,142	0,29	1,002	1,47	7,096	4,47	50,238	0,95	355,656
0,00	0,022	0,00	0,159	0,36	1,125	1,54	7,962	4,25	56,368	0,20	399,052
0,00	0,025	0,00	0,178	0,45	1,262	1,6	8,934	3,84	63,246	0,05	447,744
0,00	0,028	0,00	0,2	0,5	1,416	1,64	10,024	3,47	70,963	0,00	502,377
0,00	0,032	0,00	0,224	0,54	1,589	1,72	11,247	3,12	79,621	0,00	563,677
0,00	0,036	0,00	0,252	0,58	1,783	1,75	12,619	2,05	89,337	0,00	632,456
0,00	0,04	0,00	0,283	0,63	2,000	1,91	14,159	2,48	100,237	0,00	709,627
0,00	0,045	0,00	0,317	0,66	2,244	2,07	15,887	2,35	112,468	0,00	796,214
0,00	0,05	0,00	0,356	0,72	2,518	2,21	17,825	2,27	126,191	0,00	893,367
0,00	0,056	0,00	0,399	0,78	2,825	2,46	20,000	2,18	141,589	0,00	1002,374
0,00	0,063	0,01	0,448	0,8	3,170	2,58	22,440	1,62	158,866	0,00	1124,683
0,00	0,071	0,05	0,502	1,13	3,557	2,93	25,179	1,24	178,250	0,00	1261,915
0,00	0,08	0,08	0,564	1,26	3,991	3,18	28,251	1,21	200,000	0,00	1415,892
0,00	0,089	0,1	0,632	1,3	4,477	3,21	31,698	1,18	224,404	0,00	1588,656
0,00	0,1	0,12	0,71	1,3	5,024	4,22	35,566	1,86	251,785	0,00	1782,502
0,00	0,112	0,15	0,796	1,42	5,637	4,78	39,905	1,28	282,508	0,00	2000,000
0,00	0,126	0,2	0,893	1,45	6,325	4,65	44,774	1,13	316,979		

## APÊNDICE B

**DADOS DE pH, COR, TURBIDEZ, E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA  
PARA AS ÁGUAS A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> E A<sub>3</sub>, ANTES E APÓS TRATAMENTO NO SHC E  
PARA O PERMEADO DO SMC E MEMBRANA DE OI.**

➤ **ÁGUA A<sub>1</sub> (v<sub>2</sub>)**

v <sub>2</sub> = 1,3 m/s e t <sub>2</sub> = 1 h											
	t (min)	A	OF	SMC	OI		t (min)	A	OF	SMC	OI
TURBIDEZ	5	38,1	28,9	1,1	0	COR	5	231	215	54,4	0
	10	36,8	28,1	0,9	0		10	222	192,3	50,3	0
	15	36,5	28,5	0,8	0		15	217	188,7	49,5	0
	20	36,4	26,5	0,6	0		20	203	185	40,7	0
	25	36,6	26,7	0,5	0		25	198	183	48,1	0
	30	36,1	26,4	0,4	0		30	208	176,8	48,2	0
	35	37,3	27,6	0,4	0		35	197	174,4	48,2	0
	40	36,2	25,9	0,5	0		40	198	178,7	48,1	0
	45	35,7	26,7	0,3	0		45	197	172,2	47,7	0
	50	36,1	26,4	0,2	0		50	192	171,7	46,4	0
	55	36,1	25,8	0	0		55	194	170,4	46,1	0
	60	35,3	25,6	0	0		60	191	171,2	46,5	0
	Média	36,4	26,9	0,5	0,0		Média	204	181,6	47,9	0,0

	t (min)	A	OF	SMC	OI		t (min)	A	OF	SMC	OI
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	5	2820	2276	1166,3	331,7	pH	5	8,3	8,1	7,7	7,6
	10	2778	2144	1158,6	322,2		10	8,2	7,9	7,7	7,5
	15	2769	2122	1158,8	324,8		15	8	8	7,8	7,5
	20	2771	2151	1148,8	316,5		20	8,1	7,8	7,6	7,4
	25	2772	2166	1153,1	311,2		25	8,1	7,9	7,5	7,4
	30	2764	2172	1147,2	319,8		30	8,1	7,9	7,6	7,5
	35	2783	2147	1146,4	320,4		35	8,2	7,9	7,5	7,4
	40	2765	2147	1145,6	321,1		40	8,1	7,9	7,4	7,4
	45	2751	2128	1133,2	320,3		45	8,1	7,8	7,5	7,5
	50	2775	2155	1135,4	319,5		50	8,1	7,7	7,5	7,4
	55	2773	2111	1123,3	310,8		55	8	7,7	7,4	7,3
	60	2719	2149	1097,5	300,8		60	7,9	7,6	7,3	7,3
	Média	2770,0	2155,7	1142,9	318,3		Média	8,1	7,9	7,5	7,4

➤ **ÁGUA A<sub>2</sub> (v<sub>2</sub>)**

v <sub>2</sub> = 1,3 m/s e t <sub>2</sub> = 1 h											
	t (min)	A	OF	SMC	OI		t (min)	A	OF	SMC	OI
TURBIDEZ	5	107	103,8	4,5	0	COR	5	193	190	54	0
	10	110	101,8	4,4	0		10	193	189	55	0
	15	112	99,4	3,7	0		15	196	183	51	0
	20	119	98,8	3,4	0		20	203	185	48	0
	25	114	101,1	3,3	0		25	196	178	48,2	0
	30	119	97,8	3,1	0		30	200	185	51	0
	35	118	96,4	3,2	0		35	193	186	49,3	0
	40	117	95,5	3,1	0		40	196	187	48,3	0
	45	116	95,9	3,2	0		45	197	188	47,9	0
	50	115	96,2	3,3	0		50	199	186	45,2	0
	55	114	96,3	3,2	0		55	195	184	44,9	0
	60	112	96,9	3,1	0		60	191	184	43,5	0
Média	114,4	98,3	3,5	0,0	Média	196,0	185,4	48,9	0		

	t (min)	A	OF	SMC	OI		t (min)	A	OF	SMC	OI
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	5	1579	1637	751,3	208,4	pH	5	7,6	7,5	7,5	7,4
	10	1594	1568	748,1	205,1		10	7,6	7,4	7,4	7,4
	15	1581	1533	752,5	202,3		15	7,5	7,4	7,4	7,3
	20	1612	1528	751,3	201,9		20	7,5	7,3	7,3	7,3
	25	1618	1527	749,5	200,6		25	7,4	7,4	7,3	7,3
	30	1627	1524	752,3	202,7		30	7,4	7,4	7,4	7,3
	35	1632	1525	744,9	201,7		35	7,4	7,4	7,4	7,3
	40	1656	1535	748,3	198,5		40	7,5	7,5	7,3	7,4
	45	1659	1591	751,7	199,4		45	7,4	7,4	7,4	7,4
	50	1661	1525	746,8	198,8		50	7,4	7,3	7,3	7,3
	55	1659	1526	747,8	198,4		55	7,3	7,3	7,2	7,3
	60	1670	1512	745,3	197,5		60	7,3	7,3	7,2	7,2
Média	1629,0	1544,3	749,2	201,3	Média	7,4	7,4	7,3	7,3		

➤ **ÁGUA A<sub>3</sub> (v<sub>2</sub>)**

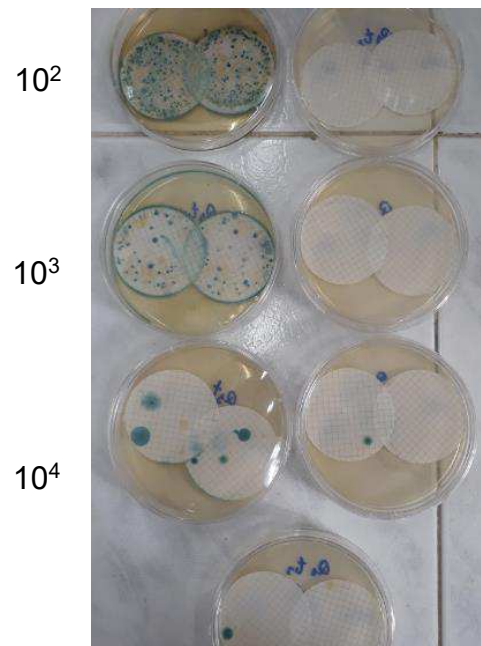
v <sub>2</sub> = 1,3 m/s e t <sub>2</sub> = 1 h										
TURBIDEZ					COR					
t (min)	A	OF	SMC	OI	t (min)	A	OF	SMC	OI	
5	498	465,3	10,2	0	5	658	631	74,6	4	
10	493	447,1	9,8	0	10	649	612	65,8	2	
15	485	443,2	9,1	0	15	654	603	68,2	0	
20	481	432,5	8,6	0	20	649	595	68,4	0	
25	493	419,4	7,9	0	25	651	607	67,2	0	
30	483	401,7	7,8	0	30	646	591	68,7	0	
35	478	380,1	7,6	0	35	662	594	69,6	0	
40	491	365,1	7,4	0	40	655	582	70,3	0	
45	484	348,9	7,1	0	45	660	597	69,2	0	
50	482	407,8	7,3	0	50	646	586	71,7	0	
55	479	357,3	7,3	0	55	654	571	70,3	0	
60	471	344,2	7,1	0	60	657	558	67,6	0	
Média	485	401,1	8,1	0,0	Média	653,4	593,9	69,3	0,5	

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA					pH				
t (min)	A	OF	SMC	OI	t (min)	A	OF	SMC	OI
5	1214	1174	648	393	5	7,62	7,54	7,46	7,41
10	1214	1110	640	357	10	7,59	7,51	7,42	7,4
15	1215	1109	631	334	15	7,56	7,48	7,4	7,38
20	1213	1108	643	376	20	7,42	7,37	7,33	7,29
25	1213	1109	638	293	25	7,45	7,38	7,31	7,3
30	1215	1109	652	285	30	7,46	7,36	7,28	7,27
35	1212	1115	657	252	35	7,43	7,34	7,25	7,24
40	1207	1112	660	272	40	7,42	7,31	7,27	7,27
45	1207	1124	638	252	45	7,34	7,31	7,3	7,23
50	1218	1113	619	246	50	7,33	7,3	7,26	7,28
55	1216	1112	611	244	55	7,32	7,29	7,23	7,23
60	1208	1108	606	249	60	7,3	7,28	7,22	7,21
Média	1212,7	1116,9	636,9	296,1	Média	7,4	7,4	7,3	7,3

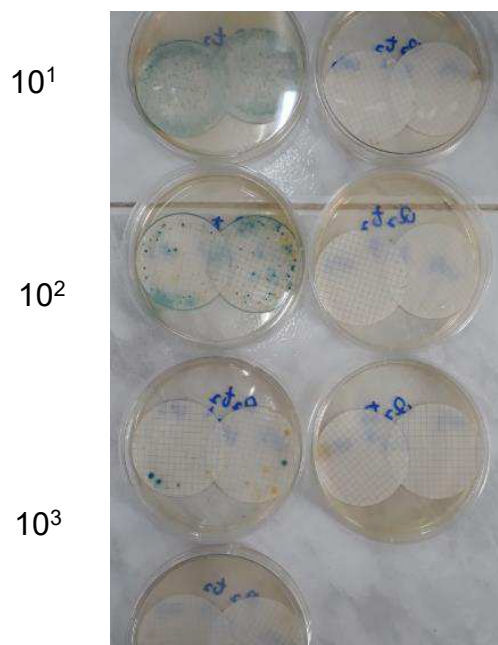
## APÊNDICE C

**RESULTADOS DAS ANÁLISES BACTERIOLÓGICAS PARA A ÁGUA DA FOSSA, ANTES E APÓS TRATAMENTO NO SHC.**

- ❖ Água da alimentação (fossa):  $34 \times 10^3$  UFC. Realizada em duplicata.

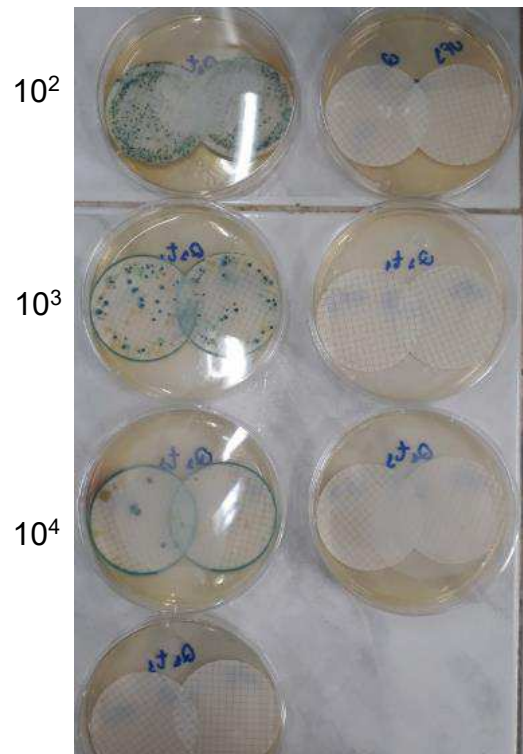


- ❖ Água *Overflow* do SHC:  $39 \times 10^2$ . Realizada em duplicata.





❖ Água do underflow:  $32 \times 10^3$  UFC. Realizada em duplicata.



## APÊNDICE D

**DADOS DE VAZÃO E FLUXO PERMEADO E CONCENTRADO DURANTE A CARACTERIZAÇÃO DAS MEMBRANAS CERÂMICAS COM ÁGUA DESSALINIZADA E APÓS TRATAMENTO PELO SMC (COM SEIS ELEMENTOS DE MEMBRANAS CERÂMICAS DE MICROFILTRAÇÃO EM PARALELO) PARA AS ÁGUAS A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> E A<sub>3</sub>.**

- ❖ Fluxo permeado e concentrado para a MC 1, modelo MR01-20, durante 60 minutos.

Membrana 1						
Permeado			Concentrado			R (%)
t (h)	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	t (h)	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	
0,08	26,02	1800,81	0,08	13,25	917,08	66,3
0,17	24,96	1727,18	0,17	12,12	838,68	67,3
0,25	24,00	1660,75	0,25	11,20	775,02	68,2
0,33	23,34	1615,08	0,33	10,38	718,27	69,2
0,42	22,80	1577,71	0,42	10,18	704,16	69,1
0,50	22,44	1552,80	0,50	10,00	691,98	69,2
0,58	22,05	1525,51	0,58	9,74	673,79	69,4
0,67	21,78	1507,13	0,67	9,57	662,22	69,5
0,75	21,55	1490,98	0,75	9,57	662,45	69,2
0,83	21,29	1473,08	0,83	9,62	665,96	68,9
0,92	21,01	1453,91	0,92	9,73	673,36	68,3
1,00	20,94	1449,00	1,00	9,88	683,67	67,9

- ❖ Fluxo permeado e concentrado para a MC 2, modelo MR01-20, durante 60 minutos.

Membrana 2						
Permeado			Concentrado			R (%)
t (h)	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	t (h)	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	
0,08	21,69	1500,68	0,08	6,75	466,88	76,3
0,17	22,32	1544,49	0,17	6,72	465,01	76,9
0,25	21,68	1500,21	0,25	6,72	465,01	76,3
0,33	20,64	1428,24	0,33	6,72	465,01	75,4
0,42	20,54	1421,60	0,42	6,72	465,01	75,3
0,50	20,00	1383,96	0,50	6,80	470,55	74,6
0,58	19,51	1349,95	0,58	6,86	474,50	74,0
0,67	19,26	1332,75	0,67	6,90	477,46	73,6
0,75	18,99	1313,84	0,75	6,91	477,93	73,3
0,83	18,72	1295,38	0,83	6,96	481,62	72,9
0,92	18,41	1274,25	0,92	6,98	483,13	72,5
1,00	18,26	1263,55	1,00	7,00	484,38	72,3

- ❖ Fluxo permeado e concentrado para a MC 3, modelo MR01-20, durante 60 minutos.

Membrana 3						
Permeado			Concentrado			R (%)
t (h)	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	t (h)	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	
0,08	15,90	1100,50	0,08	8,43	583,60	65,4
0,17	16,32	1129,31	0,17	8,40	581,26	66,0
0,25	16,40	1134,84	0,25	8,33	576,28	66,3
0,33	16,38	1133,46	0,33	8,28	572,96	66,4
0,42	16,37	1132,63	0,42	8,26	571,30	66,5
0,50	16,36	1132,08	0,50	8,20	567,42	66,6
0,58	16,32	1129,31	0,58	8,16	564,65	66,7
0,67	16,26	1125,16	0,67	8,16	564,65	66,6
0,75	16,21	1121,93	0,75	8,16	564,65	66,5
0,83	16,13	1116,02	0,83	8,16	564,65	66,4
0,92	16,10	1114,21	0,92	8,16	564,65	66,4
1,00	16,02	1108,55	1,00	8,16	564,65	66,3

- ❖ Fluxo permeado e concentrado para a MC 4, modelo MR01-20, durante 60 minutos.

Membrana 4						
Permeado			Concentrado			R (%)
t (h)	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	t (h)	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	
0,08	19,76	1367,28	0,08	9,16	633,62	68,3
0,17	19,80	1370,12	0,17	7,56	523,14	72,4
0,25	19,60	1356,28	0,25	7,12	492,69	73,4
0,33	19,62	1357,66	0,33	6,96	481,62	73,8
0,42	19,34	1338,56	0,42	6,86	474,97	73,8
0,50	19,20	1328,60	0,50	6,84	473,31	73,7
0,58	18,93	1309,62	0,58	6,89	476,87	73,3
0,67	18,93	1309,91	0,67	6,96	481,62	73,1
0,75	18,83	1302,76	0,75	7,09	490,84	72,6
0,83	18,72	1295,38	0,83	7,08	489,92	72,6
0,92	18,59	1286,32	0,92	7,13	493,69	72,3
1,00	18,50	1280,16	1,00	7,02	485,77	72,5

- ❖ Fluxo permeado e concentrado para a MC 5, modelo MR01-20, durante 60 minutos.

Membrana 5						
Permeado			Concentrado			R (%)
t (h)	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	t (h)	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	
0,08	19,28	1333,93	0,08	13,25	917,08	59,3
0,17	16,20	1121,00	0,17	13,68	946,63	54,2
0,25	15,44	1068,41	0,25	13,12	907,88	54,1
0,33	14,34	992,30	0,33	13,20	913,41	52,1
0,42	13,49	933,34	0,42	13,20	913,41	50,5
0,50	12,96	896,80	0,50	12,28	849,75	51,3
0,58	12,45	861,22	0,58	11,62	804,28	51,7
0,67	12,00	830,37	0,67	11,22	776,40	51,7
0,75	11,65	806,39	0,75	10,85	751,03	51,8
0,83	11,33	783,87	0,83	10,58	732,39	51,7
0,92	11,08	766,96	0,92	10,36	717,14	51,7
1,00	10,86	751,49	1,00	10,14	701,67	51,7

- ❖ Fluxo permeado e concentrado para a MC 6, modelo MR01-20, durante 60 minutos.

Membrana 6						
Permeado			Concentrado			R (%)
t (h)	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	t (h)	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	
0,08	15,18	1050,47	0,08	9,40	650,29	61,8
0,17	15,36	1062,88	0,17	9,24	639,39	62,4
0,25	15,20	1051,81	0,25	9,12	631,08	62,5
0,33	15,06	1042,12	0,33	9,06	626,93	62,4
0,42	14,88	1029,66	0,42	9,02	624,44	62,3
0,50	14,76	1021,36	0,50	9,00	622,78	62,1
0,58	14,74	1020,17	0,58	8,98	621,59	62,1
0,67	14,61	1010,98	0,67	8,97	620,70	62,0
0,75	14,56	1007,52	0,75	8,96	620,01	61,9
0,83	14,40	996,45	0,83	8,95	619,46	61,7
0,92	14,33	991,92	0,92	8,95	619,01	61,6
1,00	14,26	986,76	1,00	8,94	618,63	61,5

- ❖ Vazão e fluxo permeado e concentrado durante a caracterização do SMC, com seis elementos de MC em paralelo, modelo MR01-20 com água dessalinizada durante 60 minutos.

Caracterização do SMC com seis MC em paralelo, com água dessalinizada					
t (h)	Permeado do SMC		Concentrado do SMC		R (%)
	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	Q (L/h)	J <sub>P</sub> (L/h.m <sup>2</sup> )	
0,08	117,83	8153,58	60,24	4168,5	66,2
0,17	114,96	7954,98	57,72	3994,1	66,6
0,25	112,32	7772,30	55,61	3848,1	66,9
0,33	109,38	7568,86	54,60	3778,2	66,7
0,42	107,42	7433,23	54,24	3753,3	66,4
0,50	105,72	7315,59	53,12	3675,8	66,6
0,58	104,00	7196,57	52,25	3615,6	66,6
0,67	102,84	7116,30	51,78	3583,1	66,5
0,75	101,79	7043,64	51,54	3566,5	66,4
0,83	100,59	6960,61	51,35	3553,3	66,2
0,92	99,52	6886,57	51,31	3550,5	66,0
1,00	98,84	6839,51	51,14	3538,8	65,9

---

**LAUDOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS PARA AS ÁGUAS A<sub>1</sub>,  
A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub> ANTES E APÓS TRATAMENTO NO SMC E MEMBRANA DE OI NAS  
VAZÕES Q<sub>1</sub> E Q<sub>2</sub> DO SHC NO TEMPO DE 1 HORA.**

❖ Para a água A<sub>1</sub>:

1. Alimentação
2. Permeado da MR01-20 (Q<sub>2</sub>)
3. Permeado OI (Q<sub>2</sub>)

❖ Para a água A<sub>2</sub>:

4. Alimentação
5. Permeado da MR01-20 (Q<sub>2</sub>)
6. Permeado OI (Q<sub>2</sub>)

❖ Para a água A<sub>3</sub>:

7. Alimentação
8. Permeado da MR01-20 (Q<sub>2</sub>)
9. Permeado OI (Q<sub>2</sub>)



<b>Laudo Nº.:/2019</b>		Data da Coleta: 20/08/2018
Interessado:		Resp. pela Coleta: <b>Interessado</b>
Município:		Data da Entrega da Amostra:
Localidade:		Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: Alimentação A <sub>1</sub>	Vazão(*):	Data da Análise:

PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (**)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	2323,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	8,1	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	<b>36,4</b>	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	<b>204</b>	15,0
Dureza em Cálcio (Ca <sup>++</sup> ), mg/L	30	---
Dureza em Magnésio (Mg <sup>++</sup> ), mg/L	35,4	---
Dureza Total (CaCO <sub>3</sub> ), mg/L	222,5	500,0
Sódio (Na <sup>+</sup> ), mg/L	<b>314,1</b>	200,0
Potássio (K <sup>+</sup> ), mg/L	10,9	---
Alumínio (Al <sup>3+</sup> ), mg/L	0,00	0,2
Ferro Total, mg/L	<b>0,42</b>	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	204,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	334,0	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	538,0	---
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	41,8	250,0
Fósforo Total, mg/L	0,0	---
Cloreto (Cl <sup>-</sup> ), mg/L	241,4	250,0
Nitrato (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	1,33	10,0
Nitrito (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,054	1,0
Amônia (NH <sub>3</sub> ), mg/L	<b>247,9</b>	1,5
Sílica, mg/L (SiO <sub>2</sub> )	68,3	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	0,72	≤ 0
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	<b>1521,4</b>	1.000,0

(\*)Vazão Informada.

(\*\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 2914/11 MS).

#### LAUDO:

De acordo com os resultados analíticos acima relacionados, esta água **não** se encontra dentro dos padrões de potabilidade no que se refere aos parâmetros físico-químicos.

#### OBSERVAÇÕES:

- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Eng. Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Visto da Coordenação: Prof. Kepler B. França

Data:



<b>Laudo Nº.:/2019</b>		Data da Coleta: 20/08/2018
Interessado:		Resp. pela Coleta: <b>Interessado</b>
Município:		Data da Entrega da Amostra:
Localidade:		Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência:MR01-20 (Q <sub>2</sub> ) A <sub>1</sub>	Vazão(*):	Data da Análise:

PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (**)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	1142,9	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,5	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	0,5	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	<b>47,9</b>	15,0
Dureza em Cálcio (Ca <sup>++</sup> ), mg/L	10,0	---
Dureza em Magnésio (Mg <sup>++</sup> ), mg/L	18,0	---
Dureza Total (CaCO <sub>3</sub> ), mg/L	100,0	500,0
Sódio (Na <sup>+</sup> ), mg/L	86,3	200,0
Potássio (K <sup>+</sup> ), mg/L	6,3	---
Alumínio (Al <sup>3+</sup> ), mg/L	0,00	0,2
Ferro Total, mg/L	0,17	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	78,2	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	71,8	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	150,0	---
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	19,3	250,0
Fósforo Total, mg/L	0,0	---
Cloreto (Cl <sup>-</sup> ), mg/L	88,8	250,0
Nitrato (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,3	10,0
Nitrito (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,006	1,0
Amônia (NH <sub>3</sub> ), mg/L	12,4	1,5
Sílica, mg/L (SiO <sub>2</sub> )	16,4	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,65	≤ 0
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	392,5	1.000,0

(\*)Vazão Informada.

(\*\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 2914/11 MS).

#### LAUDO:

De acordo com os resultados analíticos acima relacionados, esta água **não** se encontra dentro dos padrões de potabilidade no que se refere aos parâmetros físico-químicos.

#### OBSERVAÇÕES:

- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Eng. Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Visto da Coordenação: Prof. Kepler B. França

Data:





<b>Laudo Nº.:/2019</b>		Data da Coleta: 20/08/2018
Interessado:		Resp. pela Coleta: <b>Interessado</b>
Município:		Data da Entrega da Amostra:
Localidade:		Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: OI (Q <sub>2</sub> ) A <sub>1</sub>	Vazão(*):	Data da Análise:

PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (**)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	318,3	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,4	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	0,0	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	0,0	15,0
Dureza em Cálcio (Ca <sup>++</sup> ), mg/L	2,4	---
Dureza em Magnésio (Mg <sup>++</sup> ), mg/L	1,8	---
Dureza Total (CaCO <sub>3</sub> ), mg/L	13,5	500,0
Sódio (Na <sup>+</sup> ), mg/L	39,1	200,0
Potássio (K <sup>+</sup> ), mg/L	0,4	---
Alumínio (Al <sup>3+</sup> ), mg/L	0,0	0,2
Ferro Total, mg/L	0,0	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	32,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	20,0	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	52,0	---
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	3,0	250,0
Fósforo Total, mg/L	0,0	---
Cloreto (Cl <sup>-</sup> ), mg/L	31,2	250,0
Nitrato (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,0	10,0
Nitrito (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,0	1,0
Amônia (NH <sub>3</sub> ), mg/L	<b>5,79</b>	1,5
Sílica, mg/L (SiO <sub>2</sub> )	6,4	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-1,99	≤ 0
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	133,8	1.000,0

(\*)Vazão Informada.

(\*\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 2914/11 MS).

#### LAUDO:

De acordo com os resultados analíticos acima relacionados, esta água **não** se encontra dentro dos padrões de potabilidade no que se refere aos parâmetros físico-químicos.

#### OBSERVAÇÕES:

- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Eng. Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Visto da Coordenação: Prof. Kepler B. França

Data:



<b>Laudo Nº.:/2019</b>		Data da Coleta: 23/11/2018
Interessado:		Resp. pela Coleta: <b>Interessado</b>
Município:		Data da Entrega da Amostra:
Localidade:		Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: Alimentação A <sub>2</sub>	Vazão(*):	Data da Análise:

PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (**)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	1629,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,4	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	<b>114,4</b>	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	<b>196</b>	15,0
Dureza em Cálcio (Ca <sup>++</sup> ), mg/L	95	---
Dureza em Magnésio (Mg <sup>++</sup> ), mg/L	33,0	---
Dureza Total (CaCO <sub>3</sub> ), mg/L	375	500,0
Sódio (Na <sup>+</sup> ), mg/L	133,6	200,0
Potássio (K <sup>+</sup> ), mg/L	3,7	---
Alumínio (Al <sup>3+</sup> ), mg/L	0,00	0,2
Ferro Total, mg/L	0,0	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	160,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	120,0	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	280,0	---
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	78,2	250,0
Fósforo Total, mg/L	0,0	---
Cloreto (Cl <sup>-</sup> ), mg/L	195,3	250,0
Nitrato (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	2,8	10,0
Nitrito (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,21	1,0
Amônia (NH <sub>3</sub> ), mg/L	2,3	1,5
Sílica, mg/L (SiO <sub>2</sub> )	71,4	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	0,26	≤ 0
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	858,0	1.000,0

(\*)Vazão Informada.

(\*\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 2914/11 MS).

#### LAUDO:

De acordo com os resultados analíticos acima relacionados, esta água **não** se encontra dentro dos padrões de potabilidade no que se refere aos parâmetros físico-químicos.

#### OBSERVAÇÕES:

- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Eng. Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Visto da Coordenação: Prof. Kepler B. França

Data: 27/07/2019

<b>Laudo Nº.:/2019</b>		Data da Coleta: 23/11/2018
Interessado:		Resp. pela Coleta: <b>Interessado</b>
Município:		Data da Entrega da Amostra:
Localidade:		Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência:MR01-20 (Q <sub>2</sub> ) A <sub>2</sub>	Vazão(*):	Data da Análise:

PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (**)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	749,2	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,3	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	3,5	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	<b>48,9</b>	15,0
Dureza em Cálcio (Ca <sup>++</sup> ), mg/L	45,0	---
Dureza em Magnésio (Mg <sup>++</sup> ), mg/L	11,4	---
Dureza Total (CaCO <sub>3</sub> ), mg/L	160,0	500,0
Sódio (Na <sup>+</sup> ), mg/L	69,3	200,0
Potássio (K <sup>+</sup> ), mg/L	2,4	---
Alumínio (Al <sup>3+</sup> ), mg/L	0,0	0,2
Ferro Total, mg/L	0,0	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	76,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	24,0	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	100,0	---
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	42,5	250,0
Fósforo Total, mg/L	0,0	---
Cloreto (Cl <sup>-</sup> ), mg/L	113,6	250,0
Nitrato (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,35	10,0
Nitrito (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,033	1,0
Amônia (NH <sub>3</sub> ), mg/L	0,25	1,5
Sílica, mg/L (SiO <sub>2</sub> )	11,4	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,57	≤ 0
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	371,2	1.000,0

(\*)Vazão Informada.

(\*\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 2914/11 MS).

#### LAUDO:

De acordo com os resultados analíticos acima relacionados, esta água **não** se encontra dentro dos padrões de potabilidade no que se refere aos parâmetros físico-químicos.

#### OBSERVAÇÕES:

- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Eng. Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Visto da Coordenação: Prof. Kepler B. França

Data:



<b>Laudo Nº.:/2019</b>		Data da Coleta: 23/11/2018
Interessado:		Resp. pela Coleta: <b>Interessado</b>
Município:		Data da Entrega da Amostra:
Localidade:		Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: OI (Q <sub>2</sub> ) A <sub>2</sub>	Vazão(*):	Data da Análise:

PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (**)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	201,3	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,3	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	0,0	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	0,0	15,0
Dureza em Cálcio (Ca <sup>++</sup> ), mg/L	4,2	---
Dureza em Magnésio (Mg <sup>++</sup> ), mg/L	2,5	---
Dureza Total (CaCO <sub>3</sub> ), mg/L	21,0	500,0
Sódio (Na <sup>+</sup> ), mg/L	16,0	200,0
Potássio (K <sup>+</sup> ), mg/L	0,1	---
Alumínio (Al <sup>3+</sup> ), mg/L	0,0	0,2
Ferro Total, mg/L	0,0	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	0,8	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	8,0	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	8,8	---
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	10,5	250,0
Fósforo Total, mg/L	0,0	---
Cloreto (Cl <sup>-</sup> ), mg/L	24,1	250,0
Nitrato (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,14	10,0
Nitrito (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,015	1,0
Amônia (NH <sub>3</sub> ), mg/L	0,09	1,5
Sílica, mg/L (SiO <sub>2</sub> )	0,7	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-2,59	≤ 0
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	68,6	1.000,0

(\*)Vazão Informada.

(\*\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 2914/11 MS).

#### LAUDO:

De acordo com os resultados analíticos acima relacionados, esta água **não** se encontra dentro dos padrões de potabilidade no que se refere aos parâmetros físico-químicos.

#### OBSERVAÇÕES:

- 1- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- 2- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Eng. Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Visto da Coordenação: Prof. Kepler B. França

Data:


**LABDES**

Laboratório de Referência em Dessalinização

<b>Laudo N°.:/2019</b>		Data da Coleta: 04/04/2019
Interessado:		Resp. pela Coleta: <b>Interessado</b>
Município:		Data da Entrega da Amostra:
Localidade:		Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: Alimentação A <sub>3</sub>	Vazão(*):	Data da Análise:

PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (**)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	1212,7	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,4	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	<b>485,0</b>	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	<b>653,4</b>	15,0
Dureza em Cálcio ( $\text{Ca}^{++}$ ), mg/L	60,0	---
Dureza em Magnésio ( $\text{Mg}^{++}$ ), mg/L	24,0	---
Dureza Total ( $\text{CaCO}_3$ ), mg/L	250,0	500,0
Sódio ( $\text{Na}^+$ ), mg/L	110,3	200,0
Potássio ( $\text{K}^+$ ), mg/L	2,2	---
Alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ), mg/L	0,0	0,2
Ferro Total, mg/L	0,00	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L ( $\text{CaCO}_3$ )	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L ( $\text{CaCO}_3$ )	154,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L ( $\text{CaCO}_3$ )	86,0	---
Alcalinidade Total, mg/L ( $\text{CaCO}_3$ )	240,0	---
Sulfato ( $\text{SO}_4^{-}$ ), mg/L	35,0	250,0
Fósforo Total, mg/L	0,0	---
Cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), mg/L	133,1	250,0
Nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ), mg/L	1,13	10,0
Nitrito ( $\text{N-NO}_2^-$ ), mg/L	0,129	1,0
Amônia ( $\text{NH}_3$ ), mg/L	1,44	1,5
Silica, mg/L ( $\text{SiO}_2$ )	50,7	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	0,01	$\leq 0$
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	615,4	1.000,0

(\*)Vazão Informada.

(\*\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 2914/11 MS).

**LAUDO:**

 De acordo com os resultados analíticos acima relacionados, esta água **não** se encontra dentro dos padrões de potabilidade no que se refere aos parâmetros físico-químicos.

**OBSERVAÇÕES:**

- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Eng. Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Visto da Coordenação: Prof. Kepler B. França

Data:



<b>Laudo Nº.:/2019</b>		Data da Coleta: 04/04/2019
Interessado:		Resp. pela Coleta: <b>Interessado</b>
Município:		Data da Entrega da Amostra:
Localidade:		Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência:MR01-20 (Q <sub>2</sub> ) A <sub>3</sub>	Vazão(*):	Data da Análise:

PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (**)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	636,9	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,3	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	<b>8,1</b>	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	<b>69,3</b>	15,0
Dureza em Cálcio (Ca <sup>++</sup> ), mg/L	31,8	---
Dureza em Magnésio (Mg <sup>++</sup> ), mg/L	10,9	---
Dureza Total (CaCO <sub>3</sub> ), mg/L	125,0	500,0
Sódio (Na <sup>+</sup> ), mg/L	34,9	200,0
Potássio (K <sup>+</sup> ), mg/L	1,2	---
Alumínio (Al <sup>3+</sup> ), mg/L	0,0	0,2
Ferro Total, mg/L	0,0	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	64,8	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	32,0	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	96,8	---
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	16,3	250,0
Fósforo Total, mg/L	0,0	---
Cloreto (Cl <sup>-</sup> ), mg/L	63,9	250,0
Nitrato (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,14	10,0
Nitrito (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,008	1,0
Amônia (NH <sub>3</sub> ), mg/L	0,17	1,5
Sílica, mg/L (SiO <sub>2</sub> )	8,4	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,72	≤ 0
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	245,7	1.000,0

(\*)Vazão Informada.

(\*\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 2914/11 MS).

**LAUDO:**

De acordo com os resultados analíticos acima relacionados, esta água **não** se encontra dentro dos padrões de potabilidade no que se refere aos parâmetros físico-químicos.

**OBSERVAÇÕES:**

- 1- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- 2- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Eng. Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Visto da Coordenação: Prof. Kepler B. França

Data:



<b>Laudo Nº.:/2019</b>		Data da Coleta: 04/04/2019
Interessado:		Resp. pela Coleta: <b>Interessado</b>
Município:		Data da Entrega da Amostra:
Localidade:		Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: OI (Q <sub>2</sub> ) A <sub>3</sub>	Vazão(*):	Data da Análise:

PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (**)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	296,1	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,3	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	0,0	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	0,5	15,0
Dureza em Cálcio (Ca <sup>++</sup> ), mg/L	6,0	---
Dureza em Magnésio (Mg <sup>++</sup> ), mg/L	1,1	---
Dureza Total (CaCO <sub>3</sub> ), mg/L	19,5	500,0
Sódio (Na <sup>+</sup> ), mg/L	19,8	200,0
Potássio (K <sup>+</sup> ), mg/L	0,3	---
Alumínio (Al <sup>3+</sup> ), mg/L	0,0	0,2
Ferro Total, mg/L	0,0	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	24,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	4,0	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	28,0	---
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	2,7	250,0
Fósforo Total, mg/L	0,0	---
Cloreto (Cl <sup>-</sup> ), mg/L	21,3	250,0
Nitrato (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,18	10,0
Nitrito (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ), mg/L	0,01	1,0
Amônia (NH <sub>3</sub> ), mg/L	0,05	1,5
Sílica, mg/L (SiO <sub>2</sub> )	1,4	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-1,93	≤ 0
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	72,2	1.000,0

(\*)Vazão Informada.

(\*\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 2914/11 MS).

#### LAUDO:

De acordo com os resultados analíticos acima relacionados, esta água **não** se encontra dentro dos padrões de potabilidade no que se refere aos parâmetros físico-químicos.

#### OBSERVAÇÕES:

- 1- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- 2- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Eng. Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Visto da Coordenação: Prof. Kepler B. França

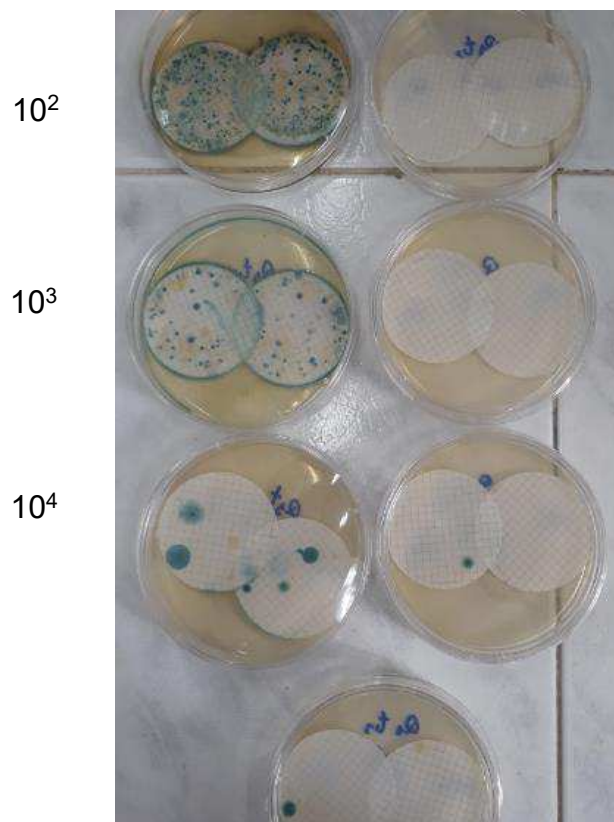
Data:

---

**DADOS DAS ANÁLISES BACTERIOLÓGICAS (CONTAGEM EM PLACAS DE PETRI), ANTES E APÓS TRATAMENTO PELO SMC E MEMBRANA DE OI, PARA AS ÁGUAS A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub>.**

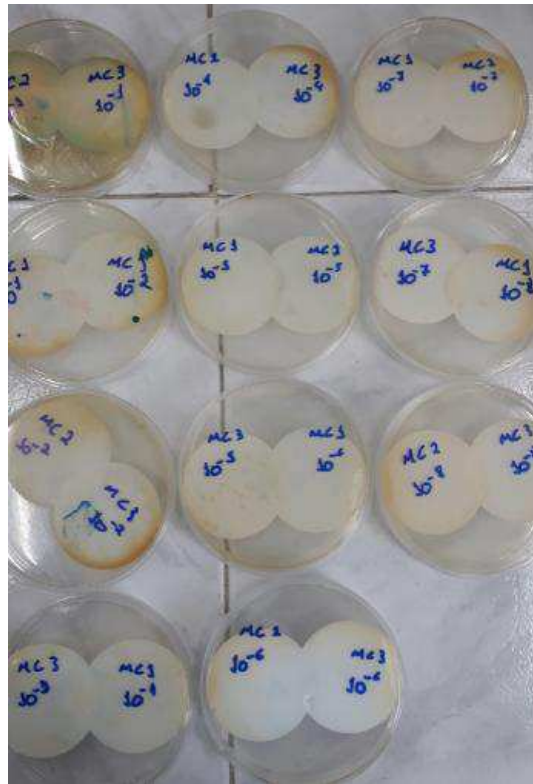
❖ *Água A<sub>1</sub>/UFCG*

- ✓ Concentração de bactérias termotolerantes (*Escherichia coli*) na água da alimentação:  $34 \times 10^3$  UFC. Realizadas em duplicata

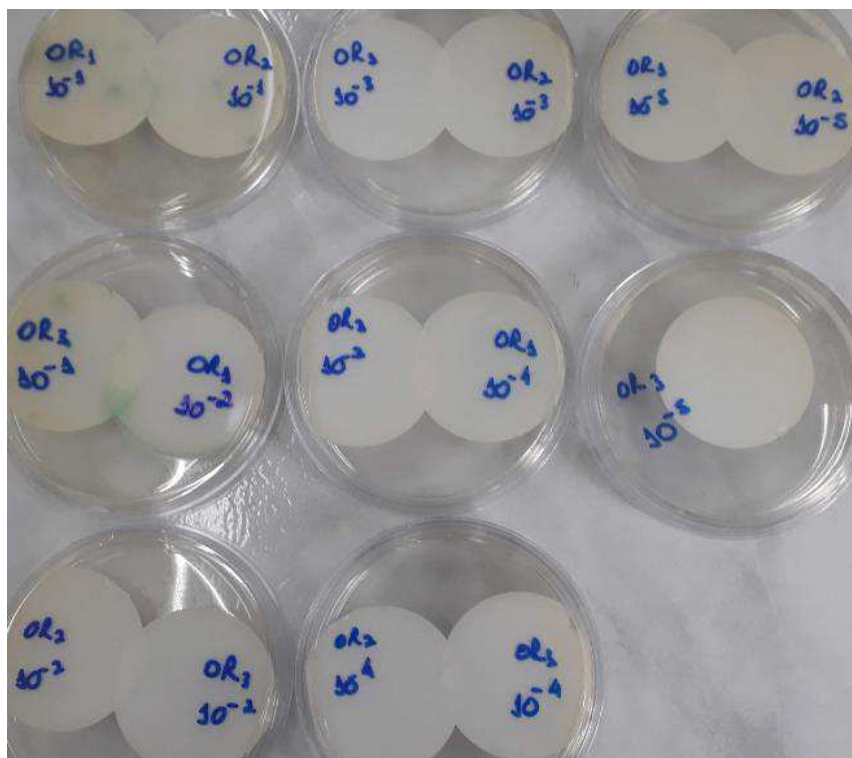




- ✓ Concentração de bactérias termotolerantes (*Escherichia coli*) para o permeado do SMC: 0 UFC. Realizada em triplicata.

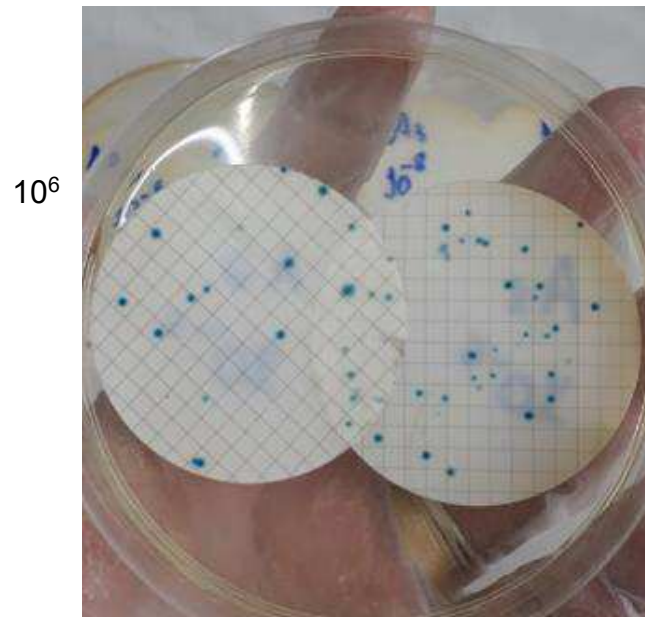


- ✓ Concentração de bactérias termotolerantes (*Escherichia coli*) para o permeado da membrana de OI: 0 UFC. Realizada em triplicata.

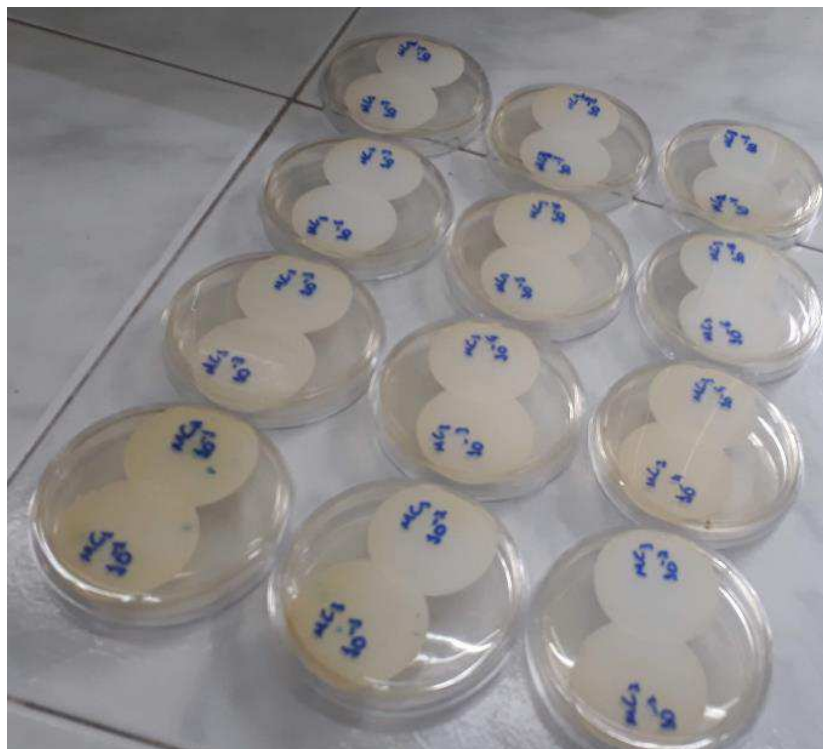


❖ Água A<sub>2</sub>/UFCG

- ✓ Concentração de bactérias termotolerantes (*Escherichia coli*) na água da alimentação:  $38 \times 10^6$  UFC. Realizadas em duplicata



- ✓ Concentração de bactérias termotolerantes (*Escherichia coli*) para o permeado do SMC: 0 UFC. Realizada em triplicata.



- ✓ Concentração de bactérias termotolerantes (*Escherichia coli*) para o permeado da membrana de OI: 0 UFC. Realizada em triplicata.

