



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS I CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL**

**RAILSON DE OLIVEIRA RAMOS**

**AValiação de membranas cerâmicas como pré tratamento para  
processos de produção de água ultra purificada**

**CAMPINA GRANDE  
2015**

**RAILSON DE OLIVEIRA RAMOS**

**AVALIAÇÃO DE MEMBRANAS CERÂMICAS COMO PRÉ TRATAMENTO PARA  
PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE ÁGUA ULTRA PURIFICADA**

Trabalho de Conclusão do Curso da  
Universidade Estadual da Paraíba, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Química Industrial.  
Área de concentração: Ciências Exatas e  
Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Márcia Isabel Cirne  
França

**CAMPINA GRANDE  
2015**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

R175a Ramos, Railson de Oliveira.

Avaliação de membranas cerâmicas como pré tratamento para processo de produção de água ultra pura [manuscrito] / Railson De Oliveira Ramos. - 2015.

31 p. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.

"Orientação: Profa. Dra. Marcia Izabel Cirne França, Departamento de Química".

1. Membrana cerâmica. 2. Filtração. 3. Água purificada. I.  
Título.

21. ed. CDD 628.3

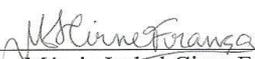
RAILSON DE OLIVEIRA RAMOS

AVALIAÇÃO DE MEMBRANAS CERÂMICAS COMO PRÉ TRATAMENTO PARA  
PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE ÁGUA ULTRA PURIFICADA

Trabalho de Conclusão do Curso da  
Universidade Estadual da Paraíba, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Química Industrial.  
Área de concentração: Ciências Exatas e  
Tecnologia.

Aprovada em: 12/06/2015.

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Márcia Isabel Cirne França (Orientador)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Kepler Borges França (PhD).  
Universidade Federal de Campina Grande(UFCG)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Wilton Silva Lopes (PhD)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Ao meu DEUS, pela fidelidade, DEDICO.

À professora Márcia Cirne pela orientação e pela dedicação.

Aos meus familiares, pela força que me deram, pela educação e pelos exemplos de honestidade.

Aos professores do Curso da UEPB, em especial, Socorro Marques e Wilton Silva, que contribuíram ao longo desses anos, por meio das disciplinas e debates, para o desenvolvimento de pesquisas.

Ao professor da UFCG Kepler França, pela instrução no desenvolvimento desta pesquisa no LABEDES.

Ao professor da UEPB Wilton Lopes, pela contribuição na avaliação deste trabalho, e por toda compreensão e generosidade.

Aos funcionários do LABDES, João e Iago, pela presteza e atendimento quando nos foi necessário.

Aos colegas de classe pelos momentos de amizade e apoio.

## RESUMO

A água é um subsídio indispensável para atividade humana, e a fixação do homem em uma determina região está intimamente ligada à disponibilidade quantitativa e qualitativa deste bem. O tratamento convencional da água para abastecimento público visa enquadrar a água nos padrões de potabilidade para consumo humano, porém, ainda que potável este produto não atende os requisitos para usos mais refinados, como hemodiálise, uso em laboratórios de análise físico-química e biológica, abastecimento de caldeiras, produção de bebidas, entre outros. Neste sentido, grande atenção tem se dado as novas tecnologias de purificação de água, dentre as quais, pode-se citar a osmose inversa, deionização, processos oxidativos avançados e processos de filtração com membranas. As membranas são amplamente empregadas em processos de separação na indústria química, metalúrgica, têxtil e de papel, em aplicações farmacêuticas e de biotecnologias, no tratamento de efluentes industriais e residenciais, na reciclagem e no processamento de alimentos e de bebidas, e sua aplicação na filtragem de água é largamente explorada em função dos benefícios oferecidos. Este trabalho compreendeu a projeção e construção de um sistema em escala piloto para avaliar o desempenho de duas membranas cerâmicas produzidas pelo LABCEM-LABDES-UFCG, identificadas pelos nomes MC10 e MC20, na filtração de água, visando obter melhor recuperação e qualidade da água para alimentar sistemas de purificação que requerem água com parâmetros mais abrandados. As membranas são refis cilíndricos ocos de diâmetro externo 25 mm e altura de 150 mm, que foram acopladas em copos de filtro, e permearam a água de alimentação de fora para dentro, em sistema "Dead End.". O estudo foi desenvolvido variando as pressões de operação sobre a membrana, e observando-se as taxas de permeado. Para cada valor de taxa obtido foram feitas análises físico-químicas do permeado para testes da eficiência. Os experimentos mostraram que o sistema piloto projetado e construído atendeu todas as expectativas de funcionamento e facilidade de operação, podendo ser aplicado em sistemas de purificação na remoção de cor e turbidez. O estudo dos resultados obtidos para membrana MC20 indicaram que ela pode ser aplicada em sistemas que necessitam de fluxo de permeado de até 209 L/h, operando em baixa pressão (0,9 bar), podendo fornecer percentuais de remoção de cor e turbidez provocados por material em suspensão, em torno de 66% e 41% respectivamente, para valores de entrada de 6,7 Pt/CO e 1,80 NTU ou superiores. A MC10 operando sob a pressão de 0,9 bar forneceu uma taxa de permeado 11,8 L/h e apresentou remoções de cor e turbidez, de 81% e 71% de valores iniciais de 6,7 Pt/CO e 1,8 NTU respectivamente. Os resultados da MC10 apontam que ela pode empregada no pré tratamento para alimentação de destiladores e sistema de deionização de laboratório. O estudo também apontou que um sistema de filtração seriado com estas duas membranas, com a MC20 antecedendo a MC10 pode operar com intervalos de lavagem maiores e percentuais de remoção melhores que os encontrados.

**Palavras-Chave:** Membrana Cerâmica; filtração; Água purificada.

## ABSTRACT

Water is an essential subsidy to human activity, and to keep workers in a determined region is closely linked to quantitative and qualitative availability of this well. The conventional treatment for public water supply is aimed at framing the water in the potability standards for human consumption, however, that even drinking this product does not meet the requirements for more sophisticated uses, such as hemodialysis, use of physical-chemical and biological analysis laboratories, supply boilers, production of beverages, among others. In this sense, great attention has been given new water purification technologies, among which may be mentioned reverse osmosis, deionização, advanced oxidation processes and filtration processes with membranes. The membranes are widely used in separation processes in the chemical industry, metal, textiles and paper, in pharmaceutical and biotechnology applications, the treatment of industrial and residential waste, recycling and processing of food and drink, and their application in water filtering is widely exploited in terms of benefits offered. This work was realized the projection and construction of a system on a pilot scale to evaluate the performance of two ceramic membranes produced by LABCEN -LABDES-UFCG, identified by names MC10 and MC20, water filtration, to obtain better recovery and water quality to feed water purification systems that require more parameters softened. The membranes are hollow cylindrical refill outer diameter 25 mm and height of 150 mm which were attached on filter cup, and the permeated water supply from outside to inside in system 'Dead End'. The study was conducted by varying the operating pressure on the membrane, and observing permeated rates. For each obtained rate of value were made physicochemical analysis of the permeate to the efficiency tests. The experiments showed that the pilot system designed and built attended all operating expectations and ease of operation and can be applied in purification systems for the removal of color and turbidity. The study of the results obtained for MC20 membrane indicated that it can be applied in systems that require permeate flow up to 209 L / h, operating under low pressure (0.9 bar) and can provide color removal percentage and caused turbidity a suspension material, around 66% and 41% respectively for the input values of 6.7 Pt / CO and 1.80 NTU or higher. The MC10 operating under the pressure of 0.9 bar gave a permeate rate of 11.8 L / h showed turbidity and color removal was 81% and 71% of initial values of 6.7 Pt / CO, and 1.8 NTU respectively. The results indicate that it may MC10 employed in pretreatment for distiller feed and laboratory deionização system. The study also showed a series of filtration system with these two membranes with the preceding MC20 to MC10 can operate with larger washing ranges and percentages of removal that best matches.

Keywords: Ceramic Membrane; filtration; Purified water.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Esquemática de permeado e concentrado em membrana filtrante.....	16
Figura 2 –	Escoamento <i>crossflow</i> (A) e <i>dead-end</i> (B) e membranas.....	19
Figura 3 –	Comportamento do fluxo de permeado (F) para solução e para solvente puro, sob uma pressão trans-membrânica.....	20
Figura 4 –	Planta com vista frontal do sistema em escala piloto.....	21
Figura 5 –	Sistema piloto montado em bancada.....	22
Figura 6 –	Montagem do filtro de membrana cerâmica.....	23
Figura 7 –	Fluxo de permeado em função da pressão de operação para a membrana MC20	24
Figura 8 –	Plotagem da remoção de cor e turbidez em função do aumento da pressão na membrana MC20, para valores de alimentação de 6,5 e 1,75 respectivamente.....	25
Figura 9 –	Fluxo de permeado em função da pressão da membrana MC10.....	26
Figura 10 –	Plotagem da remoção de cor e turbidez em função do aumento da pressão na membrana MC20 respectivamente de 6,7 Pt/CO e 1,80 NTU.....	27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Parâmetros, equipamentos e métodos utilizados nas análises.....	23
Tabela 2 –	Valores de Fluxo de permeado, remoção de cor e turbidez para membrana MC20 para valores de entrada, respectivamente, de 6,5 Pt/CO e 1,759 NTU.....	25
Tabela 3 –	Valores de Fluxo de permeado, remoção de cor e turbidez para membrana MC10, para valores, respectivamente de 6,7 Pt/CO e 1,80 NTU.....	27
Tabela 4 –	Valores experimentais, e análises físico-químicas para membrana MC20.	33
Tabela 5 –	Valores experimentais, e análises físico-químicas para membrana MC10.	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETA	Estação de Tratamento de Água
NCCLS	Comitê Nacional para Padrões de Laboratórios Clínicos
CAP	Colegiado dos Patologistas Americanos
AAMI	Associação para o Avanço da Instrumentação Médica
ASTM	Sociedade Americana para Ensaios e Materiais
OMS	Organização Mundial de Saúde
UH	Hazen
NTU	Unidade de Turbidez
LABDES	Laboratório de Referencia em Dessalinização
UAEQ	Unidade Acadêmica de Engenharia Química
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
PVC	Cloreto de Polivinila

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>01</b>	Calculo de fluxo onde o fluxo (F), que equivale a vasão (Q) por unidade de área (A) da membrana.....	<b>19</b>
<b>2</b>	Área lateral de um cilindro reto.....	<b>24</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu\text{m}$	Micrometro
nm	Nanômetro
bar	Equivale a pressão de 1, 01325 atmosferas.
F	Fluxo
Q	Vazão
A	Área
%	Percentual
H <sup>+</sup>	Próton de hidrogênio
OH <sup>-</sup>	Hidroxila
<	Menor que
pH	Potencial Hidrogeniônico
$\frac{1}{4}$	Uma parte em quatro
$\frac{1}{2}$	Uma parte em duas
in	Polegada
L	Litros
ml	Mililitros
mim	Minutos
$\pi$	3,14159
R	Raio da circunferência
<i>h</i>	Altura
*	Operação matemática de multiplicação
/	Operação matemática de divisão

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Membranas.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.1</b>	<i>Definição e principio.....</i>	<b>16</b>
<b>3.1.2</b>	<i>Histórico.....</i>	<b>17</b>
<b>3.1.3</b>	<i>Classificação.....</i>	<b>18</b>
<b>3.1.3.1</b>	<i>Materiais.....</i>	<b>18</b>
<b>3.1.3.2</b>	<i>Estrutura.....</i>	<b>18</b>
<b>3.1.3.4</b>	<i>Configuração.....</i>	<b>18</b>
<b>3.1.3.5</b>	<i>Métodos de produção.....</i>	<b>18</b>
<b>3.1.3.6</b>	<i>Regime de separação.....</i>	<b>18</b>
<b>3.1.3.7</b>	<i>Aplicação.....</i>	<b>18</b>
<b>3.1.4</b>	<i>Tipos de escoamento.....</i>	<b>18</b>
<b>3.1.5</b>	<i>Aplicação de membrana cerâmica .....</i>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1</b>	<b>Montagem do sistema.....</b>	<b>21</b>
<b>4.2</b>	<b>Montagem do filtro de membrana cerâmica.....</b>	<b>22</b>
<b>4.3</b>	<b>Execução do experimento.....</b>	<b>23</b>
<b>4.3.1</b>	<i>Água de estudo.....</i>	<b>23</b>
<b>4.3.2</b>	<i>Estudo da fluxo de filtração em função da pressão.....</i>	<b>23</b>
<b>4.3.4</b>	<i>Amostragem e parâmetros analisados.....</i>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUÇÕES.....</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>28</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>30</b>
<b>9</b>	<b>ANEXO I.....</b>	<b>31</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

A fixação do homem em uma determinada região está intimamente ligada à disponibilidade quantitativa e qualitativa da água, pois este bem é um subsídio indispensável para atividade humana. Um dos serviços que compreende a atuação do saneamento básico é o tratamento da água para abastecimento público, que visa enquadrar a água nos padrões de potabilidade para consumo humano. As grandes maiorias das empresas que desenvolvem estes tratamentos executam o processo por estações de tratamento convencionais, que em suas etapas de operação objetivam a distribuição de água dentro dos padrões de potabilidade. Ainda que potável este produto não atenda os requisitos para usos mais refinados, como hemodiálise, uso em laboratórios de análise físico-química e biológicas, abastecimento de caldeiras, produção de bebidas, entre outros. Neste sentido, grande atenção tem se dado as novas tecnologias de purificação de água, dentre as quais, pode-se citar a osmose inversa, deionização, processos oxidativos avançados e processos de filtração com membranas.

As membranas são amplamente empregadas em processos de separação na indústria química, metalúrgica, têxtil e de papel, em aplicações farmacêuticas e de biotecnologias, no tratamento de efluentes industriais e residenciais, na reciclagem e no processamento de alimentos e de bebidas. Diversos estudos têm demonstrado que a utilização das membranas cerâmicas apresenta vantagens em relação às poliméricas, principalmente no que se refere à inércia química, estabilidade biológica e resistência a altas temperaturas e pressões.

Outro ponto importante é a vantagem que as membranas cerâmicas apresentam em relação aos métodos tradicionais de separação (filtros rotativos a vácuo, destilação, centrifugação, etc.), tais como: baixo consumo de energia, vida útil longa, ocupação de pouco espaço físico, facilidade de limpeza, significativo aumento do rendimento do produto, redução de mão-de-obra e de custos de manutenção. Entretanto, as membranas cerâmicas apresentam a desvantagem no alto custo de fabricação, devido ao transporte e ao custo das matérias-primas que são importadas e sintéticas do tipo: zircônia, alumina, titânia e sílica. Considerando que a região Nordeste do Brasil, principalmente os Estados da Paraíba e de Pernambuco, possui grandes reservas de matérias-primas para produção de cerâmica, essas fontes poderão cooperar fortemente na minimização dos custos de produção de membranas cerâmicas.

Este trabalho buscou desenvolver um estudo de membranas cerâmicas, utilizando dois tipos de membrana produzidos pelo LABCEN-UFPE, para estudar se tais membranas podem ser aplicadas no pré-tratamento de água, para abastecer sistemas que requerem uma alimentação mais purificada, como requeridos na hemodiálise, destiladores, deionizadores, mas também levantar informações que norteiem estudos para aplicação de tais membranas em indústria de alimentos, bebidas, uso doméstico, etc.

## **2 OBJETIVO**

Desenvolver e avaliar um sistema em escala piloto, na purificação de água, constituído por membrana cerâmica.

### **2.1 Objetivos específicos:**

- Desenvolver e montar um sistema piloto que será usado na execução do trabalho
- Estudar o comportamento das membranas para diferentes condições de pressão, bem como, estudar a taxa de filtração (fluxo de permeado) em função da pressão.
- Estudar a capacidade de remoção de cor e turbidez destas membranas, comparar as taxas de permeado e os percentuais de remoção de cor e turbidez em função da composição da membrana.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Sistema de abastecimento de água caracteriza-se pela retirada de água da natureza, seguido pela adequação de sua quantidade, tratamento, transporte até os aglomerados humanos e fornecimento às populações em quantidade e qualidade compatível com as necessidades. Nas Estações de Tratamento de águas de abastecimento (ETAs) do Brasil, as técnicas de tratamento de água mais usadas são denominadas de tratamento convencional (ou de ciclo completo) e a filtração direta, embora outras, como a filtração lenta, a flotação e a filtração em membrana também sejam empregadas, mas em poucas ETAs (PADUÁ e HELLER, 2006).

A água tratada nestas estações e destinada ao abastecimento público deve atender aos padrões de potabilidade da Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde. Ainda que obedecendo aos padrões de potabilidade, a água não tem pureza suficiente para aplicações específicas como o uso para banhos de hemodiálise, na indústria farmacêutica, em laboratórios, na produção de equipamentos eletrônicos, em sistemas de refrigeração, e em varias outras aplicações que exigem uso de água purificada.

Segundo BREDA (2001), visando suprir a crescente sensibilidade impostas em suas pesquisas, várias organizações profissionais têm estabelecido padrões de qualidade de água. Nos Estados Unidos, tem-se a referencia do National Committee for Clinical Laboratory Standards (NCCLS - Comitê Nacional para Padrões de Laboratórios Clínicos), também do College of American Pathologists (CAP - Colegiado dos Patologistas Americanos), a Association for Advancement of Medical Instrumentation (Associação para o Avanço da Instrumentação Médica- AAMI) e da American Society for Testing and Materials (ASTM - Sociedade Americana para Ensaio e Materiais); a nível internacional, pode-se citar, entre outros, a Organização Mundial de Saúde (OMS) e órgãos específicos da Comunidade Econômica Européia.

Na purificação de águas de abastecimento público para fins específicos, as tecnologias atualmente empregadas dispõem da utilização de vários processos de purificação de água, sejam eles isolados ou combinados, que dependerá das características iniciais da água de alimentação, e das características esperadas na água produto. Dentre os principais processos observa-se: adsorção em carvão ativado, deionização; filtração; e ultrafiltrarão.

O emprego de carvão ativado: compreende um Processo Oxidativo Avançado bastante empregado na atualidade, onde, por quimiosorção, pode-se remover da água cloro residual livre e substâncias orgânicas dissolvidas como toxinas de algas. Filtros de carvão são largamente comercializados na forma de copos e refis, e acoplados a sistemas de purificação como pré-tratamento.

A deionização: geralmente é feita por resinas trocadoras de íons, em um processo conhecido por desmineralização. FRANÇA (2014) descreve que estas resinas são copolímeros de poliestireno, um catiônico fortemente ácido operado no formato hidrogênio (H), e outro aniônico fortemente básico operado no formato OH. Essas resinas são produzidas e comercializadas nos formatos sódio – Na (catiônica) e cloro – Cl (aniônica). Quando aplicadas na deionização as resinas catiônicas apresentam uma forte atração por átomos de cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Portanto, a troca iônica acontece pelo hidrogênio (H) até então instalado na resina. Outros cátions como sódio (Na), potássio (K) e ferro (Fe) também ficam retidos na resina. Já as resinas aniônicas têm uma forte atração por ânions, como os dos Cloretos (Cl), e a troca iônica acontece com a hidroxila (OH) da resina.

A Microfiltração: compreende um processo de separação por emprego de membranas com porosidade de 0,05 a 5,0  $\mu\text{m}$ , e por isso se aproxima dos processos de filtração básica. É indicado para retenção de materiais em suspensão e emulsão e é operado em pressões inferiores a 2 bar (FRANÇA 2009). Por reter partículas de tamanho superior a sua porosidade, estas membranas são empregadas no abrandamento de turbidez e cor aparente, e tem sido aplicada como pré-tratamento em sistemas de osmose inversa.

Ultrafiltração: é um processo de separação por membranas de porosidade 3,0 nm a 50,0 nm aonde as pressões de operação vão de 2,0 a 10,0 bar. Aplica-se quando se deseja purificar e fracionar soluções contendo moléculas. Este tipo de filtração aproxima-se da osmose inversa uma vez que, ambas necessitam de agitação na interface fluido/membrana limitando a polarização do contato (HEBERT et. al., 1997).

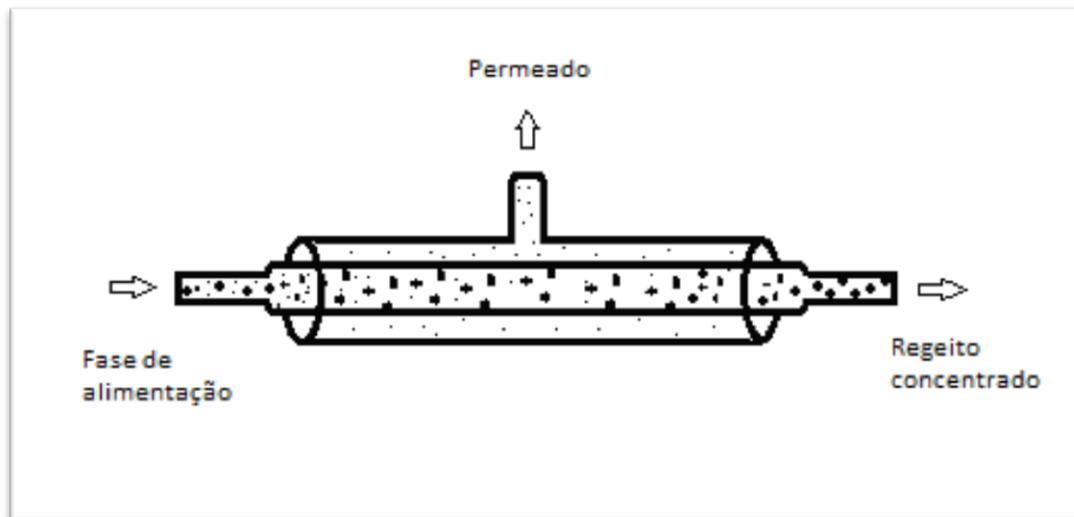
### **3.1 Membranas:**

#### ***3.1.1 Definição e princípio***

Membrana é uma barreira seletiva entre duas fases, que, sob ação de uma força motriz permite a passagem de uma ou mais espécies selecionadas da fase de alimentação, a qual é uma mistura de caráter líquido gasoso ou solução (ANADÃO, 2010).

Uma força motriz empurra a fase de alimentação sobre a membrana que permite a passagem apenas de uma ou mais fases: o permeado. As espécies retidas pela membrana constituem o concentrado, como se pode observar na Figura 1.

FIGURA 1: Esquematização de permeado e concentrado em membrana filtrante (FONTE: Própria).



### 3.1.2 Histórico

Os primeiros relatos de fenômenos membranológicos apontam para o século XVIII, quando o francês Abbé Nolet observou a difusão da água para o vinho através de uma bexiga de origem animal, onde, a membrana era mais permeável à água que ao vinho, o que se comprovou pelo inchaço da bexiga até seu estouro. Nos anos seguintes bexigas de peixe e porco continuaram a ser empregadas nos estudos de difusão, e em 1855 Fick publicou leis fenomenológicas sobre difusão que ainda são utilizadas nos dias atuais. Fick também desenvolveu a primeira membrana artificial por uma mistura de nitrato de celulose, éter e álcool chamado colódio.

Em 1887 van'tHoff utilizou membranas produzidas por Traube e Pfeffer para explicar o comportamento de soluções diluídas ideais, desenvolvendo a lei limite. Já no século XX, em 1906 Bechhold desenvolveu técnicas para controlar o tamanho dos poros das membranas de colódio, e em 1911 Donan realizou estudos sobre macro e micromoléculas carregadas ionicamente através de membranas que resultou na lei de distribuição de Donan. Só na década de 20 que a comercialização de membranas foi explorada pela primeira vez, pois até então, eram apenas alvo de estudos. A primeira grande aplicação de membranas microfiltrantes ocorre na Alemanha no fim da segunda guerra mundial, anos 40, para filtração de águas de mananciais.

Mais adiante, na década de 70, novos processos de fabricação de membrana foram desenvolvidos, como a polimerização interfacial de Riley, e assim, membranas de osmose reversa começaram a ser comercializadas, surgindo também a micro e a ultra filtração. No final de 1980 uma pequena empresa alemã de engenharia, a GFT desenvolveu o primeiro sistema comercial de pervaporação para destilação de álcool e em 1998 esta empresa já havia vendido mais de 100 plantas (ANADÃO, 2010).

No cenário atual grande importância tem se dado ao estudo de novos materiais na produção de membranas, objetivando atender o perfil de consumo existente, uma vez que, as possibilidades de uso das membranas poliméricas são limitadas. Faz-se importante destacar a carência destas membranas principalmente no que se refere à inércia química, estabilidade biológica e resistência a altas temperaturas e pressões, e aponta que diversos estudos têm observado que a utilização das membranas cerâmicas por apresentarem estas vantagens em relação às poliméricas.

### 3.1.3 Classificação

ANADÃO (2010) classifica as membranas de acordo os parâmetros: tipo de material usado na fabricação, estrutura, configuração, método de produção, regime de separação, aplicação.

3.1.3.1 *Materiais*: orgânicas (polímeros ou líquidos de substâncias orgânicas) e Inorgânicas (metais ou materiais cerâmicos).

As orgânicas apresentam vantagem relativa de facilidade de formação de um filme fino que permite altas taxas de permeabilidade, além do baixo custo em relação às inorgânicas. No entanto, como desvantagens aparecem várias limitações como baixa seletividade, instabilidades a altas temperaturas, dilatação e decomposição em solventes. As membranas inorgânicas apresentam alta resistência química e térmica, levando de 10 a 14 anos de vida útil. Em contraposição temos a pobre resistência mecânica.

3.1.3.2 *Estrutura*: simétricas ou isotrópicas, por possuírem estrutura uniforme ao longo da espessura, podendo ser porosas de poros cilíndricos ou densas (não porosas), e apresentam baixa taxa uma vez que toda estrutura espessura para resistência a transporte de massa. Assimétricas ou anisotrópicas, caracterizadas por um gradiente de porosidade em sua estrutura. Podem apresentar camadas com diferentes porosidades.

3.1.3.4 *Configuração*: podem aparecer na forma de folhas planas ou no formato de cilindros ocos.

3.1.3.5 *Métodos de produção*: para membranas densas metálicas; membranas densas com eletrólitos sólidos e óxidos; membranas microporosas sintéticas e cerâmicas; membranas microporosas e sintéticas, de vidro ou metálicas; membranas microporosas assimétricas, cerâmicas ou metálicas; membranas densas poliméricas; membranas microporosas sintéticas e poliméricas; membranas porosas poliméricas e assimétricas. Membranas compósitas inorgânicas; membranas compósitas poliméricas; membrana líquida; membranas inorgânicas e/ou orgânicas, formadas dinamicamente.

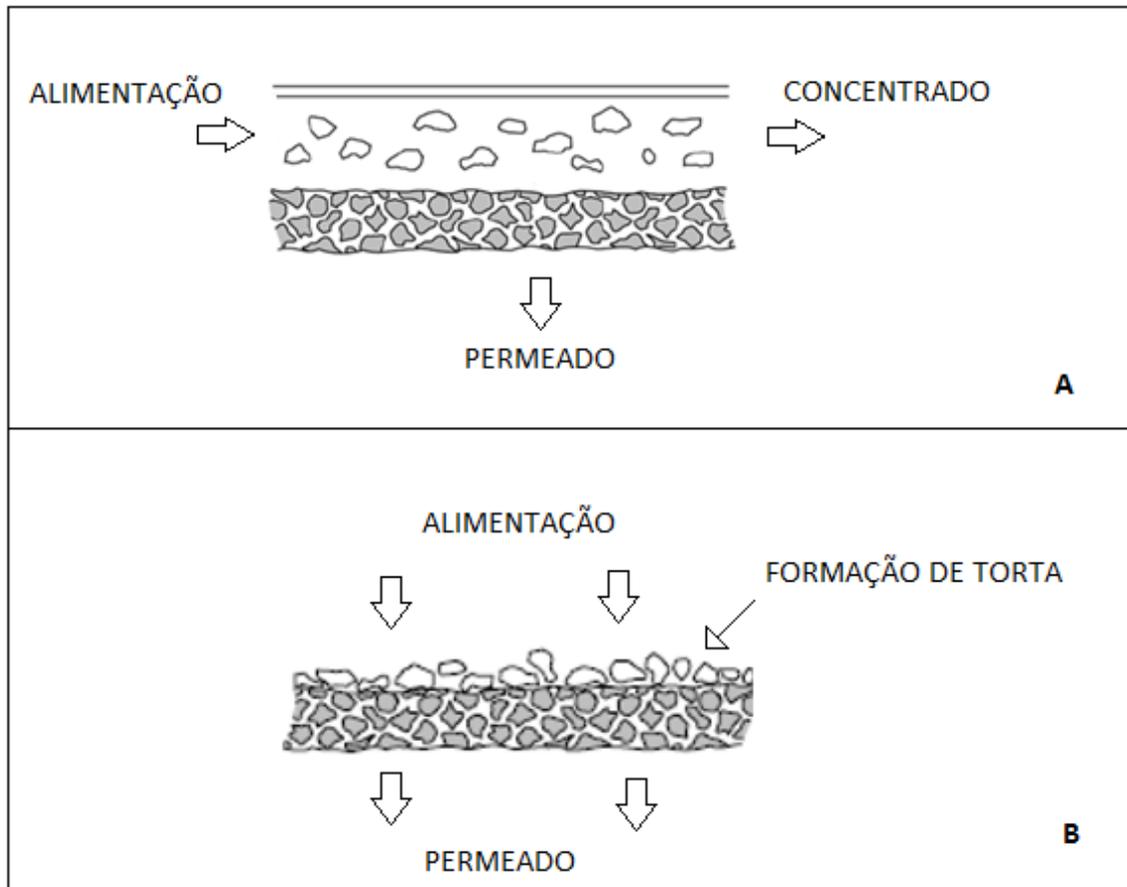
3.1.3.6 *Regime de separação*: os processos de separação são regidos por uma força motriz, que é classificada como: Gradiente de pressão trans-membrana; gradiente de concentração trans-membrana de espécies permeáveis à membrana e gradiente de potencial elétrico.

3.1.3.7 *Aplicação*: quanto à aplicação se classificam em membranas de: diálise; microfiltração; ultra filtração; nano filtração; osmose reversa; eletrodialise; pervaporação e transporte facilitado.

### 3.1.4 Tipos de escoamento

O escoamento em membranas pode ser tangencial (*crossflow*) ou convencional (*dead-end*). No tangencial a solução a ser filtrada escoam paralelamente a parede da membrana, diminuindo a formação de torta, que permite um fluxo de permeado quase constante. Já no convencional a solução a ser filtrada é direcionada perpendicularmente a parede da membrana (DIEL, 2010). A FIGURA 2 é uma representação do escoamento *crossflow* (A) e do *dead-end* (B).

FIGURA 2: Escoamento *crossflow* (A) e *dodead-end*(B) em membranas. (adaptado de DIEL, 2010).



Fluxo de permeado pode ser definido como a vazão mássica ou molar de permeado por unidade de área da membrana. A Equação 1.0 mostra a forma de calculo de fluxo onde o fluxo (F), que equivale a vasão (Q) por unidade de área (A) da membrana.

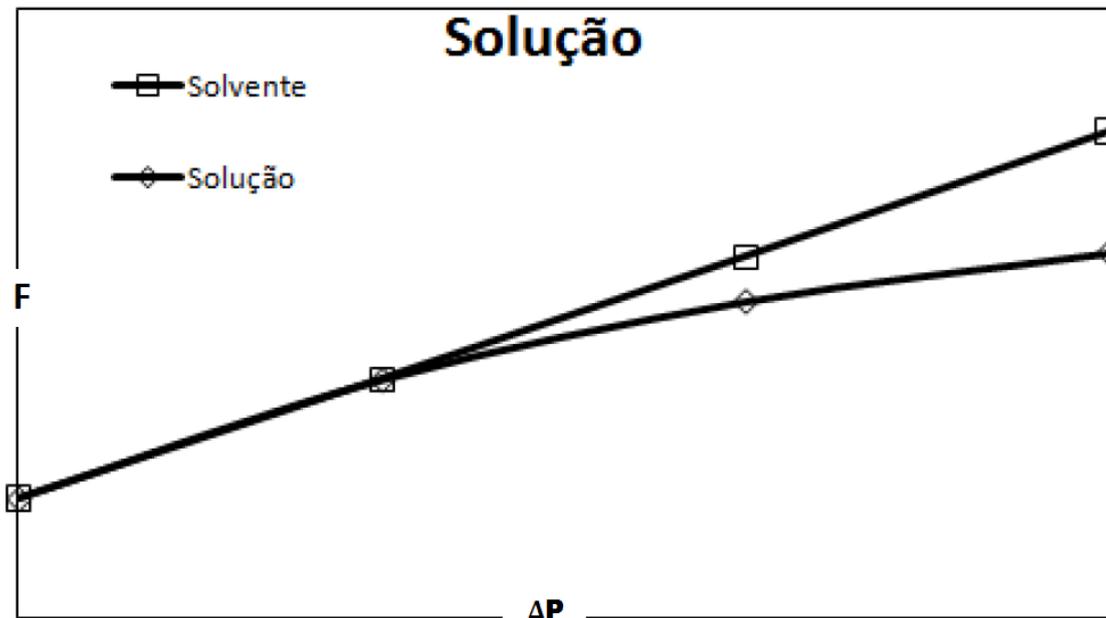
$$F = \frac{Q}{A} \quad (1.0)$$

DIEL (2010) descreve que o fluxo de permeado depende da temperatura, uma vez que o fluxo é função da viscosidade dinâmica que por sua vez depende diretamente da temperatura. Outros parâmetros importantes são pH e força iônica, que influenciam na solubilidade dos componentes da alimentação, alterando as interações com a membrana. Quando a alimentação consiste em uma solução qualquer, o fluxo apresenta um comportamento inicial linear, e à medida que a pressão é aumentada ocorre uma diminuição. Esta diminuição do fluxo está relacionada com fenômenos de polarização por concentração e *fouling*.

Quando se processa uma solução, devido à seletividade do processo, haverá um aumento de concentração retida na superfície da membrana, que provoca uma resistência maior à passagem de permeado, diminuindo o fluxo. Este efeito não ocorre só pelo fechamento dos poros, mas também, porque esta maior concentração na parede da membrana provoca um movimento difuso do soluto no sentido contrario a superfície da membrana, provocando uma

resistência adicional à passagem do soluto. Na FIGURA 3 temos uma representação do fluxo de filtração com o aumento da pressão para uma solução e para um solvente.

FIGURA3: Comportamento do fluxo de permeado (F) para solução e para solvente puro, sob uma pressão transmembrânica (adaptado de DIEHL, 2010).



### 3.1.5 Aplicações de membranas cerâmicas

GEAFILTRATION (2009) descreve que uma vantagem que as membranas cerâmicas apresentam é a proximidade com os métodos tradicionais de separação (filtros rotativos a vácuo, destilação, centrifugação, etc.), implicando em: baixo consumo energético, longa vida útil, ocupação de pouco espaço físico, facilidade de limpeza, aumento significativo no rendimento do produto, redução de mão-de-obra e de custos de manutenção.

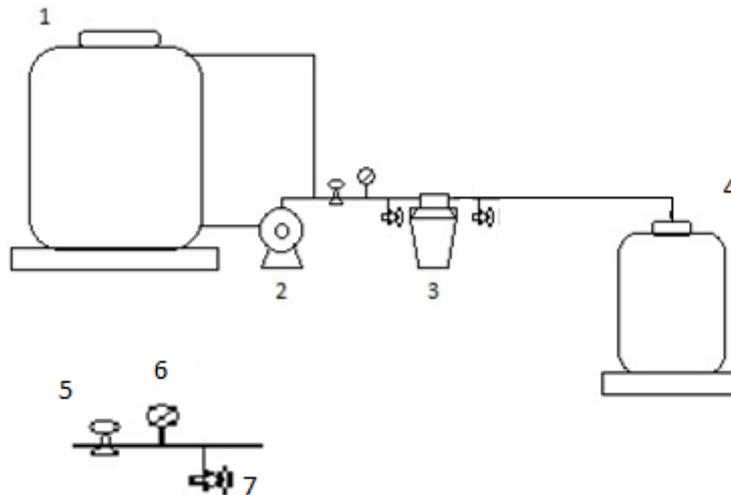
Segundo FRANÇA (2014) o número de aplicações das membranas cerâmicas é grande porem está em franca expansão. Estima-se que, dentre os processos de separação por membranas, as membranas de cerâmica têm crescido cerca de 15 % ao ano, apesar dos conhecimentos detalhados sobre aplicações comerciais ainda serem restritos. O mesmo autor ainda ressalta que as membranas cerâmicas apresentam a desvantagem no alto custo de fabricação, devido ao transporte e ao custo das matérias-primas que são importadas e sintéticas do tipo: zircônia, alumina, titânia e sílica. Considerando que a região Nordeste do Brasil, principalmente os Estados da Paraíba e de Pernambuco, possui grandes reservas de matérias-primas para produção de cerâmica, essas fontes poderão cooperar fortemente na minimização dos custos de produção de membranas cerâmicas.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido nas dependências do Laboratório de Referência em Dessalinização – LABDES, da Unidade Acadêmica de Engenharia Química – UAEQ, da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

A primeira fase deste trabalho compreendeu a montagem de um sistema que foi projetado e desenvolvido de forma que cada membrana pudesse ser estudada e caracterizada separadamente. O sistema consiste em etapas de purificação, como observado no diagrama da Figura 4, a seguir.

FIGURA 4: Planta com vista frontal do sistema em escala piloto.



Neste teste, a água armazenada no tanque de alimentação (1) será filtrada diretamente pela membrana, o fluxo de permeado e os parâmetros monitorados foram medidos na saída do copo de filtro que contém a membrana (3). A água de alimentação foi coletada na torneira (6) antes de passar pela membrana. As pressões variam em 0,1 bar, até a máxima pressão exercida pelo sistema sob a membrana, e foram ajustadas pela válvula (5) e verificadas no manômetro (6). A vazão para cálculo de fluxo foi aferida com uso de proveta e cronômetro através da torneira (6) após o copo de filtro (3), e todos os testes realizados em triplicata.

#### 4.1 Montagem do sistema:

Na montagem do sistema foi utilizada uma bobona plástica de 200 l onde é armazenada a água de alimentação, que é inserida no sistema através de uma bomba elétrica. Foi usado copos de filtro, de modelo comercial FILTRO SANGEL 9.3/4, com pressão de operação máxima de 4 bar. O primeiro copo recebeu um refil de membrana cerâmica MC10, e o segundo a MC020, e foram fabricados pelo LABCEM-UFCG. As conexões e tubulações são de PVC, de 1/2 in, as válvulas de controle de vazão são do tipo esfera, os manômetros do sistema de 2 bar, e alguns pontos foram interligados por mangueiras. A Figura 8 é o sistema em escala piloto montado. Como observado, o sistema montado comporta outras etapas de tratamento que aqui não foram descritas, pois o objetivo deste trabalho é o estudo apenas dos processos com a membrana.

FIGURA 5: Sistema piloto montado em bancada.

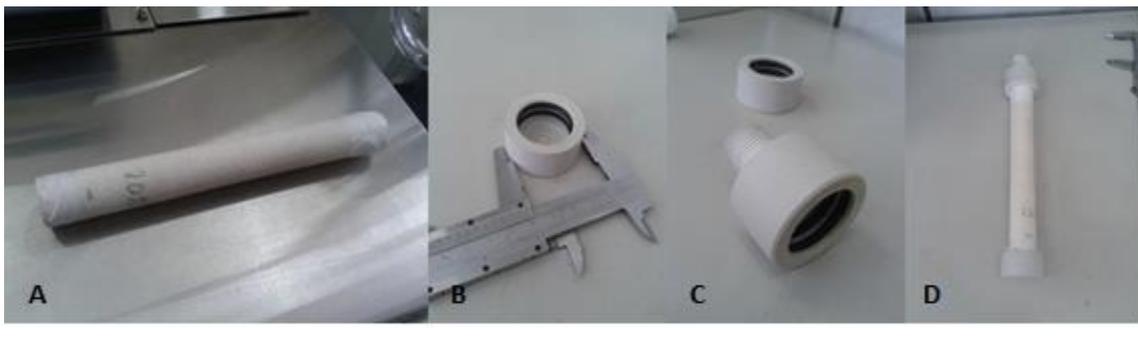


#### 4.2 Montagem do filtro de membrana cerâmica:

De acordo com informações fornecidas pelo LABCEM, que é o laboratório responsável pela confecção das membranas, na fabricação foi utilizada uma massa especial composta de alumina 80%, e argila 20%. A esta mistura, foi acrescentado um agente porogênico, que é uma substância orgânica inerte, e que foi determinante na porosidade das membranas. As frações húmidas passaram por processo de mistura, extrusão, e em seguida secagem por etapas. Na produção da MC10 empregou-se o agente porogênico em uma quantidade equivalente a 10% da massa total, e para MC20 20% deste composto. A abertura do poro da membrana está entre 0,8 – 1  $\mu\text{m}$ .

A peça produzida consiste em um cilindro reto oco, com diâmetro externo de 25 mm, e diâmetro interno de 21 mm, com altura de 150 mm. Para ser encaixado no copo de filtro comercial, foram produzidas por tornearia encaixes de PVC, com anéis de borracha interno, para as extremidades da membrana, que também receberam um revestimento de teflon para auxiliar na vedação dos tampos. O copo de filtro opera com a água entrando pela parte externa na membrana. A FIGURA 9 mostra a membrana (A), os tampos torneados com as borrachas para encaixe na membrana (B e C), e o refil pronto para ser acoplado (D) ao copo de filtro.

FIGURA 6: Montagem do filtro de membrana cerâmica



#### **4.4 Execução do experimento.**

##### ***4.4.1 Água de estudo***

A água utilizada para este trabalho foi uma mistura de água de abastecimento público, e água de chuva, que chegam a uma cisterna subterrânea da UFCG. Esta água é bombeada para um reservatório do tipo caixa d'água elevada, e então distribuída nas dependências da Universidade. Um volume de 200 litros desta água, que chega a torneira do jardim do LABDES, foi transferido para a bombona de armazenamento e aí permaneceu durante 48 horas antes de ser usada. Durante este período a bombona esteve com a tampa aberta e teve o conteúdo homogeneizado pelo by-pass do sistema, durante 15 min por dia. Este método de armazenamento foi executado para garantir a retirada de cloro residual livre da água de estudo.

##### ***4.4.2 Estudo do fluxo de permeado em função da pressão***

Na primeira batelada de testes se analisou o fluxo de permeado, em função da pressão, para cada membrana. Os testes consistiram em variar a pressão de forma crescente, e medir o fluxo do permeado, bem como verificar a eficiência na remoção de cor e turbidez, dureza e condutividade, e observar o comportamento do pH.

##### ***4.4.2 Amostragem e parâmetros analisados***

Durante a execução do experimento, a bomba era ligada e então a água de estudo começava a fluir pelo sistema. Foi determinado um tempo de espera de 10 min, após a saída da primeira amostra do sistema, para dar-se início a amostragem. Este tempo compreende uma lavagem de segurança, para que alguma impureza ou água retida no sistema não comprometesse a amostragem. Também entre as mudanças de pressão para coleta de uma nova amostra foi esperando um tempo de estabilização de 10 min.

Em cada ponto (pressão/fluxo de permeado) foi coletada uma amostra de 500 ml para realização das análises. Para este trabalho foram feitas apenas análises físico-químicas. A Tabela 1 apresenta os parâmetros analisados e os equipamentos e métodos utilizados nas análises.

TABELA 1: Parâmetros, equipamentos e métodos utilizados nas análises.

Parâmetro	Método ou Equipamento
Cor	Colorimetro de bancada POLICONTROL
Turbidez	Turbidimetro portátil HANA
pH	pHmetro digital PG1000 da GEHAKA.
Condutividade	Condutivímetro modelo 600 da ANALYSER;
Cloretos	ARGENTOMETRIC Method. AWWA
Dureza total	EDTA Titrimetric method. AWWA
Dureza de Cálcio	EDTA Titrimetric method. AWWA
Dureza de magnésio	EDTA Titrimetric method. AWWA

## 5 RESULTADOS E DISCUSSOES

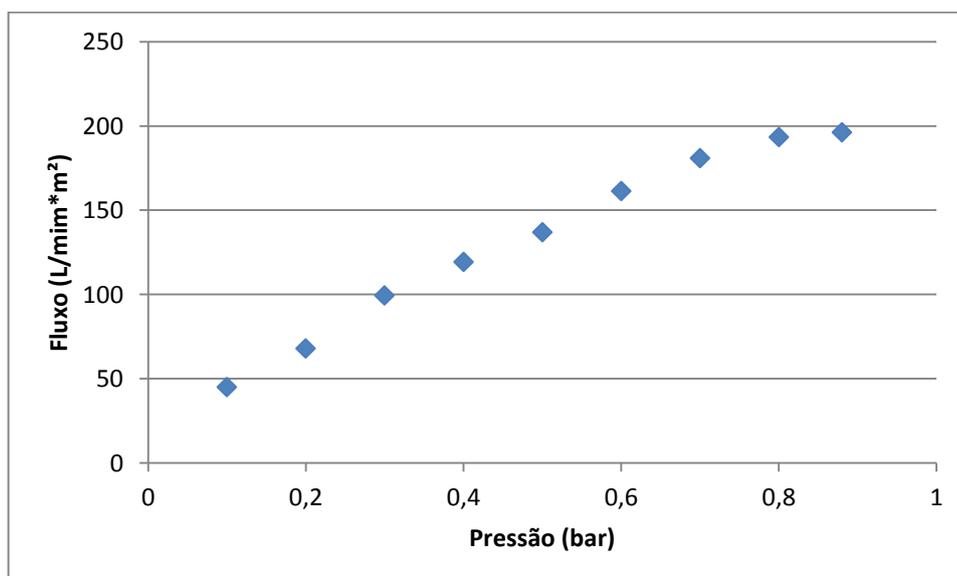
O cálculo da área externa da membrana, que compreende apenas a área de contato com a água de alimentação, foi feito pela EQUAÇÃO 2.0, da área lateral de um cilindro reto.

$$A = 2\pi Rh \quad (2.0)$$

Onde o raio externo da membrana (R) é 1,25 cm e a altura (h) é 15 cm, resultando em uma área de contato de 117,8 cm<sup>2</sup>, que equivale a 0,0178 m<sup>2</sup>.

Para cálculo do fluxo de permeado foi utilizada a Equação 1.0. No experimento foi desenvolvida uma curva do fluxo de permeado em função da pressão de filtração, como observado na Figura 7, para membrana MC20, e Figura 2, para MC10.

FIGURA 7: Fluxo de permeado em função da pressão de operação para a membrana MC20.



Como esperado, com o aumento da pressão verificou-se o aumento do fluxo de permeado, e foi observado que a pressão máxima alcançada por este sistema sob esta membrana foi de 0,88 bares, e que para esta pressão temos um fluxo de filtração de 392 l/mim\*m<sup>2</sup>. A relação entre o gradiente de pressão e de fluxo não se apresenta de forma linear, ou seja, a curva possui inclinações diferentes para diferentes pontos. Próximo às pressões máximas a curva

apresentou leve continuidade, o que indica que existe um fluxo de permeado máximo permitido pela membrana, e que este fluxo pode ser obtido em valores de pressão próximos a 0,9 bar.

É importante destacar que o fluxo de permeado está diretamente relacionada às características do fluido, e neste caso, como o fluido foi água, o valor de viscosidade estava próximo de 1cP (25°C). Outro ponto a se observar é que ocorreu um leve aumento da temperatura durante a execução experimento, devido as trocas de calor feitas entre a bomba ea água que recirculava pelo by-pass. Considerando que o aumento da temperatura diminui a viscosidade do fluido, então este leve aumento influenciou nos valores fluxo encontrados, de forma que, os fluxos encontradas ao fim do experimento poderiam ter um valor levemente maior dos encontrados se a temperatura fosse constante.

NA Tabela 2 observa-se os valores da taxa e das pressões, bem como os percentuais de remoção para cor e turbidez correspondentes a estes valores.

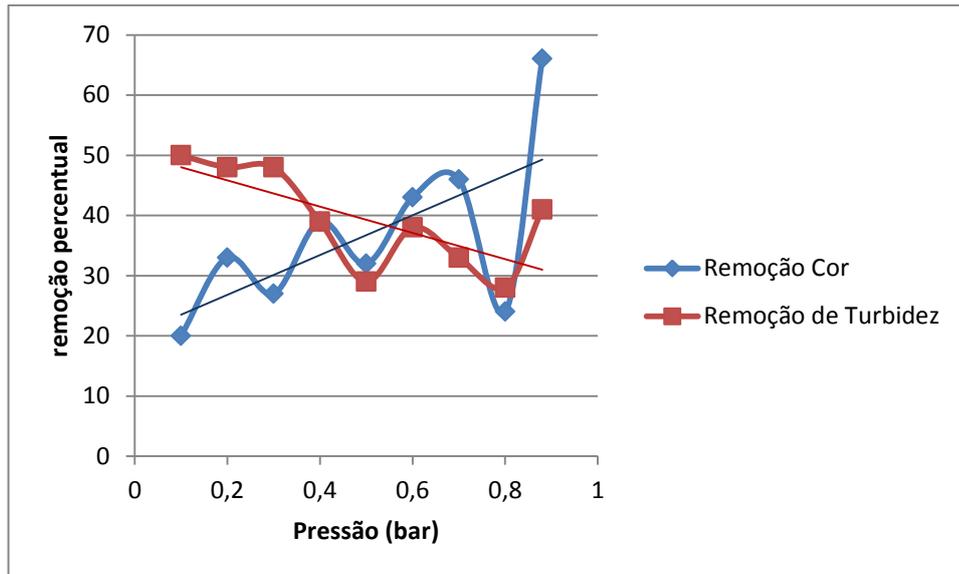
TABELA 2: Valores de Fluxo de permeado, remoção de cor e turbidez para membrana MC20 para valores de entrada, respectivamente, de 6,5 Pt/CO e 1,759 NTU.

Pressão (Bar)	Fluxo de permeado (L/mim*m <sup>2</sup> )	% remoção de cor	% remoção de turbidez
0,1	45,0	20	50
0,2	67,9	33	48
0,3	99,4	27	48
0,4	119,2	39	39
0,5	136,9	32	29
0,6	161,3	43	38
0,7	180,8	46	33
0,8	193,4	24	28
0,88	196,2	66	41

Na plotagem a seguir, Figura 8, é possível analisar o comportamento da remoção de cor e turbidez em função do aumento da pressão. Ao analisar os valores percentuais de cor e turbidez, observou-se que eles apresentam comportamento oposto entre si ao se observar a linha de tendência final, porem, a partir da pressão de 0,4 bar, pode-se perceber uma tendência comum no sentido paralelo. O ponto da melhor relação entre remoção de cor e turbidez foi próximo as pressões máximas (0,88 bar).

Os melhores valores percentuais de remoção de cor foram obtidos nas pressões iniciais, mais baixas, e os melhores valores de remoção de turbidez foram obtidos nas pressões mais altas. Verificou-se que os percentuais de remoção para cor e turbidez apresentaram comportamento ondulatório com o aumento gradativo da pressão.

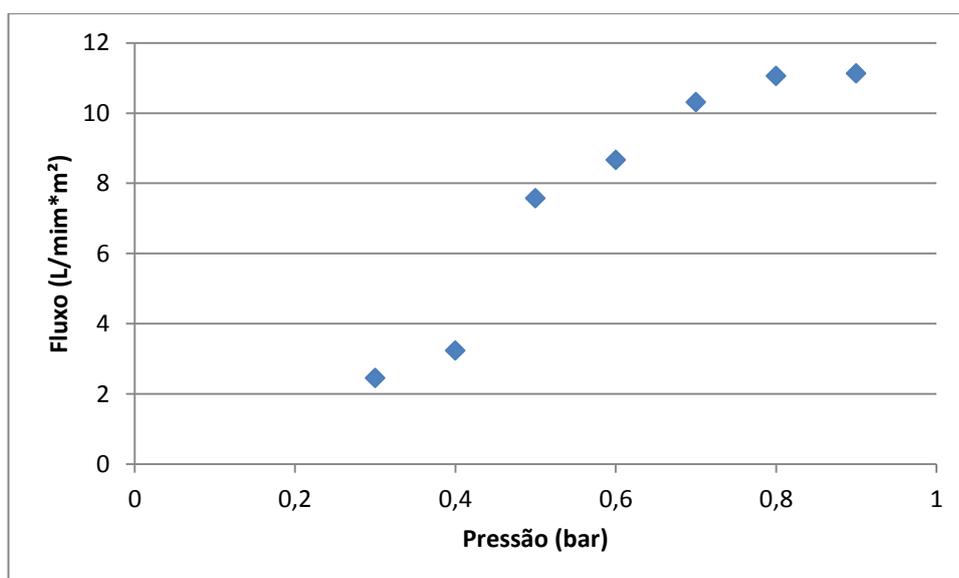
FIGURA 8: Plotagem da remoção de cor e turbidez em função do aumento da pressão na membrana MC20, para valores de alimentação de 6,5 e 1,75 respectivamente.



O parâmetro condutividade, bem como, cloretos e dureza não apresentaram variação significativa, nem mesmo um padrão de variação em função da taxa. A condutividade teve uma diminuição média de 1,5 %, Cloretos 4,83 %, Dureza total 3,57 %, Cálcio 4,11% e Magnésio de 3,32%.

Já era esperado que as membranas fossem operantes em remoção de cor verdadeira e turbidez, porem, não se é esperado a remoção de material dissolvido. Entretanto, pode-se observar que uma pequena fração de material dissolvido ficou retida na membrana, e pode-se dizer que isto ocorreu devido à camada de material formado sob a superfície da membrana, a exemplo de ácidos húmicos, que possivelmente foram responsáveis por tais retenções.

Figura 9: Fluxo de permeado em função da pressão da membrana MC10.



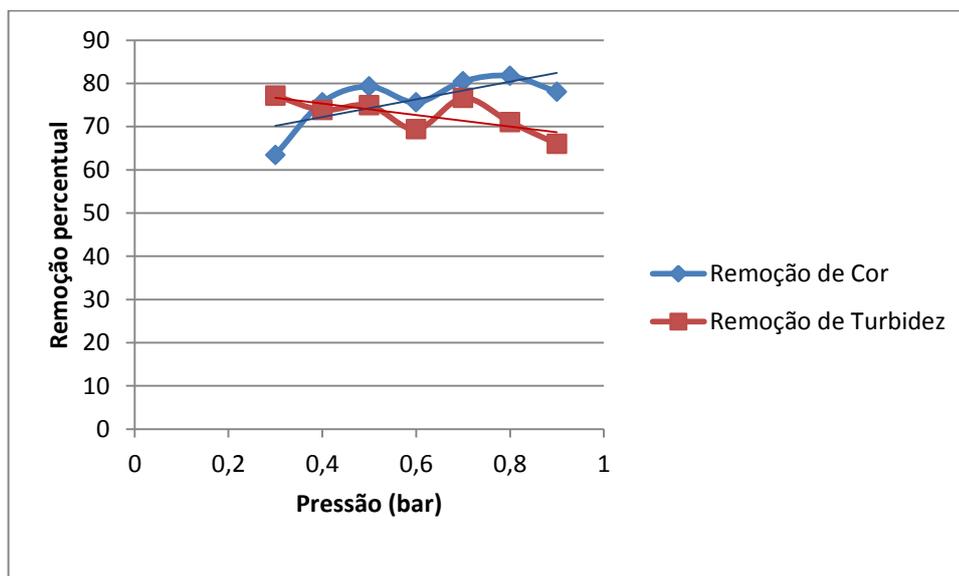
Nesta membrana com o aumento da pressão também se verificou o aumento da taxa de filtração, no entanto, observou-se um comportamento menos regular, o que indica que alguns

valores de pressão são pontos de mudança de comportamento da tendência do fluxo. Entre os pontos 0,3 e 0,4 bar a diferença entre a taxa de filtração foi de 0,78 (L/mim\*m<sup>2</sup>), já entre os pontos 0,4 e 0,5 esta diferença foi de 4,33 (L/mim\*m<sup>2</sup>). Entre pontos seguintes 0,5 e 0,6 observa-se 1,09 (L/mim\*m<sup>2</sup>) de diferença. Na Tabela 2 observa-se os valores da taxa e das pressões, bem como os percentuais de remoção para cor e turbidez correspondentes a estes valores. O maior fluxo obtido foi de 11,13122 (L/mim\*m<sup>2</sup>) sob pressão de 0,9 bar.

TABELA 3: Valores de Fluxo de permeado, remoção de cor e turbidez para membrana MC10, para valores, respectivamente de 6,7 Pt/CO e 1,80 NTU.

Pressão (Bar)	Fluxo de permeado (L/mim*m <sup>2</sup> )	% remoção de cor	% remoção de turbidez
0,3	2,45	63	77
0,4	3,23	77	74
0,5	7,57	79	75
0,6	8,66	76	69
0,7	10,31	80	77
0,8	11,05	82	71
0,9	11,13	78	66

FIGURA 10: Plotagem da remoção de cor e turbidez em função do aumento da pressão na membrana MC20 respectivamente de 6,7 Pt/CO e 1,80 NTU..



Para esta membrana, os percentuais de remoção de cor e turbidez, a partir da pressão de 0,3 seguiram um comportamento paralelo entre si, como também foi observado, a partir de 0,4 bar, para a MC20. Os melhores resultados para cor foram obtidos nas pressões máximas, e os melhores resultados de turbidez nas pressões mínimas. O ponto ótimo comum foi nas pressões próximas a 0,7 bar, onde foi verificado remoção de cor e turbidez, respectivamente, 80,4878 e 76,60167 %. A condutividade teve um abaixamento médio de 1,5 %, Cloretos 4,34 %, Dureza total 6,96 %, Cálcio 9,44 % e Magnésio 5,88.

Ainda sobre os dados de remoção de cor e turbidez, observa-se que o comportamento de remoção da turbidez diminuiu ao com o aumento da pressão de operação, que se justifica

devido ao acúmulo de substâncias insolúveis nos poros da membrana, os quais passam à medida que a pressão aumenta, diminuindo a qualidade do permeado. Isso implica a necessidade de um estudo para observar a qualidade do permeado versus pressão de operação por um tempo mais prolongado.

## **6 CONCLUSÃO**

O Sistema piloto projetado e construído para este trabalho atendeu todas as expectativas de funcionamento e facilidade de operação. Por ter operado em pressões máximas em torno de 0,9 o uso da bomba pode ser descartado, e o sistema operado com a pressão fornecida pelas redes de abastecimento público, uma vez que, a pressão destas chega a valores superiores a 2 bar. Desta forma, este sistema pode ser aplicado também, para purificação de água para uso doméstico. Ainda de falando em água para consumo humano, pode-se dizer que, estas membranas podem ser empregadas na potabilização de cor e turbidez, em casos similares ao da água estudada.

No tocante ao estudo do comportamento das membranas para diferentes condições de pressão, pode-se dizer que a membrana MC20 pode ser aplicada em sistemas que necessitam de maior taxa de filtração, observando que sob a pressão de 0,88 bar obteve-se um fluxo de permeado de 196 l/mim\*m<sup>2</sup>, que resultaria, para a membrana no tamanho estudado, uma produção de 209 l/h, com percentuais de remoção de cor de 66% de 6,7 Pt/CO e, turbidez de 41% de (1,80 NTU). Esta membrana já se enquadra como pré-tratamento a sistemas de purificação, uma vez que, ela retém boa parte de material em suspensão, que poderia vir a prejudicar as etapas seguintes da produção de água ultra pura.

Apesar do baixo fluxo de permeado, a membrana MC10 apresenta-se como melhor proposta para remoções de cor e turbidez, apresentando em seu ponto ótimo remoções de 81% e 71% de valores iniciais de 6,7 Pt/CO e 1.8 NTU respectivamente. Operando em pressão máxima, foi obtida uma taxa de permeado de 11.8 L/h, que já compreende uma vazão para alimentar destiladores e sistema de deionização de laboratório, evitando boa parte das incrustações e evitando que materiais mais refinados com resinas trocadoras de íons tenha sua capacidade de remoção prejudicada por cor e turbidez que podem e devem ser eliminadas.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestões para estudos posteriores, pode-se propor a combinada das duas membranas, operando em série, sendo a de porosidade maior MC20 antecedendo a de Porosidade menor, MC10. Esta proposta representa uma alternativa ao prolongamento do tempo de lavagem das membranas, uma vez que, a membrana de MC10 não seria sobrecarregada por partículas maiores que ficariam retidas pela MC20.

Outra proposta de estudo, é medir o fluxo de permeado e pressão ao longo do tempo, fixando-se valores iniciais, para observar a influência da saturação das membranas em função do volume filtrado. Com estes dados, seria possível estimar o tempo de operação de sistemas com estas membranas, baseando-se em parâmetros de material em suspensão da água de alimentação.

Na operação do sistema completo descrito na FIGURA 7, observou-se que quando combinadas, as membranas mostraram uma relação pressão/fluxo similar ao da membrana

MC10 quando operada isolada. Analisando que as relações entre o percentual de cor e turbidez não obedecem a um comportamento de inclinação comum, se fez necessário uma sobreposição das curvas de remoção de cor e turbidez para se encontrar uma região de maior concentração de percentuais de remoção. Este procedimento apontou dois pontos de pressão onde se obteve uma média comum dos melhores resultados para as duas membranas, que foram próximas as pressões de 0,4 bar, e próximo de 0,9 bar. Considerando que nas maiores pressões se encontra os maiores fluxos, escolheu-se a pressão de 0,9 bar como pressão sugerida para operação do sistema combinado, objetivando o maior fluxo possível produzido.

## 8 REFERENCIAS

ANADÃO, P., Ciência e Tecnologia de membrana, São Paulo: Ar líber Editora, 2010.

BRASIL. Portaria nº 518 de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde. In: Diário Oficial da União, n.59, p.166-176, Seção I. 26 de março 2004.

DIEL, J.L., Caracterização funcional de membranas cerâmicas de micro e ultra filtração,UFRS, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, 2010..

FRANÇA, M., Estudo da redução de sílica por pré-tratamento em sistemas de dessalinização de pequeno porte, Universidade Federal de campina Grande, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, 2009.

FRANÇA, M., Avaliação de um sistema de membrana cerâmica e resina trocadora de íons para fins de deionização de águas, UEPB, Programa de Pós-graduação pesquisa, 2014.

GEAFILTRATION. Nanofiltração. Disponível em: <http://www.geafiltration.com/portuguese/tecnologia/nanofiltracao.htm>.

HABERT, A. C., BORGES, C. P. e NÓBREGA, R., Processos de separação com membranas, Escola Piloto em Engenharia Química, COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Química, 2006.

HELFFERICH, F., Iron Exchange, New Iork: Mc Graw – Hill Book,Company inc., 1962.  
Rodrigues A.D; A guieto carotenoide analysis in foods, OMNI, Research: ILSI Press: Washington, 1991.

KLUG, T., Resina de troca iônica aplicada na clarificação de xaropes para refrigerantes: uma revisão, Instituto de Tecnologia de Alimentos, Curso de Engenharia de alimentos, Porto Alegre, 2011.

MULDER, M., Basic principleofmembranetechnology. KluwerAcademicPublishers, Dordrecht The Netherlands, 2000.

PADUÁ, V. L.; In.: HELLER, L. e PÁDUA, V. L. Abastecimento de água para consumo humano. Belo Horizonte: UFMG, 2006.

POHL, PAWEL, ApplicationofIon-Exchange Resinsto The FractionationofMetals in Water, Trends in AnalyticalChemistry, Vol. 25, No. 1, 2006.

STANDARD methods for the examination of water and wastewater. 22nd ed. Washington: APHA; AWWA; WEF, 2012. p. 4:72-73 (Method 4500-Cl- B).

## 8 ANEXO I

Valores experimentais, e análises físico-químicas para membrana MC20.

Pressão (Bar)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	Cloreto (ppm Cl)	Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	Dureza Cálcio (ppm $\text{CaCO}_3$ )	Dureza Magnésio (ppm $\text{CaCO}_3$ )
0,1	1279	8,09	324,8	231,2	72,5	158,7
0,2	1282	7,71	349,6	231,2	70	161,2
0,3	1284	7,92	349,6	231,2	72,5	165
0,4	1271	8,16	355,0	230,6	70	160,625
0,5	1280	8,08	353,2	237,5	72,5	165
0,6	1271	8,04	349,6	231,2	71,2	160
0,7	1266	8,05	344,3	230,0	70	160
0,8	1269	8,09	349,6	228,7	70	158,7
0,88	1261	8,16	353,2	222,5	70	152,5

Água de estudo	1302	8,02	367,425	240	74,375	165,6
----------------	------	------	---------	-----	--------	-------

Valores experimentais, e análises físico-químicas para membrana MC10.

Pressão (Bar)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	Cloreto (ppm Cl)	Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	Dureza Cálcio (ppm $\text{CaCO}_3$ )	Dureza Magnésio (ppm $\text{CaCO}_3$ )
0,3	1262	7,90	356,7	242,5	62,5	180
0,3	1255	7,84	353,2	240,6	64,3	176,2
0,3	1254	7,52	347,9	238,7	63,7	175
0,3	1267	7,84	349,6	248,7	66,2	182,5
0,3	1258	7,87	351,4	235,6	65	170,6
0,3	1260	7,86	347,9	242,5	58,7	183,7
0,3	1258	7,86	353,2	239,3	66,2	173,1

Água de estudo	1279	7,87	371	248,7	78,7	170
----------------	------	------	-----	-------	------	-----