

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

FELIPE PEIXOTO MANGUEIRA BATISTA

**APLICAÇÃO DE MEMBRANAS CERÂMICAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES
TÊXTEIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JOÃO PESSOA - PB
2019

FELIPE PEIXOTO MANGUEIRA BATISTA

**APLICAÇÃO DE MEMBRANAS CERÂMICAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES
TÊXTEIS**

Dissertação de Mestrado submetida à coordenação do Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Desenvolvimento e Propriedades dos Materiais

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Lizabetha Fernanda Araújo Campos

Co-orientador: Prof. Dr. Daniel Araújo de Macedo

JOÃO PESSOA – PB
2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B333a Batista, Felipe Peixoto Mangueira.

Aplicação de membranas cerâmicas no tratamento de efluentes têxteis / Felipe Peixoto Mangueira Batista. - João Pessoa, 2019.
72 f. : il.

Orientação: Lízandra Fernanda Araújo Campos.

Coorientação: Daniel Araújo de Macedo.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Efluentes Têxteis. 2. Membranas Cerâmicas. 3. Microfiltração. 4. Meio Ambiente. I. Campos, Lízandra Fernanda Araújo. II. Macedo, Daniel Araújo de. III. Título.

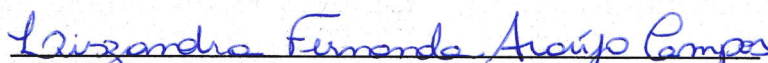
UFPB/BC

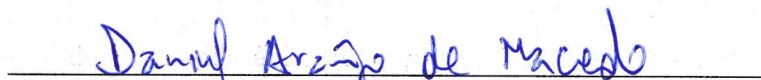
APLICAÇÃO DE MEMBRANAS CERÂMICAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS

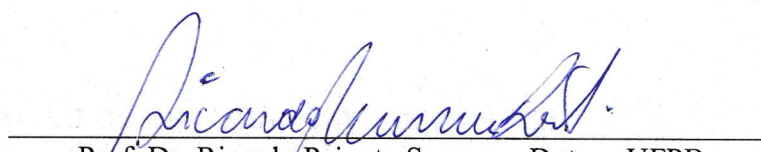
FELIPE PEIXOTO MANGUEIRA BATISTA

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba como requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO AVALIADA EM: 11 / 02 / 2019


Profa. Dra. Lizandra Fernanda Araújo Campos - UFPB
(Orientadora)


Prof. Dr. Daniel Araújo de Macedo - UFPB
(Co-orientador)


Prof. Dr. Ricardo Peixoto Suassuna Dutra - UFPB
(Examinador Interno)


Profa. Dra. Mirella Leôncio Motta e Costa - IFPB
(Examinador Externo)

JOÃO PESSOA - PB
2019

Acima de tudo, sou grato a Deus por realizar mais este sonho na minha vida.

Dedico este trabalho à minha amada esposa, familiares, amigos, colegas e a todos aqueles que contribuíram e me compreenderam durante a realização deste trabalho, em especial à professora Lízandra por todo esforço e ensinamentos.

RESUMO

Os impactos ambientais e sociais da degradação da qualidade das águas devido à ação antrópica têm aumentado de forma alarmante no decorrer dos anos. Em virtude da complexidade de contaminantes presentes, os efluentes têxteis são considerados bastante nocivos ao meio ambiente, sendo o seu descarte adequado uma preocupação atual. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a eficiência de membranas cerâmicas à base de argila e cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) no tratamento de efluentes têxteis de indústrias da região metropolitana de João Pessoa, PB. Para tanto, as matérias-primas utilizadas na confecção das membranas foram caracterizadas por análise térmica, química e mineralógica. Foram determinadas as propriedades físicas de absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente, permeabilidade a água e as características microestruturais das membranas obtidas. A funcionalidade das membranas para o tratamento dos efluentes coletados foi avaliada através do comparativo entre os parâmetros físico-químicos de cor, turbidez, Sólidos Suspensos Totais (SST), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), determinados para os efluentes, antes e após a filtração. A argila apresentou componentes químicos e mineralógicos característicos da composição de argilas para cerâmica vermelha e a CBC apresentou características térmicas típicas de agentes porogênicos. A membrana cerâmica apresenta porosidade aparente de 25,76%, superfície altamente porosa e fluxo permeado a água, para pressão de 200 kPa, de 500 L/h.m². Dos três efluentes analisados, dois obtiveram resultados bastante significativos, nos quais, o tratamento realizado apresentou eficiência de remoção de cinco dos seis parâmetros variando de 82 a 96%. Todavia, para um dos efluentes, apenas dois parâmetros apresentaram eficiência de remoção entre 50 e 60%. Concluiu-se que a aplicação das membranas cerâmicas estudadas é viável como pré-tratamento de efluentes industriais têxteis, tendo em vista a diminuição significativa de seu potencial poluidor. Outro ponto bastante positivo é a possibilidade da utilização de membranas de baixo custo relativo, visto que foram confeccionadas com matéria-prima natural abundante e resíduo industrial.

Palavras-chaves: Efluentes Têxteis; Membranas Cerâmicas; Microfiltração; Meio Ambiente

ABSTRACT

The environmental and social impacts of the degradation of water quality due to anthropogenic action have increased alarmingly over the years. Due to the complexity of contaminants, textile effluents are considered very harmful to the environment, and their proper disposal is a current concern. The general objective of this work was to evaluate the efficiency of ceramic membranes based on clay and sugarcane bagasse ash in the treatment of textile effluents from industries in the metropolitan area of João Pessoa, PB. For this purpose, the raw materials used in the preparation of the membranes were characterized by thermal, chemical and mineralogical analysis. The physical properties water absorption, apparent porosity, apparent density, water permeability and microstructural characteristics of the obtained membranes were determined. The functionality of the membranes for the treatment of the collected effluents was evaluated by comparing the physico-chemical parameters of color, turbidity, Total Suspended Solids (TSS), Total Dissolved Solids (TDS) and Chemical Oxygen Demand (COD), determined for the effluents, before and after filtration. The ceramic membrane presented an apparent porosity of 25.76%, highly porous surface and water permeated flow, at a pressure of 200 kPa, of 500 L/h.m². On the three effluents analyzed, two obtained very significant results, in which, the treatment presented efficiency of removal of five of the six parameters ranging from 82 to 96%. However, for one of the effluents, only two parameters showed removal efficiency between 50 and 60%. It was concluded that the application of the ceramic membranes studied is feasible as a pre-treatment of industrial textile effluents, in view of the significant reduction of their polluting potential. Another very positive point is the possibility of using membranes of low relative cost, since they were made with abundant natural raw material and industrial wastes.

Palavras-chaves: Textile Effluents; Ceramic Membrane; Microfiltration; Environment

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA – Absorção de água

ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional de Águas

APHA– American Public Health Association

CBC –Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DA – Densidade Aparente

DBO – Demanda bioquímica de oxigênio

DQO – Demanda química de oxigênio

DRX – Difração de Raios X

DTA – Análise Térmica Diferencial

EDX – Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X

ETAD – Ecological and Toxicological Association of the Dyestuffs Manufacturing Industry

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez

PA – Porosidade Aparente

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SDT – Sólidos dissolvidos totais

SST – Sólidos suspensos totais

UNESCO–Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

THM –Trihalometano

TG – Termogravimetria

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Abordagem de um sistema de tratamento de efluente industrial	19
Figura 2 - Hierarquia dos processos de filtração por membranas conduzidos sob pressão.....	27
Figura 3 - Fluxograma geral da pesquisa	36
Figura 4 - Sistema de filtração por membranas	40
Figura 5 - Termogramas da CBC e da argila	43
Figura 6 – DRX da CBC e da argila	45
Figura 7 – Micrografia da membrana cerâmica	47
Figura 8 - Características visuais do Efluente 1	48
Figura 9 - Características visuais do Filtrado 1	49
Figura 10 - Características visuais do Efluente 2	50
Figura 11 - Características visuais do Filtrado 2	50
Figura 12 - Características visuais do Efluente 3	51
Figura 13 - Características visuais do Filtrado 3	52
Figura 14 - Comparativo da eficiência de remoção para os Filtrados 1, 2 e 3.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos corantes utilizados nas operações de tingimento	21
Tabela 2 - Tecnologias disponíveis para remoção de compostos orgânicos potencialmente tóxicos.....	30
Tabela 3. Parâmetros analisados, equipamentos utilizados e metodologia adotada.	41
Tabela 4. Composição química da argila e CBC	44
Tabela 5. Propriedades físicas das membranas cerâmicas.....	45
Tabela 6 - Parâmetros físico-químicos do Efluente 1 e do Filtrado 1.....	52
Tabela 7 - Parâmetros físico-químicos do Efluente 2 e do Filtrado 2.....	53
Tabela 8 - Parâmetros físico-químicos do Efluente 3 e do Filtrado 3.	54
Tabela 9 - Parâmetros dos Filtrados 1, 2 e 3 em comparação com critérios para reuso.	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVO GERAL.....	16
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 Efluentes industriais e seus tratamentos.....	17
3.2 Efluentes têxteis.....	20
3.3 Indicadores de qualidade da água.....	22
3.3.1 Cor.....	23
3.3.2 Odor.....	24
3.3.3 Turbidez	24
3.3.4 Sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais.....	25
3.3.5 Demanda química de oxigênio (DQO)	25
3.4 Processos de separação por membranas.....	26
3.5 Aplicação de membranas cerâmicas para o tratamento de efluentes industriais.....	28
3.5.1 Membranas cerâmicas de baixo custo para tratamento de efluentes.....	31
3.5.2 Agentes porogênicos.....	32
3.5.2.1 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).....	33
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1 MATERIAIS.....	35
4.2 MÉTODOS.....	35
4.2.1 Caracterização térmica, química e mineralógica das matérias-primas	37
4.2.1.1 Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG)	37
4.2.1.2 Análise química por fluorescência de raios X (EDX)	37
4.2.1.3 Difração de raios X (DRX)	37
4.2.2 Preparação das formulações	37
4.2.3 Confecção das membranas cerâmicas	38
4.2.4 Caracterização física das membranas cerâmicas	38
4.2.5 Caracterização microestrutural das membranas	40
4.2.6 Aplicação das membranas cerâmicas no tratamento do efluente têxtil.....	40

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1 Caracterização térmica, química e mineralógica das matérias-primas	43
5.1.1 Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG)	43
5.1.2 Análise química por fluorescência de raios X (EDX)	44
5.1.3 Difração de raios X (DRX)	44
5.2 Caracterização física das membranas	45
5.3 Caracterização microestrutural das membranas	46
5.4 Aspectos de qualidade física dos efluentes bruto e tratado	47
5.5 Avaliação dos parâmetros físico-químicos dos efluentes bruto e tratado	52
6 CONCLUSÕES	59
7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
REFERÊNCIAS	61

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os impactos causados ao meio ambiente em virtude da ação antrópica têm aumentado de forma alarmante. Tornou-se comum artigos científicos apontarem de forma recorrente que os recursos naturais, fauna e flora não suportam tamanha interferência externa.

O crescimento populacional dos grandes centros urbanos geralmente vem acompanhado da contínua expansão de atividades industriais e comerciais. A falta de um planejamento urbano adequado pode comprometer os níveis de sustentabilidade e ameaça diretamente todos os recursos ambientais da área.

A água é o bem mais valioso para o ser humano, pois é essencial para a saúde, além de ser recurso importante para a indústria da transformação. Porém, a realidade atual é que muitos países já estão passando por situações generalizadas de escassez hídrica, e a tendência é uma disponibilidade ainda menor de água a partir de 2050 (BUREK et al., 2016).

Segundo mais recente relatório da UNESCO (2018, p.2):

A demanda mundial por água tem aumentado a uma taxa de aproximadamente 1% por ano, devido ao crescimento populacional, ao desenvolvimento econômico e às mudanças nos padrões de consumo, entre outros fatores, e continuará a aumentar de forma significativa durante as próximas duas décadas. A demanda por água das indústrias e das residências aumentará muito mais rápido do que a demanda da agricultura, embora o setor agrícola continuará tendo o maior consumo em termos gerais. O aumento da demanda por água ocorrerá principalmente em países com economias emergentes ou em desenvolvimento (UNESCO, 2018).

A poluição pode ser considerada como a ação mais nociva e preocupante decorrente dos processos de produção e consumo da sociedade moderna, ocorrendo tanto de forma acidental, nos derramamentos, vazamentos e emissões, como também por meio de contaminação no lançamento de efluentes, gases, resíduos sólidos ou material particulado no meio ambiente. Muito embora a legislação vigente no país esteja contribuindo para um descarte mais responsável, estes impactos chegam a níveis críticos em áreas onde a fiscalização e prevenção não são eficazes (JURAS, 2015).

Ainda segundo UNESCO (2018, p.3):

Desde a década de 1990, a poluição hídrica piorou em quase todos os rios da América Latina, da África e da Ásia. Estima-se que a deterioração da qualidade da água irá se ampliar ainda mais durante as próximas décadas, o que aumentará as ameaças à saúde humana, ao meio ambiente e ao desenvolvimento sustentável. Em âmbito mundial, o maior desafio no que diz respeito à qualidade da água é a carga de nutrientes a qual, dependendo da região, é frequentemente associada à carga de agentes patogênicos. Centenas de produtos químicos também causam impactos na qualidade da água. Prevê-se que o aumento de exposição a substâncias poluentes será maior em países de renda baixa e média-baixa,

principalmente devido ao crescimento populacional e econômico, e à ausência de sistemas de gestão das águas residuais (UNESCO, 2018).

A água já é considerada por muitas empresas como fator estratégico para a sobrevivência em longo prazo. Em busca de redução de custos, aumento da competitividade e valorização dos ativos intangíveis, o uso racional da água pode ser observado nos processos produtivos, no tratamento de efluentes e em projetos de reuso e reflorestamento. Esta nova forma de pensar e manejar os recursos hídricos mostra que é possível reverter o quadro da degradação do meio ambiente, mas ainda não adquiriu escala expressiva (ANA, 2013). Por essa razão, esse tema merece atenção e aprofundamento.

As atuais relações de produção e consumo caminham, muitas vezes, em sentido divergente da sustentabilidade. Dessa forma, a gestão dos resíduos constitui um desafio, principalmente para o setor industrial, que trabalha com produção em larga escala, sendo responsável por uma grande parcela da carga poluidora existente.

Uma produção mais limpa pode ser entendida como a busca eficiente do uso de matérias-primas, energia e água, além da redução de fontes de resíduos e emissões, sendo geralmente o cenário ideal buscado pelos mais diversos setores industriais. Isso pode ser possível se certas medidas forem colocadas em prática, como por exemplo na eliminação ou diminuição do uso de solventes e produtos químicos tóxicos nos processos produtivos. Com relação ao consumo de água, usar cada vez menos esse recurso natural no sistema é importante, e merece atenção a questão do reuso e do lançamento dos efluentes de forma adequada (ANA, 2013).

Os impactos ambientais e sociais da degradação da qualidade das águas em virtude da ação antrópica têm reflexos econômicos nem sempre mensurados, tais como o aumento do custo de tratamento das águas, custos hospitalares com internações, a perda de produtividade na agricultura e na pecuária, a redução da pesca, a perda da biodiversidade e a perda de valores turísticos, culturais e paisagísticos. Para o Brasil encarar os problemas da poluição ambiental existentes e os do futuro, é necessário que as medidas de controle possam fazer parte do contexto de uma economia planejada com desenvolvimento social e sustentável. (BRASIL, 2014).

Os efluentes domésticos dos municípios geralmente possuem características similares com relação aos contaminantes e suas formas de tratamento, devendo a instalação de uma ETE- Estação de Tratamento de Esgoto - observar as características de desempenho de muitos sistemas municipais existentes e deduzir um conjunto ideal de parâmetros de projeto para o sistema em consideração. Isso não ocorre com os efluentes industriais, que dificilmente têm propriedades

similares entre si, e a ênfase passa a ser na análise dos resíduos gerados, e suas possibilidades de reuso e tratamento para um descarte adequado (WOODARD & CURRAN, 2006). Na maior parte dos casos, o tratamento de efluentes industriais constitui um desafio, dada a variedade de contaminantes orgânicos tóxicos, metais pesados e outras substâncias de difícil degradabilidade, e evitar a geração destes resíduos é uma alternativa improvável.

As indústrias dos ramos da mineração, alimentos, papel e celulose, petroquímica, farmacêutica e têxtil figuram como as maiores produtoras de águas residuais, com impactos significativos na litosfera, hidrosfera, atmosfera e aos seres humanos (ADEOLU, 2016). A busca por métodos de tratamento de efluentes mais eficazes e sustentáveis tem impulsionado diversas pesquisas, com relevantes contribuições tanto para o setor acadêmico como para o setor industrial.

Oferecendo boa estabilidade com menor custo de operação, processos de filtração por membranas são alternativas viáveis para tratamento de efluentes industriais. Todavia, apesar dos avanços alcançados, essa tecnologia ainda não atingiu seu ápice, necessitando de melhorias quanto ao custo de investimento, seletividade, controle do entupimento (*fouling*), para que a aplicação em larga escala seja efetivamente viável para o setor industrial (MORE et al., 2012; SAMAEI et al., 2018).

O efluente gerado pela indústria têxtil pode ser considerado um dos mais problemáticos ao meio ambiente. Primeiro, pelo grande volume de água exigido nas etapas de preparação, tingimento e acabamento, todas realizadas por via úmida. Em segundo lugar, o excesso de corantes e pigmentos que não se fixam nas fibras, além de outros reagentes auxiliares utilizados nessas etapas produzem águas residuais complexas com relação aos seus contaminantes, com altos valores de cor, turbidez, pH, temperatura, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), álcalis, sais e substâncias tóxicas (VERMA et al., 2012).

Com base nos dados fornecidos pela *Ecological and Toxicological Association of the Dyestuffs Manufacturing Industry* (ETAD), dos mais de 4000 corantes analisados, cerca de 90% apresentaram toxicidades, alguns com possibilidade inclusive de formação de subprodutos carcinogênicos ou mutagênicos, como é o caso dos azocorantes (KUNZ et al., 2002; MARCELINO et al., 2013).

Não há um sistema geral de tratamento para efluentes têxteis com alta coloração. Embora haja várias alternativas de tratamento, nenhuma pode ser considerada totalmente eficaz e algumas necessitam de associações de técnicas para obter resultados aceitáveis, tornando-se muitas vezes

inviável por gerar alto custo. Desta forma, muitos estudos têm-se concentrado em aumentar a eficiência das tecnologias já amplamente conhecidas, tornando os métodos mais sustentáveis e baratos (ALMEIDA et al., 2016).

É preciso inverter a forma de se lidar com o efluente. Não é mais cabível tratá-lo como um fardo a ser descartado ou um incômodo a ser ignorado, mas sim percebê-lo como fonte sustentável de energia, nutrientes e subprodutos úteis. É necessário alterar o paradigma da gestão das águas residuais: de “tratamento e eliminação” para “reuso, reciclagem e recuperação de recursos” (UNESCO, 2017). Isso é perfeitamente possível, desde que novas tecnologias sejam amplamente estudadas, implementadas e disponibilizadas para o setor produtivo.

A reciclagem e a reutilização de resíduos consistem em alternativas mais vantajosas em relação ao uso de recursos naturais “virgens”, proporcionando melhorias ambientais e de saúde da população. Isso porque diminuem sensivelmente o volume de extração de matérias-primas, do gasto energético e da emissão de poluentes, reduzindo a destruição da paisagem, fauna e flora. Embora haja boas e relevantes pesquisas sobre reciclagem e reutilização no Brasil, se comparado à quantidade de resíduos produzidos no país, este número ainda é bastante inexpressivo. Instituições de pesquisas de países dos continentes europeu e asiático tem dedicado mais esforços nesta área (MENEZES et al., 2002; ORTLEPP e LÜTZKENDORF, 2006; PACHECO-TORGAL e JALALI, 2010; INAZUMI et al., 2012; SIRVAIN, 2013; SEGUÍ-AMÓRTEGUI, 2014; BELLIN, 2015; CONKE, 2018; GOMES et al., 2018; JIANG et al., 2018; XIAO et al., 2018; DENG et al., 2019).

Processos de filtração por membrana possuem papel importante para a utilização sustentável de água e energia em todo o mundo, nos quesitos de facilidade de uso, impactos, flexibilidade e adaptabilidade. Além de já serem amplamente aplicados como solução para a dessalinização em países como Catar e Kuwait, por exemplo, essa tecnologia apresenta projeções promissoras de utilização na produção e purificação de biocombustíveis, recuperação de produtos valiosos na mineração e na biotecnologia, além do tratamento de efluentes domésticos e industriais. Por outro lado, ainda precisam ser melhorados em termos de custo, acessibilidade, consumo de energia, condições de operação e inovação. Essas melhorias requerem mais pesquisas por novos materiais e melhor controle dos parâmetros de operação (LE e NUNES, 2016).

Observa-se, nos mais recentes trabalhos, um relativo aumento de publicações envolvendo membranas produzidas com materiais de baixo custo com aplicação no tratamento de águas

residuais industriais e domésticas, justificando a relevância adquirida pelo tema nos últimos anos (KUMAR et al., 2016; JEONG et al., 2017; HUBADILLAH et al., 2018; AHMAD et al., 2018; MOUIYA et al., 2018).

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a aplicação de membranas cerâmicas à base de argila e cinza do bagaço da cana-de-açúcar no tratamento de efluentes têxteis.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar as matérias-primas utilizadas na formulação das membranas cerâmicas;
2. Caracterizar as membranas utilizadas nos tratamentos dos efluentes;
3. Analisar o nível de carga poluidora de efluentes brutos coletados em indústrias têxteis localizadas na região metropolitana de João Pessoa, PB, a partir de parâmetros de qualidade física e química;
4. Avaliar a eficiência de limpeza dos efluentes obtida pela filtração com as membranas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Efluentes industriais e seus tratamentos

Diversas etapas do processamento industrial utilizam água: incorporação ao produto, lavagens no maquinário e tubulações, sistema de resfriamento, sistema de geração de vapor, diluição de efluentes, no próprio processo industrial e nos banheiros e dependências. Desta forma, certamente algum resíduo será gerado, sendo obrigatório um tratamento deste efluente antes do seu lançamento. A escolha do tratamento adequado irá depender principalmente da carga poluidora e dos contaminantes presentes.

A vazão dos esgotos industriais é função precípua do tipo e porte da indústria, de seus processos e materiais utilizados, grau de reciclagem e reaproveitamento, existência de pré-tratamentos, entre outros. É importante destacar que mesmo indústrias do mesmo ramo e que fabriquem o mesmo produto podem apresentar vazões de despejo diferentes (VON SPERLING, 1996).

O principal objetivo da gestão de resíduos é o de minimizar a quantidade de material a ser descartado, por meio da recuperação de materiais com algum valor econômico e da redução do conteúdo de água empregado no processo. Além disso, merece atenção a questão da minimização dos impactos ambientais, de forma a atender aos requisitos de descarga estabelecidos pelos órgãos reguladores. A gestão de resíduos é um fator importante para definir o projeto e a operação das estações de tratamento, pois podem limitar a capacidade total da instalação se não forem projetados e operados adequadamente (HOWE et al., 2016).

De acordo com a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 430, de 13 de maio de 2011: *“Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis”* (CONAMA, 2011). Portanto, é de inteira responsabilidade das indústrias o gerenciamento de seus resíduos, perpassando as etapas de estudo e classificação do efluente, assim como o tratamento, transporte, lançamento e/ou armazenagem. Se não tratados corretamente, estes efluentes certamente suscitarão consequências ambientais, criminais, de saúde, de responsabilidade social e de sustentabilidade.

Em média, países com renda *per capita* alta tratam cerca de 70% das águas residuais urbanas e industriais que produzem. Todavia, essa proporção é bem menor nos países de renda média-alta (38%) e países de renda média-baixa (28%), chegando a 8% em países de renda baixa. Em âmbito global, portanto, estima-se que mais de 80% das águas residuais vêm sendo despejadas sem tratamento adequado (UNESCO, 2017).

Analisando a situação do atendimento da população brasileira com serviços de esgotamento sanitário, apenas 43% é atendida por sistema coletivo (rede coletora e estação de tratamento de esgotos); 12% é atendida por solução individual (fossa séptica); 18% da população se enquadra na situação em que os esgotos são coletados, mas não são tratados; e 27% é desprovida de atendimento, ou seja, não há coleta nem tratamento de esgotos. Esses valores, portanto, ainda são insatisfatórios, tendo em vista que não há uma uniformização das políticas e serviços oferecidos em todas as regiões do país (ANA, 2017).

Os contaminantes químicos distinguem-se daqueles de caráter infeccioso ou parasitário, por serem prejudiciais à saúde do homem a sua exposição prolongada, sendo o alvo de preocupação substâncias com propriedades tóxicas cumulativas, como os metais pesados e os agentes cancerígenos. Geralmente, a toxicidade desses elementos varia em relação a sua concentração na água, tempo de exposição e suscetibilidade individual. A contaminação química da água também pode ser ocasionada pela formação de produtos secundários durante o seu tratamento, alguns deles com potencial de risco para a saúde bastante significativo (BRASIL, 2014).

De forma geral, os processos de tratamento de efluentes industriais envolvem processos físicos, químicos e biológicos. O tratamento biológico envolve processos aeróbios, anaeróbios e enzimáticos, com boa aplicabilidade na remoção de matéria orgânica e baixo custo, porém são bastante sensíveis a mudanças operacionais, por exemplo variações de pH ou temperatura. Processos químicos, além dos mais tradicionais como incineração e precipitação/coagulação, englobam os processos oxidativos avançados, que geralmente não são atrativos economicamente. Nos físicos, não há degradação ou eliminação dos contaminantes, consistindo na manipulação ou separação das fases, porém com excelente eficiência, principalmente se aplicado como tratamento primário (FREIRE et al., 2000; DASGUPTA et al., 2015).

Os sistemas de tratamento avançados emergiram de forma substancial nos últimos anos, por oferecerem expectativa de remoção mais abrangente que os tratamentos convencionais, como por

exemplo, na remoção adicional de cor, odor, sabor, compostos potencialmente tóxicos, como metais pesados, ou microrganismos patogênicos (BITTENCOURT e DE PAULA, 2014).

Observa-se um aumento dos estudos diante da complexidade e diversidade dos efluentes industriais enfatizando a importância da caracterização dos efluentes para uma escolha adequada do método de separação e reuso que deverá ser aplicado, visto que, essas variáveis apresentam correlação direta com a eficiência de remoção e custo associado ao processo. Esses estudos propõem materiais e tratamentos alternativos, além de melhorias de condições de operação (WOODARD & CURRAN, 2006). De forma esquemática, a Figura 1 apresenta um modelo de etapas na implementação de um sistema de tratamento de efluentes industriais.

Figura 1 - Abordagem de um sistema de tratamento de efluente industrial



Fonte: Traduzido de Woodard & Curran (2006)

3.2 Efluentes têxteis

A indústria têxtil no Brasil, com produção média têxtil acima de 1,3 milhões de toneladas no último ano, é, segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil (ABIT), o segundo maior empregador da indústria de transformação, perdendo apenas para os setores de alimentos e bebidas em conjunto. Esse setor ocupa posição de destaque no cenário mundial, entre os cinco maiores produtores do mundo, com produção de confecção acima de 8,9 milhões de peças (ABIT, 2018).

Do ponto de vista ambiental, este setor industrial caracteriza-se por consumir grandes quantidades de água, chegando em alguns casos ao valor de 3.000 metros cúbicos consumidos por dia em apenas uma planta industrial (KARCI, 2014). Dados mais recentes do Brasil disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), estimaram que a vazão de retirada de água para fabricação de produtos têxteis foi de 5,197 m³/s, dos quais 1,414 m³/s se incorporaram ao produto final, restando nesse caso 3,783 m³/s (cerca de 72,8%), que retornam aos corpos hídricos, geralmente de forma contaminada.

Na produção têxtil, uma grande quantidade de água e compostos químicos de diferentes especialidades (corantes, amaciantes, alvejantes, detergentes, óleos, agentes de fixação e de colagem, compostos orgânicos, entre outros) são utilizados no processo. Muitos desses produtos químicos se incorporam ao produto final, enquanto o restante é removido do tecido, sendo purgado na corrente do efluente. Essa elevada carga de contaminantes despertou a atenção das autoridades quanto aos riscos associados a esse descarte (NAVEED et al., 2006).

O processo de tingimento é etapa essencial para a qualidade do produto final e seu sucesso comercial. O consumidor, por exemplo, exige que o produto apresente algumas características básicas, como padronagem e beleza da cor, além de elevado grau de fixação em relação à luz, lavagem e transpiração. Para atender a estes requisitos, uma gama de produtos químicos coloridos vem sendo sintetizados nos últimos cem anos, dos quais cerca de dois mil estão disponíveis para a indústria têxtil, com classificações em função da sua estrutura química ou com relação ao seu modo de fixação (GUARATINI e ZANONI, 2000). A Tabela 1 apresentada a seguir resume algumas características dos corantes mais comumente utilizados durante o tingimento.

Tabela 1 - Características dos corantes utilizados nas operações de tingimento

Classe Corantes	Descrição	Tipo de fibras	Fixação	Poluentes associados
			Típica (%)	
Ácidos	Compostos aniônicos solúveis em água.	Lã e Poliamida	80 – 93	Cor, ácidos orgânicos e corantes não fixados.
Catiônicos ou Básicos	Compostos catiônicos, solúveis em água, aplicáveis em banho fracamente ácido.	Acrílico e alguns tipos de poliéster	97 – 98	Fixação quase que total na fibra. Sal, ácidos orgânicos, retardantes, dispersantes, entre outros.
Diretos	Solúveis em água, compostos aniônicos. Podem ser aplicados diretamente na celulose sem mordente (ou metais como cromo e cobre).	Algodão, Raion e demais fibras celulósicas	70 – 95	Cor, sal, corante não fixado, fixadores; agentes catiônicos surfactantes, antiespumante, agentes retardantes e igualizantes, entre outros.
Dispersos	Insolúveis em água, compostos não iônicos.	Poliéster, Acetato e outras fibras sintéticas	80 – 90	Cor, ácidos orgânicos, agentes de igualização, fosfatos, antiespumantes, lubrificantes, dispersantes, entre outros.
Reativos	Solúveis em água, compostos aniônicos, classe mais importante de corantes.	Algodão, Lã e outras fibras celulósicas.	60 – 90	Cor, sal, álcalis, corantes hidrolisados, surfactantes, antiredutores orgânicos, antiespumantes, entre outros.
Sulfurosos (Enxofre)	Mercapto corantes. Compostos orgânicos contendo enxofre e polisulfetos em sua formulação.	Algodão e outras fibras celulósicas	60 – 70	Cor, sal, álcalis, agentes oxidantes, agentes redutores e corantes não fixados, entre outros.
Cuba ou Tina	Tina Corantes tipo Redox, insolúveis em água. A “mais nobre” classe de corantes.	Algodão e outras fibras celulósicas	80 – 95	Cor, álcalis, agentes oxidantes, agentes redutores, entre outros.

Fonte: CETESB (2009).

Os corantes aplicados na indústria têxtil se enquadram na categoria de poluentes emergentes. Segundo Horvat et al. (2012), esses compostos têm adquirido uma atenção especial na última década, pois embora não tenham limites previamente definidos nas legislações ambientais,

o seu impacto ambiental em função de atividades antrópicas precisa ser estudado sob o aspecto toxicológico. Se essa questão for conduzida de forma negligente, certamente irá comprometer seriamente os ecossistemas aquáticos e terrestres.

Tendo em vista que a maioria dos corantes utilizados pela indústria têxtil não são biodegradáveis, o tratamento biológico, preferido pelas indústrias pelo custo, geralmente não consegue uma remoção eficiente. Portanto, para o atendimento das diretrizes ambientais, a estação de tratamento de efluente de uma indústria têxtil necessita de processos mais complexos e caros, combinando etapas químicas, físicas e biológicas, para que o descarte seja adequado. A possibilidade de reuso total ou parcial deste efluente tratado no processo produtivo é bastante desejável, dada a grande quantidade de água demandada durante a produção (MARCELINO et al., 2013).

Um dos métodos mais efetivos para tratamento de efluente têxtil compreende a combinação de coagulação seguida de filtração por membranas. Além do tratamento do efluente, a tecnologia de filtração por membranas pode ser útil nos processos têxteis de impressão, limpeza, tingimento, dimensionamento e na recuperação do látex e de corantes (NAVEED et al., 2006).

Segundo Robinson (2001), a principal vantagem da utilização da filtração por membranas para o tratamento de um efluente têxtil é a capacidade de clarificar, concentrar e separar totalmente o corante contaminante, suportando condições severas de operação não permitidas em outros métodos de tratamento, como altas temperaturas, ataques químicos e microbianos. Em contrapartida, há que se pensar no gerenciamento do lodo concentrado obtido e a necessidade de outros tratamentos auxiliares para que a água esteja apta para reuso.

3.3 Indicadores de qualidade da água

Para caracterizar uma água é necessário um estudo de diversos parâmetros, separados sob os aspectos físicos, químicos e biológicos, que são indicadores da qualidade e se constituem não conformes quando alcançam valores discordantes aos estabelecidos para determinado uso (BRASIL, 2014).

Muitas das variações dos parâmetros de qualidade da água têm origem nos fenômenos naturais, todavia parte dessas variações se dá em virtude da ação antropogênica, tanto de forma

dispersa (aplicação de fertilizantes ou defensivos agrícolas no solo, por exemplo) como de forma concentrada (despejos domésticos ou industriais) (VON SPERLING, 1996).

O *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA/AWWA/WEF, 2012) preceitua que a avaliação física de uma amostra deve englobar quaisquer termos que possam ajudar a descrever as suas características visíveis, como por exemplo a presença de cor, turbidez, sólidos em suspensão, microrganismos, sedimentos, material flutuante e outras partículas detectáveis a olho nu. Medidas numéricas, sempre que possível, devem ser utilizadas, como é o caso dos parâmetros cor, turbidez e sólidos suspensos totais.

3.3.1 Cor

A cor na água pode resultar da presença de íons metálicos naturais (ferro e manganês), húmus e materiais de turfa, plâncton, ervas daninhas, além dos despejos domésticos e industriais. Para efeito de caracterização de águas para abastecimento, distingue-se a cor aparente, na qual se consideram as partículas suspensas, da cor verdadeira, após centrifugação da amostra (APHA/AWWA/WEF, 2012).

A cor pode ser determinada através da comparação visual, utilizando uma fonte de luz, com cloroplatinato de cobalto ou com discos de cores semelhantes a esta solução. Para efluentes, que geralmente são complexos quanto aos seus contaminantes, este procedimento não é o mais adequado (ABNT, 1997), tendo em vista tratar-se de um método suscetível a tendências pessoais dos observadores. Deve-se recorrer aos métodos instrumentais, como a espectrofotometria, que permitem inclusive a correção de possíveis interferências, gerando resultados mais reprodutíveis (SILVA e DE OLIVEIRA, 2001).

Os corantes são altamente detectáveis a olho nu, mesmo em concentrações tão baixas quanto 1 ppm (mg/L). Desta forma, uma pequena quantidade lançada de efluente de forma não-controlada consegue provocar mudanças na coloração de rios, interferindo fatalmente na absorção da luz pelos habitantes vegetais e animais do ambiente aquático. A acumulação e o transporte para as estações de tratamento podem também contaminar mananciais e a água distribuída à população (GUARATINI e ZANONI, 2000).

A remoção da cor aparente pode indicar a consequente diminuição de partículas suspensas, matéria orgânica, além da diminuição da concentração do corante utilizado. A literatura já

apresentou diversos estudos que evidenciaram que processos de tratamentos convencionais, como ozonização, branqueamento, oxidação com peróxido de hidrogênio são inadequados para o tratamento de corantes têxteis, que geralmente consistem de compostos aromáticos estáveis à luz, agentes oxidantes e à digestão aeróbia (FERSI et al., 2005).

3.3.2 Odor

Com relação ao odor e ao sabor, está associada tanto à presença de substâncias químicas ou gases dissolvidos, quanto à atuação de alguns micro-organismos, notadamente algas. Neste último caso, são obtidos odores que podem até mesmo ser agradáveis (odor de gerânio e de terra molhada) além daqueles considerados como repulsivos (odor de ovo podre, por exemplo). Despejos industriais que contêm fenol, mesmo em pequenas concentrações, apresentam odores bem característicos. Vale destacar que substâncias altamente deletérias aos organismos aquáticos, como metais pesados e alguns compostos organossintéticos não conferem nenhum sabor ou odor à água, por isso a investigação destes contaminantes, mesmo que de forma qualitativa, é importante (BRASIL, 2014).

3.3.3 Turbidez

A turbidez é uma expressão da propriedade ótica que causa a dispersão e absorção da luz, ao invés de sua transmissão de forma linear através da água. Tem grande relevância, tanto no ambiente aquático, por interferir diretamente nos processos biológicos que dependem da penetração da luz, como também no abastecimento de água, seja por razões estéticas, ou mesmo influenciando nos processos de tratamento. Na filtração, quanto maior a turbidez, mais difícil e oneroso se torna o seu processo, por isso é geralmente impraticável a utilização de filtros lentos em pequenas comunidades. Águas turvas interferem também na desinfecção, na medida em que agentes infecciosos adquirem uma certa proteção no interior das partículas (SILVA; DE OLIVEIRA, 2001).

Para análise de águas, o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA/AWWA/WEF, 2012) recomenda a medição da turbidez pelo método nefelométrico (método 2130 B), através de turbidímetros eletrônicos comerciais, que conseguem operar com bons resultados em uma faixa de 0 a 1 unidade nefelométrica de turbidez (NTU). Neste método, uma

célula detectora é colocada em ângulo reto com relação a fonte de luz para medir a luz espalhada pelas partículas. Os principais cuidados durante a operação do equipamento para que não haja interferências na medição incluem: evitar a formação de bolhas de ar e a utilização de cubetas sujas ou riscadas (SABESP, 1999a).

3.3.4 Sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais

A presença de sólidos na água tem origem não somente física, como também química e biológica, distribuídos da seguinte forma: em suspensão (sedimentáveis e não sedimentáveis), que são os sólidos que geralmente ficam retidos durante o processo de filtração, e os dissolvidos (voláteis e fixos), que representam todas as substâncias que permanecem em solução mesmo após a filtração. A entrada de sólidos na água pode ocorrer de forma natural (processos erosivos, organismos e detritos orgânicos) ou antropogênica (lançamento de lixo e esgotos) (SABESP, 1999b; BRASIL, 2014).

A natureza e quantidade de matéria dissolvida e não dissolvida em água variam enormemente. Águas potáveis apresentam fração de dissolvidos considerável, sob a forma de sais inorgânicos, pequenas quantidades de matéria orgânica e gases dissolvidos. Conforme o nível de poluição dos corpos d'água aumenta, são observados altos valores de matéria suspensa e coloidal (SILVA e DE OLIVEIRA, 2001). Por isto, dados de sólidos têm sua importância para o acompanhamento na eficiência dos sistemas de tratamento para águas naturais e residuárias.

3.3.5 Demanda química de oxigênio (DQO)

A DQO é um parâmetro que informa a quantidade de oxigênio consumido por materiais e por substâncias orgânicas e minerais. Baseia-se no princípio de que todos os compostos orgânicos, com poucas exceções, podem ser oxidados pela ação de agentes oxidantes fortes em condições ácidas. Após vários estudos, concluiu-se que o dicromato de potássio, $K_2Cr_2O_7$, seria o reagente mais viável a ser utilizado, tendo em vista a sua capacidade de oxidar uma grande variedade de substâncias orgânicas, de modo quase completo, gerando dióxido de carbono e água. Como todos os agentes oxidantes são usados em excesso, deve-se medir a quantidade remanescente no final da

reação, de modo a se calcular a quantidade realmente usada na oxidação da matéria orgânica (SABESP, 1997; GRANER et al., 1998).

Enquanto a DQO mede toda a matéria orgânica digerida por um reagente específico de digestão, a demanda biológica de oxigênio (DBO) utiliza microrganismos para decompor o material orgânico na amostra por respiração aeróbia, ao longo de um período de incubação definido. Como a decomposição bioquímica geralmente não ocorre de forma completa, os valores de DQO costumam ser maiores que na DBO. Além desta vantagem, os resultados de DQO são rápidos e confiáveis, não necessitando dos cinco dias de incubação, comum nas análises de DBO (VON SPERLING, 1996; APHA/AWWA/WEF, 2012).

A DQO é um parâmetro essencial nos estudos de caracterização e tratamento de esgotos sanitários e industriais, tendo em vista que fornece a biodegradabilidade dos despejos e o seu potencial poluidor. Altos valores de DQO indicam maiores níveis de matéria orgânica oxidável, o que reduz sensivelmente a quantidade de oxigênio dissolvido no ambiente receptor (VON SPERLING, 1996). Os valores de DQO são expressos em termos de miligramas de oxigênio consumido por litro de amostra.

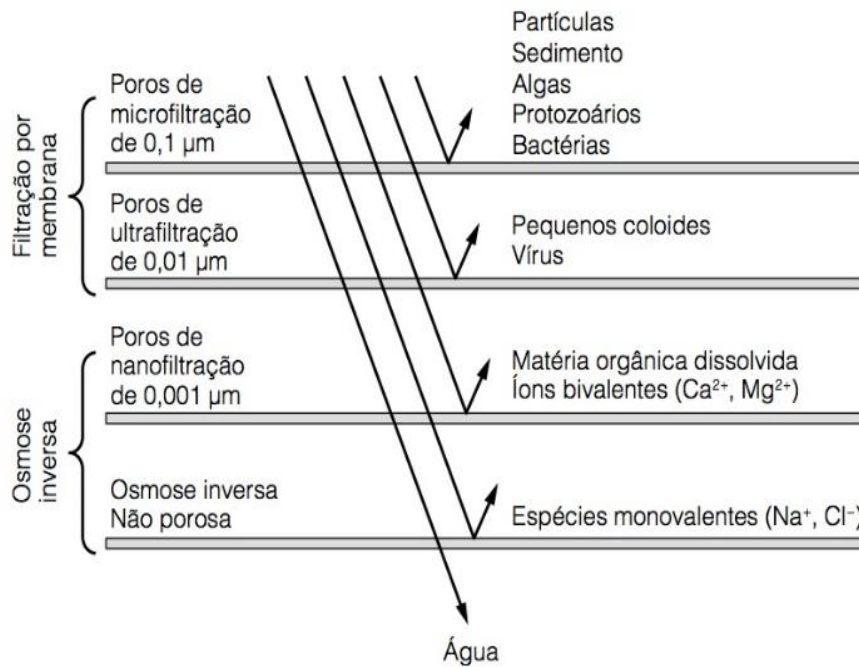
3.4 Processos de separação por membranas

Os processos de separação por membranas figuram como uma tecnologia promissora no segmento industrial, impulsionando diversos estudos em busca de novos materiais e melhoria de condições de operação. A seletividade característica das membranas permite a escolha das frações de permeado e concentrado, e essa versatilidade tem permitido as membranas atuarem em processos de concentração, beneficiamento, pasteurização, tratamento, clarificação, desinfecção, entre outros (LE e NUNES, 2016; SAMAEI et al., 2018).

As instalações de filtração por membrana não requerem instalações adicionais para coagulação, floculação e sedimentação para a remoção eficaz das partículas. Em consequência, são reduzidos os requisitos para armazenamento e manuseio de produtos químicos e a geração de resíduos, permitindo que as instalações de membrana sejam mais compactas e automatizadas. Isso permite uma economia considerável de custos de implantação e de operação nas indústrias (HOWE et al., 2016).

Os tipos de filtração por membranas são escolhidos em função do tamanho dos poros e da pressão utilizada no processo. A Figura 2 apresenta, de forma ilustrativa, a hierarquia dos processos de filtração por membranas conduzidos sob pressão.

Figura 2 - Hierarquia dos processos de filtração por membranas conduzidos sob pressão



Fonte: Howe et al. (2016).

Embora de funcionamentos similares, a filtração por membranas se difere da osmose reversa. A primeira se baseia no mecanismo da filtragem ou a exclusão por tamanho, podendo atingir a exclusão perfeita de partículas, sem depender de parâmetros como concentração ou pressão. Já a segunda envolve um mecanismo de difusão, em que a eficiência de separação é dependente da concentração do soluto no afluente, da pressão e da vazão de água (HOWE et al., 2016).

A caracterização de membranas permite determinar a sua natureza morfológica (tamanho de poro, distribuição de tamanho de poro, espessura e porosidade) e natureza funcional (fluxo do permeado e seletividade). A partir dos resultados de caracterização, é possível prever como será o

comportamento da membrana durante a filtração para então prever condições ideais de operação (DIEL, 2010).

As membranas cerâmicas apresentam algumas vantagens em comparação às membranas poliméricas, o que possibilita sua aplicação em escala industrial com melhor desempenho sob condições severas de operação, como por exemplo, em meio fortemente ácido. Suas principais vantagens incluem elevada estabilidade química e física, com excelente resistência térmica, mecânica, vida útil longa e bioinertidade. Os custos de implantação e modificação e a dependência de um suporte adequado são apontados como as maiores desvantagens (BUEKENHOUDT, 2008).

3.5 Aplicação de membranas cerâmicas para o tratamento de efluentes industriais

O desempenho das membranas durante a filtração está ligado às propriedades físicas e químicas do material. O material da membrana ideal é aquele que consegue produzir um elevado fluxo sem sofrer obstrução ou incrustação, durável fisicamente, quimicamente estável e resistente, bioinerte e de baixo custo. Para tanto, propriedades como classificação da retenção, hidrofobicidade, carga e rugosidade da superfície, porosidade, durabilidade mecânica e estabilidade química, física e biológica, além dos custos de fabricação são aspectos relevantes no estudo de membranas (HOWE et al., 2016).

A grande maioria das membranas cerâmicas porosas disponíveis no mercado são produzidas a partir de óxidos de Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 e SiO_2 e suas misturas. Embora de custo elevado, estes materiais têm sido bastante utilizados para a fabricação de membranas por conferirem boa estabilidade química, térmica e hidrotérmica. Monitorar etapas como parâmetros de sinterização e mudanças de fase são importantes para melhoria das propriedades da membrana, além da prevenção de defeitos estruturais. Algumas propriedades podem ainda ser melhoradas por meio de dopagem (BUEKENHOUDT, 2008).

Estudos baseados nos processos de separação por membranas com aplicação no tratamento de águas tiveram seu início documentado na década de 60, com a produção de membranas de acetato de celulose para aplicação em osmose reversa. A utilização de membranas tem se mostrado como alternativa viável e eficiente em comparação aos processos de separação tradicionais, como por exemplo, coagulação, filtração e adsorção, que geralmente são limitados pela qualidade da

fonte de alimentação e pelas condições de operação, por exemplo, pH, temperatura ou reagentes utilizados (RIBEIRO; DE LUCA, 1998).

Para remoção de matéria orgânica e Trihalometanos - THMs - presentes principalmente em águas residuais e efluentes, Jacangelo et al. (1995) destaca que a filtração por membrana obteve o melhor resultado com relação à eficiência de remoção, muito embora o seu custo de implantação seja um pouco maior no início se comparado aos outros processos convencionais. Graças à sua simplicidade em termos de operação e manutenção, é bastante atrativo a aplicação em pequenos módulos operacionais. Dependendo da origem da água a ser utilizada, geralmente é interessante realizar um pré-tratamento, com o objetivo de otimizar a filtração e diminuir o *fouling*. Grande parte dos estudos tem buscado a melhoria destas condições de operação, além da aplicação de materiais alternativos para baratear custos.

O *fouling* é considerado um fator limitante nos processos de separação por membrana, por reduzir o fluxo de permeado, diminuir a vida-útil na membrana e aumentar os custos de operação para sua prevenção. Por envolver fenômenos de cristalização e transporte, suas causas não são facilmente detectadas, sendo geralmente em função das características da membrana, do modo de alimentação e de condições do sistema. Recomenda-se um pré-tratamento por coagulação ou por carvão ativado em pó quando membranas de baixa pressão são selecionadas, como por exemplo, microfiltração e ultrafiltração (HOFS, 2011).

Em todos os processos que envolvem filtração por membrana, o *fouling* é um desafio inevitável, podendo ser de origem orgânica, inorgânica ou biológica. As características e propriedades das membranas, como estrutura química e morfologia, são responsáveis por ampliar ou diminuir o *fouling*. A solução pode envolver otimização das condições de operação, limpeza química ou pré-tratamento (Ex. coagulação, precipitação ou cloração), muito embora a modificação da membrana aparece como uma alternativa que pode viabilizar melhores resultados (LE e NUNES, 2016).

Com o rápido desenvolvimento e diversificação da industrialização, começaram a surgir águas residuais com determinados poluentes que não podem ser removidos com sucesso pelos tratamentos convencionais, por exemplo, compostos orgânicos persistentes, pesticidas, farmacêuticos e produtos químicos com efeitos endócrinológicos (em inglês EDCs). Esses, mesmo em pequenas quantidades, apresentam risco à saúde humana, animal e vegetal (LE e NUNES,

2016). A Tabela 2 apresenta um resumo de vantagens e desvantagens de alguns processos estudados para remoção desses compostos.

Tabela 2 - Tecnologias disponíveis para remoção de compostos orgânicos potencialmente tóxicos

Processo	Vantagens	Desvantagens
Coagulação química	Processo de tratamento de baixo custo para remoção de cor e turbidez	Produz grande quantidade de lodo; remove uma quantidade limitada de compostos.
Eletrocoagulação	Possibilidade de adsorção, degradação e remoção de compostos orgânicos solúveis e insolúveis	Poluição secundária (compostos orgânicos clorados e metais pesados); alto custo da eletricidade; a literatura apresenta poucos relatos de remoção de traços orgânicos.
Adsorção por carvão ativado	Opção de tratamento terciário bastante utilizada; remove uma grande variedade de traços orgânicos.	A competição durante a adsorção promove o desenvolvimento de vários grupos de compostos; a regeneração e eliminação do adsorvente potencialmente perigoso gasto é difícil.
Nanofiltração/ Osmose reversa	Boa remoção de uma ampla gama de orgânicos por meio da exclusão de tamanho e repulsão eletrostática	Elevado grau de complexidade associado ao processo de separação; produção de lodo concentrado; adsorção à superfície da membrana e difusão de orgânicos hidrofóbicos através da membrana.
Processos oxidativo avançados	Degradação de vários traços orgânicos pela geração de um grande número de radicais livres altamente reativos, superando de longe os oxidantes convencionais em eficiência.	Necessidade de pré-tratamento para remoção de sólidos em suspensão, sequestrantes de radicais e íons concorrentes; formação de subprodutos tóxicos; alto custo; existem poucas plantas operacionais em tamanho real.
Biorreator de membrana	Excelente remoção de compostos orgânicos hidrofóbicos em um processo biológico compacto de etapa única.	Remoção ineficiente de orgânicos hidrofílicos, requerendo uma etapa de tratamento.

Fonte: Traduzido e adaptado de Alexander et al. (2012).

Quando implantados individualmente, os processos avançados de tratamento apresentam suas limitações de operação e de eficiência, de forma que não oferecem uma remoção completa

para uma ampla gama de compostos que podem estar presentes em águas residuais. Para superar isso, o conceito de processos combinados, como por exemplo associação de biorreatores de membrana com nanofiltração ou osmose reversa, ou a combinação de duas filtrações (ultrafiltração e osmose reversa), apresentam um resultado aprimorado, por herdar vantagens de ambos os processos (HAI et al., 2015).

3.5.1 Membranas cerâmicas de baixo custo para tratamento de efluentes

Adotar princípios e ferramentas de uma produção mais limpa consiste em incorporar ideias e práticas sobre sustentabilidade na produção, com o fim de reduzir desperdícios, atender com maior eficácia às normas e requisitos ambientais e promover tratamento ou reaproveitamento dos resíduos gerados. Se aplicados corretamente, podem trazer avanços consideráveis, como a redução de custos e geração de vantagem competitiva, além de ganhos ambientais e de melhoria da saúde da população (OLIVEIRA NETO et al., 2015).

Atualmente, o reaproveitamento dos resíduos urbanos está recebendo maior atenção, tendo em vista o aumento do volume de rejeitos sólidos e da indisponibilidade cada vez maior de locais para descarte desse material, principalmente em grandes centros urbanos. A indústria de cerâmica possui destaque na reciclagem e reutilização, com elevada capacidade de absorção de resíduos em função de seu alto volume de produção, podendo inclusive estabilizar e neutralizar vários resíduos tóxicos (MENEZES et al., 2002 e SILVA et al., 2017).

A busca pela confecção de membranas de baixo custo tem incentivado diversas pesquisas por materiais alternativos e aproveitamento de resíduos de outros processos. O objetivo principal é a obtenção de desempenho compatível com os parâmetros exigidos pela indústria, para que seja viável a substituição dos módulos comerciais, gerando economia de processo, e podendo ser aplicados em processos de tratamento de águas residuais, biorreatores e em etapas de purificação, concentração e separação. Por essa razão, os esforços estão em desenvolver novas membranas cerâmicas a partir de matérias-primas mais comuns e baratas, como argila, caulim, zeólita, bauxita, diatomita, andaluzita, entre outras (LORENTE-AYZA et al., 2015).

Dentre os mais variados tipos de argila estudados, o caulim tem sido considerado uma matéria-prima de baixo custo promissora para a confecção de membranas cerâmicas, graças ao seu arranjo cristalino, composição química e propriedades mineralógicas adequadas (HEDFI et al.,

2014 e HUBADILLAH et al., 2018). A aplicação de caulim melhora as propriedades mecânicas, químicas e térmicas da membrana, oferecendo baixa plasticidade e excelente comportamento refratário (MITTAL et al., 2011). Além disso, na etapa de tratamento térmico, necessita de temperaturas bem menores que outros materiais, como a alumina, produzindo custos menores.

Em sua tese de doutorado, Souza (2016) confeccionou e caracterizou membranas cerâmicas para tratamento de água, a partir de matérias primas regionais (argila caulinítica, pó de conchas de mariscos e sacarose), apresentando características de desempenho compatíveis com membranas comerciais, podendo ser utilizadas para microfiltração, ultrafiltração e nanofiltração. Estudos dessa natureza evidenciam a viabilidade e a necessidade de se explorar novas formulações de membranas com materiais de baixo custo para as mais variadas aplicações.

3.5.2 Agentes porogênicos

Os materiais porosos encontram hoje em dia muitas aplicações tanto em produtos finais como materiais em processos tecnológicos, devido às suas propriedades e características especiais que normalmente não podem ser alcançadas quando estão na fase densa convencional, e isto inclui processos de tratamento de água. A necessidade de utilização de cerâmicas porosas vem aumentando principalmente em ambientes onde altas temperaturas, desgaste extensivo e meios corrosivos estão presentes (OBRADOVIC et al. 2017).

Segundo Studart et al. (2006), cerâmicas porosas podem ser obtidas de duas formas convencionais: pela sinterização parcial de pós inicialmente porosos ou pela sinterização de misturas de pós que sofrem reações de estado sólido e formam poros. Com a crescente diversificação da aplicação das cerâmicas porosas, a necessidade de controle da microestrutura do material (porosidade, morfologia dos poros e distribuição do tamanho) levou ao surgimento de novas rotas de preparação, como é o caso do método de modelagem sacrificial e do método direto de formação de espuma.

Em processos de separação por membrana, uma alta porosidade é requerida para minimizar a resistência à permeação. Portanto, o desafio é manter a resistência mecânica do material cerâmico tendo em vista o grande volume de poros introduzido. É necessário desenvolver maneiras eficazes de preparar cerâmicas porosas com excelentes propriedades mecânicas que possam ser aplicadas com sucesso em processos industriais (KIM et al., 2003).

Os agentes porogênicos são os materiais responsáveis pela formação de poros na membrana durante a sinterização. Podem ser tanto inorgânicos, por exemplo, carbonato de amônio, bicarbonato de amônio e sais de cloreto de amônio, grafite, cinza de carvão, como orgânicos, tais como fibras e alguns polímeros (amido, serragem, poliestireno, polimetacrilato de metila). Reduzir custos de fabricação optando por matérias-primas regionais deve ser aplicado inclusive na escolha do agente porogênico a ser utilizado (WU et al., 2015).

Souza (2016) aplicou somente matérias-primas de baixo custo como agentes formadores de poros (sacarose, calcita e pó de conchas de mariscos) para a fabricação de membranas cerâmicas, e evidenciou a viabilidade da aplicação destes materiais, obtendo membranas ausentes de defeitos visíveis ao microscópio, com boa resistência mecânica e altos valores de porosidade (37,50% a 46,70%).

3.5.2.1 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC)

Segundo dados da CONAB (2018), a produção de cana-de-açúcar para fabricação de açúcar, etanol, etanol anidro e etanol hidratado, na safra 2017/2018, foi de 633,26 milhões de toneladas, com área colhida de 8.729,5 mil hectares, colocando o Brasil entre o maior produtor e exportador dessa *commodity* no mundo. Em contrapartida, esse elevado volume de produção está diretamente ligado ao acúmulo de resíduos.

O bagaço da cana-de-açúcar é o subproduto mais abundante nas usinas durante a etapa de beneficiamento. Esse posteriormente é aproveitado como combustível para geração de energia nas caldeiras, e após esta queima, as cinzas são liberadas de duas formas: abaixo da grelha da caldeira (cinza pesada) ou de forma particulada nos gases de combustão (cinza volante). Pobre em nutrientes, de difícil deterioração e contendo metais pesados em sua composição, a sua aplicação nos solos não é recomendável, restando como única opção a destinação aos aterros sanitários (CASTRO; MARTINS, 2016).

Tomando por base o valor da safra 2017/2018 do relatório da CONAB (2018), pode-se estimar, no mínimo, que algo em torno de 3 a 4 milhões de toneladas de CBC foram produzidas nesse período. Com o crescimento recorrente de casos de poluição já registrados na natureza em virtude da destinação incorreta de resíduos, a mera deposição do CBC, gerando elevada quantidade

de rejeito, não é mais aceitável nos dias de hoje, principalmente se algum valor ambiental, energético ou econômico ainda estiver presente neste resíduo (TEIXEIRA et al., 2015).

Além da fração orgânica (cerca de 35% em peso), que a literatura já avaliou a sua aplicação na fabricação de briquetes de combustível (TEIXEIRA et al., 2011), o CBC apresenta a sílica como componente mais presente na sua fração inorgânica, similar à areia natural, podendo servir como substituto deste material no processamento de materiais cerâmicos (SALES; LIMA, 2010; TEIXEIRA et al., 2015 e PHONPHUAK; CHINDAPRASIRT, 2018).

Novas pesquisas começaram a surgir buscando aplicações viáveis e econômicas para o CBC, como material adsorativo eficiente na remoção de metais tóxicos de efluentes (FERREIRA et al., 2015), como aditivo em concretos e argamassas e como substituto parcial do cimento Portland (CORDEIRO et al., 2009 e FERNANDES et al, 2015).

Outros estudos visam a otimização da obtenção da biosílica a partir dessa cinza, material que poderia ser aplicado no setor industrial como matéria-prima para tintas, cosméticos, pneus, revestimentos e desumidificantes (ALVES et al., 2017). Todavia, um dos principais desafios são as diferentes composições dessa cinza, que variam em função da temperatura de queima e das características do solo.

Phonphuak e Chindaprasirt (2018), ao analisarem a incorporação de CBC (de 0 a 10% em peso) em tijolos de argila para verificação de suas propriedades mecânicas (absorção de água, resistência à compressão, perda ao fogo, densidade e porosidade), concluíram que o CBC pode atuar como agente formador de poros na fabricação de artefatos de cerâmica vermelha. Materiais cerâmicos, conforme Karayannis et al. (2017), são apontados como excelentes imobilizadores de metais pesados oriundos de resíduos sólidos, como cinzas de usinas, subprodutos da metalurgia e lodos de esgotos.

Observa-se, na literatura, uma lacuna de estudos sobre a aplicação da CBC em composições de membranas cerâmicas, como também a aplicação dessas membranas em tratamento de águas e efluentes.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Foram analisadas três amostras de efluentes têxteis coletados em indústrias localizadas na região metropolitana de João Pessoa, PB. As amostras foram denominadas de Efluente 1, Efluente 2 e Efluente 3, assim como seus respectivos Filtrado 1, Filtrado 2 e Filtrado 3.

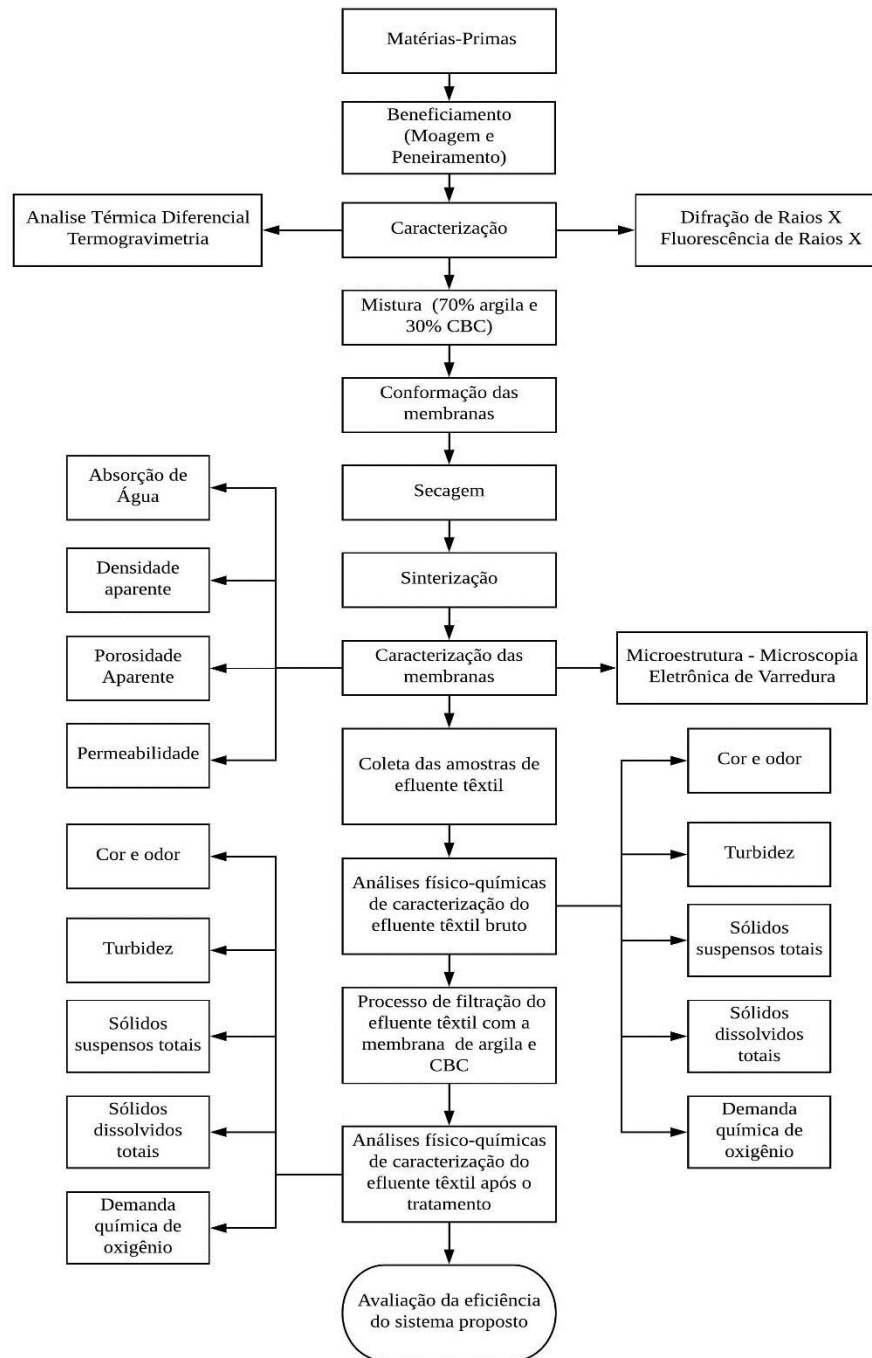
Uma das principais dificuldades encontradas durante o estudo estão relacionados a disponibilidade de efluentes para pesquisa oferecido pelas empresas, seja por aspectos relacionados ao sigilo industrial, seja por receio de repercussões negativas legais e ambientais.

Para formulação das membranas foram utilizadas como matérias-primas uma argila fornecida por indústria da cerâmica vermelha e uma amostra da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, fornecida por uma usina, ambas coletadas no município de Santa Rita, PB.

4.2 MÉTODOS

A Figura 3 apresenta o fluxograma geral da pesquisa.

Figura 3 – Fluxograma geral da pesquisa.



Fonte: Autor (2018)

4.2.1 Caracterização térmica, química e mineralógica das matérias-primas

4.2.1.1 Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG)

As análises térmicas, DTA e TG, das matérias-primas foram realizadas em equipamento de Análises Térmicas da marca Shimadzu, com razão de aquecimento 12,5°C/min e atmosfera de ar comprimido. A temperatura máxima utilizada foi de 1000°C e o padrão utilizado nos ensaios de DTA foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado.

4.2.1.2 Análise química por fluorescência de raios X (EDX)

Foram preparados corpos cerâmicos, das matérias-primas, por prensagem, na forma de discos, e submetidos à EDX. Foram analisadas: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O e outros. Essa análise foi realizada através da espectroscopia de energia dispersiva de raios X, no equipamento marca Shimadzu modelo XRF - 1800.

4.2.1.3 Difração de raios X (DRX)

As análises por DRX das matérias-primas, na forma seca, foram realizadas em equipamento XRD 6000 da Shimadzu. A radiação utilizada foi o $\text{K}\alpha$ do Cu (40kV/30mA); a velocidade do goniômetro foi de 2°/min e passo de 0,02°. A interpretação foi efetuada por comparação com padrões contidos no programa computacional PDF 02 (ICDD, 2003).

4.2.2 Preparação das formulações

Nessa etapa, a argila e a CBC foram submetidos à moagem, peneiramento (granulometria abaixo da peneira ABNT N° 200 (0,074mm)) e foram formuladas as composições de 30% de CBC e 70% de argila. Logo após adicionou-se 7% de umidade (água destilada), após adição de umidade foram classificadas em peneira ABNT 35 e armazenadas em recipiente fechado por um período de 24 horas visando melhor distribuição de umidade.

4.2.3 Confeção das membranas cerâmicas

Membranas em formato de disco (35 mm de diâmetro e 6,6 mm de espessura) foram obtidas por prensagem uniaxial a 55 MPa. As amostras prensadas foram secas em estufa a 110°C por 24 h e sinterizadas a 1000 °C por 2 h, em forno tipo mufla, utilizando taxa de aquecimento de 5 °C/min.

A metodologia mais detalhada de processamento dessas membranas encontra-se protegida por patente (CAMPOS et al., 2017).

4.2.4 Caracterização física das membranas cerâmicas

Foram avaliadas as propriedades físicas de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA), densidade aparente (DA) e fluxo permeado a água das membranas cerâmicas.

As propriedades de AA, PA e DA foram determinadas segundo princípio de Arquimedes, utilizando as Equações A, B e C respectivamente.

Essas propriedades foram determinadas utilizando as seguintes equações.

$$AA = \frac{MU - MQ}{MU} * 100 \quad (1)$$

$$PA = \frac{MU - MQ}{MU - MI} * 100 \quad (2)$$

$$DA = \frac{MQ}{MU - MI} * 100 \quad (3)$$

Sendo: MQ-massa da membrana sinterizada, MU-massa da membrana saturada em água e MI-massa da membrana imersa em água.

As membranas foram submetidas ao teste de permeabilidade utilizando água fornecida pela distribuidora local. As amostras foram previamente imersas em água por 24h visando promover a absorção de água pelos poros da membrana e evitar a ocorrência de trincas provocadas pelo alto gradiente de pressão no instante inicial da análise. O ensaio de permeabilidade foi realizado na pressão 200 kPa. Os resultados equivalem a média de quatro determinações.

Para o cálculo do fluxo permeado através das membranas (J) foi utilizada a equação 4.

$$J = \frac{m_{\text{água}}}{t_c \cdot A} \quad (4)$$

Onde:

$m_{\text{água}}$ – quantidade da água permeada durante o intervalo de tempo t_c (em L);

t_c – intervalo de tempo da coleta de água permeada pela membrana (em h);

A – área útil da membrana (m^2).

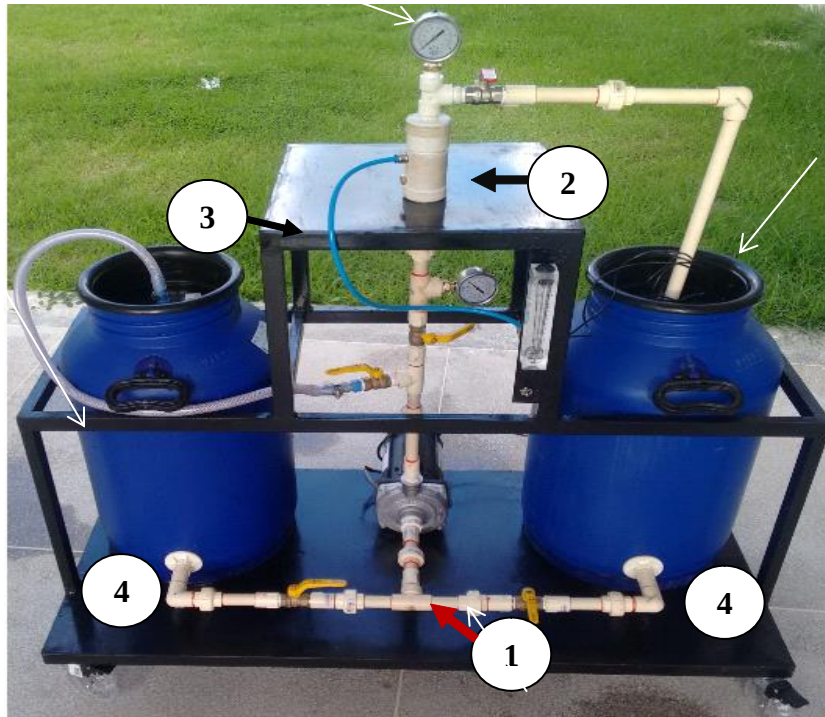
A área útil (A) da membrana confeccionada foi calculada através da Equação 5.

$$A = \pi r^2 \quad (5)$$

Onde, r é raio da membrana.

O ensaio de permeabilidade foi realizado em um sistema de filtração que funciona com uma bomba à vácuo, um módulo de acondicionamento da membrana e reservatórios de entrada e saída de efluente. A Figura 4 apresenta o mecanismo experimental de filtração.

Figura 4 - Sistema de filtração por membranas.



Fonte: Autor (2018)

Onde: 1- Bomba de alimentação, 2- Módulo de acondicionamento da membrana, 3- Coletor do permeado e 4- Reservatório de água/efluente.

4.2.5 Caracterização microestrutural das membranas

A caracterização microestrutural (morfologia da superfície de fratura) das membranas foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no equipamento LEO 1430 que possui resolução de 3,5 A 30kv (tungstênio) e com faixa de magnificação de 15 a 300000X.

4.2.6 Aplicação das membranas cerâmicas no tratamento do efluente têxtil

A funcionalidade das membranas para o tratamento dos efluentes coletados foi avaliada através do comparativo entre os parâmetros físico-químicos cor, turbidez, Sólidos Suspensos Totais (SST), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), DQO, determinados para os efluentes, antes e após a filtração.

Diante da complexidade dos contaminantes presentes nos efluentes têxteis, além da falta de informações disponibilizadas pelas indústrias quanto aos processos realizados para a formação do efluente, não foi realizada análise de corante ou de um reagente específico como indicador de performance das membranas utilizadas.

A Tabela 3 informa os parâmetros analisados bem como a metodologia adotada.

Tabela 3. Parâmetros analisados, equipamentos utilizados e metodologia adotada.

Parâmetro	Unidade	Equipamento	Método
Cor aparente 455nm	PtCo	Espectrofotômetro HACH DR3900 – Método 8025	Espectrofotométrico – Adaptado de 2120B (APHA/AWWA/WEF,2012).
Cor região do visível	Adimensional	Espectrofotômetro HACH DR3900	Integral da região espectral de 400 - 800 nm–2120C (APHA/AWWA/WEF,2012).
Turbidez	NTU	Turbidímetro Tecnonon TB 1000	Nefelométrico – 2130B (APHA/AWWA/WEF,2012).
Sólidos Suspensos Totais (SST)	mg/L	Espectrofotômetro HACH DR3900 - Método 8006	Espectrofotométrico - 1159 (KRAWCZY; GONGLEWSKI, 1959).
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	mg/L	Condutivímetro de bancada Alfakit AT 255	Laboratório – 2510B (APHA/AWWA/WEF,2012).
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg O ₂ / L	Laboratório	Titulométrico com refluxo fechado – 5220 C (APHA/AWWA/WEF,2012).

Fonte: Autor (2019)

Todas as medidas foram realizadas com amostras em triplicata, e foram calculados os seus desvios-padrão. Para os casos em que foi necessário realizar medições em diferentes diluições, por questões de limite de detecção do equipamento/método, foram escolhidas, como valor final para o cálculo da eficiência de remoção, as medidas que apresentavam menor desvio-padrão.

A eficiência de remoção dos parâmetros analisados foi determinada de forma percentual, a partir da média dos valores medidos antes e após a filtração, segundo a Equação 6.

$$E = \frac{C_b - C_t}{C_b} * 100 \quad (6)$$

em que:

E = eficiência de remoção (%);

C_b = concentração da amostra bruta;

C_t = concentração da amostra tratada.

Os valores encontrados para eficiência foram comparados com dados obtidos na literatura, com o propósito de avaliar a performance das membranas utilizadas. Além disso, verificou-se a ocorrência ou não de inconformidades durante o processo, como sujidades, trincas e entupimentos.

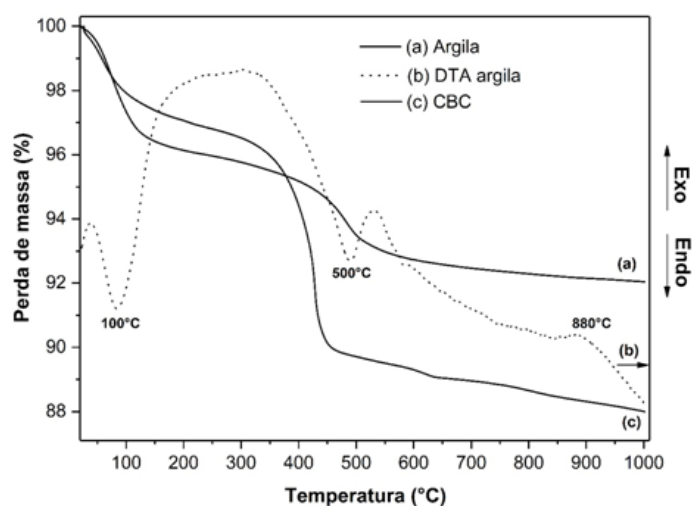
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização térmica, química e mineralógica das matérias-primas

5.1.1 Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG)

Os termogramas das matérias-primas são apresentados na Figura XX. A análise termogravimétrica indicou uma perda de massa total de 12% para a CBC. Essa redução de massa é mais acentuada entre 100 e 450 °C e está associada à perda de água e queima de matéria orgânica, característica valiosa quando se trata de uma matéria-prima que terá aplicação como agente porogênico. A perda de massa total da argila é de aproximadamente 7,2%. A curva de análise térmica diferencial da argila apresenta um pico endotérmico com máximo a 100 °C que pode ser atribuído à eliminação de água livre e adsorvida na sua superfície. Um segundo pico endotérmico a 500 °C correspondente à perda de hidroxilas do argilomineral e é característico da transformação da caulinita em metacaulinita. O pico exotérmico a 880 °C apresentado na curva DTA está associado à formação de espinélio Si-Al e sílica amorfa e/ou nucleação da mulita primária.

Figura 5 - Termogramas da CBC e da argila.



Fonte: Autor (2018)

5.1.2 Análise química por fluorescência de raios X (EDX)

A Tabela 4 apresenta a composição química da argila e da CBC. Observa-se que a argila é essencialmente composta por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), com teores característicos de argilas cauliníticas e argilas para cerâmica vermelha. Para a CBC observa-se a predominância dos óxidos de Si, Al, Ca, Mg e K.

Tabela 4 - Composição química da argila e CBC.

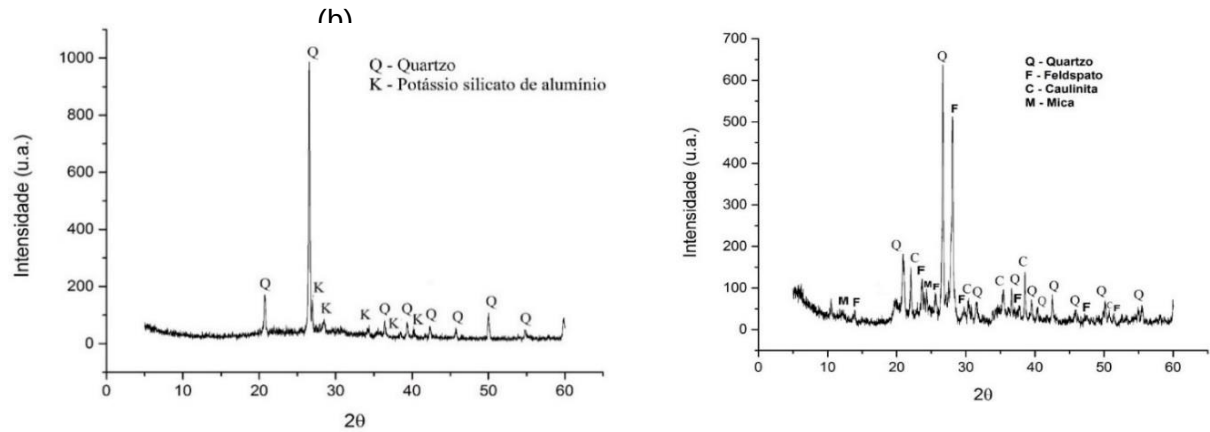
Óxidos (%)	Argila	CBC
SiO_2	63,01	57,46
Al_2O_3	10,80	3,78
Fe_2O_3	8,58	6,18
CaO	2,73	5,02
MgO	2,24	3,67
Na_2O	1,97	0,19
K_2O	1,43	6,90
TiO_2	1,29	1,46
P_2O_5	-	1,81
Outros	0,75	1,53
Perda ao fogo (%)	7,2	12,0

Fonte: Autor (2018)

5.1.3 Difração de raios X (DRX)

A Figura 6 apresenta os difratogramas obtidos para as amostras de CBC e argila. De acordo com o padrão de difração de raios X, a argila apresenta as presenças de caulinita (ICSD 75-0938), feldspato (ICSD 73-0264) e quartzo (ICSD 79-1910). A CBC apresenta a presença do quartzo (ICSD 79-1910) associado a um silicato de alumínio e potássio (ICSD 84-0639).

Figura 6 - DRX da CBC (a) e da argila (b).



Fonte: Autor (2018)

5.2 Caracterização física das membranas

A Tabela 5 apresenta as características físicas de AA, PA, DA e Permeabilidade.

Tabela 5 - Propriedades físicas das membranas cerâmicas

Propriedades Físicas	
Absorção de Água (AA)	13,18%
Porosidade Aparente (PA)	25,76%
Densidade Aparente (DA)	1,95 g/cm ³
Fluxo Permeado (Pressão de 200 kPa)	500,00 L/h.m ²

Fonte: Autor (2018)

Analizando as propriedades apresentadas na Tabela 4 observa-se que a membrana cerâmica estudada apresenta valores de AA de 13,18%, PA de 25,76% e DA de 1,95 g/cm³, esses valores são dependentes da quantidade e tipo de agente porogênico adicionado na preparação da membrana e estão diretamente relacionados ao processamento da membrana cerâmica.

Membranas cerâmicas de baixo custo produzidas por Vasanth et al (2013) utilizando caulim, quartzo, carbonato de cálcio e dióxido de titânio em suas formulações, sem nenhuma etapa de purificação destas matérias-primas, obteve valores de porosidade aparente variando de 23% a 30%, valores similares ao do presente trabalho, de 25,76%.

O valor de porosidade aparente (25,76%) é menor do que os obtidos no experimento de Bhattacharya et al. (2010), que produziu membranas de baixo custo à base de alumina e argila com porosidade de 36% e estudou a sua performance no tratamento de um efluente têxtil, através de 5 tipos de alimentações diferentes: tratado com biossorvente, tratado com coagulante sulfato de alumínio, tratado com cloreto férrico, tratado com sulfato ferroso e sem pré tratamento.

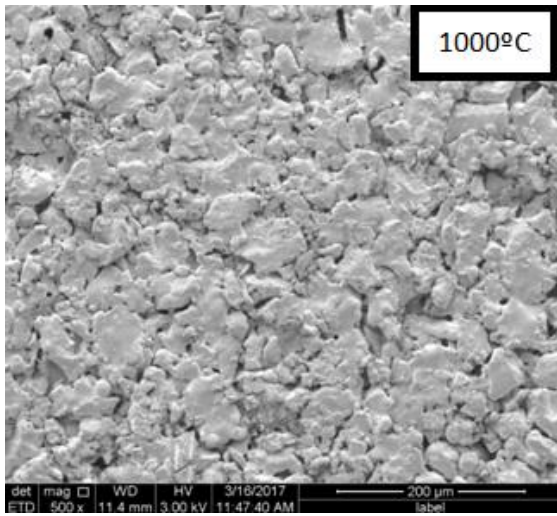
Silva et al. (2015) produziu membranas de baixo custo à base de caulim e argila *ballclay* como matérias-primas e avaliou o efeito de diferentes temperaturas de sinterização (900°C a 1100°C) nas suas características morfológicas e estruturais, obtendo porosidades variando de 40,30% a 25,16%, respectivamente, valores próximos ao do presente trabalho (25,76%). Os autores concluíram que a formulação proposta era viável para aplicação do tratamento de efluentes têxteis em virtude da remoção considerável de turbidez e sólidos na amostra.

As membranas apresentaram fluxo permeado a água, para pressão de 200 kPa, de 500 L/h.m², resultado similar aos encontrados na literatura (Silva et al., 2015 e Bhattacharya et al., 2010) para membranas utilizadas em processos de microfiltração.

5.3 Caracterização microestrutural das membranas

A Figura 7 apresenta micrografia obtida por MEV da superfície da membrana cerâmica. Pode-se observar a presença de uma superfície altamente porosa, com poros distribuídos aleatoriamente, assim como, ausência de fissuras e trincas.

Figura 7 - Micrografia da membrana cerâmica

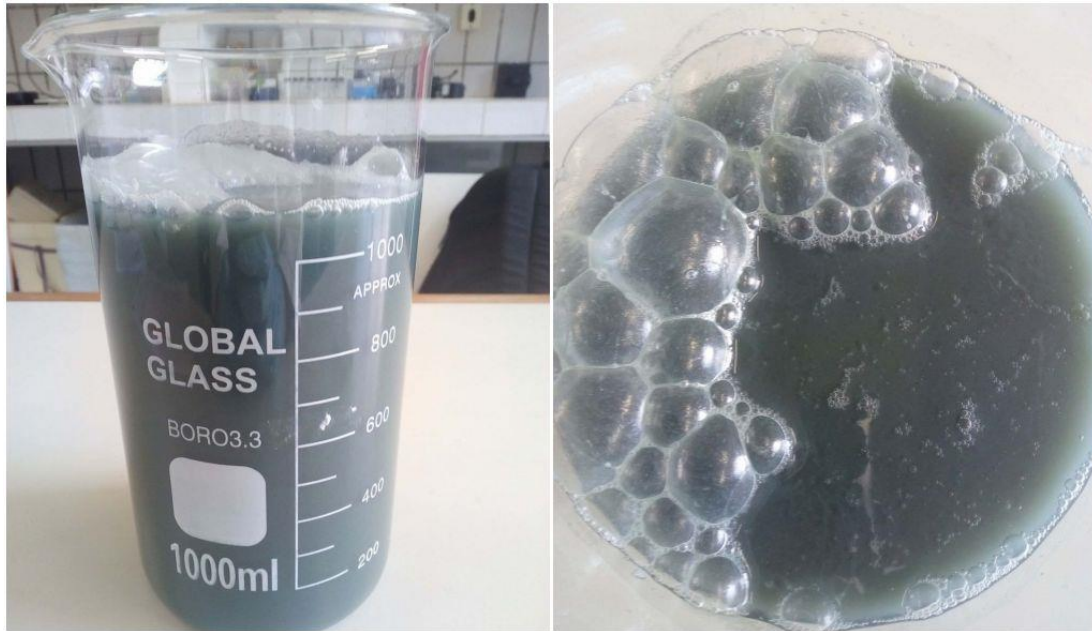


Fonte: Autor (2018)

5.4 Aspectos de qualidade física dos efluentes bruto e tratado

O Efluente 1 apresentado na Figura 8, coletado na sua forma bruta, é resultante dos vários processos que utilizam água na indústria. Na análise visual, esse efluente apresentou coloração verde escura, aparentemente um pouco viscoso, odor bastante forte (cheiro de podre), além da presença de materiais particulados em suspensão e formação de espuma. Também era notável uma camada que provavelmente se tratava de restos de fibras de tecido. Após um tempo acondicionado em recipiente fechado, apresentava nitidamente a formação de gás quando aberto, exalando cheiro forte. Este efluente foi avaliado como possuindo alta carga poluidora.

Figura 8 - Características visuais do Efluente 1.



Fonte: Autor (2018)

Conforme apresentado na Figura 9, após a filtração obteve-se um permeado limpo após a aplicação de pressão a 2,0 bar. O fluxo de saída foi lento, em virtude de limitações do sistema e a formação de *fouling*, confirmado após a retirada da membrana contendo depósitos depois de finalizada a filtração. Esses depósitos podem ser tanto resultantes da formação de torta, precipitação de solutos, entupimento de poros ou adsorção de materiais.

Figura 9 - Características visuais do Filtrado 1.



Fonte: Autor (2018)

O Filtrado 1 apresentou coloração verde clara, livre de odores, espumas e materiais grosseiros em suspensão. A presença de cor indica que ainda há traços do corante na amostra. Fragmentos cerâmicos podem ser percebidos ao fundo da solução, provenientes de pequenos traços da membrana.

O Efluente 2 apresentado na Figura 10, coletado na sua forma bruta, é resultante dos vários processos que utilizam água na indústria. Apresentava coloração verde claro, odor bastante forte (cheiro de podre), além da presença de materiais particulados em suspensão e formação de espuma. Também apresentava uma camada com restos de fibras de tecido. Após um tempo acondicionado em recipiente fechado, apresentava nitidamente a formação de gás quando aberto, exalando cheiro forte. Esse efluente foi avaliado como possuindo média carga poluidora.

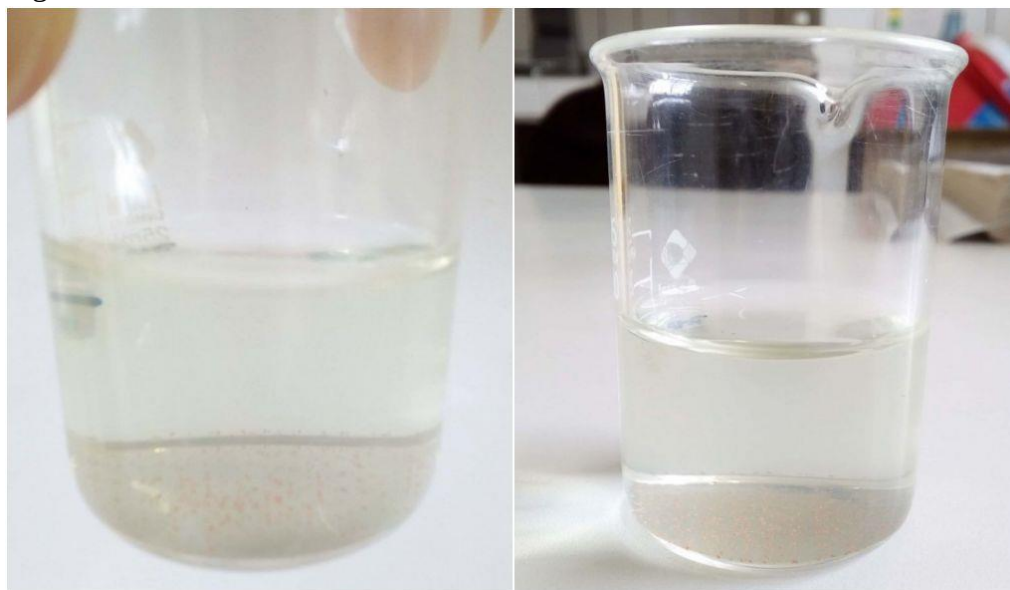
Figura 10 - Características visuais do Efluente 2.



Fonte: Autor (2018)

Conforme apresentado na Figura 11, a filtração permitiu obter um permeado limpo com sucesso após a aplicação de pressão a 2 bar. O fluxo de saída foi lento, em virtude de limitações do sistema e a formação de *fouling*. A amostra filtrada apresentou coloração verde clara, livre de odores, espumas e materiais grosseiros em suspensão. De forma similar ao Filtrado 1, ainda era notável a presença de traços de corante na amostra.

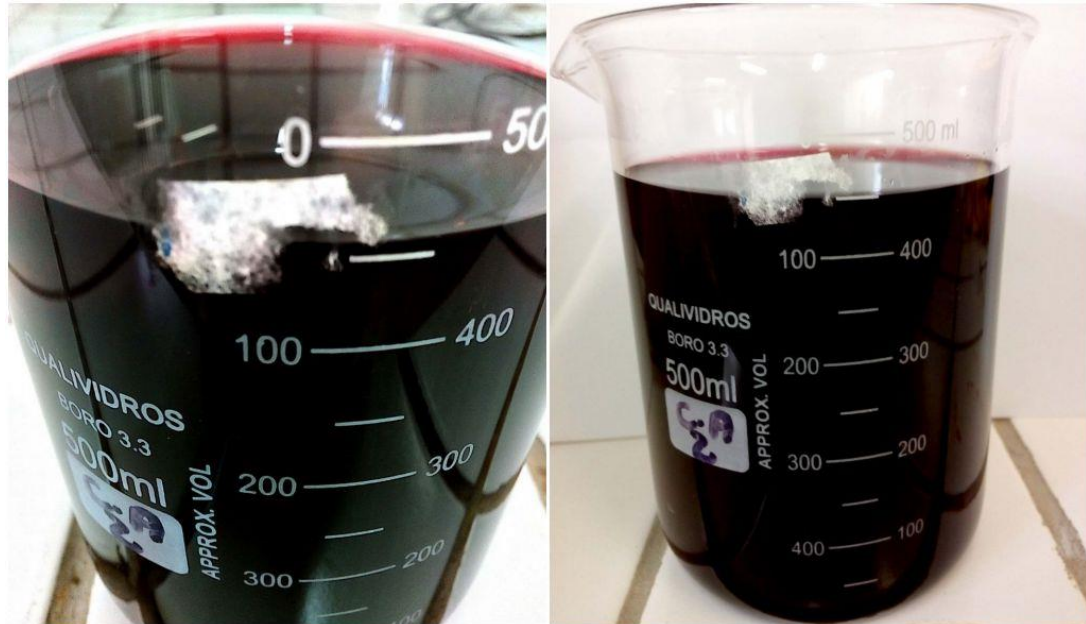
Figura 11 - Características visuais do Filtrado 2.



Fonte: Autor (2018)

O Efluente 3, apresentado na Figura 12, compreendeu um líquido de cor vermelha bastante forte, sem odor característico, isento de materiais particulados ou de fases distintas. Esse efluente foi avaliado como possuindo baixa carga poluidora, e presumiu-se que passou por algum tipo de tratamento para redução dos contaminantes na indústria.

Figura 12 - Características visuais do Efluente 3.



Fonte: Autor (2018)

As características visuais do Filtrado 3 podem ser observadas na Figura 13. Após a aplicação de pressão a 1 bar, o fluxo de saída foi rápido, e o permeado muito se assemelhou à amostra bruta em seus aspectos físicos, indicando que a filtração não ofereceu melhora significativa nos parâmetros de qualidade física desta amostra.

Figura 13 - Características visuais do Filtrado 3



Fonte: Autor (2018)

5.5 Avaliação dos parâmetros físico-químicos dos efluentes bruto e tratado

A Tabela 6 contém os valores de cor, turbidez, SST, SDT e DQO, e a eficiência de remoção destes parâmetros, para o Efluente 1 e Filtrado 1.

Tabela 6 - Parâmetros físico-químicos do Efluente 1 e do Filtrado 1.

Parâmetro	Efluente 1	Desvio Padrão	Filtrado 1	Desvio Padrão	Eficiência de Remoção (%)
Cor 455 nm (PtCo)	22.563,00	7,55	486,67	4,93	97,84
Cor região do visível	1.940,70	-	57,25	-	97,05
Turbidez (NTU)	1.087,67	7,57	31,67	3,05	97,09
SST (mg/L)	2.623,00	7,00	42,00	2,65	98,40
SDT (mg/L)	3.664,00	1,00	1.910,00	1,00	47,87
DQO (mg O ₂ /L)	5.925,28	-	222,16	-	96,25

Fonte: Autor (2019)

Analizando os resultados apresentados na Tabela 6 confirmou-se a alta carga poluidora verificada durante a etapa de análise visual do Efluente 1. A filtração com a membrana cerâmica promoveu uma limpeza eficiente confirmada pelos parâmetros cor (97,84%, e 97,05%), turbidez

(97,09%), SST (98,40%) e DQO (96,25%). É importante enfatizar que o sistema de filtração não passou por nenhum tipo de otimização prévia. O tratamento ainda obteve remoção bastante aceitável de SDT (aprox. 47,87%), algo positivo para diminuição da concentração de substâncias indesejáveis na água tratada.

A Tabela 7 contém os valores de cor, turbidez, SST, SDT e DQO, e a eficiência de remoção destes parâmetros, para o Efluente 2 e Filtrado 2.

Tabela 7 - Parâmetros físico-químicos do Efluente 2 e do Filtrado 2.

Parâmetro	Efluente 2	Desvio Padrão	Filtrado 2	Desvio Padrão	Eficiência de Remoção (%)
Cor 455 nm (PtCo)	11.373,67	127,70	342,33	8,08	96,99
Cor região do visível	351,88	-	61,10	-	82,64
Turbidez (NTU)	624,00	4,58	7,17	1,05	98,85
SST (mg/L)	1.558,67	34,27	19,33	2,08	98,76
SDT (mg/L)	1.932,67	0,58	1932,00	1,73	0,03
DQO (mg O ₂ /L)	2.370,13	-	204,70	-	91,36

Fonte: Autor (2019)

Analisando os dados do Efluente 2 (Tabela 7), a filtração com a membrana cerâmica conseguiu uma remoção eficiente nos parâmetros cor, pelas duas metodologias utilizadas (96,99% para cor 455nm e 82,64% para cor região do visível), turbidez (98,85%), SST (98,76%) e DQO (91,36%), valores significativos que evidenciam a aplicabilidade do tratamento proposto. A ineficiência de remoção dos SDT de 0,03% não surpreende, tendo em vista que essa remoção exige, em alguns casos, condições otimizadas de operação, como por exemplo membranas com poros menores.

A Tabela 8 contém os valores de cor, turbidez, SST, SDT e DQO, e a eficiência de remoção desses parâmetros, para o Efluente 3 e Filtrado 3.

Tabela 8 - Parâmetros físico-químicos do Efluente 3 e do Filtrado 3.

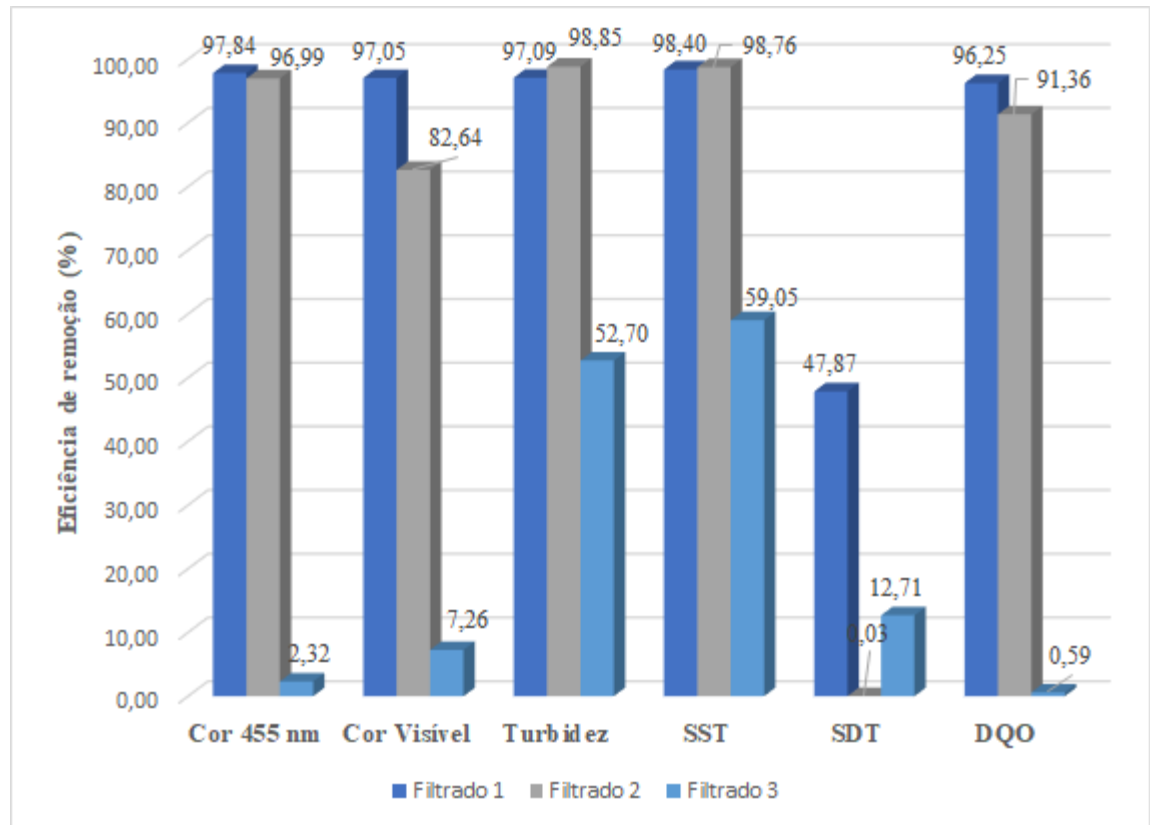
Parâmetro	Efluente 3	Desvio Padrão	Filtrado 3	Desvio Padrão	Eficiência de Remoção (%)
Cor 455 nm (PtCo)	8.834,00	52,85	8.628,67	10,07	2,32
Cor região do visível	826,23	-	766,22	-	7,26
Turbidez (NTU)	21,00	0	9,93	0,63	52,70
SST (mg/L)	35,00	2,00	14,33	2,52	59,05
SDT (mg/L)	28.413,00	4,36	24.801,67	22,79	12,71
DQO (mg O ₂ /L)	433,49	-	430,93	-	0,59

Fonte: Autor (2019)

Analisando os resultados apresentados na Tabela 8 observa-se que o Filtrado 3 apresentou uma baixa remoção nos parâmetros turbidez de 52,70% e SST de 59,05%, no entanto esses parâmetros já apresentavam valores relativamente baixos na amostra bruta (21 NTU e 35 mg/L, respectivamente). Observa-se também poucas alterações nos demais parâmetros após tratamento. Interessante observar também a alta concentração de sólidos dissolvidos, 28.413 mg/L, valor cerca de dez vezes maior do que os apresentados pelos Efluentes 1 e 2. Não houve diminuição significativa da cor, dessa forma conclui-se que houve a completa passagem do corante pelo permeado. O corante, provavelmente, é o maior responsável pela concentração de matéria orgânica evidenciado nos valores de DQO de 433,49 mg O₂/L e 430,93 mg O₂/L para o Efluente 3 e o Filtrado 3, respectivamente.

A Figura 14 compara os valores da eficiência de remoção, por parâmetro, para os Filtrados 1, 2 e 3.

Figura 14 - Comparativo da eficiência de remoção para os Filtrados 1, 2 e 3.



Fonte: Autor (2019)

É razoável presumir que algum tipo de tratamento físico, químico ou biológico para neutralização de contaminantes e remoção particulados foi utilizado pela indústria no Efluente 3 antes da entrega ao pesquisador. O ideal no estudo para a avaliação da performance das membranas cerâmicas seria partir de efluentes sem nenhum tipo tratamento ou com menor tratamento possível, desta forma certamente a eficiência de remoção para o Filtrado 3 obteria resultados similares aos encontrados nos Filtrados 1 e 2.

Além da melhora nos aspectos visíveis discutidos na seção 5.2, para os Filtrados 1 e 2, os valores encontrados da remoção de cor (97,84% e 97,05%; 82,64% e 96,99%, respectivamente) e turbidez (97,09% e 98,85%, respectivamente) foi significativa. Se comparado ao experimento de tratamento de um efluente têxtil biologicamente tratado realizado por Fersi et al. (2005), que utilizou membranas cerâmicas comerciais de microfiltração e ultrafiltração a partir de óxidos de alumínio e zircônia e obteve eficiência de remoção de cor e turbidez na faixa de 40% com as

membranas de microfiltração, e de 50% a 90%, respectivamente, com membranas de ultrafiltração, o desempenho da membrana cerâmica foi superior.

A filtração realizada por meio da membrana cerâmica obteve desempenho de remoção de turbidez nos Filtrados 1 e 2 (97,09% e 98,85%, respectivamente) próximos aos encontrados no estudo de Mouiya et al. (2018), que desenvolveu membranas cerâmicas para microfiltração à base de argila vermelha regional e fosfato natural, e obteve remoção de turbidez acima de 99% em três alimentações diferentes: um efluente industrial, água do mar e uma solução sintética.

Comparando a eficiência de remoção da turbidez dos Filtrados 1 e 2 (97,09% e 98,85%, respectivamente) com valores disponíveis na literatura da coagulação química, processo comumente utilizado pelo setor industrial, percebeu-se que apresenta desempenho superior à grande maioria dos coagulantes recentemente estudados na literatura (MOSLEH et al., 2014; ASLANI et al., 2015 e FARHADI et al., 2016). Vale ressaltar como principais vantagens que a filtração por membranas não gera subprodutos indesejáveis e não depende de controle rígido de parâmetros como pH, temperatura e concentração do coagulante.

Recente estudo realizado por Aziz et al. (2018) buscou avaliar a eficiência dos coagulantes tetracloreto de titânio (TiCl_4) e tetracloreto de zircônio (ZrCl_4) no tratamento de um efluente têxtil, a partir da melhoria nos parâmetros cor, turbidez, SST e DQO. Os resultados obtidos pelo autor para turbidez (97%) e SST (98-99%) foram similares aos dos Filtrados 1 e 2 do presente estudo (97,09% e 98,85% para turbidez; 98,40% e 98,76% para SST, respectivamente). Todavia, nos resultados de DQO (28-36%) e cor (60-68%), a filtração por membranas obteve melhor eficiência de remoção (96,25% e 91,36%, para DQO; 97,84 e 97,05%; 82,64% e 96,99% para cor, respectivamente).

O estudo do comportamento da filtração de um efluente têxtil utilizando membranas comerciais de ultrafiltração à base de titânio e zircônia realizado por Barredo-Damas et al. (2010) buscou otimizar os índices de retenção de contaminantes a partir do controle de parâmetros de operação, como o fluxo-cruzado, objetivando diminuir o *fouling* durante o processo. Os resultados obtidos pelo autor para cor (84-98%) e turbidez (99%) foram similares aos dos Filtrados 1 e 2 do presente estudo (97,84 e 97,05%; 82,64% e 96,99% para cor; 97,09% e 98,85%, para turbidez, respectivamente). Entretanto, nos resultados de DQO (62-79%), a membrana de argila e CBC obteve performance superior, com remoção de 96,25% e 91,36%, respectivamente.

Estudos realizados por Bhattacharya et al. (2010) avaliaram o comportamento da microfiltração por membranas cerâmicas de baixo custo à base de alumina e argila no tratamento de efluente têxtil, com ou sem pré-tratamento. Tomando por base apenas os resultados com o efluente não tratado para fins de comparação, os valores da eficiência de remoção de DQO (22-24%) e SST (80%) obtidos pelo autor foram inferiores aos verificados pelo presente estudo para os Filtrados 1 e 2 (96,25% e 91,36%, para DQO; 98,40% e 98,76% para SST, respectivamente).

A retenção obtida de DQO nos Filtrados 1 e 2, de 96,25% e 91,36%, respectivamente, foi superior à encontrada no estudo realizado por Lafi et al. (2018), da ordem de 55%, que utilizou uma membrana de ultrafiltração comercial à base de zircônia como proposta de pré-tratamento para remoção de matéria orgânica de um efluente têxtil, com o objetivo de melhorar o funcionamento do tratamento posterior de eletrodialise para diminuição da concentração de sais dissolvidos.

Jedidi et al. (2010) utilizou somente cinzas de carvão mineral como matéria-prima e aplicou técnicas de processamento cerâmico para desenvolvimento de membranas de microfiltração, apresentando boa estabilidade em relação às suas propriedades mecânicas, e avaliou a sua performance a partir de um efluente têxtil resultante da etapa de lavagem. A eficiência de remoção do sistema proposto pelo autor obteve os resultados de 97% para turbidez, 75% para DQO e 90% para cor. Comparando com os valores obtidos nos Filtrados 1 e 2, os valores de cor (97,84% e 97,05%; 82,64% e 96,99%, respectivamente) e turbidez (97,09% e 98,85%, respectivamente) foram similares, enquanto que os de DQO, de 96,25% e 91,36%, respectivamente, foram superiores aos encontrados pelo autor.

Seguindo o panorama atual de pesquisas utilizando membranas de baixo custo, Kumar et al. (2015) produziu membranas cerâmicas tubulares utilizando apenas materiais de custo acessível em sua composição (argila tipo *ballclay*, caulim, quartzo, feldspato, carbonato de cálcio, pirofilita). Posteriormente, Kumar et al. (2016) avaliou a performance dessa membrana a partir da eficiência de remoção de DQO em um efluente industrial, obtendo remoção máxima de 91%, valores próximos aos encontrados no presente estudo para os Filtrados 1 e 2 (96,25% e 91,36%, respectivamente).

Com base nos valores da eficiência de remoção obtidos nos Filtrados 1 e 2 de DQO (96,25% e 91,36%, respectivamente) e os listados no trabalho de Kumar et al. (2016) de membranas fabricadas à base de zircônia, alumina, aço, polisulfona, poliamida e polietersulfona, com eficiências variando de 51% a 99%, de forma análoga, a membrana à base de argila e CBC

possui performance comparável a esses materiais citados na literatura. Altos índices de remoção deste parâmetro é um excelente indicador de performance para o tratamento de efluentes têxteis, como também para efluentes de outras indústrias, como laticínios e papel (SAMAIE et al., 2018).

Muito embora a definição de um efluente apto para reuso irá depender principalmente do processo no qual a água recuperada será aplicada, e isso irá variar conforme o interesse da indústria, valores de referência trazidos por Capar et al. (2008) podem ser convenientemente comparados aos obtidos nesta obra para os Filtrados 1, 2, e 3, conforme a Tabela 8.

Tabela 9 - Parâmetros dos Filtrados 1, 2 e 3 em comparação com critérios para reuso.

Parâmetro	Filtrado 1	Filtrado 2	Filtrado 3	Capar et al. (2008)
Cor 455 nm (PtCo)	486,67	342,33	8.628,67	Ausente
Cor Região do visível	57,25	61,10	766,22	Ausente
Turbidez (NTU)	31,67	7,17	9,93	1,00
SST (mg/L)	42,00	19,33	14,33	5,00
SDT (mg/L)	1.910,00	1.932,00	24.801,67	500,00
DQO (mg O ₂ /L)	224,33	203,62	430,93	60,00– 80,00

Fonte: Autor (2019)

Analisando os dados da Tabela 8, os Filtrados 1, 2 e 3 apresentaram valores de cor e SDT distantes dos ideais para reuso, o que pode ser perfeitamente entendido, tendo em vista que a filtração promoveu a passagem de corante e de outras substâncias solúveis pelo permeado. Todavia, valores de turbidez, SST e DQO (exceto para o Filtrado 3, neste parâmetro) podem ser considerados próximos aos critérios estabelecidos para reuso. A adição de um tratamento posterior, conforme o caso, certamente poderia atingir os valores apresentados por Capar et al. (2008). Outra alternativa viável seria estudar a aplicação dos filtrados obtidos em processos industriais nos quais seja permitido operar com estes valores.

6 CONCLUSÕES

Após avaliar a aplicação de membranas cerâmicas à base de argila e de cinza do bagaço da cana-de-açúcar para o tratamento de efluente têxtil bruto, a partir da análise de parâmetros de qualidade física e química foi possível chegar às conclusões apresentadas a seguir.

A argila apresenta componentes químicos e mineralógicos característicos da composição de argilas para cerâmica vermelha e a CBC apresenta características térmicas típicas de agentes porogênicos.

A membrana cerâmica apresenta porosidade aparente de 25,76% e superfície altamente porosa, com poros distribuídos aleatoriamente, assim como, ausência de fissuras e trincas. Apresenta fluxo permeado a água, para pressão de 200 kPa, de 500 L/h.m², resultado similar aos encontrados na literatura para membranas utilizadas em processos de microfiltração.

Os Efluentes 1, 2 e 3 apresentaram qualidades gerais em desconformidade com o permitido para descarte diretamente nos mananciais.

O tratamento do Efluente 1 obteve remoção de cor, turbidez, SST e DQO acima de 96%, e de SDT acima de 47%. O tratamento do Efluente 2 obteve remoção de cor de 82,64% a 96,99%, turbidez, SST acima de 98% e DQO acima de 91%, sem melhora significativa para SDT. Após tratamento, o Efluente 3 apresentou uma melhora nos parâmetros turbidez (52,70%) e SST (59,05%), uma leve remoção de SDT (12,71%), sem melhora significativa para cor e DQO. Concluindo-se que o tratamento com as membranas estudadas é ineficiente para remoção de sais e outras substâncias solúveis.

Considerando os resultados obtidos, a aplicação das membranas cerâmicas estudadas é bastante viável como pré-tratamento de efluentes industriais têxteis, dada a melhora significativa dos parâmetros estudados e a diminuição do seu potencial poluidor. Outro ponto bastante positivo é a possibilidade da utilização de membranas de baixo custo relativo, visto que foram confeccionadas com matéria-prima natural abundante e resíduo industrial.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos e das conclusões apresentadas, vislumbro como promissores os seguintes desdobramentos desta pesquisa:

- Otimização do sistema de filtração, permitindo a aplicação em diferentes fluxos e pressões;
- Explorar novas formulações de membranas com materiais alternativos e resíduos de outros processos, para o tratamento de efluentes têxteis;
- Avaliar a viabilidade da combinação da filtração por membranas com outros processos de tratamento, ou até mesmo com uma segunda filtração por membrana;
- Fazer avaliação mais profunda de outros parâmetros de qualidade química, como por exemplo espécies poluentes, metais pesados e corantes;

REFERÊNCIAS

ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil. Disponível em: <<http://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>>. Acesso em dez. 2018.

ADEOLU, A. S. Impact of industrial effluent on the Environment. Institute of Ecology and Environmental Studies, Obafemi Awolowo University, Ile-Ife, Nigeria, 2016.

AHMAD, R.; ASLAM, M.; PARK, E.; CHANG, S.; KWON, D.; KIM, J. Submerged low-cost pyrophyllite ceramic membrane filtration combined with GAC as fluidized particles for industrial wastewater treatment. **Chemosphere**, v 206, pp. 784-792, 2018.

ALEXANDER, J. T.; HAI, F.I.; AI-ABOUD, T. M. Chemical coagulation-based processes for trace organic contaminant removal: Current state and future potential. **Journal of Environmental Management**, v 111, pp.195-207, 2012.

ALMEIDA, E. R. J.; DILARRI, G.; CORSO, C. R. A indústria têxtil no Brasil: Uma revisão dos seus impactos ambientais e possíveis tratamentos para os seus efluentes. **Boletim das águas**. Ministério Público Federal, nov. 2016.

ALVES, R. H.; REIS, T. V. S; ROVANI, S.; FUNGARO, D. A.Green Synthesis and Characterization of Biosilica Produced from Sugarcane Waste Ash. Hindawi. **Journal of Chemistry**, Article ID 6129035, 9 p, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Estimativa de demanda hídrica da indústria de transformação. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/metadados>>. Acesso em jan. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Cuidando das águas: soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos / Agência Nacional de Águas, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. 2. ed. Brasília: ANA, 2013.

APHA/AWWA/WEF. EATON, A.D et al. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012.

ASLANI, H.; MOHAMMADI, M. A.; MAHMOODI, B.; GHOREISHI, B.; KHAZAEI, M.; GHANI, M.; ASKARI, M. Optimization of Coagulation Process Using Alum and Ferric Chloride for Surface Water Treatment. **Journal of Environmental Health Engineering**, v. 2, issue 2, pp. 133-153, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13798: Água - Determinação de cor - Método da comparação visual**. Rio de Janeiro, 1997.

AZIZ, H. A.; RAZAK, M. H. A.; RAHIM M. Z. A.; KAMARW I. S. W.; AMR, S. S. A.; HUSSAIN, S.; LEEUWEN, J. V. Evaluation and comparison the performance of titanium and zirconium (IV) tetrachloride in textile wastewater treatment. *Data in Brief*, v. 18, pp. 920-927, 2018.

BARREDO-DANTAS, S.; ALCAINA-MIRANDA, M. I.; BES-PIÁ, A.; IBORRA-CLAR, M. I.; IBORRA-CLAR, A.; MENDOZA-ROCA, J. A. Ceramic membrane behavior in textile wastewater ultrafiltration. **Desalination**, v. 250, issue 2, pp.623-628, 2010.

BELLIN, I. Recycling and reuse of industrial waste water: Choices are still guided by economic aspects. **Eau, l'Industrie, lesNuisances**, issue 386, pp. 35-46, 2015.

BITTENCOURT, C.; DE PAULA, M. A. S. **Tratamento de Água e Efluentes: Fundamentos de Saneamento Ambiental e Gestão de Recursos Hídricos**. 1. Ed. São Paulo: Ética, 2014.

BHATTACHARYA, P. Crossflow microfiltration using ceramic membrane for treatment of sulphur black effluent from garment processing industry. **Desalination**, v. 261, issues 1–2, pp. 67-72, 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde (FUNASA). Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS. Brasília, 2014.

BUEKENHOUDT, A. Stability of Porous Ceramic Membranes. **Membrane Science and Technology**, v. 13, p. 1-31, 2008.

BUREK, P.; SATOH, Y.; FISCHER, G.; KAHIL, M. T.; SCHERZER, A.; TRAMBEREND, S.; NAVA, L. F.; WADA, Y.; EISNER, S.; FLÖRKE, M.; HANASAKI, N.; MAGNUSZEWSKI, P.; COSGROVE, B.; WIBERG, D. Water Futures and Solution: Fast Track Initiative (Final

Report). **IIASA Working Paper**. Laxenburg, Austria, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 2016.

CAMPOS, L.F.A.; DUTRA, R. P. S.; MACÊDO D.A.; JACKES, N. G.; SOUZA J.; ANDRADE, R. M., **Membranas cerâmicas à base de argila e cinza de biomassa para filtração**, 2017. INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. País: Brasil. Natureza: Patente de Invenção. Número do registro: BR1020170068730. Data de depósito: 03/04/2017. Universidade Federal da Paraíba.

CAPAR, G.; YILMAZ, L.; YETIS, U. A membrane-based co-treatment strategy for the recovery of print- and beck-dyeing textile effluents. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, issue 1, pp.316-323, 2008.

CASTRO, T. R.; MARTINS, C. H. Caracterização das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material alternativo para redução de impactos ambientais. **Mix Sustentável (edição especial - IV ENSUS)**. UFSC, v. 2, n. 1, 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar. v. 4 - SAFRA 2017/18 n.4 - Terceiro levantamento. Brasília, p. 1-73, abr. 2018.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **NTS 004: DQO - Demanda Química de Oxigênio - método de ensaio**. São Paulo, 1997. Disponível em <<http://www2.sabesp.com.br/normas/nts/nts004.pdf>> Acesso em jul. 2018.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **NTS 008: Turbidez - método de ensaio**. São Paulo, 1999a. Disponível em <<http://www2.sabesp.com.br/normas/nts/nts008.pdf>> Acesso em jul. 2018.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **NTS 013: Sólidos - método de ensaio**. São Paulo, 1999b. Disponível em <<http://www2.sabesp.com.br/normas/nts/nts013.pdf>> Acesso em jul. 2018.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Guia técnico ambiental da indústria têxtil - Série P + L. São Paulo: CETESB: SINDITÊXTIL, 2009.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 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, do Conselho. - Data da legislação: 13/05/2011 - Publicação DOU nº 92, de 16/05/2011, pág. 89.

CONKE, L. S. Barriers to waste recycling development: Evidence from Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v.134, pp. 129-135, 2018.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO-FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M.R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009.

DASGUPTA, J.; SIKDER, J.; CHAKRABORTY, S.; CURCIO, S.; DRIOLI, E. Remediation of textile effluents by membrane-based treatment techniques: A state of the art review. **Journal of Environmental Management**, v. 147, pp. 55-72, 2015.

DENG, F.; LUO, X. B.; DING, L.; LUO, S. L. Application of Nanomaterials and Nanotechnology in the Reutilization of Metal Ion From Wastewater. Micro and Nano Technologies, **Nanomaterials for the Removal of Pollutants and Resource Reutilization**, Elsevier, pp. 149- 178, 2019.

DIEL, J. L. Caracterização funcional de membranas de micro e ultrafiltração. Dissertação (Mestrado em Engenharia) UFGRS. Porto Alegre, p.vi, 2010.

FARHADI, M.; TAKDASTAN, A.; BAGHBANY, R. Evaluating the Efficiency of Tragacanth Coagulant Aid in Removing Colloidal Materials and Suspended Solids Creating Turbidity from Karun River Water. **J Environ Health Sustain Dev**, v. 1, issue 1, pp.1-8, 2016.

FERNANDES, S. E.; TASHIMA, M. M.; MORAES, J. C. B.; ISTUQUE, D. B.; FIORITI, C. F.; MELGES, J. L. P.; AKASAKI, J. L. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 04, pp.909-923, 2015.

FERREIRA, P. P. L.; BRAGA, R. M.; TEODORO, N. M. A.; MELO, V. R. M.; MELO, D. M. A.; MELO, M. A. F. Adsorção de Cu ²⁺ e Cr ³⁺ em efluentes líquidos utilizando a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 360, pp. 435-441, dez. 2015.

FERSI, C.; GZARA, L.; DHAHBI, M. Treatment of textile effluents by membrane technologies. **Desalination**, v. 185, issue 1-3, pp. 399-409, 2005.

FREIRE, R. S.; PELEGRINI, R.; KUBOTA, L. T.; DURÁN, N. Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. **Química Nova**, 2000.

GOMES, D. G.; SERNA-LOAIZA, S.; CARDONA, C. A.; GAMA, M.; DOMINGUES, L. Insights into the economic viability of cellulases recycling on bioethanol production from recycled paper sludge. **Bioresource Technology**, v.267, pp. 347-355, 2018.

GRANER, C. A. F.; ZUCCARI, M. L.; PINHO, S. Z. Determinação da demanda química de oxigênio em águas por espectrofotometria simultânea dos íons crômio (III) e dicromato. **Eclet. Quím.**, São Paulo, v. 23, p. 31-44, 1998.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. **Química Nova**, v. 23, n. 01, p. 71-78, 2000.

HAI, F. I.; NGUYEN, L. N.; NGHIEM, L. D.; LIAO, B. Q.; KOYUNCU, I.; PRICE, W. E. Trace Organic Contaminants Removal by Combined Processes for Wastewater Reuse. **The Handbook of Environmental Chemistry**, c. 318, pp 1-39, 2015.

HEDFI, I.; HAMDI, N.; SRASRA, E.; RODRÍGUEZ, M. A. The preparation of micro-porous membrane from a Tunisian kaolin. **Applied Clay Science**, v. 101, pp. 574-578, 2014.

HOFS, B.; OGIER, J.; VRIES, D.; BEERENDONK, E. F.; CORNELISSEN, E. R. Comparison of ceramic and polymeric membrane permeability and fouling using surface water. **Separation and Purification Technology**, 2011.

HORVAT, A.; BABIĆ, S.; PAVLOVIĆ, D. M.; AŠPERGER, D.; PELKO, S.; KAŠTELAN-MACAN, M.; PETROVIĆ, M.; MANCE, A. D. Analysis, occurrence and fate anthelmintcs and their transformation products in the environment. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 31, pp. 61-24, 2012.

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRILLENDE, J. C.; TRUSSEL, R. R.; TCHOBANOGLIOUS, G. **Princípios de Tratamento de Água (Tradução)**. São Paulo, SP: Cengage, 624 p, 2016.

HUBADILLAH, S. K.; OTHMANA, M. H. D.; MATSUURAA, T.; ISMAIL, A. F.; RAHMANA, M. A.; HARUN, Z.; JAAFAR, J.; NOMURA, M. Fabrications and applications of low-cost ceramic membrane from kaolin: A comprehensive review. **Ceramics International**, v 44, pp. 4538-4560, 2018.

HUBADILLAH, S. K.; OTHMAN, M. H. D.; ISMAIL, A. F.; RAHMAN, M. A.; JAAFAR, J.; IWAMOTO, Y.; HONDA, S.; DZAHIR, M. I. H. M.; YUSOP, M. Z. M. Fabrication of low cost, green silica based ceramic hollow fibre membrane prepared from waste rice husk for water filtration application. **Ceramics International**, v 44, pp. 10498-10509 ,2018.

INAZUMI, S., OHTSU, H., ISODA, T. Environmental accounting on treatment and reutilization of construction sludges in geotechnical engineering fields. **International Journal of GEOMATE**, v. 33, issue 2, pp. 369-374, 2012.

JACANGELO, J. G.; DEMARCO, J.; OWEN, D. M.; RANDTKE, S. J. Selected processes for removing NOM: An overview. Journal / **American Water Works Association**, 1995.

JEDIDI, I.; KHEMAKHEM, S.; SAID, S.; LARBOT, A.; ELLOUMI-AMMAR, N.; FOURATI, A.; CHARFI, A.; SALAH, A. B.; AMAR, R. B. Preparation of a new ceramic microfiltration membrane from mineral coal fly ash: Application to the treatment of the textile dying effluents. **Powder Technology**, v. 208, issue 2, pp. 427-432, 2011.

JEONG, Y.; LEE, S.; HONG, S.; PARK, C. Preparation, characterization and application of low-cost pyrophyllite-alumina composite ceramic membranes for treating low-strength domestic wastewater. **Journal of Membrane Science**, v 536, pp. 108-115, 2017.

JIANG, C.; HUANG, S.; LI, G.; ZHANG, X.; CHENG, X. Formation of closed-pore foam ceramic from granite scraps. **Ceramics International**, v.44, issue 3, pp. 3469-3471, 2018.

JURAS, I. A. G. M. Os impactos da indústria no meio ambiente. In: Roseli Senna Ganem. (Org.). **Políticas setoriais e meio ambiente**. 1ªed. Brasília: Edições Câmara, v. 1, pp. 47-83, 2015.

KARAYANNIS, V. G.; KARAPANAGIOTI, H. K.; DOMOPOULOU, A. E.; KOMILIS, D. P. Stabilization/Solidification of Hazardous Metals from Solid Wastes into Ceramics. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, n. 5, pp. 863-1874, 2017.

KARCI, A. Degradation of chlorophenols and alkylphenolethoxylates, two representative textile chemicals, in water by advanced oxidation processes: The state of the art on transformation products and toxicity. **Chemosphere**, v. 99, p. 1-18, 2014.

KIM, T. S.; KANG, I. C.; GOTO, T.; LEE, B. T. Fabrication of Continuously Porous Alumina Body by Fibrous Monolithic and Sintering Process. **Materials Transactions**, v. 44, n.9, pp. 1851-1856, 2003.

KRAWCZY, D.; GONGLEWSKI, N. Determining Suspended Solids Using a Spectrophotometer. **Sewage and Industrial Wastes**, v. 31, n. 10, pp. 1159-1164, 1959. Disponível em <<http://www.jstor.org/stable/25033992>> Acesso em dez. 2018.

KUMAR, R. V.; GHOSHAL, A. K.; PUGAZHENTHI, G. Elaboration of novel tubular ceramic membrane from inexpensive raw materials by extrusion method and its performance in microfiltration of synthetic oily wastewater treatment. **Journal of Membrane Science**, v. 490. Pp. 92-102, 2015.

KUMAR, R. V.; GOSWAMI, L.; PAKSHIRAJAN, K.; PUGAZHENTHI, G. Dairy wastewater treatment using a novel low-cost tubular ceramic membrane and membrane fouling mechanism using pore blocking models. **Journal of Water Process Engineering**, v. 13, pp. 168-175, 2016.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; MORAES, S. G.; DURAN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 78-82, fev. 2002.

LAFI, R.; GZARA, L.; LAJIMI, R. H.; HAFIANE, A. Treatment of textile wastewater by a hybrid ultrafiltration/electrodialysis process. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 132, pp. 105-115, 2018.

LE, N. L.; NUNES, S. P. Materials and membrane technologies for water and energy sustainability. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 7, pp. 1-28, 2016.

LORENTE-AYZA, M. M.; MESTRE, S.; MENÉNDEZ, M.; SÁNCHEZ, E. Comparison of extruded and pressed low-cost ceramic supports for microfiltration membranes. **Journal of the European Ceramic Society**, v 35, pp.3681-3691, 2015.

LUQUE, S.; GÓMEZ, D.; ÁLVAREZ, J. R. Industrial Applications of Porous Ceramic Membranes (Pressure-Driven Processes). **Membrane Science and Technology**, v. 13, pp. 177–216, 2008.

MARCELINO, R. B. P.; FRADE, P. R.; AMORIM, C. C.; LEÃO, M. M. D. Tendências e Desafios na Aplicação de Tecnologias Avançadas para o Tratamento de Efluentes Industriais

Não-Biodegradáveis: Atuação do Grupo de Pesquisas POA Control da UFMG. **Rev. UFMG**, Belo Horizonte, v. 20, n.2, pp. 358-383 jul./dez, 2013.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H, C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, pp. 303-313, 2002.

MITTAL, P.; JANA, S.; MOHANTY, K. Synthesis of low-cost hydrophilic ceramic–polymeric composite membrane for treatment of oily wastewater. **Desalination**, v. 282, pp. 54-62, 2011.

MORE T. T.; YAN, S.; TYAGI, R. D.; SURAMPALLI, R. Y. Applications of membrane processes for concentrated industrial wastewater treatment. In. **Membrane Technology and Environmental Applications**. American Society of Civil Engineers, pp. 217–238, 2012.

MOSLEH, L.; HOSSEIN, S. H. S.; FARD, R. D.; KHOSHBAKHT, K.; SHAHBAZI, A. Comparison of the performance of corn starch coagulant aid accompany with alum, polyaluminum chloride and ferric chloride coagulants in turbidity removal from water. **Journal of Environmental Health Engineering**, v. 1, issue 4, pp. 248-258, 2014.

MOUIYA, M.; ABOURRICHE, A.; BOUAZIZI, A.; BENHAMMOU, A.; HAFIANE, Y. E.; ABOULIATIM, Y.; NIBOU, L.; OUMAM, M.; OUAMMOU, M.; SMITH, A.; HANNACHE, H. Flat ceramic microfiltration membrane based on natural clay and Moroccan phosphate for desalination and industrial wastewater treatment. **Desalination**, v. 427, pp. 42-50, 2018.

NAVEED, S.; BHATTI, I.; ALI, K. Membrane technology and its suitability for treatment of textile wastewater in Pakistan. **Journal of Research (Science)**, Bahauddin Zakariya University, Multan, Pakistan, v. 17, n. 3, pp. 155-164, 2006.

OBRADOVIC, N.; FILIPOVIĆ, S.; MARKOVIĆ, S.; MITRIĆ, M.; RUSMIROVIĆ, J.; MARINKOVIĆ, A.; ANTIĆ, V.; PAVLOVIĆ, V. Influence of different pore-forming agents on wollastonite microstructures and adsorption capacities. **Ceramics International**, v. 43, issue 10, pp.7461-7468, 2017.

OLIVEIRA NETO, G. C.; FILHO, M. G.; GANGA, G. M. D.; NAAS, I. A.; VENDRAMETTO, O. Princípios e ferramentas da produção mais limpa: um estudo exploratório em empresas brasileiras. **Gest. Prod.**, São Carlos, v. 22, n. 2, p. 326-344, jun. 2015.

ORTLEPP, G.; LÜTZKENDORF, R. Long carbon fibers from textile wastes. **Chemical Fibers International**, v.56, issue 6, pp. 363-365, 2006.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, issue 5, pp. 832-838, 2010.

PHONPHUAK, N.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of sugarcane bagasse ash to improve properties of fired clay brick. **Chiang Mai Journal of Science**, v. 45, pp.1855-1862, 2018.

ROBINSON, T.; MCMULLAN, C.; MARCHANT, R.; NIGAM, P. Remediation of Dyes in Textile Effluent: a Critical Review on Current Treatment Technologies with a Proposed Alternative. **Bioresource Technology**, v. 77, n. 3, pp. 247-255, 2001.

RIBEIRO, M. L.; DE LUCA, E. Tratamento de águas por filtração por membranas. Estado da arte. 1998.

SAJA, S.; BOUAZIZI, A.; ACHIOU, B.; OUAMMOU, M.; ALBIZANE, A.; BENNAZHA, J.; YOUNSSI, S. A. Elaboration and characterization of low-cost ceramic membrane made from natural Moroccan perlite for treatment of industrial wastewater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, issue 1, pp. 451-458, 2018.

SALES, A.; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, v. 30, n. 6, pp. 1114–1122, 2010.

SAMAEI, S. M.; GATO-TRINIDAD, S.; ALTAEE, A. The application of pressure-driven ceramic membrane technology for the treatment of industrial wastewaters – A review - **Separation and Purification Technology**, Elsevier, pp. 198-220, 2018.

SEGUÍ-AMÓRTEGUI, L.; ALFRANCA-BURRIEL, O.; MOELLER-CHÁVEZ, G. Methodology for the technical-economic analysis of wastewater regeneration and reutilization systems. **Tecnología y Ciencias del Agua**, v. 5, issue 2, pp. 55-70, 2014.

SILVA, A. L.; CHAVES, A. C.; LUNA, C. B. B.; NEVES, G. A.; LIRA, H. L. Avaliação das composições de massas argilosas a partir da incorporação de resíduo da indústria de cerâmica vermelha na obtenção de membranas cerâmicas tubulares. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, e. 11795, 2017.

SILVA, M. C.; LIRA, H. L.; LIMA, R. C. O.; FREITAS, N. L. Effect of Sintering Temperature on Membranes Manufactured with Clays for Textile Effluent Treatment. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, Article ID 371697, 7 pages, 2015.

SILVA, S. A.; DE OLIVEIRA, R. **Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias**. Campina Grande, Paraíba: O Autor, 2001.

SIRVAIN, M.A. Water reuse. Role and challenges of liquid-solid and membrane separation systems. **Eau, l'Industrie, les Nuisances**, issue 363, pp. 87-91, 2013.

SOUZA, J. de. Obtenção de membranas cerâmicas utilizando matérias-primas regionais para uso em tratamento de água. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) UFPB, 2016.

STUDART, A. R.; GONZENBACH, U. T.; TERVOORT, E.; GAUCKLER, L. J. Processing Route to Macroporous Ceramics: A Review. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 89, issue 6, pp. 1771-1789, 2006.

TEIXEIRA, S.R.; SOUZA, A. E.; PEÑA, A. F. V.; LIMA, R. G.; MIGUEL, A. G. Use of charcoal and partially paralyzed biomaterial in fly ash to produce briquettes: sugarcane bagasse (Chapter 8). In: **Alternative Fuel**. InTech open access Publisher, Rijeka, Croatia, 2011.

TEIXEIRA, S. R.; ARENALES, A.; SOUZA, A. E.; MAGALHÃES, R. S.; PEÑA, A. F. V.; AQUINO, D.; FREIRE, R. Sugarcane bagasse: Applications for energy production and ceramic materials. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 41, n. 3, p. 229-238, 2015.

UNESCO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2017 - WWDR 2017 - **Águas residuais: o recurso inexplorado**. Resumo Executivo. 12p, 2017.

UNESCO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA - Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2018 - WWDR 2018 - **Soluções baseadas na natureza para a gestão da água**. Resumo Executivo. pp. 2-3, 2018.

VASANTH, D; PUGAZHENTHI, G.; UPPALURI, R. Fabrication and properties of low-cost ceramic microfiltration membranes for separation of oil and bacteria from its solution. **Journal of Membrane Science**, v. 379, issues 1–2, pp. 154-163, 2011.

VERMA, A. K.; DASH, R. R.; BHUNIA, P. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. **Journal of Environmental Management**, v. 93, pp.154-168, 2012.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, 2ª ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 243p, 1996.

WOODARD & CURRAN, INC. **Industrial Waste Treatment Handbook**, Ed. Elsevier, 2ª ed. 518p, 2006.

WU, P.; HUANG, Z.; XU, Y.; ZHANG, J. A review of preparation techniques of porous ceramic membranes. **Journal of Ceramic Processing Research**, v. 16, n. 1, pp. 102-106, 2015.

XIAO, S.; DONG, H.; GENG, Y.; BRANDER, M. An overview of China's recyclable waste recycling and recommendations for integrated solutions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 134, pp. 112-120, 2018.