

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PRODUTOS E PROCESSOS

RAQUEL IANINE LIMA DE SOUZA

USO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANA APLICADO A
EFLUENTE DE LAVANDERIA DE *JEANS* PARA FINS DE REÚSO

BELO HORIZONTE
2023

RAQUEL IANINE LIMA DE SOUZA

**USO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANA APLICADO A
EFLUENTE DE LAVANDERIA DE *JEANS* PARA FINS DE REÚSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Produtos e Processos.

Orientadora: Prof^a. Luzia Sergina de França Neta

Coorientadora: Prof^a. Patrícia Sueli de Rezende

BELO HORIZONTE

2023

S729u Souza, Raquel Ianine Lima de.
Uso de processos de separação por membrana aplicado a efluente de lavanderia de jeans para fins de reúso / Raquel Ianine Lima de Souza. – 2023.
135 f. : il.
Orientadora: Luzia Sergina de França Neta.
Coorientadora: Patrícia Sueli de Rezende.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, Belo Horizonte, 2023.
Bibliografia.
1. Lavanderia. 2. Ultrafiltração. 3. Nanofiltração. 4. Água - Reuso.
I. França Neta, Luzia Sergina de. II. Rezende, Patrícia Sueli de. III. Título.

CDD: 628.164

RAQUEL IANINE LIMA DE SOUZA

**USO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS APLICADO A
EFLUENTE DE LAVANDERIA DE JEANS PARA FINS DE REÚSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Produtos e Processos.

Belo Horizonte, 16 de junho de 2023.

Aprovada pela Banca Examinadora:


Prof.^a Dr.^a. Luzia Sergina de França Neta (Orientadora)


Prof. Dr.^a. Patrícia Sueli de Rezende (Coorientadora)


Prof.^a Dr.^a. Gisele Fátima Moraes Nunes


Prof.^a Dr.^a. Liana Franco Padilha


Prof.^a Dr.^a. Mirian Cristina Santos Amaral Moravia

“O mundo é um lugar perigoso de se viver, não por causa daqueles que fazem o mal, mas sim por causa daqueles que observam e deixam o mal acontecer”

(Albert Einstein)

RESUMO

Garantir a disponibilidade e manejo sustentável da água para todos é um dos grandes desafios da atualidade e fazem parte dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Para os processos produtivos é urgente a necessidade de reduzir a poluição eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos. A ampliação no uso de tratamento de efluentes avançados, reciclagem e tecnologias de reúso são demandas atuais necessárias. No Brasil, tais aspectos se mostram ainda mais urgentes. Dados indicam que os efluentes finais lançados pela grande maioria das estações de tratamentos convencionais nem mesmo estão alcançando as condições e os padrões de qualidade de descarte das águas estabelecidos pela lei. No caso das lavanderias de *jeans* os principais tratamentos aplicados são os físico-químicos e biológicos. Estes não são considerados eficientes para tratar estas águas complexas quimicamente e não biodegradáveis inviabilizando-as para reuso. Como alternativa, o uso dos Processos de Separação por Membrana (PSM) tem sido considerado como métodos mais adequados para garantir o reúso em aplicações industriais. O presente projeto explora o uso de membranas de ultrafiltração (UF), de tecnologia nacional, para o reúso de efluentes reais de uma lavanderia de *jeans*. A membrana na conformação de fibra oca foi caracterizada por meio de parâmetros morfológicos e de transporte. O sistema de filtração em bancada apresentou estabilidade operacional adequada para ensaios de longa duração. O desempenho do sistema de UF foi avaliado permeando diferentes amostras reais do efluente de lavanderia. A UF foi eficiente na remoção da turbidez (100%) e sólidos (89%), além disso, não foi possível identificar qualquer concentração de corante nos permeados obtidos. No entanto, a UF foi pouco efetiva para a remoção de íons e demanda química de oxigênio (DQO). Como forma de melhorar a qualidade do permeado para fins de reúso, o processo de UF foi conjugado a um processo de nanofiltração (NF) contendo membrana de poliamida (PA). O processo conjugado permitiu melhora significativa quanto a remoção da DQO de até 100%. Ao longo do estudo identificou-se que os principais parâmetros a serem analisados para a reutilização de água industrial na lavanderia de *jeans* são pH, cor, turbidez e sólidos, a depender da utilização. Diante do exposto, tanto a UF isolada quanto o processo conjugado de UF+NF proporcionaram padrões de qualidade de reúso. A recuperação de 75% do efluente sob a forma de permeado tratado, proporcionada pelo processo conjugado demonstra a eficiência do processo e a possibilidade de alto volume a ser explorado para o reúso.

Palavras-chave: lavanderia de *jeans*; ultrafiltração; nanofiltração; parâmetros; reúso.

ABSTRACT

Ensuring the availability and sustainable management of water for all is one of today's greatest challenges and is part of the United Nations (UN) Sustainable Development Goals (SDGs). For production processes, there is an urgent need to reduce pollution by eliminating dumping and minimizing the release of chemical products. Expanding the use of advanced effluent treatment, recycling and reuse technologies are necessary current demands. In Brazil, these aspects are even more urgent. Data indicates that the final effluents released by most conventional treatment plants are not even reaching the conditions and quality standards for water disposal established by law. In the case of jeans laundries, the main treatments applied are physical-chemical and biological. These are not considered efficient to treat these chemically complex and non-biodegradable waters, making them unviable for reuse. As an alternative, the use of Membrane Separation Processes (PSM) has been considered as more suitable methods to guarantee reuse in industrial applications. This project explores the use of ultrafiltration membranes (UF), of national technology, for the reuse of real effluents from a jean's laundry. The membrane in the hollow fiber conformation was characterized using morphological and transport parameters. The bench filtration system showed adequate operational stability for long-term tests. The performance of the UF system was evaluated by permeating different real samples of laundry effluent. UF was efficient in removing turbidity (100%) and solids (89%), in addition, it was not possible to identify any concentration of dye in the permeates obtained. However, UF was ineffective in removing ions and chemical oxygen demand (COD). To improve the quality of the permeate for reuse purposes, the UF process was combined with a nanofiltration (NF) process containing a polyamide membrane (PA). The combined process allowed a significant improvement in COD removal of up to 100%. Throughout the study, it was identified that the main parameters to be analyzed for the reuse of industrial water in jeans laundry are pH, color, turbidity, and solids, depending on the use. In view of the above, both the isolated UF and the combined UF+NF process provided quality standards for reuse. The recovery of 75% of the effluent in the form of treated permeate, provided by the combined process, demonstrates the efficiency of the process and the possibility of a high volume to be explored for reuse.

Keywords: jeans laundry; ultrafiltration; nanofiltration; parameters; reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de separação utilizando membranas.....	21
Figura 2 – (a) Membrana isotrópica porosa e (b) membrana anisotrópica	22
Figura 3 – Tamanho das partículas no processo de membrana acionado por pressão	25
Figura 4 – Módulos para acondicionamento de membranas: a) quadro e	26
placas; b) tubular; c) espirais; d) fibras ocas; c) disco giratório.....	26
Figura 5 – Efeito no fluxo de eventos de polarização de concentração e incrustação.....	27
Figura 6 – Formação de incrustação em membrana.....	28
Figura 7 – Filtração convencional x filtração tangencial	29
Figura 8 – Curva fluxo pressão e região de formação de incrustação	30
Figura 9 – Fluxograma esquemático da cadeia produtiva básica do Jeans.....	36
Figura 10 – Peça em Denim cru versus peça após as etapas de lavagens: (a) peça que sai da confeção e chega às lavanderias; (b) peça que sai da lavanderia e chega ao consumidor	38
Figura 11 – Lavagens de Jeans	39
Figura 12 – Efluente gerado pelos processos de lavagens de Jeans	43
Figura 13 – Poluição da água e suas características em algumas etapas de beneficiamento do Jeans	44
Figura 14 – Lodo do tratamento de efluentes de <i>Jeans</i>	47
Figura 15 – Roteiro de atividades.....	62
Figura 16 – Tratamento de efluentes Cenário 1	63
Figura 17 – Tratamento de efluentes Cenário 2.....	63
Figura 18 - Ponto de coleta dos efluentes para estudo. a) Ponto de coleta 1 (PC1) e Ponto de coleta 2 (PC3).....	64

Figura 19 – Membranas de ultrafiltração na conformação de fibra oca	65
Figura 20 – Membrana plana de nanofiltração	66
Figura 21 – Confeção do módulo de fibra oca: a) fixação das fibras com cola no tubo PVC; b) vista das fibras (após corte das sobras de cola) no lado que corresponde a saída do permeado	68
Figura 22 – Representação esquemática do sistema de ultrafiltração.....	70
Figura 23 – Sistema de filtração para ensaios de ultrafiltração em escala de bancada	70
Figura 24 - Diagrama esquemático do sistema de filtração para ensaios de nanofiltração ...	72
Figura 25 - Sistema de filtração para ensaios de nanofiltração; a) vista frontal onde encontra-se o manômetro, válvula, rotâmetro e controle de temperatura; b) vista lateral observado o controle de pressão e a bomba	72
Figura 26 – Célula de nanofiltração.....	73
Figura 27 - Fotomicrografias da superfície externa da fibra oca: a) aumento 50.000x; b) aumento de 100.000x.....	75
Figura 28 – Seção transversal e estimativa do raio	76
externo da membrana	76
Figura 29 – Morfologia da seção transversal da fibra oca: a) detalhe da morfologia da seção transversal (aumento 400x); b) camada esponjosa e poros digitiformes (conformação de dedos) (aumento 1.500x); c) morfologia esponjosa próximo a superfície externa da membrana (aumento 25.000x)	77
Figura 30 – Fotomicrografias da seção transversal da fibra oca: a) transição da superfície macroporosa (1) para uma superfície esponjosa (2) aumento de 12.000x; b) superfície esponjosa com aumento de 12.000x.....	78
Figura 31 – Compactação do módulo M-01	79
Figura 32 – Rejeição de BSA e Tripsina pela fibra oca em função da pressão aplicada.....	80
Figura 33 – Compactação inicial da Membrana M-02	82
Figura 34 – Permeabilidade Hidráulica Inicial	82

Figura 35 – Compactação da membrana de nanofiltração (NF-90)	84
Figura 36 - Fluxo permeado em função da pressão para determinação da permeabilidade hidráulica inicial da membrana de NF.	84
Figura 37 – Avaliação do fluxo crítico com efluente de lavanderia de <i>jeans</i>	86
Figura 38 – Comportamento do fluxo permeado em função do tempo operacional de 40 horas para cada Cenário.	87
Figura 39 – Efluente de lavanderia de jeans e permeado obtido pela ultrafiltração.....	94
Figura 40 – Permeabilidade hidráulica após ensaios: a) Cenário 1; b) Cenário 2; c) Cenário 3	96
Figura 41 – Comportamento fluxo permeado em função do tempo na NF	99
Figura 42 – Efluente de lavanderia de jeans e permeado obtido pela ultrafiltração Cenário 2.	103
Figura 43 – Espectro FTIR da membrana NF-90 após ensaios	105
Figura 44 – Estrutura membrana NF-90 caracterizada por FTIR.....	106
Figura 45 – Padrões analíticos de índigo blue em DMSO utilizados nas análises quantitativas	132
Figura 46 – Curva analítica para índigo blue em DMSO por espectroscopia na região do UV – visível ($\lambda = 611\text{nm}$)	133
Figura 47 – Curva de Calibração Tripisina	134
Figura 48 – Curva de Calibração BSA	134

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos processos de separação por membranas	25
Quadro 2 – Dados gerais do setor (atualizado em janeiro de 2023).....	34
Quadro 3 – Condições de lançamento de efluente para qualquer fonte poluidora	41
Quadro 4 – Literatura sobre PSM e sua aplicação em efluentes têxteis.....	54
Quadro 5 – <i>Standard Methods</i> aplicada as análises.....	65
Quadro 6 – Características dos módulos de permeação.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos de qualidade da água para uso na indústria têxtil	60
Tabela 2 – Caracterização água industrial	60
Tabela 3 – Análise da remoção DQO (mg L^{-1}) no teste de 40 horas	89
Tabela 4 – Parâmetros físico-químicos avaliados na Ultrafiltração Cenário 1	91
Tabela 5 – Parâmetros físico-químicos avaliados na Ultrafiltração Cenário 2	92
Tabela 6 – Parâmetros físico-químicos avaliados na Ultrafiltração Cenário 3	93
Tabela 7 – Parâmetros físico-químicos permeados UF+NF, Cenário 2, 50% de recuperação	100
Tabela 8 – Parâmetros físico-químicos permeados UF+NF, Cenário 3, 50% de recuperação	101
Tabela 9 – Parâmetros físico-químicos permeados UF+NF, 75% de recuperação	104
Tabela 10 – Permeabilidade hidráulica NF	105
Tabela 11 – Requisitos de qualidade da água para uso na indústria têxtil	Erro! Indicador não definido.
Tabela 12 – Parâmetros físico-químicos dos permeados comparados com a literatura encontrada sobre PSM e efluentes têxteis	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CERH-MG	Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais
CNI	Confederação Nacional das Indústrias
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio (5 dias – 20 °C - DBO _{5,20})
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EEF	Excitação Emissão de Fluorescência
ETEs	Estações de tratamento de esgoto
FFT	Filtração de Fluxo Tangencial
FIEMG	Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
MET	Microscopia eletrônica de transmissão
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MF	Microfiltração
MFA	Microscopia de força atômica
MOD	Matéria Orgânica Dissolvida
MWCO	<i>Molecular weight cut off</i>
NF	Nanofiltração
PBTA	2-fenil-benzotriazóis
PC	Polarização de Concentração
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PSM	Processos de separação por membranas
PVDF	Fluoreto de Polivinilideno
Sebrae	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
UF	Ultrafiltração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo Geral	19
2.2 Objetivos Específicos.....	19
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA	20
3.1 Fundamentação Teórica	20
3.1.1 Processos de separação por membranas	20
3.1.2 Polarização de concentração e formação de incrustação	26
3.1.3 Ultrafiltração e Nanofiltração.....	31
3.2 Revisão da literatura	33
3.2.1 Indústria Têxtil.....	33
3.2.2 As lavanderias de Jeans.....	37
3.2.3 Efluentes gerados nas lavanderias de jeans e tratamentos aplicados	42
3.2.4 Processos de separação por membranas em efluentes industriais.....	48
3.2.4.1 Membranas de ultrafiltração e nanofiltração aplicadas a efluentes têxteis	50
3.2.5 Reúso industrial e parâmetros de qualidade para lavanderias de jeans	56
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
4.1 Coleta e Caracterização do Efluente de Lavanderia de Jeans	62
4.2 Membranas de Filtração	65
4.3 Módulos e Sistema de Filtração.....	68
4.4 Análise do Desempenho dos Processos de Filtração para fins de Reúso	73
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
5.1 Caracterização das Membranas de Filtração	75
5.2 Caracterização dos Módulos de Filtração.....	81
5.3 Ensaio de Permeação de Ultrafiltração.....	85
5.4 Ensaio de Permeação Ultrafiltração conjugada com Nanofiltração	98
5.5 Análise do Desempenho do Processo de Separação por membranas para o reúso.	106

6 CONCLUSÃO	116
7 REFERÊNCIAS	118
8 ANEXOS.....	132
8.1 Curva de calibração índigo blue	132
8.2 Curva de calibração BSA e Tripsina	133

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é uma das mais longas e tradicionais cadeias da indústria de transformação. Sua produção é diversificada, heterogênea e seus produtos usados por praticamente todos os segmentos da sociedade. No Brasil, o setor gera impactos econômicos e sociais expressivos, representando o segundo que mais emprega, perdendo apenas para os setores de alimentos e bebidas, juntos (ABIT, 2022).

O jeans é um dos tipos de produtos têxteis mais populares e usados por homens e mulheres de todas as idades e classes sociais. A sua relevância na cultura, que marcou e continua a marcar gerações, implica em uma alta produção em escala global (BOTA; RATUI, 2008). As peças em jeans originalmente foram comercializadas com o tecido cru, em sua forma original. Com o passar dos anos e um mercado cada vez mais exigente elas foram modificadas e se tornaram mais atrativas e com diferentes características. Tais alterações foram permitidas pelas muitas etapas de beneficiamento desenvolvidas. Estas envolvem basicamente processos de lavagens e são primordiais para este segmento (PAUL, 2015).

Os métodos de lavagens do jeans compreendem a etapa final do processo produtivo e dão às peças aspectos únicos que variam entre vintage, despojado e até mesmo com aparência de suja e manchada. Além disso, atuam na melhoria do tecido cru a fim de torná-lo confortável, diferenciado e competitivo. Podem ser divididas entre lavagens mecânicas e químicas (CHEN *et al.*, 2015; PAUL, 2015). Por sua complexidade, as etapas de lavagens, normalmente são realizadas em uma unidade independente ao processo de confecção, que pode ser realizada na própria empresa ou ainda ser terceirizada. As lavanderias de jeans se tornaram, portanto, parte integrante da cadeia produtiva desse item e merecem atenção pelo seu impacto produtivo, ambiental e econômico. Uma vez que, para atingir o objetivo desejado na lavagem é necessário utilizar água em abundância e grandes quantidades de produtos químicos (FILHO *et al.*, 2021; PAUL, 2015).

A água é insumo indispensável em praticamente todas as etapas do processamento têxtil, e isto abrange desde o plantio do algodão até a saída da peça acabada. Assim, este setor é responsável por uma alta pegada hídrica. A estimativa é de que este gaste anualmente 93 bilhões de metros cúbicos de água (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017). Para a manufatura do *jeans*, calcula-se que são necessários, durante todo o ciclo de vida do produto de uma calça *jeans*, por exemplo, aproximadamente de 3.000 a 11.000 litros (LEVI STRAUSS & CO., 2009; PAUL, 2015).

Toda esta alta demanda hídrica somada ao uso intensivo de produtos químicos e geração de resíduos contribuíram para que as indústrias têxteis fossem consideradas, dentre as indústrias, a mais poluente da atualidade (COUTO, 2016). E as projeções futuras são preocupantes. Um estudo conduzido pela Boston Consulting Group chamado Pulse of the Fashion Industry, de 2019, mostra que até 2030 o consumo de água na indústria da moda pode crescer de maneira expressiva quase que 50% impulsionado pelo atual padrão de consumo “fast fashion”.

A degradação da qualidade da água e seus progressivos impactos ambientais e socioeconômicos trouxeram alerta mundial. Atualmente, as projeções é que ocorra um aumento expressivo na sua escassez e que seja cada vez mais comum a existência de comunidades vivendo em locais de elevado estresse e baixa segurança hídrica. Quase dois terços da população mundial está sujeita à escassez hídrica o que pode gerar cerca de 700 milhões de refugiados até 2030 (UNICEF, 2021).

Na região metropolitana de Belo Horizonte tem sido observado ao longo dos anos que a Bacia do Rio Paraopeba (principal fonte de abastecimento da região) tem sofrido grandes alterações no seu regime hidrológico influenciada pelas atividades antrópicas. Sendo as indústrias de transformação uma das principais responsáveis em volume de captação de água desta bacia, com 36% (ANA, 2022; IB CONSULTORIA E GESTÃO AMBIENTAL EIRELI, 2022; PBH, 2016).

Tundisi e Matsumura Tundisi (2011) cita que a crise de água, além de colocar em perigo nos seres humanos, impõe dificuldades ao desenvolvimento, aumenta a tendência a doenças de veiculação hídrica, produz estresses econômicos e sociais e traz desigualdades entre regiões e países. Dessa forma, a preservação deste elemento abiótico é fundamental para a construção de um ambiental saudável e habitável.

Neste momento de incertezas ambientais observa-se que os processos produtivos baseados em economia linear se tornaram um padrão inviável e insustentável. Os princípios de uma economia circular passaram a ser mais eficientes para a gestão adequada dos recursos dentro do escopo econômico de desenvolvimento sustentável. Neste modelo, os materiais são aproveitados na cadeia de forma cíclica e os recursos naturais são valorizados em todas as etapas produtivas (TIOSSI; SIMON, 2021).

No caso das lavanderias têxteis isso significa desenvolver tecnologias mais limpas que sejam muito mais econômicas e ecológicas em termos de demanda de água, tratamento de efluentes

e reciclo do efluente tratado no próprio processo produtivo. O reúso da água é uma alternativa confiável que pode permitir a economia e redução da poluição dos recursos hídricos garantindo a sua preservação, e faz parte do plano de ação da Agenda 2030 para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

O reaproveitamento de efluentes têxteis são um grande desafio e ainda é uma prática distante e por muitas vezes considerada desinteressante para as indústrias. Fato este determinado principalmente pela falta de exigências por muito tempo dos órgãos responsáveis. Em sua maioria é determinado apenas que as empresas realizem o tratamento prévio destes efluentes antes de serem lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água obedecendo às condições, exigências e padrões dispostos nas normas aplicáveis (CONAMA, 2005). Entretanto, com aumento das cobranças ambientais e de imposições do comércio nacional e internacional, a prática do reúso e de processos produtivos mais sustentáveis estão em ascensão em nosso país e padrões mais rígidos com o meio ambiente têm sido criados.

O Estado de Minas Gerais, no ano de 2020, publicou a Deliberação Normativa nº 65, que regulamenta o reúso direto de água não potável proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos (ETE's) de sistemas públicos e privados. Além disso, já existe em andamento na Câmara dos Deputados, o Projeto de Lei 2451/20 que propõe tornar obrigatório o reúso da água de tratamento de efluentes líquidos do processo industrial.

Nesse cenário, o desenvolvimento e a pesquisa de novas tecnologias que permitem o reúso eficiente se tornam altamente relevantes para as indústrias. No caso das lavanderias de jeans têm sido observados que as técnicas convencionais, que englobam métodos físico-químicos e biológicos, aplicadas para melhorar a qualidade destas águas não têm sido alternativa eficiente para o reúso de águas coloridas (BUSCIO *et al.*, 2015). Isso porque, estes embora proporcionem boa remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), apresentam uma baixa eficiência para a remoção de sais e descoloração. Os corantes contidos nestas águas residuárias são considerados a fonte mais peremptória de contaminação e devido à sua alta massa molecular são estruturas complexas e de baixa biodegradabilidade o que dificulta a remoção por esses métodos (KIM *et al.*, 2004). Outro problema é que esses necessitam de uma alta dose de coagulantes o que aumenta o custo e o torna inseguro ao meio ambiente (VERMA *et al.*, 2012).

A aplicação dos Processos de Separação por Membranas (PSM) em efluentes industriais surgem como uma alternativa sustentável frente as técnicas convencionais. Essa tecnologia que utiliza processo de separação física sem a necessidade de adição de produtos químicos,

apresenta alto rendimento de filtração capaz de produzir um permeado de qualidade, o que pode viabilizar o reúso. No que se trata dos efluentes têxteis estudos realizados demonstraram bom desempenho no uso de PSM. As membranas permitiram uma alta remoção de cor, demanda química de oxigênio (DQO) e íons, bem como boa qualidade em outros parâmetros de qualidade, importantes para a possibilidade de reúso do permeado. Pesquisas com membranas de Ultrafiltração, Nanofiltração (NF) e Osmose Inversa (OI) têm tido destaque para estas águas residuais (AOUNI *et al.*, 2012; COUTO, 2016; RAMUTSHATSHA; NOMNGONGO, 2022).

Economicamente, já se tem identificado que para esta tecnologia, o retorno é mais atraente do que para outras técnicas. Com a possibilidade de reciclo oferecido, o custo inicial com a sua implantação pode ser compensado pela economia expressa em termos de consumo de água, reaproveitamento de sais e corantes recuperados (DASGUPTA *et al.*, 2015; TANG; CHEN, 2002).

Frente a este cenário promissor dos PSM e a necessidade de mitigar os impactos gerados pelo uso intensivo e poluição dos recursos hídricos no setor têxtil, este estudo investigou o desempenho de uma membrana ultrafiltração na conformação de fibra oca de PVDF (fluoreto de polivinilideno), recém-fabricada, em efluente real de lavanderias de jeans visando o reúso do permeado obtido nos processos produtivos da própria lavanderia. Além disso, a fim de melhorar a qualidade do permeado obtido pela ultrafiltração e ampliar os campos de aplicação da água de reúso investigou-se a integração deste processo com uma membrana nanofiltração de poliamida, já comercializável. O estudo proporcionou um conhecimento específico sobre a aplicação de processos de separação por membranas e abre novas perspectivas para que seja mais usual a prática do reúso nestas indústrias.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Aplicar os processos de separação por membranas em efluentes reais de Lavanderia de *Jeans*, visando o seu reúso.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Estudar os processos produtivos de uma lavanderia de *Jeans* e coletar o efluente real;
- b) Caracterizar membranas de fibra oca constituída por fluoreto de polivinilideno (PVDF) de acordo com os parâmetros morfológicos e de transporte;
- c) Caracterizar a membrana de nanofiltração constituída por poliamida (PA) quanto ao parâmetro de transporte;
- d) Caracterizar o efluente bruto e o permeado obtido pelos processos de separação por membrana;
- e) Avaliar o desempenho dos processos de filtração empregados;
- f) Avaliar a qualidade do permeado obtido quanto seu reúso na lavanderia de jeans.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Fundamentação Teórica

3.1.1 Processos de separação por membranas

As operações unitárias de separação estão continuamente presentes em nosso cotidiano e são essenciais para a cadeia produtiva. Esses processos que visam separar, concentrar e purificar são largamente empregados nas indústrias de transformação como parte do processo produtivo. Alguns processos clássicos de separação comumente utilizados são a destilação, filtração, centrifugação, extração por solvente, troca iônica e cristalização. Em complemento a esses métodos, os processos de separação por membranas (PSM) surgiram como uma importante tecnologia de separação, e seu uso tem sido amplamente empregado dentro de processos produtivos (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Atualmente, a tecnologia de membranas já é consolidada em algumas áreas industriais. As suas aplicações abrangem campos da indústria química, alimentícia, farmacêutica, área médica, biotecnológica, tratamentos de águas industriais e domésticos. Por ser considerada uma tecnologia limpa, esse campo tem demonstrado uma rápida e crescente evolução, principalmente sob influência das questões ambientais (DRIOLI; IULIANELLI, 2020; HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

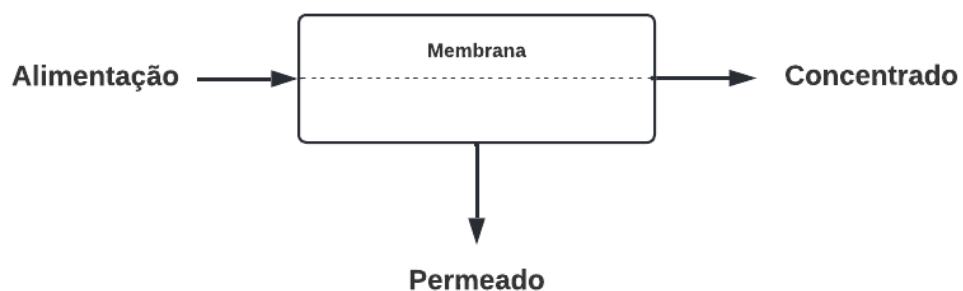
As membranas poliméricas estão na vanguarda do tratamento de efluentes, e o mercado baseado nesse tipo de tecnologia vem se destacando (KAMALI *et al.*, 2019). De acordo com a empresa de pesquisa de mercado *Grand View Research*, o mercado global da tecnologia de separação por membrana foi estimado em US\$ 19,6 bilhões em 2020 e deverá crescer a uma taxa anual de aproximadamente 12,2% entre 2020 e 2028. A pesquisa mostra, ainda, que o tratamento de água e de efluentes tem sido o segmento responsável por impulsionar esse crescimento, e que ao longo dos anos permitirá um impacto positivo devido aos regulamentos ambientais cada vez mais rigorosos que regem a descarga de águas residuais (GRAND VIEW RESEARCH, 2021). No Brasil, as aplicações industriais dos PSM são relativamente recentes, e se concentram em três principais áreas: tratamento de efluentes, dessalinização das águas e tecnologias alimentícias (BERNARDINI, 2021).

A membrana é descrita como uma barreira que separa duas fases e restringe o transporte de substâncias de maneira seletiva (NATH, 2017). Conceitualmente, os PSM utilizam um meio filtrante ou uma barreira seletiva que, sob a ação de uma força motriz, podem promover a

separação de determinados componentes de uma solução ou suspensão (MULDER, 1996). As membranas podem ser obtidas a partir de compostos poliméricos ou inorgânicos semipermeáveis que atuam como uma barreira para os processos de filtração.

A separação ocorre em virtude do transporte dos compostos presentes em uma mistura através da membrana. A separação dos compostos ocorre devido às diferenças nas propriedades físicas e/ou químicas entre a membrana e os componentes dessa mistura (MULDER, 1996). As substâncias que são retidas pela membrana constituem o concentrado, solutos que não ultrapassam a sua superfície por apresentarem dimensões moleculares maiores que o tamanho médio de seus poros. E as que passam por ela são denominadas de permeado, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Representação esquemática de separação utilizando membranas



Fonte: Elaborado pela autora.

Tanto o concentrado quanto o permeado podem conter o produto ou componente de interesse; isso irá depender das impurezas que devem ser removidas e do objetivo do processo (DAS; GEBRU, 2019; MICHELON, 2013). Em regra, a fase permeada tem baixo teor de soluto comparada ao concentrado e a solução de alimentação (BERA; GODHANIYA; KOTHARI, 2021).

O desempenho ou eficiência de uma membrana é determinado pela sua seletividade e pelo fluxo permeado através dela. O fluxo permeado ou taxa de permeação J_p , segundo a lei de Darcy, é definido como o volume que flui através da membrana por unidade de área e tempo. De forma mais ampla o fluxo volumétrico de permeado é definido como o volume de permeado que passa através da membrana (V_p) por unidade de tempo (t) e pela área de permeação da membrana (A_m), conforme na Equação 1 (MICHELON, 2013).

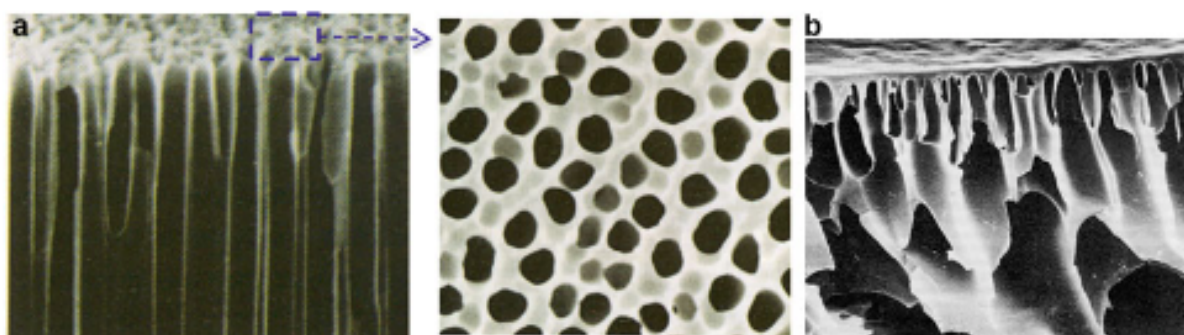
$$J_p = \frac{V_p}{A_m t}$$

Equação 1

A seletividade é uma característica considerada única de cada membrana, e muitos fatores podem estar envolvidos para a avaliação desse parâmetro. Uma membrana pode ser espessa ou fina, sua estrutura pode ser homogênea ou heterogênea, o transporte pode ser ativo ou passivo, as membranas podem ser naturais ou sintéticas, produzidas por materiais orgânicos ou inorgânicos, neutras ou carregadas, porosas ou densas. Enfim, essas e outras características devem ser analisadas e podem vir a interferir na sua seletividade (MULDER, 1996; NATH, 2017). O tamanho molecular do soluto, a estrutura morfológica da membrana e a afinidade química são os fatores chave para a eficiência da separação dos componentes químicos (SONUNE; GHATE, 2004). E esta é totalmente dependente do tipo de membrana e seus módulos de permeação.

Quanto a morfologia, as membranas podem ser classificadas como isotrópicas (simétricas) ou anisotrópicas (assimétricas), como mostrado na Figura 2

Figura 2 – (a) Membrana isotrópica porosa e (b) membrana anisotrópica



Fonte: Drioli e Giorno (2016, p. 1148).

As membranas isotrópicas são caracterizadas por serem uniformes ao longo de toda a sua espessura, e podem ser porosas ou densas. Já as membranas anisotrópicas são caracterizadas por uma região superior muito fina e mais fechada (com poros ou não), chamada de pele, suportada em uma estrutura macroporosa. Se essas duas regiões são constituídas de apenas um material, elas são denominadas anisotrópicas integrais. E caso sejam empregados dois materiais distintos, ela é denominada anisotrópica composta (ANADÃO, 2010; HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

A membrana assimétrica, devido a essa configuração peculiar, é um dos maiores avanços na pesquisa e desenvolvimento de membranas (NATH, 2017). A grande diferença entre membranas assimétricas e simétricas está na definição e caracterização dos limites de retenção (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006). A retenção das membranas simétricas é uma função do seu diâmetro equivalente ao poro de tamanho máximo, enquanto nas

membranas assimétricas essa retenção é expressa como uma razão nominal que se refere a um diâmetro de corte, definido como o valor da massa molecular (MCWO¹).

Os PSM são geralmente diferenciados também em função da natureza da força motriz empregada para o transporte dos componentes através da membrana. As principais forças motrizes utilizadas são o gradiente de pressão através da membrana, gradiente de concentração e gradiente de potencial elétrico. Além disso, o transporte de massa através de uma membrana pode ser causado por convecção, por difusão de moléculas individuais (ANADÃO, 2010; DAS; GEBRU, 2019). A seletividade em uma membrana porosa está diretamente associada ao tamanho de seu poro e ao tamanho das partículas existentes na solução. Nesse caso, o principal mecanismo de transporte é a convecção. Em membranas densas, o transporte das moléculas ocorre por sorção das moléculas nas superfícies, difusão através da membrana e dessorção das moléculas no lado do permeado (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006; MICHELON, 2013).

A natureza da membrana, a sua estrutura e o material que a constitui determinam o tipo de sua aplicação, que vai desde a separação de partículas microscópicas até a separação de moléculas de tamanho ou formas idênticas. Atualmente, pode ser encontrada uma variedade de membranas com diferentes características de separação. As técnicas mais relevantes comercialmente são os processos acionados por pressão, sendo os mais comuns a microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e a osmose inversa (OI) (NATH, 2017). Os processos de membrana acionados por pressão são a tecnologia mais comumente usada para o tratamento de águas residuais, e a pressão aplicada é um dos parâmetros essenciais para se determinar o custo operacional total do sistema (BERA; GODHANIYA; KOTHARI, 2021).

As membranas densas, por meio dos processos de osmose inversa, dominaram o mercado de tecnologia de separação por membranas principalmente devido à superior eficiência que essa metodologia proporciona para dessalinização de água salgada. Já as membranas porosas têm sido muito utilizadas em etapas produtivas da indústria, e a expectativa é de que o mercado desse tipo de membrana se expanda, influenciado pelo uso da Microfiltração (MF), Ultrafiltração (UF) e nanofiltração (NF) (GRAND VIEW RESEARCH, 2021).

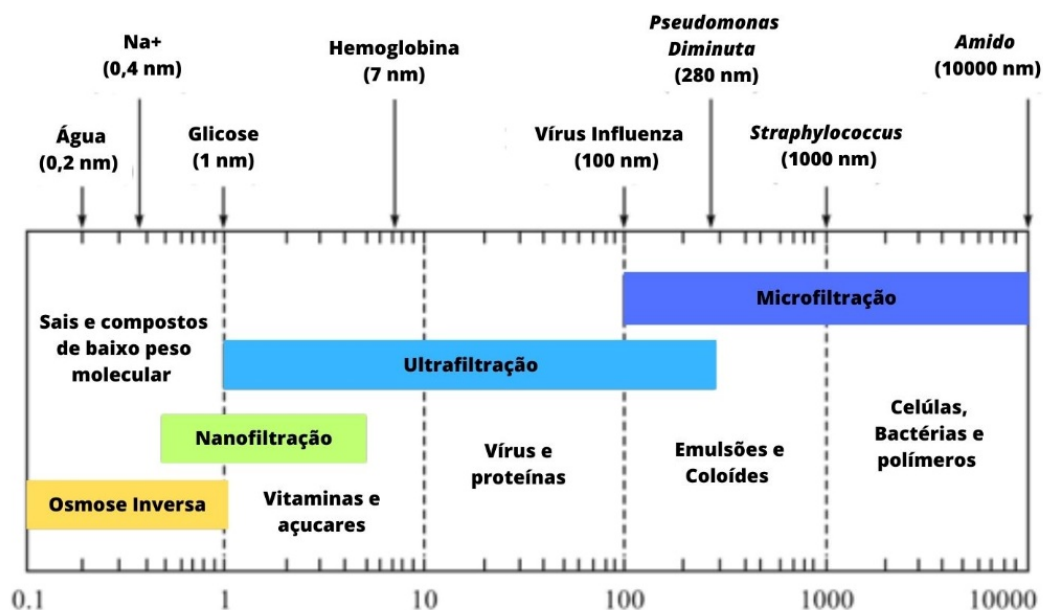
¹ MWCO, ou diâmetro de corte, designa a massa molar do menor componente que será retido com uma eficiência de pelo menos 90% (MULDER, 1996).

Os processos que utilizam MF, UF e NF apresentam capacidade de seletividade diretamente associada à relação entre o tamanho das espécies presentes e o tamanho dos poros dessas membranas (MULDER, 1996). Quando partículas de diâmetro maior que 100 nm precisam ser retidas, é possível usar uma estrutura de membrana bastante aberta e com baixa resistência hidrodinâmica. Esse é um processo típico de separação de MF, no qual baixas e pequenas forças motrizes são suficientes para obter altos fluxos permeado (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006; MULDER, 1996). A MF geralmente é utilizada como um pré-tratamento para UF e um pós-tratamento para reduzir a incrustação (BERA; GODHANIYA; KOTHARI, 2021). Estudos mostraram que a MF é um processo eficiente para a remoção de sedimentos, algas, pequenos coloides (BHARAGAVA; CHOWDHARY, 2019).

Quando se deseja separar macromoléculas de uma solução aquosa, a estrutura da membrana deve ser mais densa e, portanto, sua resistência hidrodinâmica também aumenta. A pressão aplicada agora é maior que na MF, e esse processo passa a ser denominado de UF (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006; MULDER, 1996). As membranas de UF são utilizadas para eliminação de microrganismos patogênicos, macromoléculas, matéria em suspensão, proteínas, vitus, sílicas, dentre outros, e exigem baixo custo energético (BERA; GODHANIYA; KOTHARI, 2021).

Os processos de NF combinam as pressões mais altas e fluxo permeado mais baixos que de UF. Os poros dessas membranas são menores, o que permite reter espécies com massa molecular muito baixa (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006; MULDER, 1996). As membranas de NF são comumente empregadas na área alimentícia, farmacêutica e no tratamento de águas residuais, bem como dessalinização e remoção de subprodutos de águas superficiais e subterrâneas. Tanto a NF como a UF são objetos de estudo mais explorados deste trabalho em seções seguintes. A Figura 3 apresenta de forma mais clara a diferença entre o tamanho dos poros nos PSM acionados à pressão e as partículas possíveis de serem retidas.

Figura 3 – Tamanho das partículas no processo de membrana acionado por pressão



Fonte: Adaptado de Nath (2017, p. 8).

No Quadro 1 estão sumarizadas as principais características, força motriz e exemplos típicos de aplicação dos PSM, para MF, UF, NF e OI.

Quadro 1 – Características dos processos de separação por membranas

Força motriz	Processo	MCWO	Permeado	Concentrado	Tipos de membrana
ΔP	Osmose inversa (10 – 100 bar)	0,2 – 2 kDa	Água, solventes, sais.	Solutos, água.	Assimétrica
ΔP	Nanofiltração (10 – 70 bar)	2 – 20 kDa	Íons monovalentes, água.	Pequenas moléculas, sais divalentes.	Filme fino
ΔP	Ultrafiltração (10 – 10 bar)	20 – 150 kDa	Moléculas pequenas, água.	Polímeros, proteínas, micelas, colóides.	Assimétrica microporosa
ΔP	Microfiltração (0,5 – 3 bar)	100 – 500 kDa	Solutos dissolvidos, água.	Partículas suspensas, água	Simétrica microporosa

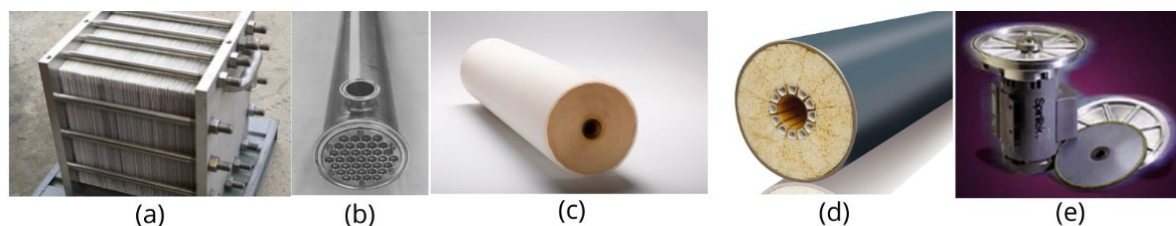
Fonte: Adaptado de Ezugbe e Rathilal (2020), Habert, Borges e Nobrega (2006) e Nath (2017).

Os materiais normalmente empregados na síntese das membranas são os orgânicos e inorgânicos. Em sua maioria, a produção de membranas tem sido preferencialmente realizada por meio de polímeros devido ao baixo custo e facilidade de fabricação. Uma das principais vantagens encontradas nesses materiais é a possibilidade de sintetizar membranas com altas

taxas de permeabilidade (ANADÃO, 2010; HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006). A maioria das membranas atuais são fabricadas com materiais poliméricos, como fluoreto de polivinilideno (PVDF), polietersulfona, poliacrilonitrila, polietileno (PE) e polipropileno (PP) (GRAND VIEW RESEARCH, 2021).

Normalmente, as membranas são produzidas em formato plano e/ou cilíndrico. Após serem produzidas, elas são dispostas em módulos que permitem acomodar grandes áreas de filtração em um pequeno espaço, cujas estruturas suportam a pressão aplicada. As configurações mais utilizadas são placa e quadro, tubulares, espirais e fibras ocas. Na Figura 4 é possível observar como são esses módulos de permeação (ANADÃO, 2010; DAS; GEBRU, 2019; HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Figura 4 – Módulos para acondicionamento de membranas: a) quadro e placas; b) tubular; c) espirais; d) fibras ocas; e) disco giratório



Fonte: Basile, Figoli e Khayet (2015), Forward Osmosis Membranes, Systems and Applications (2014), Septra (2023) e Xue *et al.* (2022).

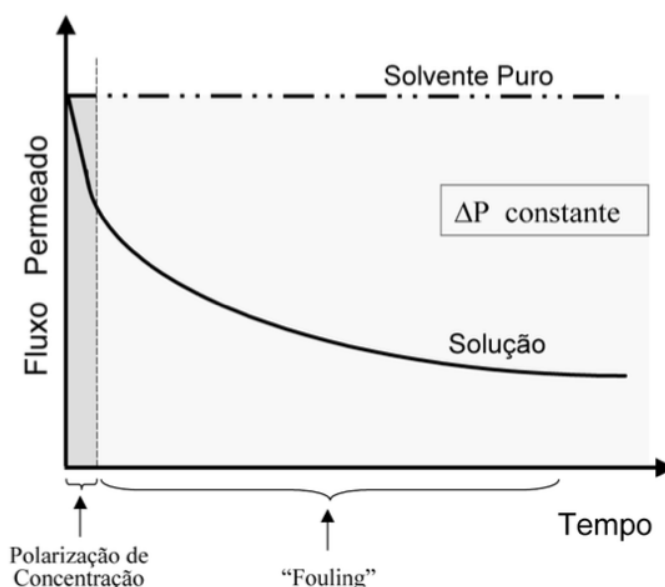
Essas configurações são estruturas que dão suporte e devem atender as características de interesse, tais como alta área de permeação por volume ocupado, baixo custo de fabricação, facilidade de operação e limpeza, além da possibilidade e facilidade de troca da membrana (MICHELON, 2013).

3.1.2 Polarização de concentração e formação de incrustação

Mesmo com uma seleção adequada do material de síntese e uma análise sistemática da morfologia, fenômenos inerentes aos PSM podem ocorrer e influenciar negativamente o desempenho de uma membrana. Uma desvantagem significativa é a ocorrência do fenômeno de Polarização de Concentração (PC), caracterizado pelo aumento da concentração de sólidos próximo à superfície da membrana em virtude da seletividade do processo e da formação de incrustação (NATH, 2017).

A membrana, como já discutido, é uma barreira semipermeável que permite a passagem de um ou mais componentes mais permeáveis e retém espécies menos permeáveis. Em razão dessa seletividade, as espécies menos permeáveis, ou seja, que não atravessam a membrana, tendem a se acumular na superfície provocando uma concentração de solutos maior que a encontrada na corrente da alimentação durante o processo de separação. Esse acúmulo gera a polarização da concentração que resulta em uma redução do fluxo do permeado (MULDER, 1996; HWANG, 2011). A variação esquemática do fluxo do permeado com o tempo de operação ocasionada por polarização de concentração seguido da formação de incrustação em operações em escoamento tangencial encontra-se representada na Figura 5.

Figura 5 – Efeito no fluxo de eventos de polarização de concentração e incrustação

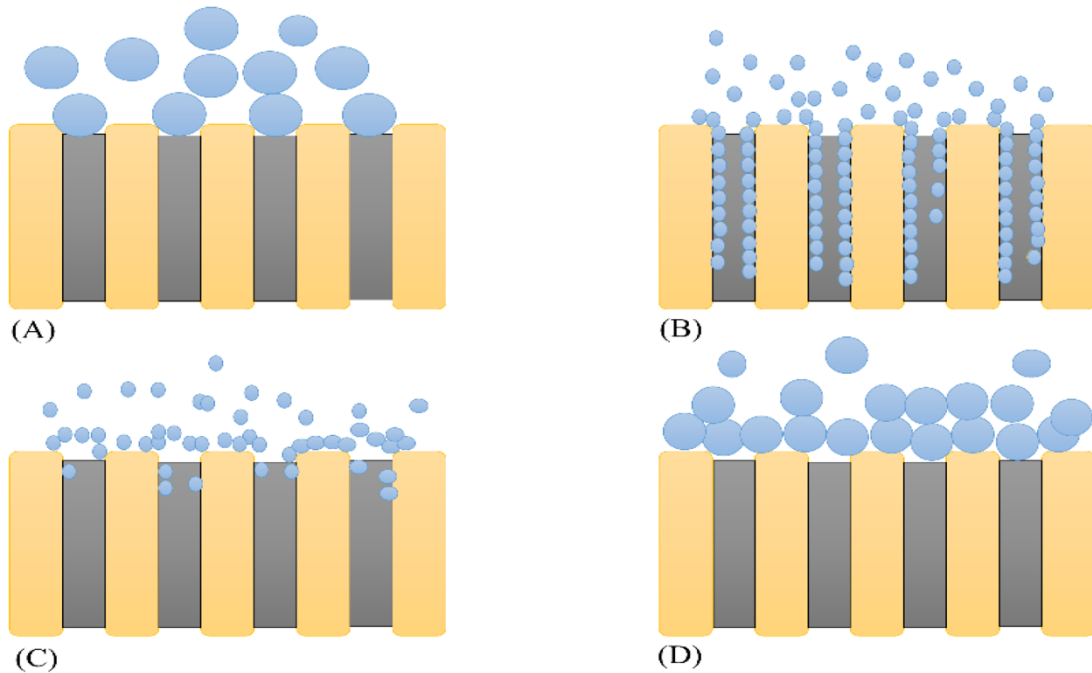


Fonte: Habert *et al.* (2006, p. 123).

A extensão da PC é fortemente dependente do tipo de processo e da solução de alimentação empregada, podendo ser evitada e reversível (MULDER, 1996). Entretanto, devido à sua ocorrência, é muito comum observar a formação de incrustações (obstrução permanente dos poros) que causam um declínio contínuo do fluxo permeado. A incrustação dos poros da membrana é resultado da penetração de solutos ou de suspensões coloidais na superfície interna dos poros e da adsorção de moléculas no material da membrana, diminuindo o fluxo permeado e alterando as características de retenção (HWANG, 2011). Ressalta-se que, na polarização da concentração, as substâncias acumuladas próximas à superfície da membrana estão dissolvidas na solução. E na incrustação, as substâncias deixam a solução e estão depositadas na superfície ou no interior dos poros. Na Figura 6 é ilustra alguns tipos de

incrustações comuns de serem encontradas nos processos de separação por membrana (BRUIJN *et al.*, 2003; MICHELON, 2013).

Figura 6 – Formação de incrustação em membrana

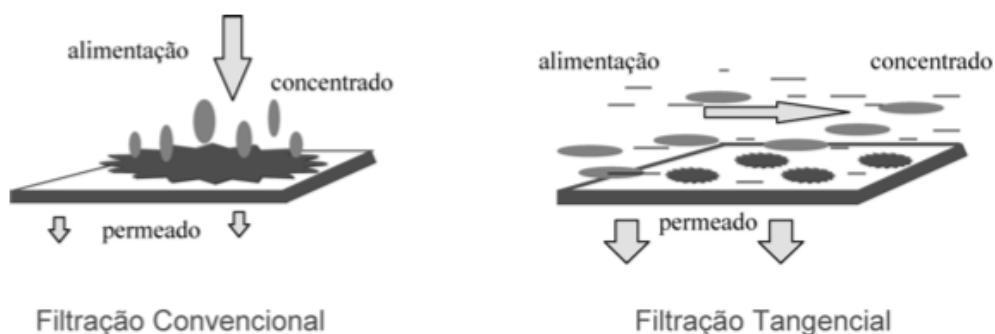


(a) Incrustações que provocam bloqueio completo dos poros (b) bloqueio padrão (c) bloqueio intermediários dos poros d) formação de torta na superfície da membrana.

Fonte: Kertész S, *et.al*, 2023.

Os fenômenos de incrustação são complexos e dependem de diversos parâmetros físico-químicos, estruturais da membrana e do modo operacional. A técnica de filtração com escoamento tangencial tem sido amplamente aderida como forma de minimizar os fenômenos de PC e suas consequências. Basicamente, essa técnica consiste na passagem de uma solução através da superfície de uma membrana, resultando em duas condições de escoamento: o método estático, denominado filtração convencional e a filtração tangencial. Na primeira configuração a alimentação ocorre perpendicularmente à superfície da membrana. Dessa forma, os solutos e/ou os materiais em suspensão retidos ficam acumulados sobre a superfície da membrana. Na segunda configuração, o volume de alimentação escoia paralelamente à superfície da membrana e dessa forma, as partículas depositadas são constantemente arrastadas pela corrente tangencial de alimentação (DAS; GEBRU, 2019; HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006). A Figura 7 ilustra a diferença entre a filtração convencional e a filtração tangencial.

Figura 7 – Filtração convencional x filtração tangencial



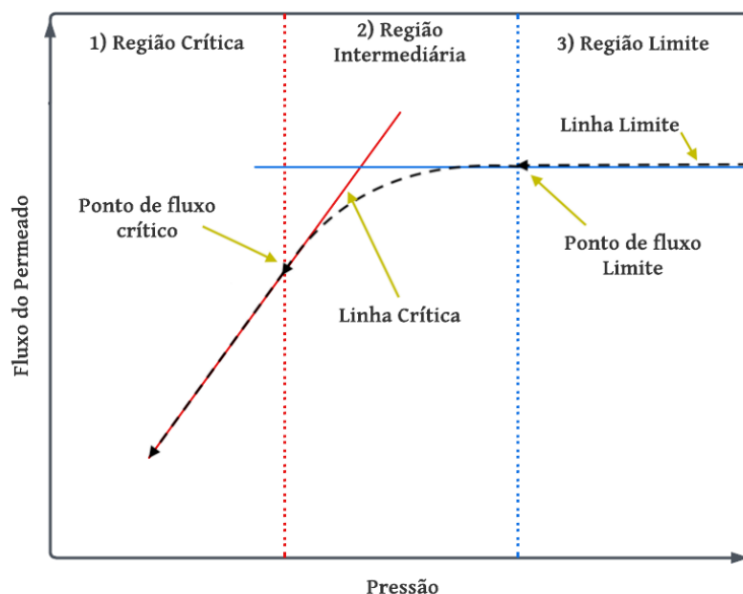
Fonte: Adaptado de Habert, Borges e Nobrega (2006, p. 116).

Em operações com escoamento tangencial a superfície da membrana, o fenômeno da polarização de concentração é observado nos primeiros minutos de filtração, seguido de um declínio acentuado do fluxo permeado com o tempo. Caso essa redução do fluxo do permeado com o tempo permaneça, sugere-se a formação de incrustações, conforme observado na Figura 5 (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Outra maneira de prevenir ou minimizar a formação de camadas de incrustação é identificando e investigando o fluxo crítico. Conceitualmente, o fluxo crítico é um valor intermediário identificado abaixo do qual é observado uma baixa incidência da formação de incrustação e acima do qual esta taxa de incrustação aumenta significativamente (YULIWATI *et al.*, 2022). A principal desvantagem desse conceito é que a determinação dos valores de fluxo crítico não pode ser prevista teoricamente, mas apenas a partir de medidas experimentalmente (DAS; GEBRU, 2019).

A análise da curva do fluxo permeado *versus* pressão de operação tem sido citada na literatura como uma alternativa para determinar de maneira experimental o fluxo crítico. Esta consiste em observar o comportamento do fluxo permeado através da membrana em relação à pressão aplicada. O fluxo crítico é o ponto a partir do qual a curva começa a se desviar da linearidade, como ilustrado na Figura 8. A curva de fluxo permeado *versus* pressão aplicada pode ser caracterizada em três regiões: crítica, intermediária e limite (ZHANG *et al.*, 2016). Na região crítica, o fluxo permeado segue a linha crítica e aumenta linearmente com a pressão. O fim da linha crítica é o ponto de fluxo crítico. Na região intermediária, a curva de fluxo permeado *versus* pressão aplicada começa a se afastar da linha crítica, tornando-se não linear. Tal região termina no ponto de fluxo limite, dando início à região de fluxo limite, na qual um aumento na pressão não resulta no aumento do fluxo permeado, que se torna estável.

Figura 8 – Curva fluxo pressão e região de formação de incrustação



Fonte: Adaptado de Zhang, Law e Fane (2010).

Reduzir a PC é de fundamental importância para se evitar a formação de incrustações. Sistemas de limpeza e promotores de turbulência também têm sido muito utilizados como métodos eficientes para reduzir a formação desse fenômeno. Uma alternativa é a realização de mudanças no módulo e nas variáveis do processo, como aumento da velocidade da vazão de alimentação (MULDER, 1996).

A aplicação de limpeza química tem demonstrado ser indispensável em PSM. Entretanto, é necessário escolher agentes de limpeza apropriados e planejar etapas específicas, visto que alterações a longo prazo podem ocorrer na membrana, gerando o envelhecimento precoce (DING *et al.*, 2020; REGULA *et al.*, 2014). Usualmente, ácidos fortes, cáusticos e hipoclorito são muito utilizados na limpeza química (DING *et al.*, 2020). Álcalis, oxidantes e surfactantes são geralmente aplicados para remover impurezas orgânicas das membranas, pois a condição alcalina é mais eficaz que a ácida, visto que os grupos hidroxila aumentam a solubilidade da matéria orgânica. (WANG *et al.*, 2018). Para limpeza de membranas de PVDF, por exemplo, estudos mostraram que a maior parte da incrustação irreversível pode ser removida por NaClO (PUSPITASARI *et al.*, 2010). DING *et al.*, (2020) investigou a limpeza química com NaClO de incrustações graves em uma membrana de (PVDF) de UF causadas pela filtração das águas residuais da fabricação de papel. Os resultados satisfatórios indicaram que o fluxo permeado de água pura foi recuperado em mais de 95% após a limpeza da membrana de PVDF usando as condições ideais de 0,5% em massa de NaClO (como oxidante) (DING *et al.*, 2020).

3.1.3 Ultrafiltração e Nanofiltração

As membranas de ultrafiltração são sólidos porosos finos que realizam separações retendo e passando solutos principalmente com base em seu tamanho. Estas membranas apresentam poros na faixa entre 1 e 100 nm, portanto soluções contendo solutos numa ampla faixa de massa molar entre 10³ e 10⁶ Dalton podem ser tratadas por este processo. As membranas de UF retêm solutos menores do que as membranas de microfiltração e solutos maiores do que as membranas de osmose inversa (DRIOLI; GIORNO, 2016; MULDER, 1996).

O processo de ultrafiltração envolve o bombeamento de fluidos, em que a pressão força a passagem do solvente através da membrana. Desta forma, o fluxo permeado através das membranas é descrito pela Lei de Darcy em que o fluxo permeado é diretamente proporcional à diferença de pressão aplicada através da membrana (Equação 1)

Segundo Drioli e Giorno (2016) as principais etapas operacionais típicas para um processo de ultrafiltração incluem montagem do sistema de permeação, teste de integridade, limpeza, sanitização, desmontagem e armazenamento. A escolha da configuração do módulo de permeação dependerá das propriedades físicas da alimentação e do concentrado. Os módulos de permeação mais utilizados são os espirais de fibra oca (ANADÃO, 2010). O teste de integridade envolve a determinação da permeabilidade hidráulica. Este é um parâmetro primordial a ser avaliado nos PSM e indicativo de um bom funcionamento do processo. O acúmulo de sólidos retidos sobre a superfície da membrana pode resultar na redução do fluxo permeado e consequentemente provocar uma queda na eficiência do processo de separação. Desta forma, a permeabilidade deve ser avaliada sempre que necessário (DRIOLI; GIORNO, 2016). A fim de evitar a diminuição do fluxo permeado a maioria dos sistemas de UF é operada de modo a atender um escoamento tangencial. Isso favorece o transporte de sólidos suspensos ou solutos retidos pela superfície da membrana de volta para o seio da solução, favorecendo uma operação em estado estacionário com fluxos permeado de solvente economicamente viáveis (DRIOLI; GIORNO, 2016).

Assim como a ultrafiltração, a nanofiltração pertence à classe de processos de separação por membrana acionados por pressão e aplicados para separações em fase líquida. A NF é um processo capaz de efetuar separações de moléculas de massa molar média que variam entre 500 e 2.000 Dalton (MULDER, 1996; HABERT et al., 2006).

O princípio de funcionamento da nanofiltração (NF) é semelhante ao dos demais processos com membranas. A solução a ser tratada circula sob pressão em contato com uma

membrana. Sob efeito da pressão aplicada, o solvente, juntamente com sais e moléculas de baixa massa molecular, atravessam a membrana, e dão origem ao permeado, enquanto as moléculas de maior massa molecular não permeiam a membrana e ficam retidas sobre a sua superfície (BHARAGAVA; CHOWDHARY, 2019).

Com tamanhos de poros da ordem do nanômetro, as membranas NF podem, reter espécies com peso molecular muito baixo, como açúcares, corantes, micropoluentes orgânicos, dentre outros. Elas também são capazes de reter íons bivalentes e exibem uma alta seletividade entre íons mono e multivalentes (BHARAGAVA; CHOWDHARY, 2019; DRIOLI; GIORNO, 2016).

As membranas NF também são confeccionadas em módulos que permitem montagem e operação convenientes em sistemas modulares. Os módulos mais comuns são principalmente módulos em conformação espiral e tubulares provenientes de tecnologias já dominadas na fabricação de módulos resistentes à pressão (DRIOLI; GIORNO, 2016).

Os principais mecanismos de separação da membrana de nanofiltração envolvem exclusão por tamanho e interação eletrostática. A maioria destas membranas adquirem carga elétrica quando colocadas em contato com uma fonte polar. A combinação de poros de dimensões nanométricas com materiais eletricamente carregados implica que a separação de solutos resulta de mecanismos complexos que podem incluir efeitos de Donnan, dielétricos e de transporte (DRIOLI; GIORNO, 2016).

O desempenho e a eficiência destas membranas podem ser avaliados pela utilização de parâmetros como fluxo do permeado, coeficiente de retenção, duração do ensaio, pressão e massa molecular de corte (DAS; GEBRU, 2019, DRIOLI; GIORNO, 2016). O fluxo volumétrico para os processos de nanofiltração tem como base a Equação 2 em que J_t é o fluxo corrigido da temperatura do experimento para a temperatura padronizada a 25°C, Δv o volume do permeado recolhido e Δt o intervalo de tempo, μ viscosidade dinâmica da água na temperatura de permeação e $\mu_{25^\circ\text{C}}$ a viscosidade dinâmica da água a 25°C. Ressalta-se que para o cálculo do fluxo do permeado através da membrana será necessário dividir o fluxo volumétrico pela área (REIS, 2018).

$$J_t = \frac{\Delta v}{\Delta t} \times \frac{\mu}{\mu_{25^\circ\text{C}}}$$

Equação 2

A aplicação da NF cresceu rapidamente devido à capacidade única deste processo em fracionar espécies orgânicas, iônicas e de baixa massa molar. Este tipo de membrana tem sido uma importante técnica de separação e purificação não apenas em alimentações aquosas, como tratamento de água e purificação de fármacos, mas também em aplicações emergentes em separações baseadas em solvente orgânico e líquido iônico (DRIOLI; GIORNO, 2016). Destaca-se a aplicação deste processo principalmente nas etapas do processo de purificação de água potável, como descoloração, remoção de micropoluentes e amaciamento de água, bem como na separação de corantes de efluentes têxteis (DAS; GEBRU, 2019, DRIOLI; GIORNO, 2016).

3.2 Revisão da literatura

3.2.1 Indústria Têxtil

A indústria têxtil é um dos setores mais complexos e tradicionais do mundo. O seu protagonismo industrial é destaque desde o século XVII, uma vez que foi responsável pelo marco da primeira Revolução Industrial ao substituir os teares manuais pela tecnologia de máquinas a vapor. Com o passar dos anos, essa cadeia nunca parou de investir em tecnologias de produção. Atualmente, impulsionada pelas mudanças dos padrões de consumo e pelo novo conceito *fast fashion*, que oferece roupas mais baratas em ciclos mais rápidos, está na vanguarda da implementação da Indústria 4.0² (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2017; FEBRATEX GROUP, 2019).

O Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae) aponta que a manufatura da moda é uma das que mais cresceu e se desenvolveu ao longo da história da industrialização mundial (SEBRAE, 2018). Da produção artesanal até as grandes e modernas linhas de produção da indústria atual, esse setor obteve avanços significativos em termos de tecidos, acabamentos, maquinário e sistemas produtivos. A introdução atual dos conceitos da Indústria 4.0 tende a possibilitar melhorias importantes no segmento têxtil, como controle de produção, estoque, redução de custos e customização de produtos.

² O conceito de Indústria 4.0 ainda é algo recente e em construção. De uma forma geral, ele congrega máquinas inteligentes, análise computacional avançada e trabalho colaborativo entre pessoas conectadas, proporcionando eficiência operacional ao longo de toda a cadeia de produção e logística. Tudo que faz parte internamente ou está ao redor de uma planta industrial se mantém conectado digitalmente, o que resulta em uma cadeia de valor altamente integrada e automatizada (SEBRAE, 2018).

No Brasil, a produção de tecidos foi primordial para o início do desenvolvimento da industrialização do país, tendo em vista a cultura algodoeira no Norte e Nordeste que se iniciou no período colonial (FUJITA; JORENTE, 2015). Depois de quase 200 anos aqui inserida, essa cadeia gera impactos econômicos e sociais expressivos e representa o segundo setor da indústria de transformação que mais emprega, perdendo apenas para os de alimentos e bebidas (ABIT, 2022).

Em 2021, a indústria têxtil e de confecção gerou em valor de produção aproximadamente 190 bilhões de reais e proporcionou cerca de 1,3 milhão de postos de trabalho, quantitativo que foi equivalente a 19,5% do total de trabalhadores alocados na produção industrial no referido ano. Destaca-se ainda que, após mais de dois anos de pandemia e árduos desafios econômicos, a indústria da moda foi considerada resiliente e dinâmica, tendo desempenhado um papel importante na retomada da economia brasileira, principalmente por ter proporcionado a geração de novas oportunidades de trabalho (IEMI, 2022).

Os dados gerais do setor, apresentados pela Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), estão listados no Quadro 2 e exibem a relevância econômica e social desse setor.

Quadro 2 – Dados gerais do setor (atualizado em janeiro de 2023)

Aspecto	Valores	Data
Faturamento	R\$ 190 bilhões	2020
Exportações (sem fibra de algodão)	US\$ 1,14 bilhão	2022
Importações (sem fibra de algodão)	US\$ 5,9 bilhões	2022
Investimentos	R\$ 4,9 Bilhões	2021
Produção da confecção	R\$ 8,1 bilhões de peças	2021
Trabalhadores	1,34 milhão de empregados formais. 60% mão de obra feminina.	2021

Fonte: ABIT (2022).

A indústria têxtil brasileira é bem diversificada e é considerada a maior cadeia têxtil completa do Ocidente. Isso em virtude de ser a única que apresenta uma produção verticalizada, que vai desde a produção das fibras, nas plantações de algodão, até o produto acabado, passando pelas fiações, tecelagem, beneficiadores e confecções. Mundialmente, o Brasil tem sido referência em *design* de moda praia, *jeanswear*, *homewear* e com crescimento também nos segmentos *fitness* e *lingerie* (ABIT, 2022).

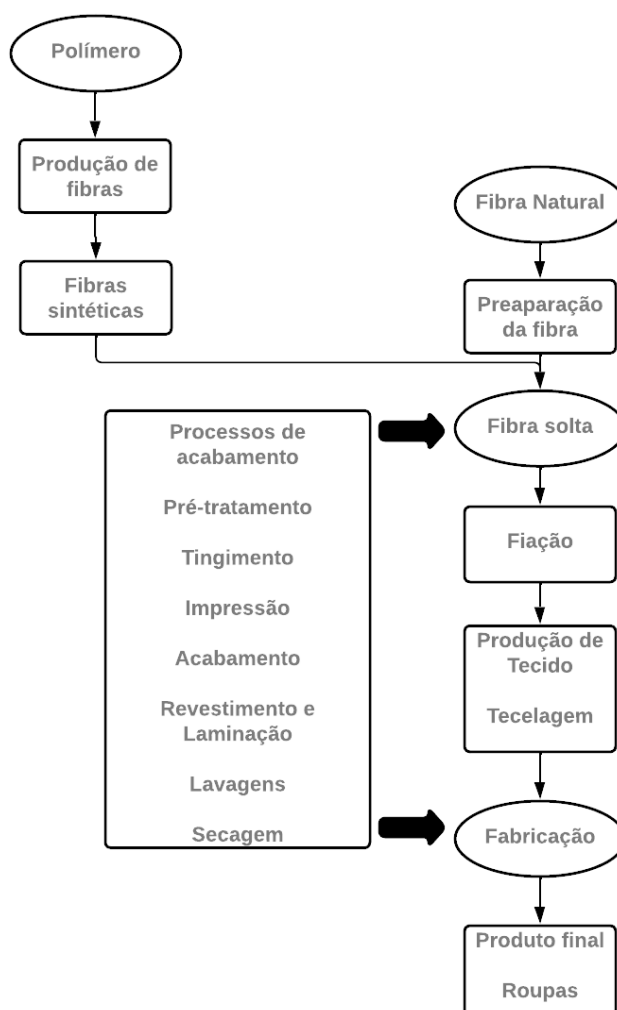
Dentre esses segmentos, a categoria *jeanswear* é destaque no nosso país e está entre as mais modernas e competitivas do planeta, com potencial ilimitado de expansão. O aumento significativo na indústria da moda no mundo e a rápida urbanização são dois dos principais fatores que impulsionaram seu crescimento ao longo dos anos. Além disso, a mudança no estilo de vida do consumidor e uma alta significativa na taxa de participação feminina na força de trabalho também contribuíram para o aumento da demanda de produtos (PERIYASAMY; PERIYASAMI, 2023). O mercado brasileiro, que acompanha o ritmo mundial, apresenta um ótimo progresso nesse campo devido aos seus produtos de qualidade e estilo. Estima-se que existam quase 6 mil indústrias e mais de 100 mil empregados alocados na produção dessa linha de produtos. No ano de 2020, mesmo com os impactos da pandemia, esse segmento, sozinho, movimentou quase 22 bilhões de reais (IEMI, 2021).

Criado em meados do século XVI, o *Jeans* se tornou um símbolo de estilo que marcou e continua a marcar gerações. Ele é produzido de um tecido de sarja de algodão altamente durável, conhecido como denim. Sugere-se que as primeiras calças desse material foram produzidas em Nîmes, cidade da França. Nos anos 90, com a popularização na América, essa peça se transformou. Além da calça, o denim foi pensado em outros *designs* e, assim, diversos modelos foram desenvolvidos, como casacos, *shorts*, saias e jaquetas. Ao se olhar ao redor, sem dúvidas, várias pessoas podem ser vistas usando alguma peça confeccionada por esse material. Na atualidade, o Brasil perde apenas para a China como maior produtor de denim, revelando a importância desse item para a economia nacional (FEBRATEX GROUP, 2022; MUTHU, 2017; PERIYASAMY; PERIYASAMI, 2023).

Para a confecção do *Jeans*, sucintamente, as fibras são processadas de maneira natural ou sintética, avançando para processos de fiação, tecelagem, tingimento e acabamento para se transformar em tecido. Esse tecido, o denim, é encaminhado para a confecção e posteriormente para processos de lavagens, que acontecem nas chamadas lavanderias. A função das lavagens é melhorar as qualidades visuais e de toque do tecido, bem como adicionar características específicas e únicas que irão atrair os consumidores com peças diversificadas (CHAIM, 2013; PAUL, 2015).

A cadeia produtiva básica desse item está esquematicamente representada na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma esquemático da cadeia produtiva básica do Jeans



Fonte: Elaborada pela autora com dados extraídos de Valh *et al.* (2011).

Com o tecido pronto, os processos seguintes correspondem à fase de beneficiamento, que envolve as etapas de confecção e lavagem. Tais estágios visam melhorar as características físico-químicas dos substratos têxteis, nesse caso do *Jeans*, para que ele se transforme em uma peça atrativa e comercializável (CHAIM, 2013).

A confecção abrange processos de corte, montagem e costura. Atualmente, com a tecnologia, os procedimentos de corte foram automatizados. Já a montagem e a costura ainda são realizadas com total dependência do trabalho humano, o que demanda organização e alto controle de qualidade (ABNT; SEBRAE, 2012; PAUL, 2015). Após costuradas, as peças em tecido cru chegam às lavanderias e ganham efeitos diferenciados por meio de distintas etapas de acabamento, como desengomagem, mercerização, amaciamento, tingimento, envelhecimento, alveamento químico, estonagem, desgastes, dentre outros. A lavanderia é primordial para um diferencial no *Jeans* e é parte final do processo produtivo desse item (CHAIM, 2013; MUTHU, 2017).

3.2.2 As lavanderias de Jeans

As lavanderias de *Jeans* nasceram no início dos anos 80 com a ascensão da produção do denim. O objetivo inicial era conferir às peças um aspecto desejado e um toque de maciez focando apenas no conforto. Com o transcorrer do tempo, técnicas diferenciadas de lavagens foram criadas para vislumbrar novos valores estéticos. As lavanderias passaram a ter papel primordial na fabricação de *Jeans* por proporcionarem a criação de modelos diversos, ditando moda, seguindo tendências e atraindo cada vez mais os consumidores (OLIVEIRA, 2008; WERDESHEIM, 2022).

Após a confecção, as peças fabricadas em formatos variados estão em tecido denim cru e exibem uma aparência grosseira e pouco atrativa, como é possível observar na Figura 10a. Como forma de melhorar esse tecido e de ampliar a variedade de peças produzidas, são introduzidas técnicas de beneficiamento úmido. Estas ocorrem nas lavanderias de *Jeans*, que podem estar no mesmo local da confecção, em local separado ou ainda serem terceirizadas pelas empresas fabricantes dessas peças.

Os tecidos já prontos chegam às lavanderias e em seguida são melhorados, descoloridos, envelhecidos, desfiados, marcados e rasgados, originando variados efeitos nas peças (como exemplificado na Figura 10b). Tais processos não são padronizados e variam a depender do objetivo requerido para as peças fabricadas (ABNT; SEBRAE, 2012; ARJUN *et al.*, 2013).

Figura 10 – Peça em Denim cru versus peça após as etapas de lavagens: (a) peça que sai da confecção e chega às lavanderias; (b) peça que sai da lavanderia e chega ao consumidor



Fonte: Adaptado de Azevedo (2017).

As etapas de beneficiamento envolvidas nas lavanderias são totalmente dependentes de água e podem ser divididas em processos físicos e químicos. O primeiro é realizado no tecido ainda cru e está relacionado a trabalhos manuais, muitas vezes de abrasão, ou já automatizados com o uso de *laser*. O segundo refere-se a processos que aderem maior visual à peça, combinando preparação do tecido com uso de tensoativos (detergentes, umectantes, desengomantes, dispersantes, antimigrantes), dissolução da cor, destruição do corante, abrasão mecânica, lavagem com ácido, peróxido de hidrogênio ou permanganato de potássio, desbotamento por enzima e ozônio, técnicas de pulverização, tingimento, dentre outros. Tudo isso proporciona aspectos únicos nas peças, que variam entre *vintage*, despojado e até mesmo aparência de sujo e manchado (PAUL, 2015; WERDESHEIM, 2022).

Uma das lavagens mais conhecidas e que confere às peças efeitos de envelhecimento e desbotamento é a lavagem feita com a aplicação do permanganato de potássio, um agente oxidante. Ao entrar em contato com a peça, o permanganato corrói a cor do índigo causando um efeito esbranquiçado. A aplicação de permanganato também é feita para dar um efeito de clareamento em partes específicas da peça. Nesse caso, essa substância é aplicada com uma pistola de ar comprimido, processo conhecido como *Used*. Outro agente também muito utilizado é o hipoclorito de sódio que, assim como o permanganato, necessita de uma neutralização no final do processo (LUIZ, 2019; WERDESHEIM, 2022).

Outros tipos de lavagens muito aplicadas são o *Stone Washed*, *Super Stone* ou *Destroyed*, em que são realizados desgastes na peça com o uso de pedras-pomes colocadas dentro das lavadoras. Nesse caso, produtos químicos podem ser inseridos com essas pedras para que se reduza o tempo de máquina e, assim, o custo do processo (PAUL, 2015). Efeitos chamados de bigodes podem ser feitos na lixa, no *laser* ou na prensa para dar o efeito 3D nas peças. Efeitos detonados podem ser feitos em vários tamanhos e em qualquer lugar do tecido. Em síntese, os processos de beneficiamento do denim são inúmeros e com variadas possibilidades (LUIZ, 2019). Na Figura 11 estão demonstrados alguns efeitos das técnicas de lavagens e seus nomes.

Figura 11 – Lavagens de Jeans



Fonte: Werdesheim (2022, p.17).

Práticas mais sustentáveis de produção têm sido propagadas a fim de intensificar a melhorias dos processos na indústria da moda. A preocupação dos consumidores com o meio ambiente e os recursos naturais estão em ascensão e começa a ser um diferencial nos negócios. Presume-se que o mercado têxtil seja impulsionado nos próximos anos pela introdução de processos e produção de *Jeans* mais sustentáveis (PERIYASAMY; PERIYASAMI, 2023).

Os investimentos em novas tecnologias para processos de beneficiamento estão cada vez mais extensos. O desenvolvimento sustentável reflete em uma forte tendência de inovação. A introdução de uma produção sustentável pode reduzir o consumo de recursos, a geração de resíduos e os custos de produção nas fábricas têxteis. Ao mesmo tempo, que os impactos na saúde e no meio ambiente e na comunidade do entorno são reduzidos com o uso de tecnologias proporcionando a economia de água e produtos químicos (MACÊDO, 2016)

Dentre as inovações sustentáveis na lavanderia de jeans estão a adoção de beneficiamento a laser e lavagem com uso de ozônio. O processo a laser no Jeans é feito com o feixe de luz condensado dirigido à superfície do tecido ainda engomado e seco. A luz queima a camada superficial de corante índigo substituindo efeitos que eram adquiridos por meio de beneficiamentos físicos, como bigodes, detonados e químicos (*Used* ou *destroyed*). Além disso, com esta tecnologia fica possível a impressão de variadas estampas. Uma peça com reprodução a laser reduz custos com volume de água, energia e produtos químicos. (MACÊDO, 2016).

O ozônio é um gás altamente instável e um poderoso oxidante. Na indústria de beneficiamento têxtil, o seu uso tem sido atestado como uma técnica eficaz para redução de tempo de processo de lavagens e consequentemente água, energia e substituição de produtos químicos. O contato do gás com o denim proporciona uma reação química com o índigo presente na superfície da peça, o que possibilita efeitos de clareamento, envelhecimento, alveamento e amaciamento. Seu uso pode substituir algumas etapas convencionais para remoção da cor e impurezas como, estonagem e desengomagem. Cada tipo de processo dependerá do tipo de operação utilizada, podendo variar a potência e o tempo de exposição com o gás (MACÊDO, 2016; PERIYASAMY; PERIYASAMI, 2023; SEBRAE; SENAI, 2015).

Essa diversidade de métodos de lavagens no processamento do *Jeans* fornece diferentes entradas de insumos e uma grande saída de resíduos. Muitas consequências ao meio ambiente estão envolvidas nesses processos, sendo as mais alarmantes a quantidade de água despendida e consequentemente descartada, além da carga química que esta carrega. Algumas dessas etapas sozinhas chegam a consumir, por exemplo, mais de 200 litros de água para o beneficiamento de 400 kg de *Jeans* (SILVA; XAVIER; SOBRAL, 2022). Dentre os efluentes industriais, estes têm sido considerados os que representam maior impacto poluidor (COUTO, 2016; PERIYASAMY; PERIYASAMI, 2023).

Em regra, de acordo com as legislações pertinentes, os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água depois do seu devido tratamento e desde que obedeçam às condições, exigências e padrões dispostos nas normas aplicáveis (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2005).

Atualmente, a principal legislação que trata dos padrões de despejo de efluentes é a Resolução n. 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Essa norma, que complementa e altera a Resolução n. 357/2005 do CONAMA, relaciona o bem-estar de todo o ecossistema envolvido com os padrões de lançamento de efluentes, definindo que

esses resíduos não podem modificar a qualidade do corpo receptor, isso porque, a depender da severidade da alteração, pode acarretar desequilíbrio ecológico (CONAMA, 2011).

Quanto ao lançamento de resíduos líquidos provenientes da indústria têxtil, ainda não é possível encontrar qualquer legislação específica. De acordo com o citado na Resolução n. 430/2011 do CONAMA, na ausência de padrões estabelecidos, devem-se assumir os disponíveis para a classe em que os corpos receptores estiverem enquadrados, impedindo assim que descartes com colorações extremas sejam realizados. Normalmente, os principais parâmetros avaliados para efluentes industriais são: vazão de corrente efluente, DBO, DQO, sólidos em suspensão, pH e temperatura (VON SPRELING, 2011). O Quadro 3 destaca as condições de lançamentos de efluente de qualquer fonte poluidora previstas na Resolução n. 430/2011 do CONAMA.

Quadro 3 – Condições de lançamento de efluente para qualquer fonte poluidora

Parâmetros	Condições
pH	Entre 5 e 9
Temperatura	Inferior a 40°C
Materiais sedimentáveis	Até 1 mL L ⁻¹
Materiais flutuantes	Vazão de até 1,5 vezes a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente.
DBO	Remoção mínima de 60% de DBO, sendo que esse limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.
Cor	75 mg Pt - CoL ⁻¹

Fonte: Adaptado de CONAMA (2011).

Destaca-se que, devido ao tamanho territorial do país, é comum a autonomia e competência dos estados para delimitarem seus próprios padrões de lançamentos. Entretanto, fica determinado que qualquer novo padrão estadual estabelecido não deve ultrapassar os valores estipulados pela Resolução n. 430/2011 do CONAMA, devendo sempre ser iguais ou ainda mais rigorosos (CONAMA, 2011).

No âmbito estadual, o governo de Minas Gerais estabeleceu por meio da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n. 1, de 05 de maio de 2008, condições e padrões

de lançamentos de efluentes. Especificamente, para o lançamento de efluentes têxteis, o limite máximo de despejo padrão para o parâmetro DQO deve ser de 250 mgL^{-1} .

No ano de 2022 houve uma atualização da legislação com a criação da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n. 8, de 21 de novembro de 2022, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Basicamente essa normativa une requisitos importantes da Resolução n. 430/2011 do CONAMA com os da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n. 1, de 05 de maio de 2008, somadas algumas providências estaduais.

Ainda sobre o âmbito estadual, desde agosto de 2009, Minas Gerais passou a exigir outorga para lançamento de efluentes em corpos de água por meio da Deliberação Normativa n. 26 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais (CERH-MG). Esta estabelece critérios técnicos a serem observados no exame de pedidos de outorga para o lançamento de efluentes em corpos de água superficiais. Os critérios avaliados são a capacidade de diluição do curso de água, os tipos de substâncias presentes nos efluentes, bem como a meta de qualidade pactuada para o corpo de água em questão de acordo com o programa de enquadramento do curso de água em classes (MINAS GERAIS, 2008).

3.2.3 Efluentes gerados nas lavanderias de jeans e tratamentos aplicados

Os efluentes originários da produção de *Jeans* apresentam uma coloração azul bastante forte (Figura 12) advinda do uso de corantes. O índigo é capaz de emitir resíduos orgânicos de difícil degradação, como anilina e N-metil anilina. Já os corantes diretos e os indiretos, que também são utilizados na lavanderia, podem conter metais tóxicos como cromo, cobre e zinco (MUTHU, 2017).

Figura 12 – Efluente gerado pelos processos de lavagens de Jeans

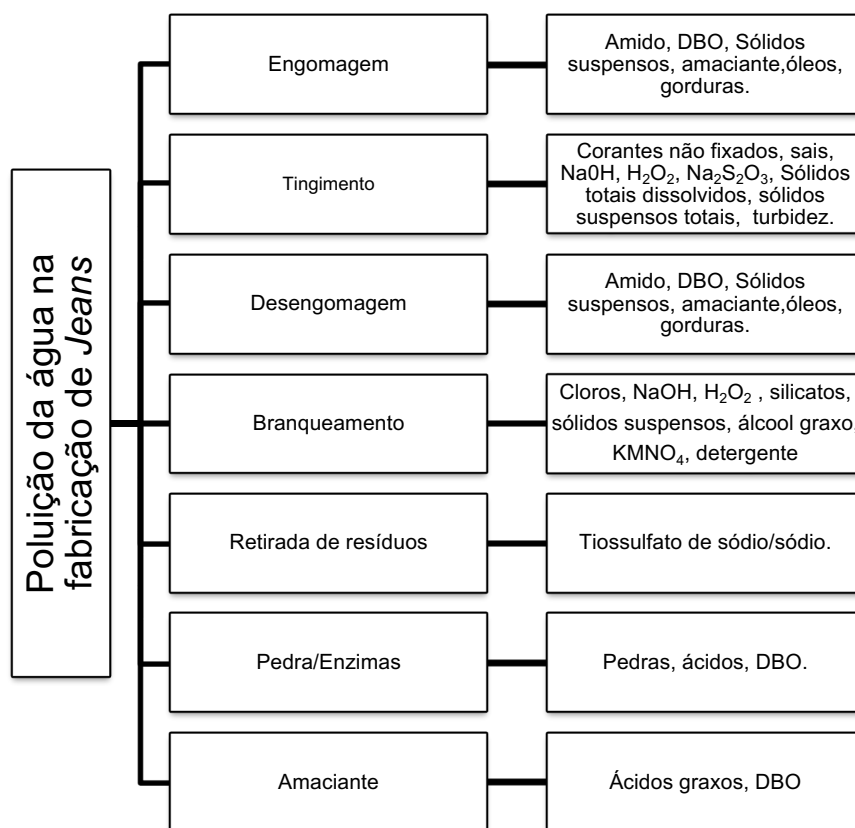


Fonte: Fotografia da autora (2022).

Durante as etapas de tingimento e acabamento, até 200 mil toneladas de corante têxtil são despejadas em efluentes industriais todos os anos em todo o mundo (CHEQUER *et al.*, 2013). Tal fato é justificado pela ineficiência da etapa do processo de tingimento, que fica em torno de 85%. A redução de corantes azo por hidrossulfito de sódio e as sucessivas etapas de cloração com ácido hipocloroso podem formar derivados de 2-fenil-benzotriazóis (PBTA) e aminas aromáticas, substâncias caracterizadas por serem altamente mutagênicas (UMBUZEIRO *et al.*, 2005).

Da mesma forma que ocorre com os corantes, certos produtos químicos utilizados nas etapas de lavagens também não são totalmente consumidos e compõem o efluente do *Jeans*. Devido a essa complexidade e quantidade de químicos utilizados no beneficiamento desses produtos, não existe uma descrição exata sobre a composição dessas águas residuárias. O que se sabe é que a lista pode incluir variados compostos tóxicos, como sais, metais e seus complexos, ânions, formaldeído, compostos orgânicos persistentes, biocidas, surfactantes, organoclorados, emulsificantes e dispersantes (BEN *et al.*, 2011; MUTHU, 2017). A Figura 13 apresenta um esquema sumarizado das etapas do processamento do denim e os prováveis agentes poluidores que podem ser gerados. (PERIYASAMY; PERIYASAMI, 2023).

Figura 13 – Poluição da água e suas características em algumas etapas de beneficiamento do Jeans



Fonte: Adaptado de Periyasamy e Periyasami (2023, p. 4474).

Os efluentes da Lavanderia são heterogêneos e caracterizados por flutuações extremas em muitos parâmetros. Na grande maioria apresentam um alto valor de pH, alta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), assim como altas concentrações de sólidos totais dissolvidos, sólidos suspensos, cloretos, sulfatos e fenóis (CHEQUER *et al.*, 2013; MUTHU, 2017; PERIYASAMY; PERIYASAMI, 2023). Eles são classificados como não biodegradáveis devido à origem sintética e à complexidade dos compostos presentes, com destaque para aqueles que possuem estrutura aromática e de elevada estabilidade (CHEQUER *et al.*, 2013). A descarga direta de tais águas residuais sem tratamento adequado podem trazer problemas críticos que afetam os segmentos bióticos e abióticos do meio ambiente (BERA; GODHANIYA; KOTHARI, 2021).

A liberação direta de corantes coloridos no ambiente afeta desfavoravelmente a vida aquática, a transparência da água doce, a alteração do sabor da água potável e o teor de oxigênio dissolvido. Corantes de baixa solubilidade, como o índigo, são considerados mais propensos a apresentarem eco toxicidade em meio aquático, já que possuem mais chance de serem

absorvidos por organismos e entrarem para a cadeia alimentar sendo ingeridos diretamente (ZANONI; YAMANAKA, 2016).

Estudos indicam que, quando misturados à água doce, a toxicidade desses compostos pode ser aumentada e causar doenças de pele, incluindo dermatite, danos ao fígado e problemas carcinogênicos nos rins (DADI *et al.*, 2017). A coloração proporcionada pelo uso de corantes é considerada a contaminação mais alarmante, pois ela afeta a função fotossintética e, consequentemente, as atividades aeróbicas dos organismos aquáticos, principalmente pela limitação da entrada de luz no corpo d'água (CHEQUER *et al.*, 2013). Os dados sobre impactos causados por essas substâncias na fauna e flora e em corpos d'água ainda são considerados incompletos (TKACZYK; MITROWSKA; POSYNIAK, 2020).

A indústria do *Jeans* está se expandindo em um ritmo rápido como resultado de vários fatores, incluindo a urbanização, a ocidentalização dos estilos de vida, o aumento da consciência da moda e o aumento do desejo por uma aparência mais casual (PERIYASAMY; PERIYASAMI, 2023). Um estudo conduzido pela *Boston Consulting Group* chamado *Pulse of the Fashion Industry*, de 2019, mostra que até 2030 o consumo de água na indústria da moda pode crescer de maneira expressiva, aproximadamente 50%, impulsionado pelo atual padrão de consumo *fast fashion*. Esse fato torna-se então preocupante devido ao impacto negativo que a fabricação desses produtos tem causado.

A degradação da qualidade da água e seus progressivos impactos ambientais e socioeconômicos trouxeram alerta mundial. Atualmente, a projeção é que ocorra um aumento expressivo na sua escassez e que seja cada vez mais comum a existência de comunidades vivendo em locais de elevado estresse e baixa segurança hídrica. Quase dois terços da população mundial está sujeita à escassez hídrica, o que pode gerar cerca de 700 milhões de refugiados até 2030 (UNICEF, 2021).

A crise de água, além de colocar em perigo os seres humanos, impõe dificuldades ao desenvolvimento, aumenta a tendência a doenças de veiculação hídrica, produz estresses econômicos e sociais e traz desigualdades entre regiões e países (TUNDISI; MATSUMURO, 2011). Dessa forma, a preservação desse recurso abiótico é fundamental para a construção de um ambiente saudável e habitável. Como forma de atender às conformidades exigidas na lei e minimizar os problemas relacionados aos efluentes, as indústrias devem realizar o tratamento de seus resíduos líquidos visando alcançar uma qualidade desejada para descarte.

Nas lavanderias de *Jeans*, habitualmente tem se identificado como predominante o uso de processos biológicos aeróbicos, com lodo ativado, para o tratamento dos efluentes coloridos por serem simples e de baixo custo operacional (MUTHU, 2017).

Os métodos biológicos apresentam melhoria na turbidez e remoção de carga orgânica biodegradável, mas baixa eficiência na remoção de cor devido à estabilidade química e resistência ao ataque microbiológico dos corantes (GOSAVI; SHARMA, 2013). Estudos mostram ainda que esses tratamentos apresentam uma baixa eficiência para a remoção de sais que estão presentes nesses efluentes em decorrência, muitas vezes, do seu pH alcalino. Constatase que essas águas residuárias não são adequadas para tratamento biológico, em virtude da complexidade em termos de composição química (BUSCIO *et al.*, 2015; MUTHU, 2017).

Além disso, os processos biológicos, como o lodo ativado, não são eficazes para a degradação de corantes azo. A maior parte da descoloração deve-se apenas pela adsorção do corante no lodo aeróbico (RAMOS *et al.*, 2020). Outro aspecto relacionado é que microrganismos podem ser inibidos por alguns poluentes contidos nessas águas residuárias, sendo necessário implantar uma aeração artificial e, em alguns casos, até suplementação por nitrogênio e fósforo devido à falta de nutrientes nos efluentes têxteis (RAMOS *et al.*, 2020, 2021)

Um problema decorrente desses tratamentos é a produção de lodo, que requer tratamento posterior. Esses resíduos sólidos podem ser perigosos e devem ser separados, compactados, secos e dispostos em aterro industrial ou ainda incinerados (HOLKAR *et al.*, 2016). A Figura 14 apresenta os resíduos sólidos gerados em uma lavanderia de jeans utilizando a coagulação-floculação. Além disso, esses métodos demandam uma alta dosagem de coagulantes, aumentando assim os custos de tratamento e sendo considerados pouco sustentáveis (VERMA; DASH; BHUNIA, 2012).

Figura 14 – Lodo do tratamento de efluentes de *Jeans*



Fonte: Fotografia da autora (2021).

Quando se trata do reúso nas lavanderias de *jeans*, estudos indicam que o uso de processos biológicos aeróbicos, como o lodo ativado, não tem sido alternativa eficiente para a reutilização desta água residuária. Silva e Xavier (2020) analisaram a implementação de reúso em lavanderias de *jeans* do agreste Pernambucano. A principal forma de tratamento escolhido foram os métodos físico-químico e biológicos. Os autores salientam que o sistema empregado para a reciclagem da água apesar de ser eficiente no que se propõe, se encontra ultrapassado, visto que apenas transfere a matéria poluente contida nos efluentes de um local para outro. Sendo necessário buscar novas tecnologias avançadas. Junior (2022) em seu estudo também avaliou o reúso realizado nas lavanderias de *jeans* no agreste Pernambucano. As tecnologias aplicadas podem apresentar uma economia de até R\$65.200 mensal, considerando a reutilização de 80% da água. No entanto, devido o método empregado, que consiste na separação de partes sólidas e líquidas através da adição de coagulantes não permite que toda água seja reutilizada já que estes tratamentos não permitem tratar a água de maneira eficiente.

Na era atual de tratamento de efluentes, os processos de separação baseados em membranas desempenham um papel significativo na redução de poluentes e na geração de água limpa e reutilizável. Na literatura, essa tecnologia tem sido considerada o método mais adequado para garantir a qualidade necessária para que os efluentes tratados sejam reutilizados em aplicações industriais (DASGUPTA *et al.*, 2015; KAVITHA *et al.*, 2022; TANG; CHEN, 2002).

A tecnologia de membranas se apresenta como uma técnica eficaz e atraente para superar as deficiências dos processos convencionais de tratamento de águas residuais, especialmente para tratar efluentes compostos de poluentes orgânicos, recalcitrantes e tóxicos (KAMALI *et al.*, 2019). Para efluentes têxteis, estudos realizados demonstraram bom desempenho no uso de PSM. As membranas permitem alta remoção de parâmetros como cor, demanda química de oxigênio (DQO) e íons, bem como boa qualidade em outros parâmetros de qualidade, importantes para a possibilidade de reúso do permeado.

3.2.4 Processos de separação por membranas em efluentes industriais

As técnicas por membranas têm sido dominantes para lidar com os problemas globais de escassez de água (GOH; ISMAIL, 2018). A eficiência dessas tecnologias tem sido relatada em vários estudos, e o seu uso tem sido incentivado principalmente pela ascensão de processos mais sustentáveis, visto que a membrana é considerada uma tecnologia limpa e ambientalmente amigável (DAS; GEBRU, 2019; KHOUNI *et al.*, 2011; SATHYA *et al.*, 2022).

A facilidade de projeto em operações em larga escala, aplicação em condições de temperatura moderada sem mudança de fase física e química, baixo ou nenhum subproduto residual e o uso insignificante de aditivos são os principais cernes dos PSM e possibilitaram a crescente aceitação de sua aplicação para o tratamento de água e efluentes (DAS; GEBRU, 2019). KAPOOR *et al.* (2021) mostrou ainda que os méritos inerentes das tecnologias de membrana, como compacidade operacional, modularidade e adaptabilidade a diferentes operações, tornaram-nas adequados para substituir ou complementar as operações unitárias convencionais.

Outras vantagens abordadas, em relação aos métodos convencionais, é que estes usos industriais podem ocasionar a liberação de odores desagradáveis, provocando desconforto para o ambiente local e para a população vizinha. A literatura tem mostrado boa capacidade dos PSM para mitigar os compostos odoríferos dos efluentes industriais. Um estudo mostrou que uma combinação de NF e carvão ativado em pó é uma maneira muito eficaz de controlar o odor dos efluentes tratados (BRUCHET; LAINE, 2005). As membranas podem ser projetadas com muita flexibilidade e *design* compacto. Assim, podem trazer baixos impactos visuais (KAMALI *et al.*, 2019).

A viabilidade econômica dos variados métodos de tratamento por membranas existentes ainda não foi amplamente investigada. Contudo, sabe-se que um dos principais gargalos encontrados nesses processos é o custo com o gasto energético (KAMALI *et al.*, 2019).

Estudo que avaliou os custos operacionais de uma planta de biorreator de membrana em grande escala identificou que o consumo de eletricidade é responsável por 51,6% do custo do ciclo de vida (CHEN *et al.*, 2019). Entretanto, a possibilidade de redução de área construída necessária para a implantação dos PSM pode ser um atrativo e possibilidade para diminuir custos de capital. Além disto, o reciclo oferecido por esses processos podem compensar alguns custos pela economia expressa em termos de consumo de água, reaproveitamento de sais e corantes recuperados (DASGUPTA *et al.*, 2015; TANG; CHEN, 2002).

Moreira *et al.* (2021) comparou os custos operacionais de processos convencionais de tratamento de água (pré-oxidação, coagulação/floculação, filtros de areia) com a integração de processos de UF. O baixo custo do sistema de membrana sugeriu baixo impacto sobre os custos operacionais das instalações já existentes, tendo possibilitado uma melhoria expressiva na qualidade do tratado, o que é positivo.

A limpeza da membrana é outra fonte principal de custos operacionais. A integração da limpeza mecânica com tecnologias de membrana pode abrir uma nova oportunidade para o desenvolvimento de tecnologias de membrana para tratamento de efluentes, minimizando os custos operacionais associados às necessidades frequentes de limpeza, permitindo altos fluxos (ASLAM *et al.*, 2017; KAMALI *et al.*, 2019).

A implantação dos PSM em conjunto aos processos convencionais tem sido investigada. Entretanto, salienta-se que algumas características importantes devem ser abordadas para a combinação bem-sucedida de tecnologias de membrana com outros tratamentos físico-químicos ou biológicos. Destaca-se a necessidade de aplicação da etapa de pré-tratamento para aumentar a eficiência geral e prevenir a falha do sistema, que pode ser causada por possíveis incrustações da membrana (DASGUPTA *et al.*, 2015; KAMALI *et al.*, 2019).

Biorreatores a membrana, compostos por processos de filtração e métodos de tratamento biológico têm sido aplicados com sucesso para o tratamento de efluentes industriais considerados de alta resistência. Uma das principais vantagens de tais combinações é a eliminação da necessidade de grandes bacias de clarificação exigidas em alguns métodos de tratamento biológico, como os processos convencionais de lodo ativado (KAMALI *et al.*, 2019). MUTAMIN *et al.* (2012) revisou o desempenho desses biorreatores para o tratamento de efluentes de indústrias têxteis e alimentícias mostrou que essas são excelentes opções para o tratamento de efluentes industriais de alta resistência.

A maioria das membranas são fabricadas com materiais poliméricos, como fluoreto de polivinilideno (PVDF), polietersulfona, poliacrilonitrila, polietileno (PE) e polipropileno (PP)

(GRAND VIEW RESEARCH, 2021). Kang e Cao (2014) avaliou a aplicação das membranas de (PVDF) e mostrou que estas têm sido extensivamente aplicadas em pesquisas científicas e processos industriais devido às suas excelentes propriedades, como alta estabilidade térmica e boa resistência química.

3.2.4.1 Membranas de ultrafiltração e nanofiltração aplicadas a efluentes têxteis

As membranas de NF e UF, têm sido amplamente conhecidas pelo seu desempenho no tratamento de águas residuais e por produzirem água de alta qualidade (DASGUPTA *et al.*, 2014). As vantagens encontradas nesses processos são a qualidade do efluente final homogênea, boas remoções de DQO e ótima eficiência para remoção de cor. Além disso, essas tecnologias atendem as necessidades de reutilização de água em termos de parâmetros orgânicos e patógenos, ocupam menos espaço, dispensam a circulação de lodo, apresentam facilidade de automação e permitem eficiência mesmo com as variações da qualidade do efluente de entrada no sistema (RESENDE, 2012).

A NF tem sido amplamente utilizada em tratamento de água e esgoto, bem como para a recuperação de várias substâncias, incluindo corantes, como cristal violeta, vermelho congo, azul de metila, dentre outros (KAVITHA *et al.*, 2022). Além disso, o principal trabalho da NF é a remoção seletiva de íons e substâncias orgânicas. O processo de NF permite a permeação de íons monovalentes e pequenas moléculas devido às suas características únicas, como maior seletividade para íons divalentes/polivalentes. O seu uso é promissor para a reciclagem de água, reutilização e recuperação de outros produtos valiosos no tratamento de águas residuais industriais (RAHMAN *et al.*, 2023). A maioria dos estudos relacionados à aplicação da NF no tratamento de efluentes industriais relatou que a água tratada atendeu ao padrão de qualidade tanto para aplicação de reúso indireto quanto para o reúso no processo de fabricação. Contudo, faltam estudos mais abrangentes sobre a aplicação de água de reúso via NF conjugada com outro processo para a aplicação de reúso externo (RAHMAN *et al.*, 2023).

A NF tem sido investigada como eficiente para a recuperação de águas salinas. Chu *et al.* (2020) demonstraram o uso de membrana NF de poliétersulfona de fibra oca, que alcançou alta eficiência de fracionamento de misturas de corante/sal, chegando a 99,9% e 93%, respectivamente. Hosseini *et al.* (2016) revisou o desenvolvimento das tecnologias de membranas poliméricas para tratamento de efluentes de metalização e concluiu que as membranas podem trazer vantagens de alta eficiência de separação. Nesse estudo, os sistemas de osmose inversa mostraram eficiência de separação tipicamente superior a 90%

para lidar com poluentes metálicos como níquel, cromo e zinco. Dentre as membranas NF, aquelas compostas de filme fino de fibra oca apresentaram bom desempenho para o tratamento de metais pesados, principalmente Cr, Cu (II) e Ni (II). A combinação de tecnologias de membranas inorgânicas com outros métodos inovadores, como processos de oxidação avançados, pode ser uma opção para lidar com esses efluentes altamente poluídos (KAMALI *et al.*, 2019).

UF, assim como a NF, também tem sido estudada para a recuperação de corantes e no fracionamento de diferentes espécies de soluto, sendo possível o uso de membranas de diferentes tamanhos de poro. As principais características encontradas nestas membranas é a possibilidade de operações a baixa pressão, consumo de energia relativamente baixo e alta qualidade do filtrado com operações simples. As membranas de UF progrediram bastante e apresentam alto desempenho na sua aplicação para tratamento de águas residuais (SIAGIAN *et al.*, 2021). Com as melhorias proporcionadas, é possível encontrar membranas de UF altamente seletivas e resistentes a incrustações, apresentando desempenho notável em várias remoções de poluentes (MORADIHAMEDANI, 2022).

Dutta *et al.* (2020) demonstrou a eficiência na aplicação de efluentes têxteis de uma membrana de fibra oca de ultrafiltração a base de poliacrilonitrila hidrolisada, com baixa massa molecular (20 kDa). Neste estudo os experimentos foram conduzidos de maneira totalmente reciclada usando tanque de alimentação de 1L. Antes de cada conjunto experimental, água destilada foi usada para lavar o módulo de membrana por cerca de uma hora e a permeabilidade da membrana foi medida. A permeabilidade da membrana foi restaurada dentro de $\pm 15\%$ da original. Os resultados encontrados indicaram uma redução de 35 a 47% e 91 a 99,2% no valor de sólidos totais e DQO, respectivamente, além de 80 a 86% recuperação de sal.

Alardhi *et al.* (2020) investigou o comportamento de uma membrana de ultrafiltração (UF) de fibra oca de cloreto de polivinila para remoção de corante verde de metila. Neste estudo os resultados obtidos evidenciaram a influência da concentração de alimentação e da taxa de fluxo na rejeição e no fluxo permeado. Curic *et al.* (2021) analisou um processo híbrido de membrana para o tratamento de efluentes têxteis reais e seu potencial de reutilização no processo de tingimento de tecido de malha de algodão. A membrana de 5 kDa forneceu ótima qualidade de permeado de acordo com remoção de demanda química de oxigênio, turbidez, sólidos totais, condutividade e cor em 54,5%, 83,9%, 94,2% e 45,7-83,3%, respectivamente. Após a UF utilizou-se a nanofiltração e osmose inversa e esses efluentes foram reutilizados para tingimento.

A NF e a UF podem ser utilizadas de forma integrada. O objetivo do processo integrado é alcançar um melhor desempenho em comparação a qualquer um dos processos individuais, com destaque para a diminuição de incrustações (RAHMAN *et al.*, 2023). Ranganathan *et al.* (2007) indicou o potencial dos processos de UF e NF para produzir água reutilizável pelo tratamento de águas residuais têxteis provenientes de tinturarias primárias ou cubas auxiliares de enxágue. Os autores afirmaram que os efluentes tratados foram geralmente caracterizados por baixa dureza, o que foi adequado para a reutilização em instalações têxteis. Em outro estudo, Kaykiouglu *et al.*, 2017, avaliaram a reutilização de águas residuais tratadas biologicamente da indústria de lavagem e tingimento de *Jeans* em membranas de UF e NF. Amostras de água permeada foram utilizadas na etapa de tingimento de tecido cru à base de algodão 100%. De acordo com os resultados, a água permeada não teve impacto negativo na qualidade do tingimento. O estudo mostrou ainda que a filtração por membrana apresentou bom desempenho para efluentes têxteis já tratados biologicamente.

Na literatura, também é possível encontrar estudos com uso de membranas cerâmicas para a recuperação e reutilização de águas residuais quentes. Um exemplo foi o estudo conduzido por Agtas *et al.* (2020) que utilizaram um sistema de membrana de UF/NF de cerâmica em escala piloto. Nos primeiros dez ciclos foram utilizadas membranas de UF e NF, e nos últimos quatro ciclos apenas membrana de NF. De acordo com os resultados, para os ciclos UF e NF, as eficiências médias de remoção foram 89%, 83,5%, 86,4% e 68% para demanda química de oxigênio, cor, carbono orgânico total e dureza, respectivamente. Para os ciclos apenas com a NF, as eficiências de remoção média geral foram 90,1%, 82,2%, 76,8% e 82% para demanda química de oxigênio, cor, carbono orgânico total e dureza total, respectivamente. O efluente tratado foi testado e pode ser reutilizado para processos de tingimento (AGTAS *et al.*, 2020).

Muitos estudos podem ser encontrados em relação ao uso dos PSM em efluentes têxteis, sendo sua aplicabilidade bastante vasta. Khouni *et al.* (2011) examinaram a eficiência de descoloração de efluentes têxteis, contendo corantes reativos e utilizando diferentes processos (coagulação/floculação, catálise enzimática por uma lacase comercial e NF). O estudo indicou o processo de NF como o mais eficiente na remoção de cor de efluentes têxteis, podendo o permeado obtido ser reaproveitado no processo de tingimento na indústria têxtil. Outro estudo avaliou quatro diferentes membranas de UF produzidas de PVDF para o tratamento de efluentes com índigo. As membranas estudadas alcançaram até 99% de remoção de cor e 80% de redução da demanda química de oxigênio. Os concentrados contendo 20 gL⁻¹ de corante índigo foram reutilizados em novos processos de tingimento. E os tecidos tingidos com os concentrados de índigo recuperados apresentaram características

semelhantes aos obtidos com o corante comercial (BUSCIO *et al.*, 2015). Ainda, Nawaz *et al.* (2022) aplicaram uma nova membrana híbrida de polianilina e PVDF para remover corantes de efluentes têxteis e obtiveram 85% de eficiência. No Quadro 4 estão sumarizadas outras pesquisas que relacionaram os PSM e efluentes têxteis.

Quadro 4 – Literatura sobre PSM e sua aplicação em efluentes têxteis

Processo	Tipo de efluente	Especificação da membrana	Remoção e observação	Referência
Ultrafiltração	Efluente têxtil	Tannin e polietérsulfona	100% sólidos suspensos, 96,46% DQO, 97,04% cor, 97,41% turbidez, 89,94% de sólidos dissolvidos.	Johari <i>et al.</i> (2022)
Híbrida	Efluente têxtil com laranja de metila e vermelho allura	PVDF e polianilina	Laranja metila = 81% Vermelho allura = 85	Nawaz <i>et al.</i> (2022)
Ultrafiltração	Rejeição de corante têxtil	Polissulfona	90% de remoção de cor, 74,5% remoção de sólidos totais. Observada remoção de contaminantes Naftol. Possibilidade de reutilização da água abaixo consumo energético.	Aryanti <i>et al.</i> , (2022)
Ultrafiltração	Efluente têxtil	Polipropileno, PVDF e poliétersulfona	A membrana de PVDF apresentou maior remoção de turbidez. A membrana de poliétersulfona maior remoção de DQO.	Alibeigi-Beni <i>et al.</i> (2021)
Ultrafiltração	Efluente têxtil com vermelho direto 23	Poliamida	99% de remoção de corante	Yang <i>et al.</i> (2020)
Ultrafiltração	Amostra vermelho congo	PVDF e Níquel	100% remoção vermelho congo	Yu <i>et al.</i> (2019)
Nanofiltração	Efluente têxtil com vermelho congo, azul metila e amarelo crepúsculo	Poliamida	Vermelho congo = 99,6% Azul metila = 99,8% Amarelo crepúsculo = 97,6%	Liu <i>et al.</i> (2019)
Homogeneização e decantação e Ultrafiltração	Efluente têxtil real não especificado	Fibra oca de PVDF	Redução de 66% na DQO, 30% na cor e foi possível o reaproveitamento do permeado em 50%.	Buscio <i>et al.</i> (2015)
Microfiltração	Solução de índigo	Membrana cerâmica preparada com resíduo de granito	100% do índigo	Lima <i>et al.</i> (2014)
Ultrafiltração e nanofiltração	Unidades de tratamento, impressão e enxague, produção de fibras naturais e sintéticas	UF: polietersulfona NF: poliamida	A ultrafiltração permitiu a redução em 75% na DQO, 90% de cor. Já a nanofiltração os resultados indicaram 90% de remoção da DQO e cor	Aouni <i>et al.</i> (2012)
Ultrafiltração	Unidades de tratamento, impressão e enxague da produção de fios	Membrana cerâmica em formato tubular	Remoção em 85% da DQO, 88,5% na cor, 96% em turbidez e 91% dos sólidos suspensos	Barredo-Damas <i>et al.</i> (2012)

Ultrafiltração e nanofiltração	Efluentes brutos de uma indústria de acabamento têxtil	PES em espiral	Alta remoção de cor, DQO e turbidez, 71% de rejeição de sais, 54% de redução de condutividade	Miranda <i>et al.</i> (2009)
Ultrafiltração e Nanofiltração	Efluente têxtil não especificado	UF: cerâmica tubular NF: folha plana poliamida	A ultrafiltração como pré-tratamento para o processo NF melhorou a eficiência do tratamento de efluentes têxteis, aumentando o tempo de execução da membrana	Fersi e Dhahbi (2008)
Ultrafiltração e Osmose Inversa	Etapas de tingimento	UF: fibra oca em poliacrilonitrila OI: espiral em poliamida	A ultrafiltração promoveu a remoção total dos sólidos suspensos e 85% da DQO e 83% da cor. Já a osmose obteve eficiência de 100% na remoção da cor, sólidos suspensos e DQO	Nandy <i>et al.</i> (2007)

Fonte: Elaborado pela autora

3.2.5 Reúso industrial e parâmetros de qualidade para lavanderias de jeans

A crescente demanda por água para abastecer a população e assegurar o desenvolvimento de todas as atividades econômicas constitui, na atualidade, um desafio. A degradação da qualidade da água e seus progressivos impactos ambientais e socioeconômicos trouxeram alerta mundial. Atualmente, a projeção é que ocorra um aumento expressivo na sua escassez e que seja cada vez mais comum a existência de comunidades vivendo em locais de elevado estresse e baixa segurança hídrica. Quase dois terços da população está sujeita à escassez hídrica, o que pode gerar cerca de 700 milhões de refugiados até 2030 (UNICEF, 2021). Nesse cenário, realizar a gestão sustentável dos recursos hídricos torna-se urgente a fim de permitir o acesso a água em quantidade e qualidade suficientes para o atendimento das necessidades humanas, para a prática das atividades econômicas e para a conservação dos ecossistemas aquáticos (ANA, 2019).

As indústrias são atividades hidroativas. No Brasil, estimativas indicam que a indústria de transformação representa o terceiro setor com maior consumo de recursos hídricos, atrás do abastecimento e da agricultura irrigada. Assim como consomem grandes volumes de água estas atividades produzem igualmente altos volumes de efluentes líquidos (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2017). Calcula-se que, no mundo, 80% das águas residuais produzidas sejam despejadas na natureza sem tratamento adequado, causando a degradação de mananciais, favorecendo a difusão de doenças e colocando em risco a oferta de água doce. Tal dado demonstra que essas águas ainda são um recurso inexplorado e que diversificar as fontes de fornecimento pode auxiliar e contribuir na busca da segurança hídrica (ANA, 2019; ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015). As águas residuais, quando devidamente tratadas, podem ser reutilizadas, gerando economia de custos e diminuindo a dependência das indústrias. O uso de água de reúso nas indústrias é alternativa eficiente para (CNI, 2020):

- a) Garantir abastecimento de água nas indústrias mesmo durante crises hídricas;
- b) Trazer maior competitividade e/ou redução de custos relativos à obtenção de água;
- c) Obter benefícios econômicos relativos ao reaproveitamento dos próprios efluentes gerados pelas indústrias;
- d) Reutilizar o efluente tratado para fins não potáveis na indústria, tal como lavagens, refrigeração e produção de vapor;
- e) Conservar os recursos hídricos e garantir a sustentabilidade dos empreendimentos, especialmente em áreas onde há escassez;

- f) Atender aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, em especial: 6 (Água e saneamento para todos), 9 (Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação) e 12 (Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis).

Conceitualmente, reúso pode ser definido como volume de água reutilizado no processo após ter sido submetido a algum tipo de tratamento (CNI, 2017). O mercado de reúso de água ainda precisa ser desenvolvido, pois apenas menos de 4% do total de águas residuais em todo o mundo foram tratados com a finalidade de reúso na atualidade (YANG *et al.*, 2020). No Brasil, os efluentes finais lançados pela grande maioria das estações de tratamentos convencionais nem mesmo estão alcançando as condições e os padrões de qualidade de descarte das águas estabelecidos na Resolução n. 357/2005 do CONAMA (CNI, 2020). Um estudo feito pela Agência Nacional de Águas (ANA), em 2017, revelou que das 2.657 estações de tratamento de esgoto (ETEs) convencionais analisadas, 269 utilizaram processos com remoção DBO inferior a 60%; 1.428 operaram com remoção de DBO a 60% e 80%; 839 garantiram remoção de DBO superior a 80% e apenas 131 operaram com remoção da DBO acima de 80% e removeram elementos como nitrogênio e fosforo. Tais dados são extremamente preocupantes, já que, ao descartadas, essas águas podem comprometer os corpos receptores, bem como restringir a utilização dos efluentes das plantas para o reúso.

Devido ao momento de escassez observado em várias regiões e as cobranças ambientais e as imposições do comércio nacional e internacional, o reúso industrial e de processos produtivos mais sustentáveis estão em ascensão no Brasil, e padrões mais rígidos com o meio ambiente têm sido almejados. Espera-se um aumento nas cobranças e legislações ambientais para os próximos anos. Em 2022, foi publicado o novo Plano Nacional de Recursos Hídricos, que impôs atualizações importantes sobre o uso da água. Um tema muito destacado pelo plano refere-se ao reúso como alternativa essencial para os estudos de aproveitamento de recursos hídricos e caminho para a segurança hídrica no Brasil.

O Novo Marco Legal do Saneamento, sancionado em julho de 2020 por meio da Lei n. 14.026/20, também traz progressos importantes e visa cobrar ações mais concentradas para a universalização dos serviços de água e esgoto até 2033. Dentre as exigências, cita as normas de referência para a redução progressiva e controle da perda de água, sistema separador absoluto de tratamento de efluentes e o reúso dos efluentes sanitários tratados. Além disso, já existe em andamento na Câmara dos Deputados o Projeto de Lei n. 2451/20, que propõe tornar obrigatório o reúso da água de tratamento de líquidos do processo industrial.

Como forma de acompanhar essa tendência, o estado de Minas Gerais, também em 2020, publicou a Deliberação Normativa n. 65, que regulamenta o reúso direto de água não potável proveniente de ETEs de sistemas públicos e privados. A Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG), para estimular práticas sustentáveis, disponibiliza uma ficha técnica chamada “Gestão das águas nas indústrias”, que traz pontos relevantes sobre a prática do reúso industrial. O documento define reúso de águas como uma prática em que a água que foi utilizada em alguma atividade é reutilizada ou reaproveitada em outras, após receber tratamento adequado ou não. Para que isso ocorra, o conhecimento do consumo em cada etapa do processo e as especificações da qualidade para cada aplicação é considerado essencial. No caso dos processos industriais, atenção especial deve ser dada à qualidade dessas águas, aos seus potenciais efeitos na saúde dos usuários e das instalações, bem como os possíveis efeitos nocivos aos processos produtivos, como alterações de solubilidade de reagentes nas etapas de processamento e alterações das características físicas e químicas dos produtos (FIEMG, 2022).

O estado do Ceará foi precursor na regulação do reúso de água para vários fins, inclusive os industriais, com a aprovação da Lei 16.033/2016. Iniciativas desse tipo podem ser reproduzidas em outros estados ou por meio de uma Resolução CONAMA, de forma a facilitar o reúso. Desta lei, aplicasse que o reúso de água não potável, depende previamente da caracterização do efluente a ser tratado, identificação das atividades que admitem reúso e identificação da qualidade de água requerida para cada atividade descrita (BRASIL, 2016).

A qualidade da água é definida em função de características físicas, químicas, microbiológicas e radioativas. Para cada tipo de aplicação, o grau de qualidade exigido pode variar significativamente. Na prática, o reúso só pode ser adotado caso as características do efluente disponível sejam compatíveis com os requisitos de qualidade exigidos para uma determinada aplicação. Portanto, inicialmente, deve-se conhecer a fundo o processo produtivo para a caracterização da qualidade da água necessária. Além disso, a identificação das possíveis aplicações para o efluente pode ser feita por meio da comparação entre parâmetros genéricos de qualidade, exigidos pela aplicação na qual se pretende fazer o reuso, assim como os parâmetros do próprio efluente (CNI, 2017).

Os processos produtivos em sua maioria fazem uso da água potável, que vem da concessionária. Entretanto, o que se sabe é que existem processos cuja qualidade da água é de menor exigência que a distribuída no abastecimento público (CNI, 2022). Para o reúso industrial é necessário assegurar que não haverá riscos de contaminação ao trabalhador.

Além disso, os padrões de qualidade devem atender às necessidades da produção industrial (MOURA *et al.*, 2020).

No caso da indústria têxtil, como analisado ao longo deste trabalho, uma variedade de processos está envolvida. Dessa forma, a qualidade da água requerida para o uso têxtil varia de acordo com a sua aplicação. Ou seja, para cada processo, possivelmente haverá exigências de distintos parâmetros a serem atendidos. Estudos indicam que a cor, pH, turbidez e DQO são os parâmetros mais relevantes a serem avaliados (RAMOS *et al.*, 2021). Um estudo analisou o reúso em uma lavanderia industrial, situada no município de Cianorte, no Paraná. Dos 70 m³h⁻¹ de efluentes tratados nessa lavanderia, cerca de 50% dos efluentes tratados eram reutilizados. Os principais parâmetros médios monitorados pela lavanderia foram: pH (8,19), cor (26,73), DQO (28,67 mgL⁻¹) e DBO (10 mgL⁻¹). O estudo não especificou com qual finalidade era realizado o reúso, entretanto os autores ponderaram que, não era adequado que o efluente em questão fosse aplicado nas lavagens de roupas, mas reutilizado na lavagem de pisos e outras instalações da lavanderia (PORTO; SCHOENHALS, 2013).

Fernandes (2010) avaliou o reúso de água no processamento de *Jeans* elencou como variáveis de controle de qualidade de águas passíveis de reúso os seguintes parâmetros: pH, cor, turbidez e sólidos sedimentáveis. Segundo o estudo, outros parâmetros puderam ser suprimidos, visto que aqueles se mostraram satisfatórios para o controle de qualidade dos efluentes para disposição final e reúso na Lavanderia. Outras questões relevantes foram a interferência da água do reúso nos processos de lavagem do *Jeans*. Segundo o autor, etapas de enxague e limpeza, que fazem uso apenas detergente, são consideradas menos complexas para reutilização de água. Processos que utilizam oxidantes devem considerar a matéria orgânica, visto que ela pode afetar a uniformidade da etapa. Processos que usam enzimas, desengomagens e estonagem são etapas sensíveis, pois trabalham intensamente com as fibras. A etapa de tingimento, é uma das que mais exigem qualidade da água, etapas de acabamento, sobretingimentos ou redução de cor que permitem maior flexibilidade. Por fim, ficou constatado que, quando controlado o reúso do efluente tratado, não houve qualquer impacto negativo à qualidade das peças produzidas (FERNANDES, 2010).

É importante avaliar parâmetros como a salinidade nas lavanderias têxteis (RESENDE, 2012). O sal pode causar problema no banho de tingimento e mudar a tonalidade. Outros elementos que devem ser observados são o ferro, para evitar desgaste do tecido durante o alvejamento, e os compostos de enxofre, que causam odor. Conforme mostra a Tabela 1, a CNI (2017)

enumerou indicativos para o grau de qualidade da água requerido no beneficiamento têxtil (CNI, 2017).

Tabela 1 – Requisitos de qualidade da água para uso na indústria têxtil

Processo	Cor* mg-Pt- CoL⁻¹	Dureza*	Ferro*	Manganês *	pH*	Sólidos totais*	Sólidos suspensos *
Branqueamento	5	25	0,1	0,01	2,0-10,5	100	5
Engomagem	5	25	0,3	0,05	6,5-10,0	100	5
Lavagem	5	25	0,1	0,01	3,0-10,5	100	5
Tingimento	5	25	0,1	0,01	3,5-10,0	100	5

*Unidade - mgL⁻¹

Fonte: CNI (2017).

Freitas (2002) também caracterizou a água utilizada no beneficiamento têxtil de uma indústria têxtil de grande porte. As principais características físico-químicas analisadas estão destacadas na Tabela 2. Conforme CNI (2017) as aplicações de água de reuso na indústria são como fluido de resfriamento ou aquecimento, matéria-prima em processos industriais, uso como fluido auxiliar tais como preparação de suspensões e soluções químicas, compostos intermediários, reagentes químicos, veículos ou, ainda, para operações de lavagem. Uso para geração de energia, como descarga em vasos sanitários e mictórios e na construção civil, cabines de pintura, combate a incêndio, rega de áreas verdes ou incorporação em diversos subprodutos gerados nos processos industriais.

Tabela 2 – Caracterização água industrial

Parâmetro	Valores
pH	6,95
Temperatura	22,8 °C
Alcalinidade	50 mgL ⁻¹
Sólidos Totais	54,95 mgL ⁻¹
Sólidos Suspenso	Ausência
Turbidez	0,63 NTU
Cor	4,80 mg-Pt-CoL ⁻¹
Ferro	0,07 mgL ⁻¹
DQO	0,70 mgL ⁻¹

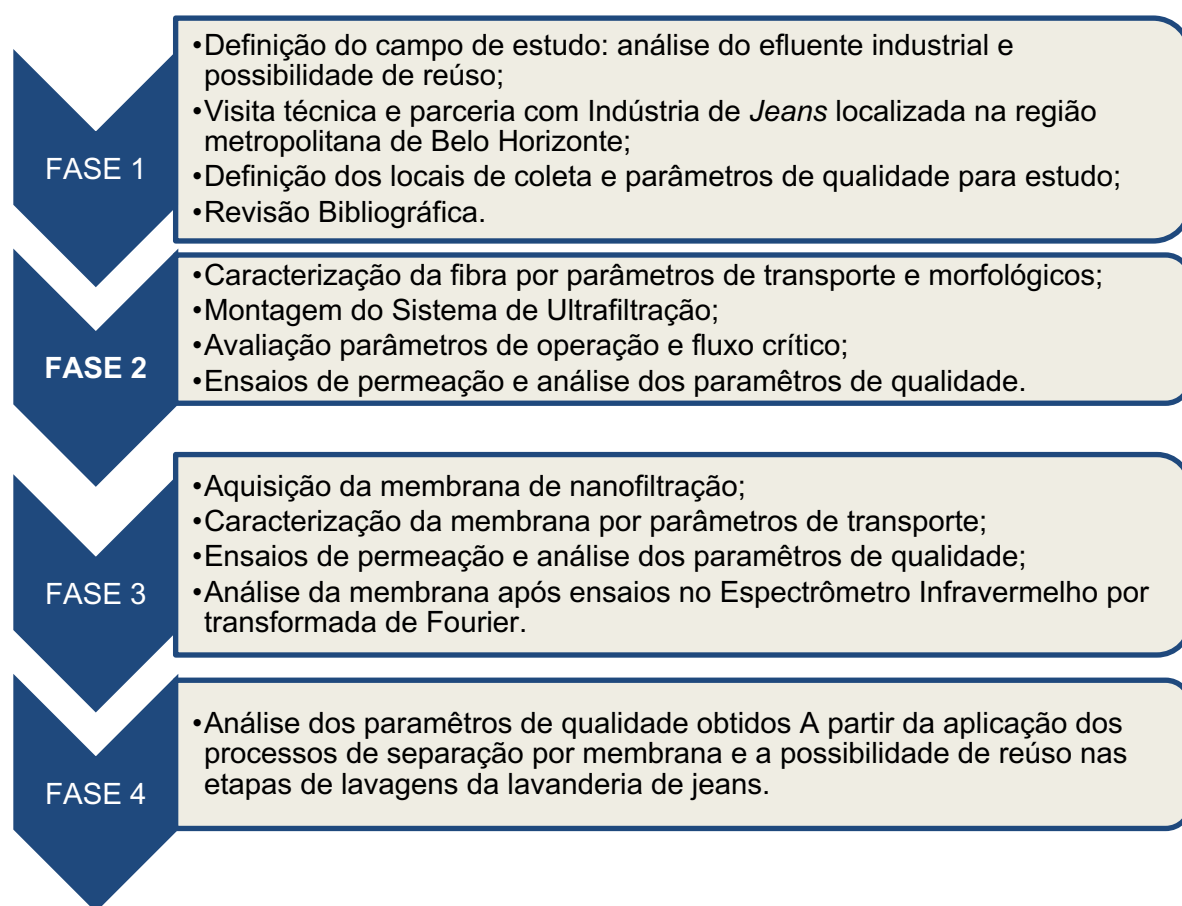
Fonte: Freitas (2002).

Visando também contribuir com parâmetros de qualidade de reúso em indústrias têxteis este estudo explorou a aplicação de processos de separação por membranas em efluentes provenientes de uma lavanderia de *jeans*. Para isso foi investigada a aplicação de uma membrana de PVDF (fluoreto de polivinilideno) de ultrafiltração recém-fabricada e de tecnologia brasileira. Além disso, para melhorar a qualidade do permeado obtido pela ultrafiltração e ampliar os campos de aplicação da água de reúso investigou-se a integração deste processo com uma membrana nanofiltração de poliamida, já comercializável.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos utilizados para recuperação da água de lavanderia de jeans e os instrumentos e técnicas empregadas para o desenvolvimento das etapas experimentais. As etapas foram divididas em quatro fases conforme apresentada na Figura 15. O efluente real foi coletado de modo a atender a cada uma das fases do estudo.

Figura 15 – Roteiro de atividades



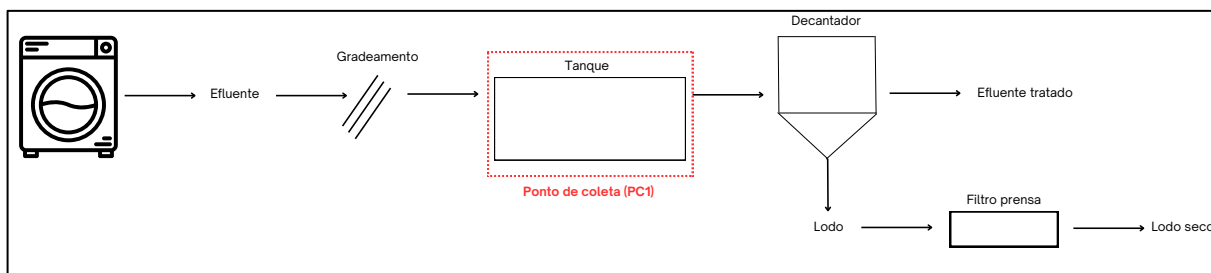
Fonte: Elaborado pela autora.

4.1 Coleta e Caracterização do Efluente de Lavanderia de Jeans

Para o desenvolvimento do projeto, o efluente de lavanderia de jeans foi coletado de uma Indústria de *Jeans*, de grande porte, localizada na região metropolitana de Belo Horizonte – Minas Gerais. Ao longo do período de desenvolvimento do projeto, a indústria passou por modificações em seu processo de lavanderia de modo a torná-lo mais sustentável. Dessa forma, foi possível identificar dois cenários de estudos de onde foram coletadas as amostras.

O cenário 1 era constituído por processos convencionais de lavagens como desengomagem, mercerização, amaciamento, tingimento, envelhecimento, alvejamento químico, estonagem, desgastes, dentre outros. A estrutura utilizada para tratamento dos efluentes gerados na lavanderia de jeans antes de serem descartados era baseada na coagulação/floculação e precipitação (Figura 16).

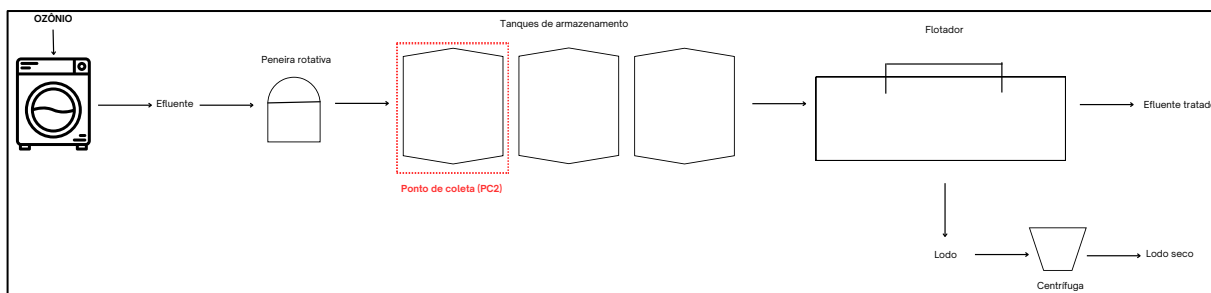
Figura 16 – Tratamento de efluentes Cenário 1



Fonte: Elaborado pela autora.

No Cenário 2, a Lavanderia passou por um processo de reestruturação em sua unidade visando a redução de quantidade de água utilizada. Nessa nova configuração foi inserida uma etapa de ozonização nas máquinas de lavagem visando uma melhoria no processo. A nova estrutura está representada na Figura 17.

Figura 17 – Tratamento de efluentes Cenário 2

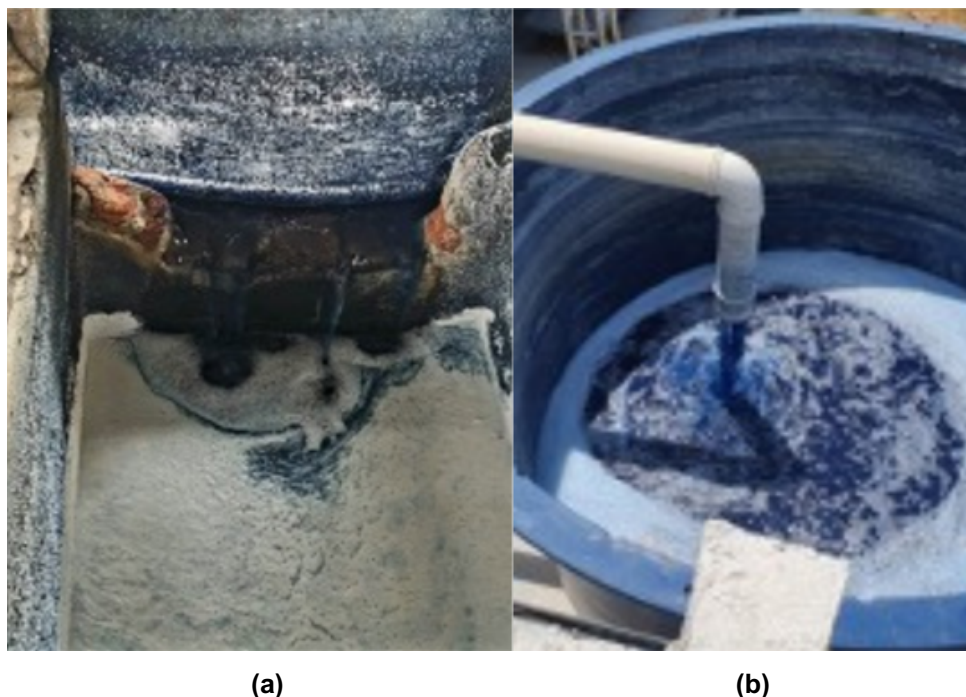


Fonte: Elaborado pela autora.

Os efluentes foram coletados em três pontos distintos. No cenário 1, o ponto de coleta (PC1) ocorreu no tanque de alvenaria após o gradeamento (Figura 16 e 18a) e no cenário 2, o ponto de coleta (PC2) se deu após a passagem do efluente pela peneira rotativa (Figura 17 e 18b).

Ainda, para o Cenário 2, foi realizada uma coleta do efluente diretamente após a saída da máquina de lavar (PC3). Neste caso, optou-se em retirar o efluente em lavagens específicas sem a presença de ozônio.

Figura 18 - Ponto de coleta dos efluentes para estudo. a) Ponto de coleta 1 (PC1) e Ponto de coleta 2 (PC3)



Fonte: Fotografia da autora (2022).

A vazão do efluente gerado diariamente nesta lavanderia é de aproximadamente $16 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Essas águas residuais apresentam uma coloração azul forte proveniente do corante índigo que estava presente nas fibras e foi descartado ao longo das lavagens, bem como outros produtos químicos auxiliares utilizados, cujas concentrações variam em função do modelo de jeans que foi produzido. Após a coleta as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Pesquisas 415, do CEFET-MG, Campus Nova Suíça para caracterização e permeação utilizando os processos de separação por membranas (PSM).

O efluente bruto e o permeado obtido nesse estudo foram caracterizados quanto aos principais parâmetros de lançamentos de efluente previstos na Resolução CONAMA nº430/2011 e na Resolução COPAM-CERH/ MG nº08/2022, em triplicata e com base no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017). Os parâmetros analisados foram pH, turbidez, DQO, série de sólidos (totais e dissolvidos), dureza, cloreto, cor e odor, conforme listado no Quadro 5. A análise de cor foi realizada para quantificar a concentração de corante índigo no efluente bruto e no permeado pela técnica de espectrofotometria na região do UV-visível, por meio da equação da reta obtida mediante o gráfico absorbância versus concentração que se encontra no Anexo 1.

Quadro 5 – *Standard Methods* aplicada as análises

Parâmetro	Metodologia
pH	2310B e 2320 B
Turbidez	2130B
DQO	5220B
Série de sólidos	2540B, 2540C, 2540D
Dureza	2340C
Cloreto	4500Cl-B
Cor	2120C
Odor	Avaliado de forma sensorial

Fonte: APHA (2017).

4.2 Membranas de Filtração

Para o desenvolvimento do projeto foram utilizadas membranas poliméricas de ultrafiltração (UF) e de nanofiltração (NF). As membranas de ultrafiltração foram fornecidas pela Vitaltec Engenharia, empresa localizada no Rio de Janeiro, que atua no desenvolvimento de membranas e em soluções para purificação de água e tratamento de efluentes. As membranas de ultrafiltração na conformação de fibra oca (Figura 19) eram constituídas de fluoreto de polivinilideno (PVDF). A membrana plana de nanofiltração (Figura 20) era constituída por um filme fino de poliamida (PA) e foi produzida pela Dupont FilmeTec Corporation, modelo NF90-2540.

Figura 19 – Membranas de ultrafiltração na conformação de fibra oca

Autor: Fotografia da autora (2022).

Figura 20 – Membrana plana de nanofiltração



Fonte: Fotografia da autora (2023).

As membranas de ultrafiltração foram caracterizadas morfologicamente utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV), rejeição a solutos e determinação da permeabilidade hidráulica. As membranas de nanofiltração foram caracterizadas quanto a permeabilidade hidráulica e de acordo com o fabricante apresentam uma rejeição de 97% de uma solução salina de concentração de 2.000 de MgSO_4 .

As membranas de fibra oca foram caracterizadas quanto à morfologia através de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV. As análises foram realizadas no Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais utilizando Microscópio de Varredura, feixe duplo, eletrônico e iônico – FEI Quanta 3D FEG. A amostra foi preparada cuidadosamente seguindo metodologia indicada por Habert *et al.* (2006) e Mulder (1996). Inicialmente as amostras de membranas foram imersas em nitrogênio líquido para evitar qualquer deformação da sua seção transversal durante a fratura da membrana. Em seguida a amostra de membrana foi recoberta com uma fina camada de ouro como forma de evitar a alteração das características das amostras devido à alta voltagem do feixe de elétrons (MULDER, 1996).

A membrana de UF também foi submetida a ensaios de rejeição ao soluto. Em membranas assimétricas a retenção é expressa como uma função do seu diâmetro equivalente ao poro de tamanho máximo, enquanto nas membranas assimétricas essa retenção é expressa como uma razão nominal que se refere a um diâmetro de corte, definido como o valor da massa molecular (MCWO). O coeficiente de retenção (R) é calculado pela Equação 3, onde cf é a

concentração de soluto na alimentação e c_p é a concentração de soluto no permeado (MULDER, 1996).

$$R = 1 - \frac{c_p}{c_f} \quad \text{Equação 3}$$

O diâmetro de corte da membrana de ultrafiltração foi analisado utilizando duas proteínas de massa molecular nominal padrão: a Tripsina com 23,8 kDa e a Albumina Bovina (BSA) com 66 kDa. Foram preparadas soluções a uma concentração de 500 ppm para as duas proteínas. A solução foi levada ao sistema de permeação em circuito fechado a uma pressão de operação inicial de 0,5 bar. A cada intervalo de 10 minutos de operação a pressão foi variada em 1,0, 1,5 e 2,0 bar e para cada valor de pressão foi coletada uma alíquota de permeado para determinação da concentração de BSA ou tripsina no permeado. A quantificação da concentração de proteínas tanto da alimentação quanto do permeado foram realizadas pela Espectrofotometria na região do UV – visível, na faixa de comprimento de onda de 280 nm, por meio da equação da reta obtida mediante o gráfico absorbância versus concentração que se encontra no Anexo 1. Em seguida, o coeficiente de retenção foi determinado e a partir desse coeficiente foi definido o diâmetro de corte da membrana.

Anterior ao teste para determinação da permeabilidade hidráulica, as membranas foram submetidas a compactação a pressão constante de operação de 2,0 bar por um intervalo de 1,0 hora ou até observar valores constantes de fluxo permeado. A compactação da membrana permite observar a acomodação mecânica dos macros poros evitando que esse fenômeno interfira nos efeitos da redução do fluxo permeado.

Em substâncias puras, a taxa de permeação da membrana é proporcional á força motriz (Equação 1). Desta forma, a permeabilidade hidráulica é usualmente encontrada por relação gráfica e corresponde ao coeficiente angular da reta obtida pela regressão linear dos dados de fluxo permeado em função da pressão aplicada (MULDER, 1996).

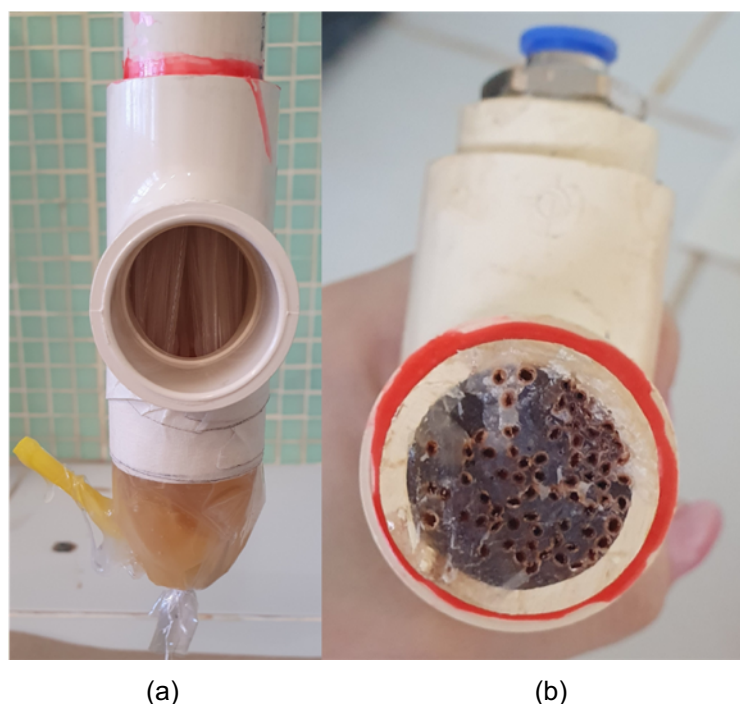
Para o módulo confeccionado este parâmetro foi determinado por meio do monitoramento do fluxo de permeado estabilizado em pressões pré-estabelecidas em 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 bar, utilizando água destilada como alimentação. O fluxo permeado de água pura apresenta uma dependência linear com a pressão empregada e o coeficiente angular da reta obtida é utilizado para a determinação da permeabilidade hidráulica da membrana. Os valores obtidos para o fluxo permeado expressos em $\text{Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$, foram representados graficamente.

Para a nanofiltração a permeabilidade hidráulica foi determinada conforme calculado para a membrana de ultrafiltração. Salienta-se que devido as condições operacionais do sistema de nanofiltração, o fluxo permeado é determinado a partir da correção da temperatura de operação conforme Equação 2.

4.3 Módulos e Sistema de Filtração

Para aplicação do processo de filtração usando membranas foram confeccionados módulos contendo membranas de ultrafiltração na conformação de fibras ocas de PVDF sob a configuração de um trocador de calor do tipo casco e tubo. As membranas foram acondicionadas no interior de tubos de PVC. E em seguida fixadas nas extremidades destes tubos utilizando resina epóxi Araldite Profissional (Brascola) (Figura 21).

Figura 21 – Confeção do módulo de fibra oca: a) fixação das fibras com cola no tubo PVC; b) vista das fibras (após corte das sobras de cola) no lado que corresponde a saída do permeado



Fonte: Fotografia da autora (2021).

Dois módulos de filtração, M-01 e M-02, foram confeccionados e utilizados para caracterização intrínseca da membrana (M-01) e para determinação das condições operacionais do sistema de permeação (M-02) avaliando as variáveis do processo, como pressão de operação através da membrana e da velocidade de escoamento da alimentação

sobre a superfície da fibra. A qualidade do permeado obtido foi determinada em função das variáveis operacionais.

Destaca-se que por serem construídos com a mesma batelada da fibra, as membranas presentes em cada módulo devem apresentar características semelhantes de separação. Os módulos foram examinados e comparados em relação a área, volume do módulo, densidade de empacotamento e velocidade de escoamento sobre a superfície da membrana. O escoamento interno aos módulos de permeação foi determinado a partir do cálculo do número de Reynolds. O cálculo é realizado utilizando a Equação 4, em que v é a velocidade média de escoamento do fluido, D diâmetro útil para escoamento do fluido no interno do tubo, μ viscosidade dinâmica, ρ massa específica do fluido (BRUNETTI, 2008).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{Equação 4}$$

O Quadro 6 apresenta as características dos módulos confeccionados para os ensaios de permeação de ultrafiltração.

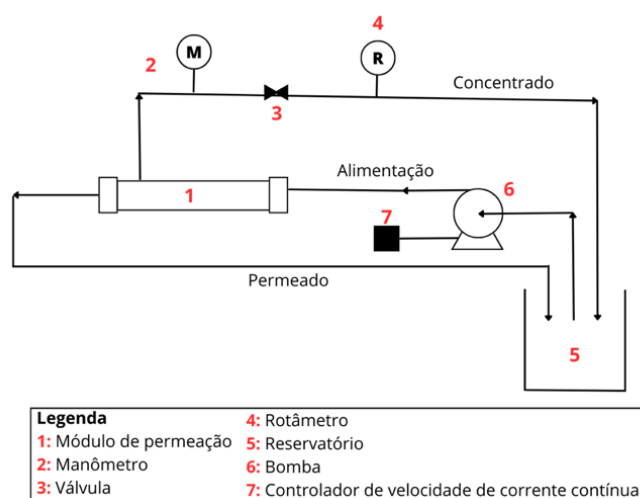
Quadro 6 – Características dos módulos de permeação

Estrutura		
Módulo	M-01	M-02
Nº de fibras	6	68
Área da membrana (m ²)	0,0056	0,085
Volume do módulo (m ³)	0,000034	0,000083
Densidade de empacotamento	164	1024
Reynolds	2.250	2.000
Testes realizados	Teste de rejeição ao soluto Determinação da permeabilidade hidráulica	Determinação da permeabilidade hidráulica. Determinação do fluxo crítico. Desempenho operacional do sistema de ultrafiltração

Fonte: Elaborado pela autora.

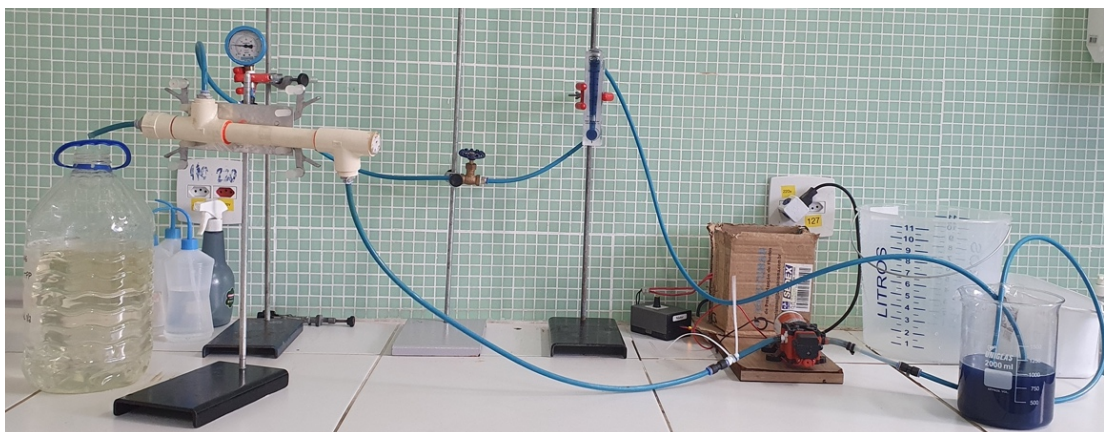
Para realização dos ensaios de ultrafiltração foi montado em escala laboratorial. O sistema de filtração era constituído pelo módulo de membrana, manômetro (Cofermeta e capacidade para 4kgfcm^{-2}) rotâmetro (Shunhuan SHILLJ:0,5 – 5 GPM), bomba de escoamento positivo (SEAFLO - open flow: 5,1 LPM/1.4 GPM – 100ps9/6,9bar) para recirculação da alimentação e válvula agulha $\frac{1}{2}$ " (DECA) para controle da pressão aplicada. A planta ilustrativa com os componentes deste sistema está representada na Figura 22 e o sistema real na Figura 23.

Figura 22 – Representação esquemática do sistema de ultrafiltração



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23 – Sistema de filtração para ensaios de ultrafiltração em escala de bancada



Fonte: Fotografia da autora (2023).

Os módulos de ultrafiltração foram submetidos a um procedimento de limpeza tanto para a retirada da glicerina utilizada para preservar a estrutura dos poros, quanto para remoção de sujidades após os ensaios de permeação. O procedimento de limpeza utilizava uma solução contendo de hipoclorito de sódio a uma concentração de $13,4\text{ gL}^{-1}$. A solução de limpeza era

bombeada para o sistema de permeação, a qual recirculava por cerca de 1 hora e em seguida era enxaguado com água destilada por cerca de 20 minutos, utilizando a mesma metodologia de Ornelas (2021).

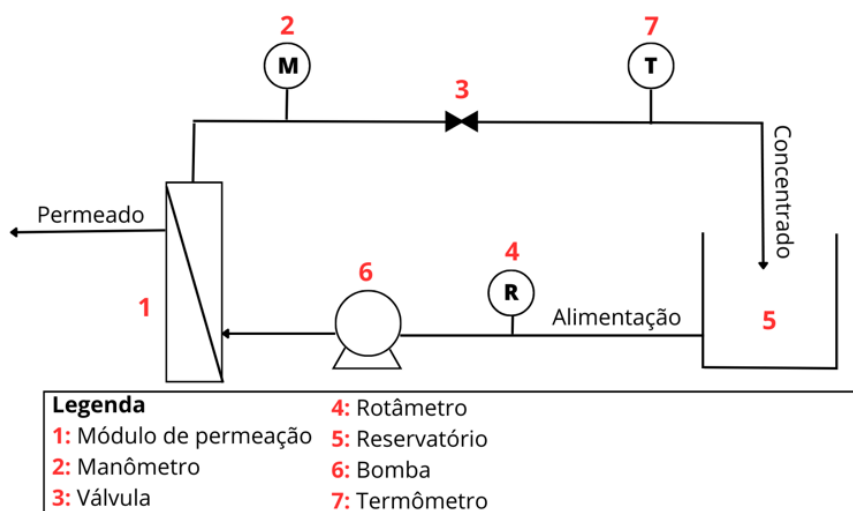
Os ensaios de permeação foram realizados em batelada para cada amostra coletada e com recirculação total da corrente do permeado e do concentrado para o tanque de alimentação. A condição de recirculação total é indicada quando se deseja determinar as condições operacionais do sistema e a caracterização da membrana. Já o escoamento foi projetado a funcionar de forma tangencial sobre a superfície da membrana de modo a evitar o acúmulo de material particulado retido pela superfície da membrana.

A pressão de operação para os ensaios de longa duração foram determinados a partir dos ensaios de fluxo crítico. As amostras de efluente de lavanderia de jeans oriundas dos pontos de coleta C1, C2 e C3 foram alimentadas no sistema de filtração e o método utilizado para determinar este parâmetro foi obtido a partir do levantamento do fluxo permeado versus pressão de operação por meio de análise gráfica (BACCHIN *et al.*, 2006; DRIOLI; GIORNO, 2016). Os experimentos de fluxo permeado versus pressão foram realizados impondo uma pressão e medindo um fluxo permeado. O fluxo permeado foi monitorado variando a pressão de operação em intervalos de 0,2 bar (0,2 a 2,0 bar). Inicialmente estabilizou-se a pressão a 0,2 bar e mediu-se o fluxo permeado por um período de 10 minutos. Após este tempo aumentou-se a pressão para 0,4 bar e mediu-se novamente o fluxo permeado. Repetiu-se o processo sempre aumentando a pressão de 0,2 bar até que fosse atingida a pressão de 2,0 bar.

O comportamento e eficiência do módulo confeccionado bem como a identificação de qualquer variabilidade do sistema frente ao efluente de lavanderia de jeans foi investigado realizando permeações das amostras dos cenários C1, C2 e C3 por um intervalo de tempo de 40 horas intermitentes (com pausas diárias). A pressão de operação do sistema e a velocidade de escoamento no interior do módulo foram mantidas constantes ao longo do funcionamento, sendo esses valores obtidos a partir da resposta dos ensaios de fluxo crítico. O fluxo permeado foi determinado em intervalos de tempo de 1,0 hora, visando determinar o fluxo médio permeado para cada cenário. Além da determinação dos parâmetros operacionais, também foram investigados os parâmetros de qualidade do permeado obtido conforme metodologia citada no Quadro 3, para os efluentes bruto (C1, C2 e C3) e para os permeados obtidos (C1, C2 e C3).

Os permeados produzidos no sistema de UF foram encaminhados para o sistema de NF. O sistema de nanofiltração utilizado foi cedido pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental do CEFET-MG. O sistema de nanofiltração é composto de um tanque de alimentação, rotâmetro para leitura da vazão de alimentação, bomba, válvula para ajuste da pressão, manômetro e medido de temperatura. A planta ilustrativa com os componentes deste sistema está representada na Figura 24 e o sistema real na Figura 25.

Figura 24 - Diagrama esquemático do sistema de filtração para ensaios de nanofiltração



Autor: Elaborado pela autora.

Figura 25 - Sistema de filtração para ensaios de nanofiltração; a) vista frontal onde encontra-se a monômetro, válvula, rotâmetro e controle de temperatura; b) vista lateral observado o controle de pressão e a bomba



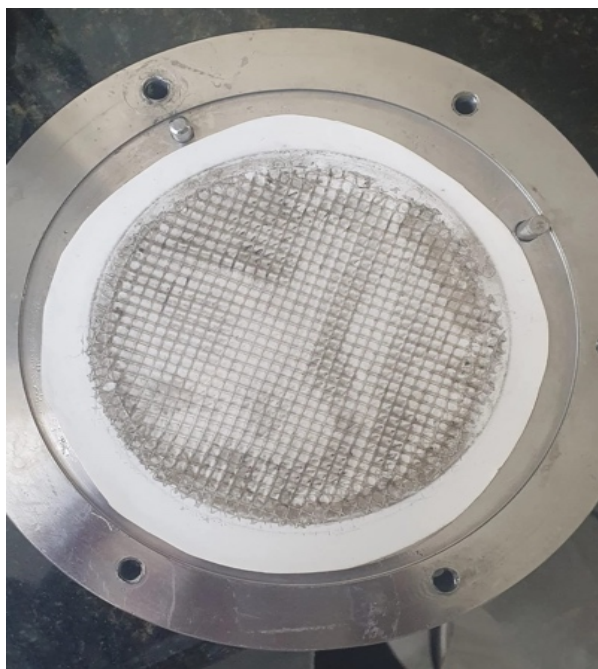
(a)

(b)

Fonte: Fotografia da autora (2023).

A membrana de nanofiltração foi inserida em um módulo de filtração, conforme Figura 26.

Figura 26 – Célula de nanofiltração



Fonte: Fotografia da autora (2023).

A etapa de nanofiltração ocorreu em circuito fechado com recirculação do concentrado e recuperação do permeado a uma taxa de 50% e 75%. O sistema operou com uma pressão de operação de 7,0 bar e vazão de $1,5 \text{ Lmin}^{-1}$, utilizando uma membrana plana com uma área de permeação de $1,13 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ (DUARTE, 2022). O permeado obtido da nanofiltração foi caracterizado conforme metodologia citada no Quadro 6.

Após os ensaios, sem qualquer limpeza prévia, a membrana de nanofiltração foi levada para análise no Espectrômetro Infravermelho por transformada de Fourier. As análises foram realizadas no laboratório TECMAT do CEFET-MG, Campus Gameleira, utilizando o equipamento modelo IR – Prestige 21 Shimadzu, que permite varredura nas faixas de 4000 a 500 cm^{-1} e resolução 1 cm^{-1} . O intuito foi investigar possíveis resíduos provenientes de incrustações presentes na superfície da membrana.

4.4 Análise do Desempenho dos Processos de Filtração para fins de Reúso

A eficiência dos sistemas de permeação utilizando a UF e a conjugação da UF e da NF, foi avaliada comparando os resultados dos parâmetros físico-químicos dos efluentes brutos com o dos permeados obtidos após processo de filtração conforme Quadro 3. Para a análise do

reúso os resultados dos parâmetros físico-químicos dos permeados obtidos foram comparados com dados de padrões da qualidade de água exigida para água na indústria têxtil e para lavanderia de *jeans* citados na literatura, bem como parâmetros de qualidade de água seguidos pela concessionária que abastece a lavanderia de *jeans* parceira.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

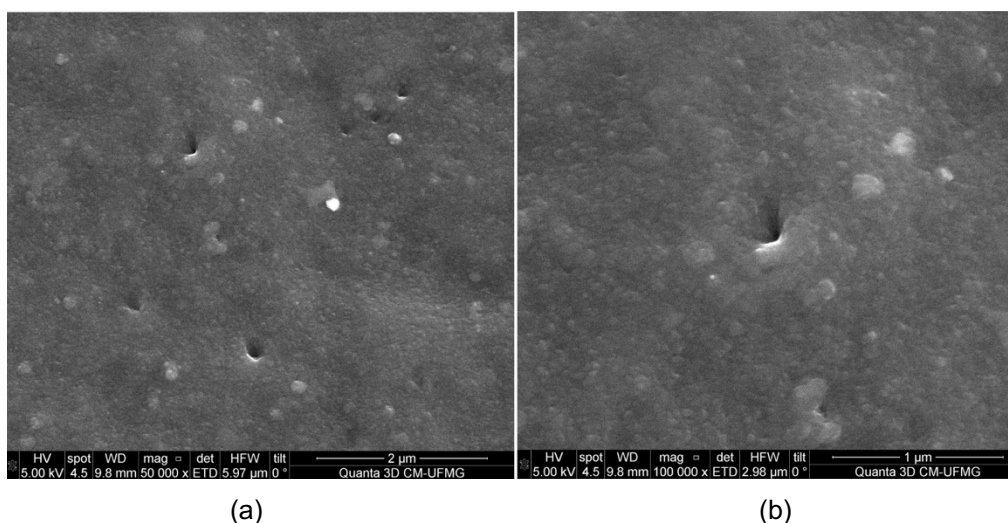
Nos tópicos a seguir serão discutidos os dados obtidos por meio dos experimentos realizados e analisados de forma qualitativa e quantitativa e sua comparação com os dados da literatura. A análise dos resultados obtidos é fator determinante para validar os objetivos propostos neste estudo.

5.1 Caracterização das Membranas de Filtração

As membranas de fibra oca foram caracterizadas quanto a morfologia, a rejeição ao soluto e a permeabilidade hidráulica. Já as membranas de nanofiltração foram caracterizadas quanto a permeabilidade hidráulica.

As membranas de fibra oca foram caracterizadas quanto a sua morfologia utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) a partir das análises tanto da superfície quanto da seção transversal. A análise da superfície externa da fibra se apresentou praticamente isentas de poros visíveis a resolução do equipamento. Ao longo da estrutura superficial, verificou-se a presença de alguns poros pontuais conforme observado na Figura 27.

Figura 27 - Fotomicrografias da superfície externa da fibra oca: a) aumento 50.000x; b) aumento de 100.000x

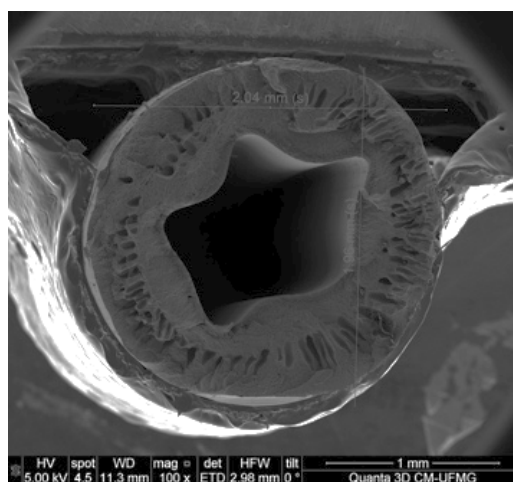


Fonte: Elaborado pela autora.

A baixa porosidade observada na superfície externa da membrana é típica em membranas de ultrafiltração as quais normalmente apresentam porosidades superficiais muito baixas, variando de 0,1 a 1% (MULDER, 1996).

Na Figura 28 é exibida a fotomicrografia da seção transversal da membrana com destaque para os valores de seu diâmetro externo estimados pela ferramenta do software do próprio equipamento.

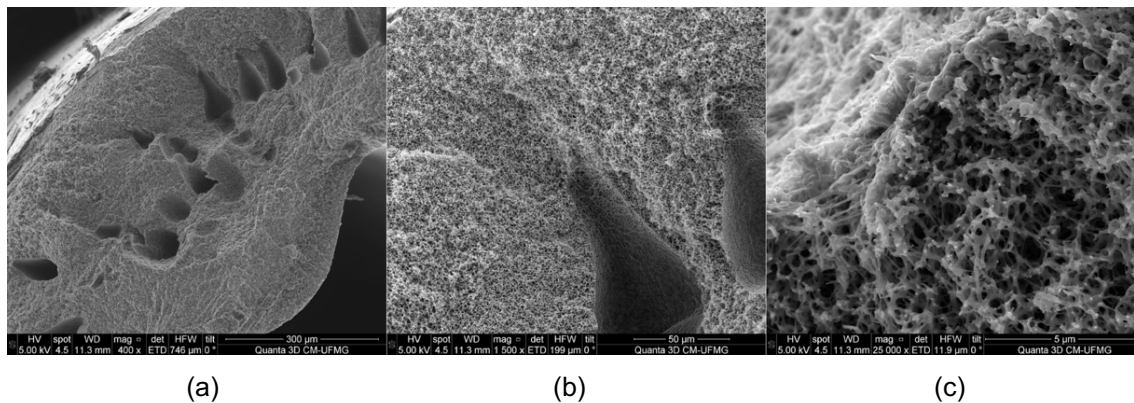
Figura 28 – Seção transversal e estimativa do raio externo da membrana



Fonte: Elaborado pela autora.

Observou-se pela variação dos diâmetros externo de 2,04 mm horizontalmente e de 1,96 mm verticalmente, que a membrana não é um cilindro circular perfeito. Desta forma, realizou-se a média destes valores e adotou-se 2,0 mm como o valor do diâmetro externo da membrana de fibra oca. Na parte central da fibra, encontra-se o lúmen que apresentou um formato não circular. Próximo a este lúmen e na parte mais externa (próximo a superfície), observou-se a presença de uma morfologia esponjosa (Figura 29a).

Figura 29 – Morfologia da seção transversal da fibra oca: a) detalhe da morfologia da seção transversal (aumento 400x); b) camada esponjosa e poros digitiformes (conformação de dedos) (aumento 1.500x); c) morfologia esponjosa próximo a superfície externa da membrana (aumento 25.000x)



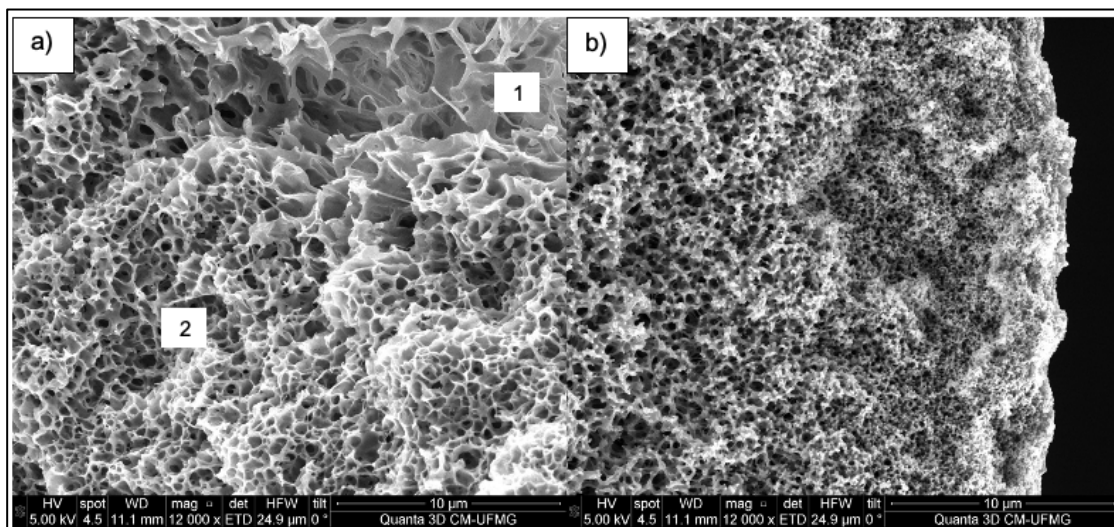
Fonte: Elaborado pela autora.

Entre a superfície e o lumén, desta fibra, identificou-se a presença de macroporos na conformação de dedos (*finger-like structure*), Figura 29b. Huang *et al.* (2013) avaliou a morfologia de membranas de fibra oca de ultrafiltração composta de PDVF, por microscopia, e de forma semelhante a esta fibra identificou superfícies densas externas e presença interna de poros na conformação de dedos. A avaliação, destes autores, cita que morfologias *finger-like structure* podem proporcionar rápida separação.

A estrutura porosa da fibra, identificada na Figura 29c, caracteriza-se pela presença massiva de poros, que interconectados, criam uma estrutura filtrante. A fibra investigada apresenta morfologia anisotrópica porosa, estes garantem a eficiência da filtração e dão suporte mecânico à membrana.

As características dos poros da fibra são mais bem identificados na Figura 30 sendo possível encontrar morfologias distintas sob a conformação de esponja. Na Figura 30a verificou-se essa diferença, na superfície interna da fibra, próximo ao lúmen, parte superior direita (ponto 1 – Figura 30), foram encontrados poros maiores e presença de macrovazios. Já na parte mais próxima a superfície externa da fibra (ponto 2- Figura 30) observa-se uma região de morfologia esponjosa, a qual apresenta poros de tamanho similares e região com poros de menores diâmetros. Ou seja, o tamanho dos poros diminui com a proximidade da superfície externa da fibra (Figura 30b).

Figura 30 – Fotomicrografias da seção transversal da fibra oca: a) transição da superfície macroporosa (1) para uma superfície esponjosa (2) aumento de 12.000x; b) superfície esponjosa com aumento de 12.000x

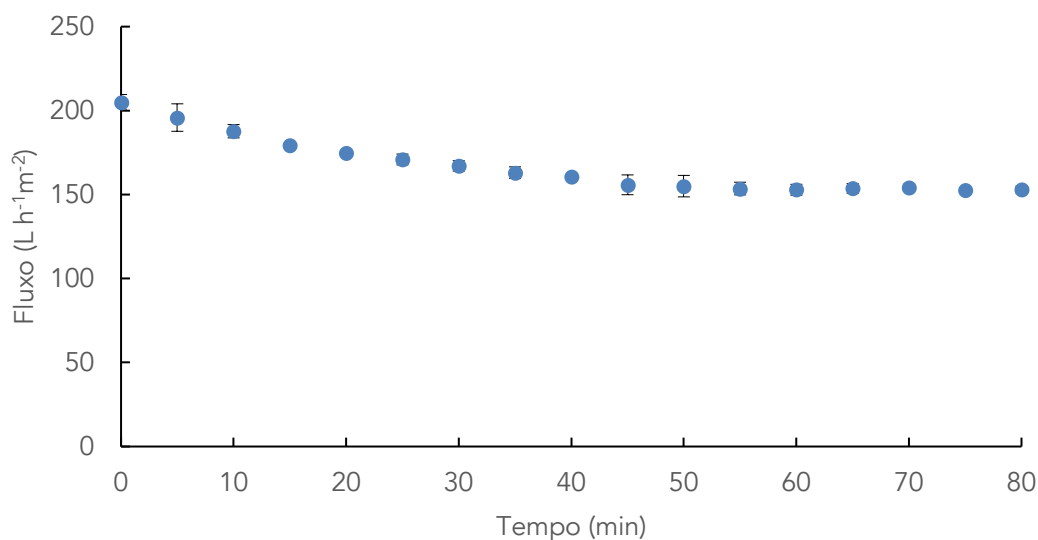


Fonte: Elaborado pela autora.

A caracterização morfológica da membrana de fibra oca é indicativa de que ela apresenta características que se adequam a uma membrana de ultrafiltração, porém são necessários ensaios complementares para finalizar a sua caracterização.

De forma complementar a etapa de caracterização da membrana, foram realizados os ensaios para determinação da permeabilidade hidráulica da membrana e da rejeição ao soluto utilizando moléculas padrão como a BSA e a Tripsina, que são proteínas com massa molecular conhecidas. Para esses ensaios foi utilizado o módulo M-01, cujas características estão apresentadas no Quadro 4. A menor quantidade de fibras presentes no interior do módulo de permeação permite uma melhor análise das características da membrana sem que haja interferência da densidade de empacotamento, ou do escoamento do fluido sobre a superfície da membrana ou seja, o comportamento da rejeição ao soluto ou da permeabilidade hidráulica será intrínseco ao contato da solução com a superfície da membrana.

O teste de rejeição aos solutos foi realizado após compactação do módulo de membrana M-01 com água pura de modo que a acomodação dos poros não interferisse na análise da determinação da faixa de tamanho de moléculas rejeitadas pela membrana. A compactação foi realizada em triplicata a 2,0 bar. A Figura 31 apresenta o resultado do comportamento do fluxo permeado em função de tempo com os respectivos desvios.

Figura 31 – Compactação do módulo M-01

Fonte: Elaborado pela autora.

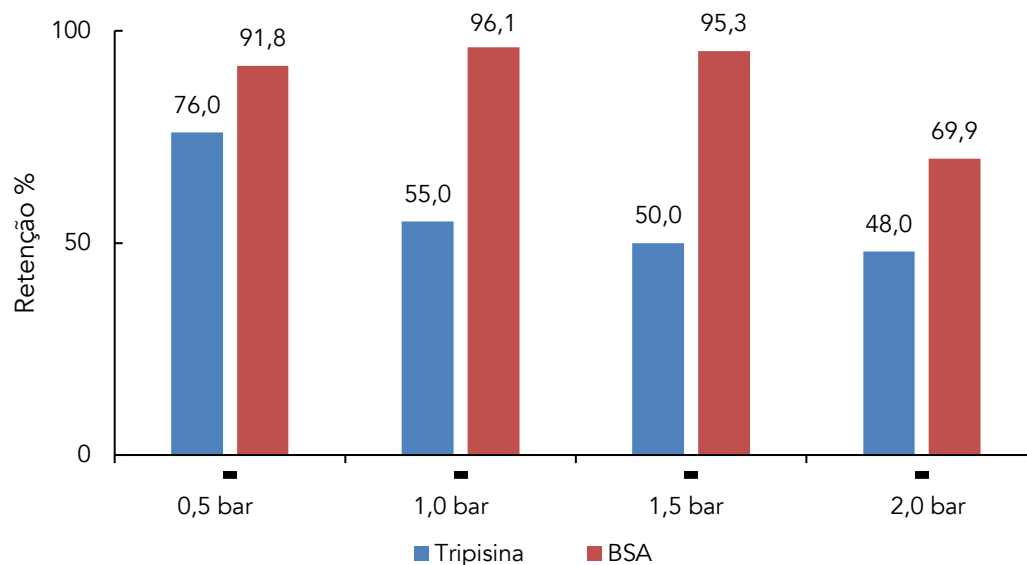
Observando a curva de compactação obtida, nota-se um comportamento comum do fluxo permeado quando operado em sistemas pressurizados e na presença de membrana polimérica. Nos primeiros minutos de filtração o fluxo permeado é elevado e com o passar do tempo observa-se uma diminuição até obter um fluxo permeado constante. Isto ocorre, pois quando uma membrana polimérica é colocada sob pressão, os poros são levemente reorganizados e acomodados a sua estrutura é alterada, resultando em uma redução do volume do poro, aumento da resistência ao transporte de fluidos através da membrana e, conseqüentemente na redução do fluxo permeado (MULDER, 1996). No caso desta membrana é perceptível que a compactação ocorre nos primeiros 50 minutos de funcionamento do sistema e após esse período o fluxo permeado tende a um valor constante.

A permeabilidade hidráulica para o módulo M-01 foi analisada anterior e após o ensaio de rejeição. A permeabilidade hidráulica também foi determinada após o procedimento de limpeza realizado conforme descrito no item 4.4. Inicialmente a permeabilidade hidráulica da membrana obtida foi de $84,55 \text{ L h}^{-1} \text{m}^{-2} \text{ bar}^{-1}$ ($R^2 = 0,9635$) e após os ensaios de rejeição $84,17 \text{ L h}^{-1} \text{m}^{-2} \text{ bar}^{-1}$ ($R^2 = 0,9598$), ou seja, quase não houve alteração da permeabilidade hidráulica indicando que se eventos de incrustações ocorreram na permeação das proteínas analisadas, sendo estes de predominância reversível.

Após a compactação da membrana foram permeadas no sistema as soluções contendo as proteínas BSA e Tripsina conforme especificado no item 4.3.1. Os resultados de

rejeição destas proteínas para a fibra oca de PVDF em função da pressão aplicada estão apresentados na Figura 32.

Figura 32 – Rejeição de BSA e Tripsina pela fibra oca em função da pressão



Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados exibiram uma forte influência da pressão de operação sobre os resultados de permeação das soluções. O aumento da pressão de operação proporcionou uma diminuição na rejeição as proteínas investigadas. Este comportamento é comumente observado, pois moléculas de uma dada massa molar é rejeitada cada vez menos pela membrana à medida que a pressão de operação aumenta. Isso ocorre devido a deformação da macromolécula provocada pela tensão de cisalhamento na entrada do poro da membrana (HABERT *et al.*, 2006). No caso do sistema estudado, esse efeito é claramente observado no processo de permeação da Tripsina em que à medida que a pressão operacional aumenta, a rejeição desta proteína diminui. Para a BSA, esse fenômeno só foi observado de forma acentuada para valores de pressão de operação de 2,0 bar. Além disso, um aumento do fluxo permeado, com o aumento da pressão de operação, pode ter proporcionado que a molécula de Tripsina (que apresenta menor diâmetro de corte que a molécula de BSA) passasse pelos poros da membrana resultando em uma menor retenção, indicando que a molécula de Tripsina (23,8 kDa) apresenta moléculas com massa molecular menor que os poros da membrana de fibra oca em estudo.

O MWCO, ou diâmetro de corte da membrana, designa a massa molar do menor componente que será retido com uma eficiência de pelo menos 90% (MULDER, 1996).

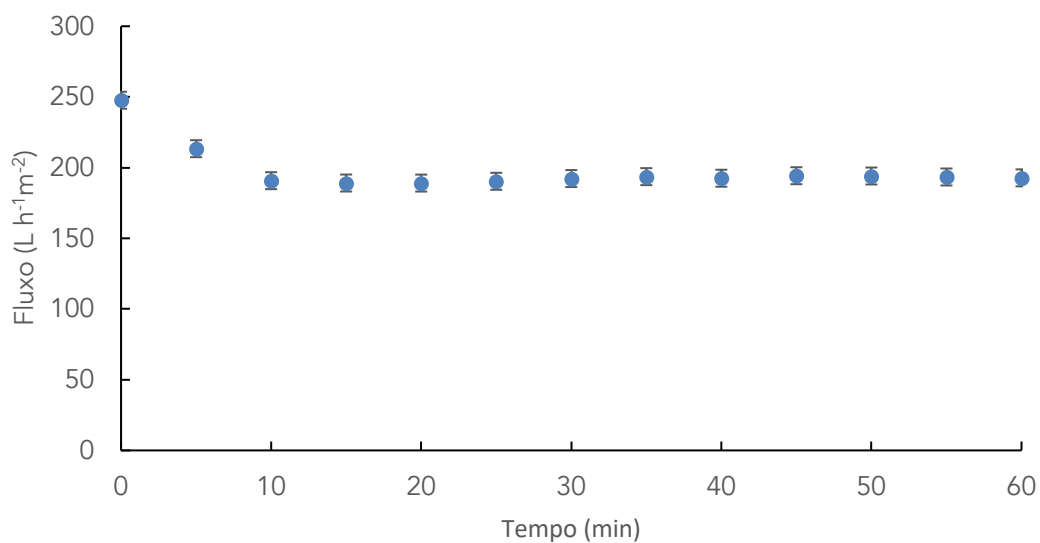
Avaliando os resultados obtidos, observa-se que a membrana de fibra oca apresentou um melhor desempenho de retenção para a molécula de BSA, chegando a 96,07% de rejeição na pressão de 0,5 bar. Ou seja, a membrana poderá ser utilizada em processos de separação para retenção de solutos com massa molar maior que 66 kDa. Tal valor de diâmetro de corte é indicativo de membranas de ultrafiltração. Com base na literatura, estima-se que membranas de ultrafiltração apresentam MWCO entre 20-150 kDa (EZUGBE; RATHILAL, 2020; HABERT *et.al.*, 2006). A retenção da fibra para tripsina não atingiu valores iguais ou maiores de 90%, portanto esta proteína não foi empregada para determinar os diâmetros de corte.

A caracterização morfológica da fibra desempenhou um papel importante para um diagnóstico sobre as propriedades do processo de separação realizado pela membrana. Por meio das investigações confirmou-se que tal fibra apresenta características que se adequem a ultrafiltração. As principais propriedades da ultrafiltração incluem capacidade de retenção, permeabilidade a solventes, compatibilidade química, resistência mecânica para fabricação de módulos e uso repetido, consistência e custo (MULDER, 1996). Propriedades estas que se tornam adequadas e importantes para o desempenho que se deseja para o processo de filtração proposto neste estudo.

5.2 Caracterização dos Módulos de Filtração

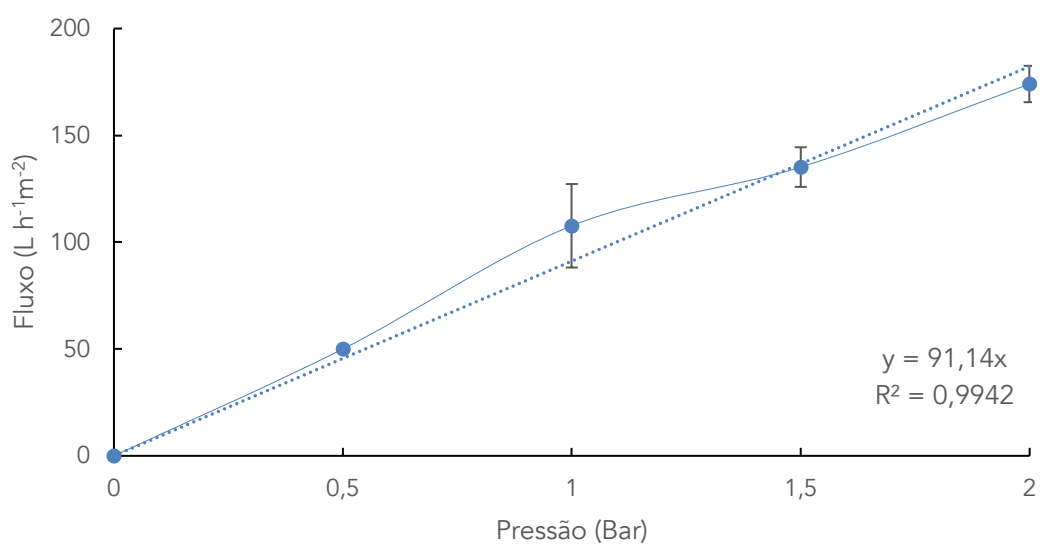
O módulo de ultrafiltração M-02 foi selecionado para ser utilizado nos ensaios de permeação com o efluente de lavanderia de jeans. O módulo para filtração do efluente de lavanderia de jeans foi confeccionado semelhante ao módulo M-01, em que a alimentação entre paralela à superfície externa das fibras ocas explorando o escoamento tangencial, sendo e o permeado é coletado pelo lúmen da fibra. O cisalhamento do fluido sobre a superfície da membrana proporcionado pelo escoamento tangencial minimiza a ocorrência de processos de incrustações devido a constante remoção do material depositado sobre a superfície da membrana.

Anterior aos testes com o efluente e após a lavagem da membrana foi realizada a avaliação dos parâmetros de transporte por meio da permeabilidade hidráulica do módulo confeccionado mediante a permeação de água pura. A Figura 33 apresenta o comportamento do fluxo permeando água pura em função do tempo e a uma pressão constante de 2,0 bar. No caso desta membrana é perceptível que a compactação ocorre aproximadamente após 20 minutos de funcionamento quando o fluxo permeado tende a estabilidade.

Figura 33 – Compactação inicial da Membrana M-02

Fonte: Elaborado pela autora.

Após a compactação do módulo de permeação, determinou-se a permeabilidade hidráulica inicial do módulo de permeação M-02, anterior aos testes com efluente, obtida a partir da determinação do coeficiente angular da reta de fluxo permeado *versus* variação de pressão. A Figura 34 apresenta os resultados obtidos para permeabilidade hidráulica do módulo de permeação.

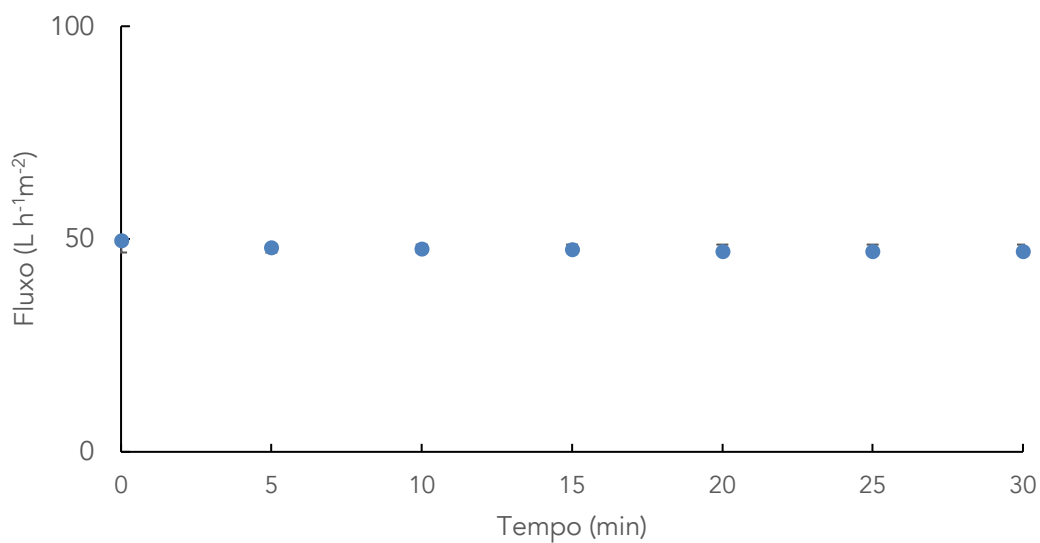
Figura 34 – Permeabilidade Hidráulica Inicial

Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com os resultados obtidos, o valor médio da permeabilidade hidráulica do módulo de permeação foi de $91,14 \text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2} \text{ bar}^{-1} \pm 52,14$, Figura 34. O comportamento do fluxo permeado ao longo de uma membrana é influenciado por diversos fatores. Em membranas porosas, quando uma força motriz é aplicada, o comportamento do fluxo permeado estará diretamente relacionado as características dos seus poros e do solvente que permeia essa matriz polimérica. Essa relação entre as características intrínsecas da membrana e o solvente resultará nos valores que definirão a permeabilidade hidráulica. Para um solvente puro os valores da permeabilidade hidráulica determinam uma constante de proporcionalidade entre o fluxo permeado e a variação de pressão. Para esta membrana nota-se uma forte linearidade com um coeficiente de correlação em torno de 0,99.

A membrana de nanofiltração (NF) também foi submetida a avaliação dos parâmetros de transporte a partir da determinação da permeabilidade hidráulica. Inicialmente a membrana foi compactada a pressão constante de 10 bar e temperatura em 25°C. A Figura 35 representa o comportamento do fluxo permeando água pura em função do tempo de operação para uma pressão constante de 10 bar. O teste foi realizado em triplicata. Para a membrana de NF a compactação ocorre aproximadamente após os primeiros 20 minutos de operação e após esse período o sistema apresenta valores de constante de fluxo permeado indicando a acomodação estrutural da membrana.

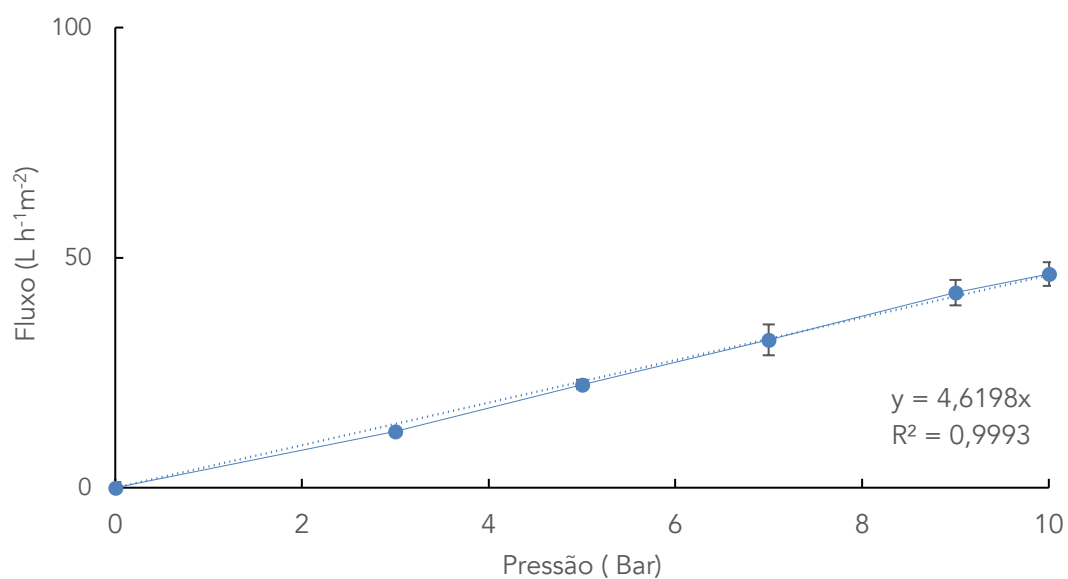
Figura 35 – Compactação da membrana de nanofiltração (NF-90)



Fonte: Elaborado pela autora.

A permeabilidade hidráulica inicial da membrana de NF, anterior a qualquer teste de permeação, foi determinada seguindo a mesma metodologia para determinação da permeabilidade hidráulica da membrana de Ultrafiltração (UF). A Figura 36 apresenta o comportamento do fluxo permeado em função da pressão de operação.

Figura 36 - Fluxo permeado em função da pressão para determinação da permeabilidade hidráulica inicial da membrana de NF.



Fonte: Elaborado pela autora.

O valor médio da permeabilidade hidráulica da membrana NF foi de $4,62 \text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2} \text{ bar}^{-1} \pm 32,13$. Para a NF nota-se também uma forte linearidade com um coeficiente de correlação em torno de 0,99. A permeabilidade hidráulica média alcançada neste trabalho está em conformidade com valores encontrados na literatura. Simões (2016) cita que membranas NF90 podem ter a sua permeabilidade variando entre 6,94 e $11,28 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}\text{bar}^{-1}$.

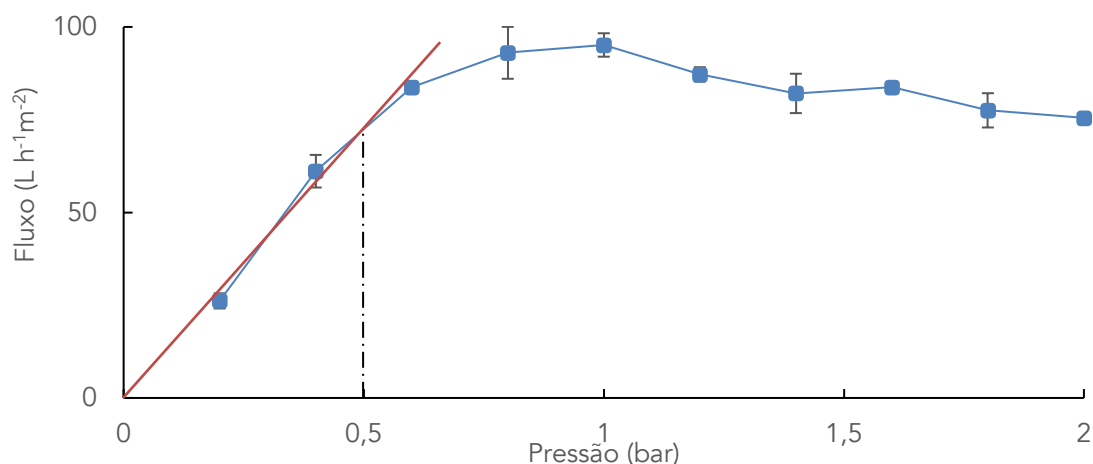
5.3 Ensaios de Permeação de Ultrafiltração

Assim que coletado, para cada cenário conforme citado no item 4.1, o efluente da lavanderia de *jeans* e o permeado obtido foram caracterizados conforme parâmetros físico-químicos descritos no Quadro 6 com o intuito de avaliar a eficiência das membranas de ultrafiltração e nanofiltração, bem como a qualidade dos permeados obtidos para fins de reúso industrial.

Anterior aos ensaios de permeação com o efluente foi determinada por meio da avaliação do fluxo crítico, a pressão de operação ideal, que resultará em uma menor probabilidade da ocorrência de incrustações sobre a superfície da membrana. Na literatura é possível encontrar alguns métodos de medições para o fluxo crítico, dentre os citados, esta a avaliação do perfil fluxo-pressão, que apresenta como principal vantagem a simplicidade de realização (DRIOLI e GIONO, 2016; BACHIN et al., 2006).

Neste ensaio o fluxo permeado, no módulo M-02, foi monitorado variando a pressão em intervalos de 0,2 bar (0,2 a 2,0 bar). Tal análise forneceu dados para estimar uma pressão de operação que permita a obtenção de um fluxo permeado sustentável para o funcionamento do sistema operando com o efluente industrial. Os resultados para determinação do fluxo crítico estão apresentados na Figura 37 e foram obtidos pela avaliação de amostras de efluentes dos 3 cenários.

Figura 37 – Avaliação do fluxo crítico com efluente de lavanderia de jeans



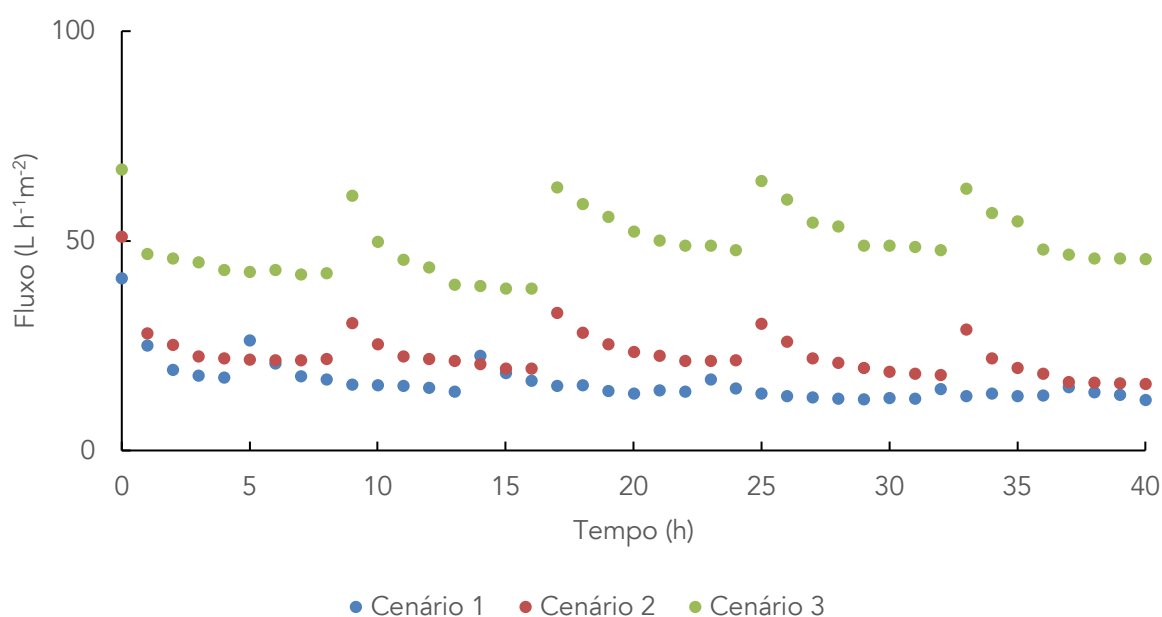
Fonte: Elaborado pela autora.

O fluxo crítico é o ponto em que a relação “fluxo permeado versus pressão” se torna não linear ou ainda, o “primeiro” fluxo de permeado para o qual a incrustação se torna predominante (BACHIN *et al.*, 2006; ZHANG *et al.*, 2016). Observando os resultados infere-se que os eventos de resistência ao fluxo permeado são mais notáveis a partir da pressão 0,8 bar com a diminuição brusca da linearidade. Até a pressão de 0,6 bar o fluxo permeado tende a crescer constantemente, e após 1 bar, o fluxo tende a diminuir e a ficar constante, demonstrando a sua estabilização em função do escoamento superficial. Desta forma, estima-se que o fluxo crítico esteja abaixo da pressão 0,6 bar. Uma operação cuidadosa para mitigar as dificuldades de incrustação devem ser realizadas abaixo do fluxo crítico, ponto no qual o fluxo permeado não ocorrerá um declínio ao longo do processo e acima do qual a incrustação tende a não ser tão intensa.

A partir destes resultados, foram realizados ensaios prévios com o sistema de filtração com reciclo total, a fim de determinar uma pressão ideal neste intervalo de predominância de existência do fluxo crítico, sempre correlacionando este valor com a velocidade de escoamento da alimentação sobre a superfície da membrana. Os parâmetros operacionais determinados para os testes com o efluente de lavanderia foram realizados a pressão de operação constante de 0,5 bar e vazão de escoamento da alimentação de 2 Lmin⁻¹, equivalente a um número de Reynolds de 2.000 para o módulo M-02.

Os efluentes coletados para cada cenário foram permeados no sistema, em reciclo total, por 40 horas, a fim de avaliar o desempenho da membrana de ultrafiltração com o efluente de lavanderia de *jeans*. Sempre após ao término de cada ensaio e antes do início de um novo ensaio foi realizada a limpeza da membrana como procedimento padrão indicado no item 4.4. O fluxo permeado foi determinado no momento da partida e ao longo do teste a cada 1 hora, os dados para cada cenário (Cenário 1, 2 e 3) estão indicados na Figura 38.

Figura 38 – Comportamento do fluxo permeado em função do tempo operacional de 40 horas para cada Cenário.



Fonte: Elaborado pela autora.

O uso das membranas de ultrafiltração no sistema de permeação apontou uma boa estabilidade operacional para os testes de longa duração e permaneceu em funcionamento até 8 horas seguidas sem qualquer interferência. Os picos iniciais nos fluxos permeados, observados no gráfico, devem-se as pausas realizadas diariamente, visto que não era possível que o sistema funcionasse as 40 horas ininterruptas. A depressurização do sistema pode ter permitido a dispersão da torta formada sobre a superfície da membrana ocasionando nos altos fluxos permeados iniciais. Além disso, quando o sistema era desligado a membrana polimérica sem qualquer ação de força motriz tinha a sua estrutura reorganizada. O fluxo permeado médio ao longo das 40 horas, foi de aproximadamente $16 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \pm 5$ para o Cenário 1, $23 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \pm 6$ para o Cenário 2 e $48 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ desvio de ± 7 para o Cenário 3.

Observa-se que o menor fluxo permeado foi determinado para o Cenário 1. Dentre as justificativas para este menor fluxo permeado, destaca-se o tratamento utilizado nesse cenário, composto pela coagulação/floculação, com uma etapa preliminar simples de gradeamento, apresentando uma elevada carga de sólidos que contribuiu de forma significativa para formação da torta sobre a superfície da membrana, e consequentemente uma resistência adicional a filtração. Já no Cenário 2 os efluentes foram coletados após peneira rotativa com escova, que foi implantada como melhoria no tratamento de efluentes da lavanderia parceira. Os tratamentos preliminares apresentam como finalidade remover sólidos grosseiros, como sobras de fibras dos tecidos, principalmente a fim de proteger os dispositivos subsequentes. Desta forma, considera-se que a peneira rotativa proporcionou maior remoção destes sólidos e contribuiu para melhores condições de fluxo permeado para o processo de ultrafiltração, minimizando a formação de torta sobre a superfície da membrana. Tratamentos preliminares adequados podem favorecer, portanto, maior vida útil da membrana, diminuindo processos reversíveis de incrustações e confirma-se como essencial a ser implantado anterior aos processos de separação por membrana.

Além disso, no Cenário 2 visando a melhoria dos seus processos e de diminuir os impactos das etapas de lavagens a empresa implantou a tecnologia do ozônio em suas lavagens, mediante a geração desse gás, em temperatura ambiente, com uso de um gerador, e direcionado para a máquina de lavar. O ozônio é um gás altamente instável proporcionando-o ser um poderoso oxidante. Na indústria de beneficiamento têxtil, o seu uso tem sido atestado como uma técnica eficaz para redução de tempo de processo de lavagens e consequentemente água, energia e substituição de produtos químicos (CETIQT, 2016; MACÊDO, 2016; PERIYASAMY; PERIYASAMI, 2023).

No caso da lavanderia parceria jatos de ozônio são injetados no início do processo de produção para limpar as impurezas do tingimento da tecelagem, para desengomar, e no processo final da lavanderia. Com esta inovação a empresa já conseguiu substituir o uso de químicos (principalmente em etapas de desengomagens) e estima-se uma redução de até 85% do volume de água em certos designs a serem produzidos, como o *Jeans destroyed*. Comparando-o com o Cenário 1, a utilização do ozônio no Cenário 2 pode ter influenciado na qualidade final do efluente e proporcionado uma melhoria do fluxo permeado devido a redução dos sólidos presentes no efluente. O efluente do cenário 3 que apresentou maior fluxo, foi coletado após a saída da máquina de lavar, em certos períodos da lavagem do *jeans* (sem tratamento preliminar e sem ozônio).

Como era esperado, o fluxo permeado se apresentou elevado inicialmente e foi diminuindo ao longo do tempo de operação. A diminuição do fluxo permeado foi mais brusca nas fases iniciais da permeação e pode ser atribuído, pela compactação da membrana e posteriormente por fenômenos intrínsecos como a polarização de concentração e formação de incrustação. Estes últimos, possivelmente, atribuídos a deposição de corantes sobre a superfície externa da membrana resultando na formação de uma camada de torta que reduz o tamanho efetivo do tamanho dos poros da membrana e aumenta a resistência ao escoamento com o passar tempo.

Em um dado intervalo de tempo, e a cada ciclo de operação, é possível perceber uma tendência do fluxo permeado a se manter constante. Este comportamento foi proporcionado pela filtração em escoamento tangencial, que promoveu o arraste de partículas e a formação de uma camada de espessura estável sobre a superfície da membrana, mantendo o fluxo permeado constante.

O desempenho do sistema de ultrafiltração para remoção da DQO foi observada para o efluente bruto e ao longo do teste na 20^a e na 40^a hora. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise da remoção DQO (mg L⁻¹) no teste de 40 horas

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Efluente bruto	865±12	1100±93	1200±6
Hora: 20 ^a	883±1	890±56	500±6
Hora: 40 ^a	765±1	815±7	500±1

Fonte: Elaborado pela autora.

Ao longo do estudo e das variadas coletas realizadas, notou-se que o efluente de lavanderia é um efluente muito heterogêneo e as suas características variam de acordo com a coleta. É possível que a fração orgânica do efluente investigado apresente mais compostos de massa molecular inferior ao ponto de corte da membrana de UF, o que proporcionou esta baixa eficiência da membrana quanto a remoção de DQO. Embora boas porcentagens de remoção de DQO já tenham sido relatadas para membranas de ultrafiltração de PVDF, a maioria dos estudos citam a necessidade da integração de processos de ultrafiltração em conjugação com outros processos para aumentar a eficiência de separação de determinados compostos (AOUNI *et al.*, 2012; CURIC; DOLAR, 2022; NANDY *et al.*, 2007).

A eficiência da remoção dos compostos presentes nas matrizes dos efluentes Cenário 1, Cenário 2 e Cenário 3 submetidas ao processo de ultrafiltração foram analisadas a partir da determinação dos parâmetros físico-químicos como odor, cor, turbidez, pH, DQO, cloreto, dureza e série de sólidos, os dados estão descritos na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente. Para garantir a precisão na avaliação dos parâmetros de qualidade estes foram executados sempre em triplicata. Além disso, foram analisadas três amostras distintas da alimentação e seus respectivos permeados para o Cenário 1 e Cenário 2. E uma amostra para o Cenário 3 devido a dificuldade de coletar mais amostras desta matriz com a empresa parceira.

Tabela 4 – Parâmetros físico-químicos avaliados na Ultrafiltração Cenário 1

Parâmetro	Identificação da Amostra	Efluente	Permeado UF	Remoção (%)
Odor	Amostra 1	Presente	Presente	-
	Amostra 2	Presente	Ausente	-
	Amostra 3	Presente	Ausente	-
Turbidez (NTU)	Amostra 1	13±1	3±1	77%
	Amostra 2	29±1	3±0	89%
	Amostra 3	35±1	3±1	91%
pH	Amostra 1	7,16	7,16	VNC*
	Amostra 2	6,28	6,30	VNC*
	Amostra 3	6,93	7,23	VNC*
Cor (mg Pt-Co L ⁻¹)	Amostra 1	VNC*	VNC*	VNC*
	Amostra 2	VNC*	VNC*	VNC*
	Amostra 3	VNC*	VNC*	VNC*
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	Amostra 1	2503±208	2403±153	<1%
	Amostra 2	4003±265	3903±651	<1%
	Amostra 3	4003±700	3703±416	<1%
Cloreto (mg L ⁻¹)	Amostra 1	129±1	124±1	<1%
	Amostra 2	126±3	122±6	<1%
	Amostra 3	123± 3	122±2	<1%
Dureza (mg L ⁻¹)	Amostra 1	291±2	40±3	86%
	Amostra 2	48±1	45±1	<1%
	Amostra 3	51±1	50±1	<1%
Sólidos Totais (mg L ⁻¹)	Amostra 1	2460±171	1270±1	48%
	Amostra 2	4710±262	1793±347	62%
	Amostra 3	120±1	90±1	25%
Sólidos Dissolvidos (mg L ⁻¹)	Amostra 1	1340±453	1270±1	<1%
	Amostra 2	4080±11	1793±347	56%
	Amostra 3	120±1	90±1	25%
Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)	Amostra 1	1120±312	VNC*	VNC*
	Amostra 2	630±100	VNC*	VNC*
	Amostra 3	0	VNC*	VNC*

*VNC: valor não calculado.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 5 – Parâmetros físico-químicos avaliados na Ultrafiltração Cenário 2

Parâmetro	Identificação da Amostra	Efluente	Permeado UF	Remoção (%)
Odor	Amostra 1	Presente	Presente	-
	Amostra 2	Presente	Presente	-
	Amostra 3	Presente	Presente	-
Turbidez (NTU)	Amostra 1	40,1±1	0±1	100%
	Amostra 2	59±1	0±1	100%
	Amostra 3	42,6±1	0±1	100%
pH	Amostra 1	6,57	7,6	VNC*
	Amostra 2	7,5	7,67	VNC*
	Amostra 3	7,89	7,99	VNC*
Cor (mg Pt Co L ⁻¹)	Amostra 1	17,73	0	100%
	Amostra 2	6,98	0	100%
	Amostra 3	13,98	0	100%
DQO (mg L ⁻¹)	Amostra 1	970±12	879±6	<1%
	Amostra 2	1150±30	850±57	26%
	Amostra 3	1100±126	817±7	26%
Cloreto (mg L ⁻¹)	Amostra 1	31±1	26±1	16%
	Amostra 2	44±0	41±1	<1%
	Amostra 3	35±0	35±0	0%
Dureza (mg L ⁻¹)	Amostra 1	79±3	63±3	20%
	Amostra 2	122±14	80±1	34%
	Amostra 3	84±2	64±2	24%
Sólidos Totais (mg L ⁻¹)	Amostra 1	593±25	190±7	68%
	Amostra 2	2580±623	156±146	36%
	Amostra 3	1960±25	1130±212	42%
Sólidos Dissolvidos (mg L ⁻¹)	Amostra 1	563±103	190±7	66%
	Amostra 2	1580±444	1560±146	<1%
	Amostra 3	1160±240	1130±212	<1%
Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)	Amostra 1	30±80	VNC*	
	Amostra 2	1000±456	VNC*	VNC*
	Amostra 3	800±26	VNC*	

*VNC: valor não calculado.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6 – Parâmetros físico-químicos avaliados na Ultrafiltração Cenário 3

Parâmetro	Efluente	Permeado UF	Remoção (%)
Odor	Presente	Presente	-
Turbidez (NTU)	36±1	0	100%
pH	7,14	7,91	VNC*
Cor (mg Pt-Co L ⁻¹)	1,23	0	100%
DQO (mg L ⁻¹)	1200±6	390±10	67%
Cloreto (mg L ⁻¹)	34±0	34±1	-
Dureza (mg L ⁻¹)	85±0	81±0	<1%
Sólidos Totais (mg L ⁻¹)	1083±275	120±1	89%
Sólidos Dissolvidos (mg L ⁻¹)	400±95	120±1	70%
Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)	683±156	VNC*	VNC*

***VNC: valor não calculado.**

Fonte: Elaborado pela autora.

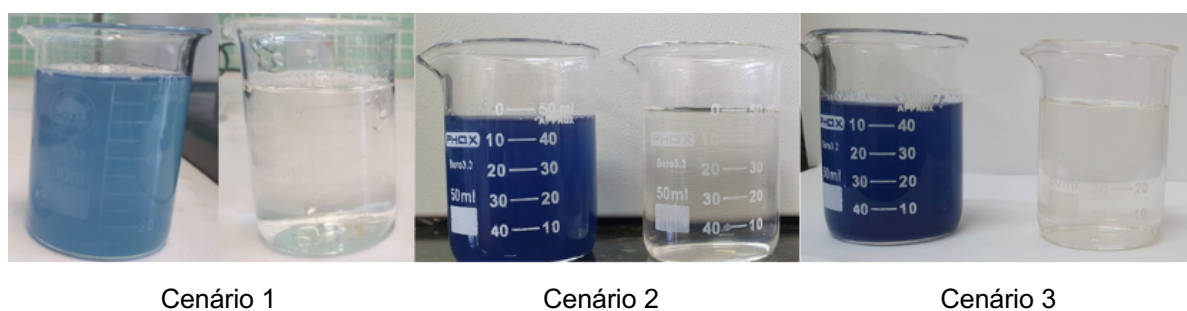
É notável que a cada coleta e para cada cenário o efluente de lavanderia não apresentou constância nos valores dos parâmetros avaliados. Na lavanderia em estudo foi relatado o uso de diversos químicos, a se destacar corantes reativos e dispersos para acabamento das peças, hipoclorito de sódio, peróxido de hidrogênio, carbonato de sódio (Barrilha), soda cáustica, amaciantes, permanganato de potássio e pó abrasivo (nome usual é perfiltra). Demonstrando a heterogeneidade dessa água residuária.

Os resultados encontrados indicam que o processo de ultrafiltração é eficiente para remoção de materiais em suspensão do efluente de lavanderia de *jeans* proporcionando bons valores de turbidez e diminuição de cor. Para o Cenário 1 o valor da turbidez pode ter sido influenciado pela sensibilidade do equipamento utilizado para a medida. Os três cenários investigados mostraram a eficiência do sistema de ultrafiltração para a remoção da turbidez chegando a 100%.

A diminuição da turbidez no permeado em módulos de membranas poliméricas de fibra oca tem sido investigada na literatura para efluentes industriais. Borsi *et al.* (2012), utilizaram uma membrana de ultrafiltração na conformação de fibra oca e os resultados indicaram uma remoção de turbidez superior a 90% para efluentes têxteis. Alardhi *et al.* (2020) e Sherhan *et al.* (2016) também avaliaram efluentes têxteis e confirmaram o sucesso da remoção de corante com membranas de fibra oca UF e indicaram alta remoção de turbidez de cerca de 95%. Curic e Dolar (2022) investigaram e compararam o melhor pré-tratamento para ser aplicado a efluentes têxteis, avaliando filtração de areia, coagulação, coagulação/floculação e ultrafiltração com membrana de fibra oca. Os resultados demonstraram que entre estes tratamentos a ultrafiltração com membranas de fibra oca foi eficiente para remoção de turbidez.

Nos permeados obtidos a partir do processo de ultrafiltração, as medidas de absorbância para as análises de cor referentes ao permeado atingiram a medida igualmente a encontrada para a água pura. Ou seja, não foi possível identificar qualquer concentração de corante nos permeados obtidos corroborando com os dados da literatura. Fazendo uma análise visual (Figura 39) nota-se a diferença entre o efluente bruto e do permeado na remoção da cor. Visualmente o permeado da ultrafiltração não apresentou coloração cristalina, porém vê-se que a coloração azul foi removida comprovando a eficiência da membrana de ultrafiltração na retenção do corante índigo blue. A cor residual ainda aparente na amostra pode ser devido ainda a concentrações de DQO e sólidos dissolvidos.

Figura 39 – Efluente de lavanderia de jeans e permeado obtido pela ultrafiltração



Fonte: Fotografia da autora (2023).

Os dados apontaram uma remoção de até 89% dos sólidos totais. A ultrafiltração é uma barreira física quem tem como principal propriedade a capacidade de remover sólidos suspensos, coloides e vírus presentes na água (DRIOLI; GIONO, 2016; HABERT *et.al.*, 2006). Isto posto, não foram realizadas análises para os sólidos em suspensão para a amostra do permeado, pois espera-se que estes tenham sido totalmente removidos pelas membranas de ultrafiltração, devido a característica de retenção deste processo.

Quanto ao pH das amostras, não houve alteração significativa nos valores entre o efluente bruto para o permeado, conforme esperado. Na determinação de cloretos verificou-se baixa redução. Membranas de ultrafiltração, como relatado na literatura, não são muito eficientes para remoção de sais e íons. As membranas de UF não são aplicáveis para retenção de íons (EZUGBE; RATHILAL, 2020, HABERT *et.al.*, 2006) e não retém cloretos, sendo um aspecto considerado negativo, visto que o acúmulo de cloretos pode aumentar o risco de corrosão em sistemas com recirculação de água sendo um desafio para métodos que objetivam o reúso do permeado (DRIOLI e GIONO, 2016). Outro parâmetro com baixa alteração encontrada entre o efluente bruto e o permeado foi a dureza. Geralmente estudos indicam que em processos de ultrafiltração parâmetros como condutividade, dureza e alcalinidade não são alterados por esta filtração devido as características destas membranas (BUSCIO *et al.*, 2015).

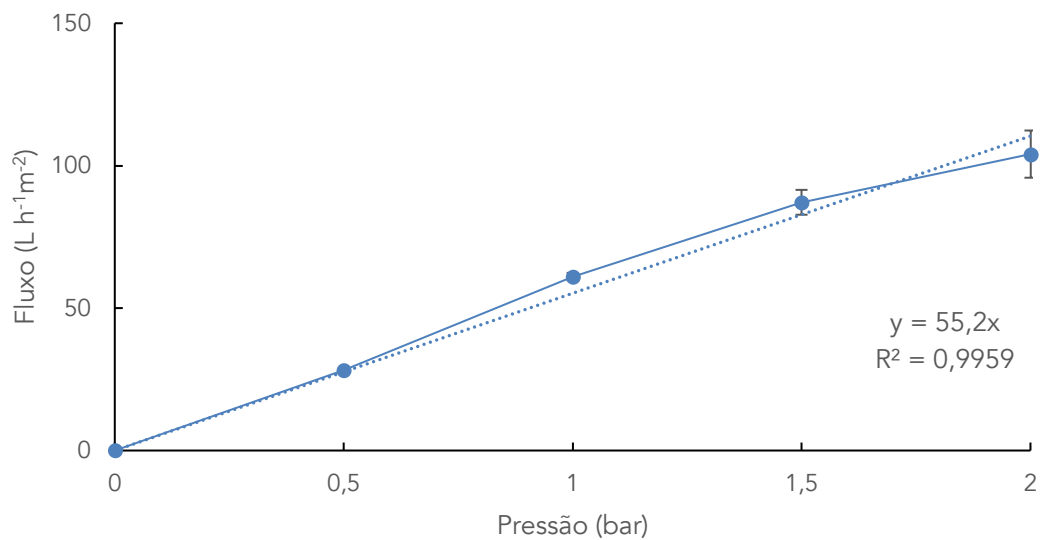
Os resultados dos ensaios de DQO do permeado da ultrafiltração indicaram baixa remoção deste parâmetro. Os dados sugerem que as moléculas orgânicas deste efluente são menores que os poros da membrana investigada e não são retidas resultando nesta baixa remoção de DQO. Outro aspecto a se destacar, é que nos processos de lavagens ocorridos na lavanderia de *jeans* é comum o uso de variadas substâncias químicas, algumas até mesmo desconhecidas, que contribuem para uma composição inorgânica complexa do efluente estudado. Dentre elas, ressalta-se o uso de permanganato de potássio e peróxido de hidrogênio, tais substâncias podem sofrer reações do tipo redox e afetar o consumo de dicromato de potássio adicionado. Enfatiza-se também que as amostras dos efluentes foram coletados em dias diferentes e em cenários distintos. A depender do tipo de lavagem realizada, o uso ou não destas substâncias, podem ter impactado em uma variabilidade dos resultados de DQO. Isso fica claro ao observar o cenário 3, em que houve maior remoção deste parâmetro. Neste cenário o efluente é coletado após a saída da máquina de lavar, em que houve lavagens específicas que variam entre preparo (desengomagem) e amaciamento da peça. Normalmente a lavagem por permanganato ocorre já com a peça seca e de forma manual. Os resíduos destas lavagens seguem pelos ralos até o tanque de descarte e junta-se ao efluente total que compreende a amostragem coletada para os cenários 1 e 2 que tiveram baixa remoção do parâmetro DQO. Infelizmente, não foi possível realizar a determinação de manganês nas amostras, portanto, a relação entre esses parâmetros não pode ser confirmada e minimizada durante o período de testes.

Ademais, salienta-se que embora boas porcentagens de remoção de DQO já tenham sido relatadas para membranas de ultrafiltração de PVDF, a maioria dos estudos citam a

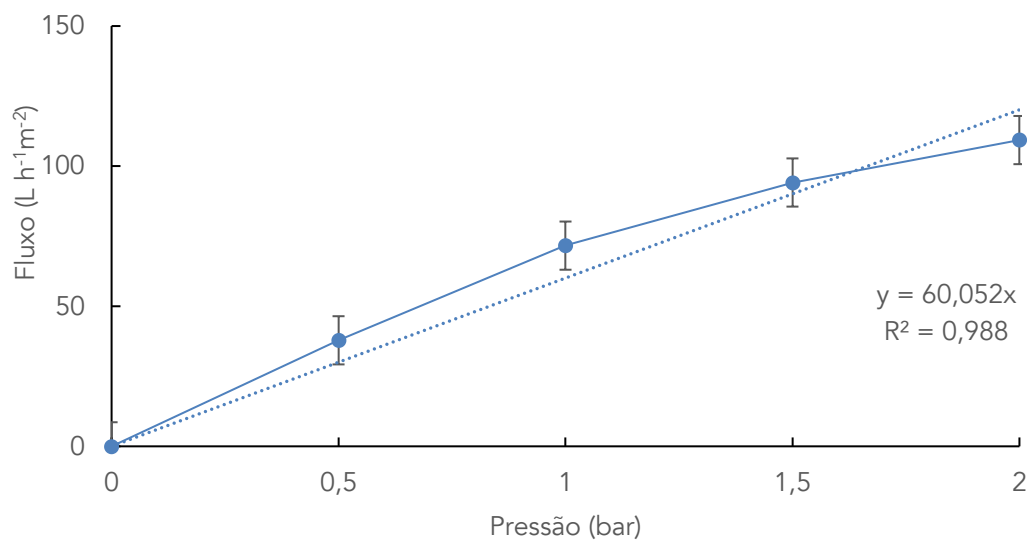
necessidade da integração de processos de ultrafiltração em conjugação com outros processos para aumentar a eficiência de separação de determinados compostos (AOUNI *et al.*, 2012; CURIC; DOLAR, 2022; NANDY *et al.*, 2007).

Como forma de avaliar a integridade da fibra após os ensaios de permeação e identificar a ocorrência de eventos de incrustações a permeabilidade hidráulica foi determinada sempre após a limpeza da membrana nos intervalos entre os testes com o efluente de lavanderia, e os resultados estão apresentados nos gráficos na Figura 40.

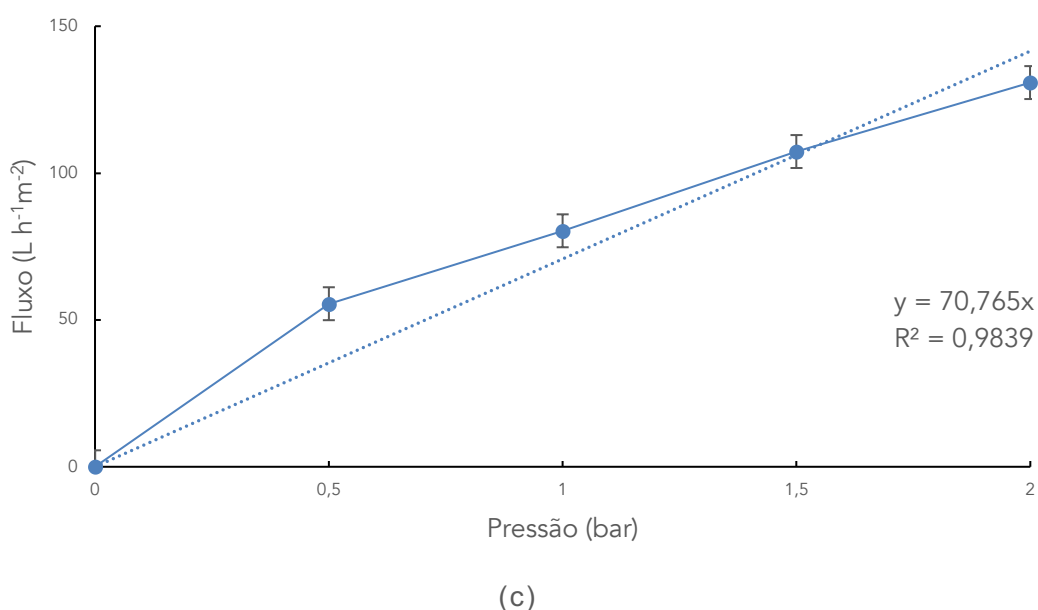
Figura 40 – Permeabilidade hidráulica após ensaios: a) Cenário 1; b) Cenário 2; c) Cenário 3



(a)



(b)



Fonte: Elaborado pela autora.

A permeabilidade hidráulica média para o Cenário 1 foi de $52 \pm 30 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ bar}^{-1}$, para o Cenário 2, $70 \pm 1 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ bar}^{-1}$ e Cenário 3, $60 \pm 17 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ bar}^{-1}$. Considerando a permeabilidade inicial, determinada para membrana virgem, $91,14 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ bar}^{-1} \pm 1$), nota-se que houve uma redução da permeabilidade hidráulica em média de 44%, 34%, e 22% para os ensaios realizados, respectivamente.

Os valores calculados para a permeabilidade hidráulica corroboram com os resultados encontrados para os parâmetros analisados para os cenários avaliados. A maior redução da permeabilidade hidráulica para o Cenário 1 teve forte influência da sua composição, visto que este efluente, apresentou dentro os outros cenários o com maior carga de sólidos e isto deve ter contribuído para uma maior formação da torta sobre a superfície da membrana refletindo em uma diminuição do fluxo permeado e consequentemente da permeabilidade hidráulica. A melhoria da qualidade dos parâmetros do efluente bruto para o Cenário 2, devido a adição do tratamento preliminar por peneira rotativa e as lavagens por ozônio refletiram também em uma baixa redução da permeabilidade hidráulica entre os ensaios. Já o cenário 3, que constitui um efluente específico da máquina de lavar, foi o que apresentou menor redução da permeabilidade hidráulica inicial para a final. Os valores calculados para a permeabilidade hidráulica corroboram com os resultados encontrados para os parâmetros analisados para os cenários avaliados.

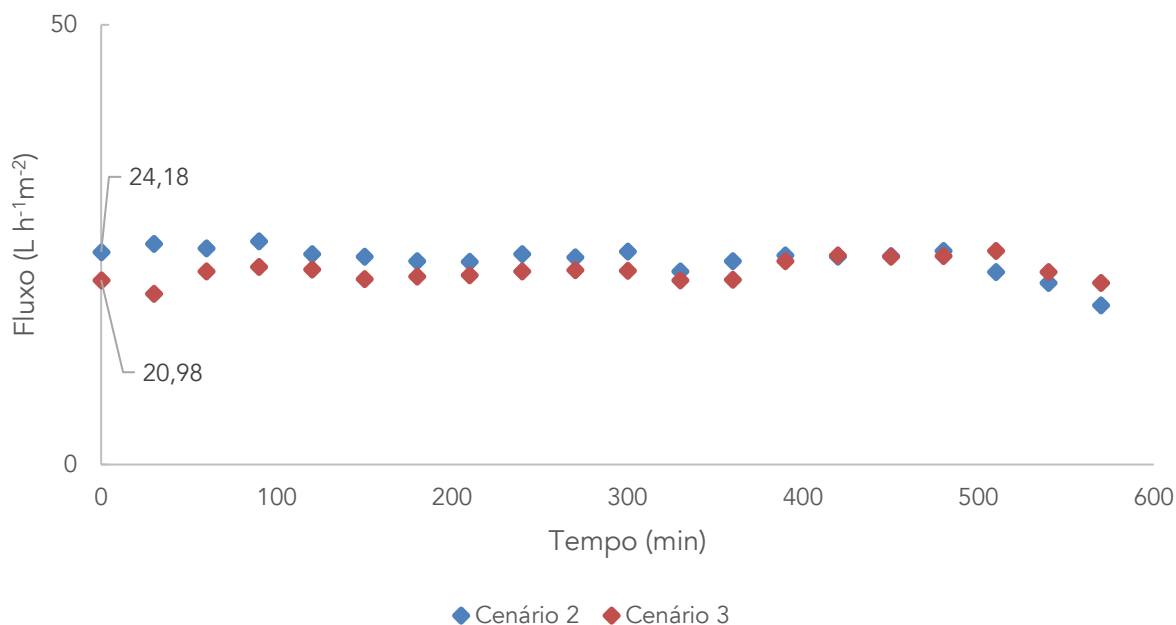
Notou-se que a permeabilidade aumenta e diminui de um cenário para outro, ou seja, que houve recuperação do fluxo permeado ao longo dos ensaios, ou seja, não é possível prever

a ocorrência de eventos reversíveis ou irreversíveis de incrustações sobre a superfície da membrana. Percebeu-se que a metodologia de limpeza da membrana utilizada pode ter influenciado no resultado da permeabilidade hidráulica. Para a limpeza de membranas de PVDF pesquisam indicam que a maior parte da incrustação pode ser removida por NaClO (DING *et al.*, 2020; PUSPITASARI *et al.*, 2010). Ding *et al.* (2020) recuperaram o fluxo de água pura em mais de 95% após a limpeza da membrana de PVDF usando as condições ideais de 0,5% em massa de NaClO, por 100 minutos, a pressão de 0,4 bar. Tal metodologia foi repetida para este estudo. A permeabilidade da membrana após a limpeza química empregada foi totalmente recuperada e chegou a atingir $130 \pm \text{L h}^{-1}\text{m}^{-2}$, comprovando que predominaram ao longo da permeação do eluente de lavanderia de jeans a presença de incrustações reversíveis. Ou seja, as incrustações da fibra oca de PDVF se mostraram reversíveis frente aos cenários investigados.

Diante dos resultados obtidos para o Cenário 1, 2 e 3 pode-se observar uma baixa eficiência na remoção de compostos solúveis por parte da ultrafiltração sendo necessária a conjugação da ultrafiltração com a nanofiltração visando uma melhor qualidade dos parâmetros físico-químicos do permeado e ampliação das possibilidades de reutilização dessa matriz.

5.4 Ensaios de Permeação Ultrafiltração conjugada com Nanofiltração

Os permeados do Cenário 2 e Cenário 3 obtidos a partir da UF foram permeados no sistema de nanofiltração (NF) com objetivo de remover sobretudo a matéria orgânica dissolvida que ainda permaneceu elevada após passagem pela ultrafiltração, além de reter íons polivalentes. Não foi possível realizar esta mesma análise para o Cenário 1 visto que este foi extinto com a alteração dos processos produtivos da lavanderia parceira. O processo de nanofiltração ocorreu em circuito fechado com recirculação do concentrado e recuperação do permeado a taxa de 50% e 75%. O sistema operou a 7 bar e vazão de $1,5 \text{ Lmin}^{-1}$. O comportamento do fluxo permeado em função do tempo está apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Comportamento fluxo permeado em função do tempo na NF

Fonte: Elaborado pela autora.

O desempenho da NF foi avaliado por meio da avaliação do fluxo permeado a cada 1 hora de operação. O fluxo médio do permeado operando a 7 bar e vazão de 1,5 Lmin⁻¹, para o Cenário 2 foi 24±2 L h⁻¹m⁻² e para o Cenário 3, 22±1 L h⁻¹m⁻². Nota-se que não houve uma alteração brusca do fluxo permeado, este permaneceu em estado estacionário ao longo do período avaliado.

Inicialmente avaliou-se os parâmetros físico-químicos dos permeados do Cenário 2 e Cenário 3 obtidos pelo processo conjugado de UF + NF, com uma taxa de recuperação de 50% do permeado para a NF. Os resultados encontrados estão listados na Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 – Parâmetros físico-químicos permeados UF+NF, Cenário 2, 50% de recuperação

Parâmetro	Identificação da Amostra	Efluente	Permeado UF+NF	Remoção (%)
Odor	Amostra 1	Ausente	Ausente	-
	Amostra 2	Ausente	Ausente	-
	Amostra 3	Ausente	Ausente	-
Turbidez NTU	Amostra 1	70,6±1	0±1	100%
	Amostra 2	42±1	0±1	100%
	Amostra 3	60,1±1	0±1	100%
pH	Amostra 1	6,56	6,46	VNC*
	Amostra 2	6,94	7,14	VNC*
	Amostra 3	6,14	7,2	VNC*
Cor (mg Pt Co L ⁻¹)	Amostra 1	41,13	0	100%
	Amostra 2	17,63	0	100%
	Amostra 3	14,33	0	100%
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	Amostra 1	890±25	350±15	61%
	Amostra 2	950±10	180±6	81%
	Amostra 3	1150±119	<LD**	100%
Cloreto (mg L ⁻¹)	Amostra 1	37±0	36±0	<1%
	Amostra 2	35±0	35±0	0
	Amostra 3	42±1	37±0	12%
Dureza (mg L ⁻¹)	Amostra 1	84±2	10±1	88%
	Amostra 2	89±1	9±1	90%
	Amostra 3	80±1	12±2	85%
Sólidos Totais (mg L ⁻¹)	Amostra 1	2777±236	97±35	96%
	Amostra 2	1430±211	200±17	86%
	Amostra 3	870±277	80±55	91%
Sólidos Dissolvidos (mg L ⁻¹)	Amostra 1	1630±174	VNC*	VNC*
	Amostra 2	330±71	VNC*	VNC*
	Amostra 3	560±1	VNC*	VNC*
Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)	Amostra 1	1147±176	VNC*	VNC*
	Amostra 2	1100±70	VNC*	VNC*
	Amostra 3	410±20	VNC*	VNC*

*VNC: valor não calculado. **LD: limite de detecção (4,92 mg O₂ L⁻¹ APHA, 2017)

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 8 – Parâmetros físico-químicos permeados UF+NF, Cenário 3, 50% de recuperação

Parâmetro	Identificação da Amostra	Efluente	Permeado UF+NF	Remoção (%)
Odor	Amostra 1	Ausente	Ausente	-
	Amostra 2	Ausente	Ausente	-
	Amostra 3	Ausente	Ausente	-
Turbidez NTU	Amostra 1	36±1	0	100%
	Amostra 2	40±1	0	100%
	Amostra 3	36±1	0	100%
pH	Amostra 1	8,56	6,46	VNC*
	Amostra 2	7,50	7,56	VNC*
	Amostra 3	8±1	7,50	VNC*
Cor (mg Pt Co L ⁻¹)	Amostra 1	12,32	0	100%
	Amostra 2	7,83	0	100%
	Amostra 3	12,17	0	100%
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	Amostra 1	1200±6	250±10	79%
	Amostra 2	880±6	370±6	58%
	Amostra 3	900±141	130±21	86%
Cloreto (mg L ⁻¹)	Amostra 1	34±0	34±0	0%
	Amostra 2	36±1	36±0	0%
	Amostra 3	35±0	34±0	<1%
Dureza (mg L ⁻¹)	Amostra 1	84±1	10±1	88%
	Amostra 2	84±1	14±1	83%
	Amostra 3	78±1	9±1	88%
Sólidos Totais (mg L ⁻¹)	Amostra 1	1083±275	170±64	84%
	Amostra 2	1490±260	120±50	92%
	Amostra 3	1287±287	380±28	70%
Sólidos Dissolvidos (mg L ⁻¹)	Amostra 1	400±95	VNC*	VNC*
	Amostra 2	360±115	VNC*	VNC*
	Amostra 3	365±196	VNC*	VNC*
Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)	Amostra 1	683±34	VNC*	VNC*
	Amostra 2	1130±502	VNC*	VNC*
	Amostra 3	922±223	VNC*	VNC*

*VNC: valor não calculado.

Fonte: Elaborado pela autora.

O sistema integrado UF+NF permitiu uma melhor eficiência de remoção para os parâmetros físico-químicos avaliados para os dois cenários, proporcionando um polimento ao efluente e visualmente uma cor cristalina.

A NF+UF permitiu melhorar significativamente a remoção da DQO obtendo até 81% de eficiência. Salienta-se que para o Cenário 2 (amostra 3), a medida da DQO do permeado foi abaixo do limite de detecção o que sugere uma remoção total deste parâmetro para esta matriz.

Devido a utilização de ozônio em algumas etapas de lavagens do Cenário 2, esperava-se alguma diferença significativa dos valores de DQO, visto que estudos indicam que a ozonização pode aumentar notavelmente a biodegradabilidade de águas residuais. Baig e Liechit (2001) citam que quando dissolvido em água, o ozônio oxida os poluentes orgânicos por oxidação direta como ozônio molecular ou por oxidação indireta através da formação de radicais livres, como radicais $\text{OH}^\cdot$. Entretanto, nota-se, que de um modo geral, os parâmetros de DQO tanto para o efluente bruto quanto para o permeado nos dois cenários 2 e 3 apresentam valores bem próximos. Tal fato indica que a utilização do ozônio como etapa de lavagem não interferiu diretamente no parâmetro da DQO.

Outros resultados satisfatórios e que também já eram esperados pelas características da nanofiltração foram a diminuição dos parâmetros de dureza, em 91%. As análises de cloretos mantiveram-se estáveis, sem grandes alterações. Apesar de avanços conquistados ao longo dos anos as membranas de nanofiltração ainda apresentam baixa retenção de sais monovalentes que varia em torno de 10 a 30% (AHMAD, *et al.*, 2023). Por fim, cita-se melhorias na remoção dos sólidos totais. A ultrafiltração já havia permitido boas remoções e a nanofiltração veio a contribuir proporcionando até 91% da remoção dos sólidos totais.

Outros resultados satisfatórios e que também já eram esperados pelas características da nanofiltração foram a diminuição dos parâmetros de dureza em 91%. As análises de cloretos mantiveram-se estáveis, sem grandes alterações. Apesar de avanços conquistados ao longo dos anos as membranas de nanofiltração ainda apresentam baixa retenção de sais monovalentes que varia em torno de 10 a 30% (AHMAD, *et al.*, 2023). Por fim, cita-se melhorias na remoção dos sólidos totais. A ultrafiltração já havia permitido boas remoções e a nanofiltração veio a contribuir proporcionando até 91% da remoção dos sólidos totais.

**Figura 42 – Efluente de lavanderia de jeans e permeado obtido pela ultrafiltração
Cenário 2.**



Fonte: Fotografia da autora (2023).

Com base nestes resultados decidiu-se avaliar também os parâmetros com uma taxa de recuperação do permeado de 75% para a NF, a fim de constatar o desempenho do sistema conjugado e melhorar recuperação da água, em termos de volume de permeado gerado, que poderá ser utilizado como água de reuso para o processo industrial. Para tanto, foi necessário a análise dos parâmetros físico-químicos do permeado considerando esse percentual de recuperação. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros físico-químicos permeados UF+NF, 75% de recuperação

Parâmetro	Identificação da Amostra	Efluente	Permeado	Remoção (%)
Odor	Cenário 2	Ausente	Ausente	-
	Cenário 3	Ausente	Ausente	-
Turbidez NTU	Cenário 2	70±1	0	100%
	Cenário 3	100±1	0	100%
pH	Cenário 2	7,58	7,62	VNC*
	Cenário 3	6,9	7,49	VNC*
Cor (mg Pt Co L ⁻¹)	Cenário 2	7,53	0	VNC*
	Cenário 3	92,93	0	VNC*
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	Cenário 2	1150±16	<LD**	VNC*
	Cenário 3	740±30	<LD**	VNC*
Cloreto (mg L ⁻¹)	Cenário 2	38±1	36±1	<1%
	Cenário 3	39±1	38±1	<1%
Dureza (mg L ⁻¹)	Cenário 2	90±4	9±1	90%
	Cenário 3	75±0	10±1	87%
Sólidos Totais (mg L ⁻¹)	Cenário 2	1057±842	10±1	99%
	Cenário 3	1113±57	27±1	97%
Sólidos Dissolvidos (mg L ⁻¹)	Cenário 2	177±19	VNC*	VNC*
	Cenário 3	353±61	VNC*	VNC*
Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)	Cenário 2	880±320	VNC*	VNC*
	Cenário 3	760±48	VNC*	VNC*

***VNC: valor não calculado. **LD: limite de detecção (4,92 mg O₂ L⁻¹ APHA, 2017)**

Fonte: Elaborado pela autora.

As análises dos permeados após a conjugação da UF com a NF e com 75% de recuperação do permeado se assemelham aos resultados obtidos para recuperação de permeado em 50%. Destaca-se uma boa remoção no parâmetro DQO e de sólidos totais para os dois cenários. Os principais mecanismos de separação da membrana de nanofiltração envolvem a exclusão por tamanho e uma interação eletrostática entre a membrana e a solução. Autores citam que a retenção, como a de traços orgânicos, seja influenciada pela química da solução, como pH e força iônica (DRIOLI; GIORNO, 2016). Com base nos resultados obtidos, identifica-se que a separação na membrana de nanofiltração não foi afetada negativamente pelos aspectos citados o que possibilitou essa boa eficiência na remoção dos parâmetros físico-químicos investigados.

A permeabilidade hidráulica da membrana de nanofiltração foi avaliada após os ensaios com taxa de recuperação de 50% e 75% e após a lavagem da membrana com água destilada.

Como observado na Tabela 10 não houve variações significativas no seu valor, indicando que não ocorreram eventos irreversíveis de incrustações na membrana com a filtração do permeado oriundo da ultrafiltração.

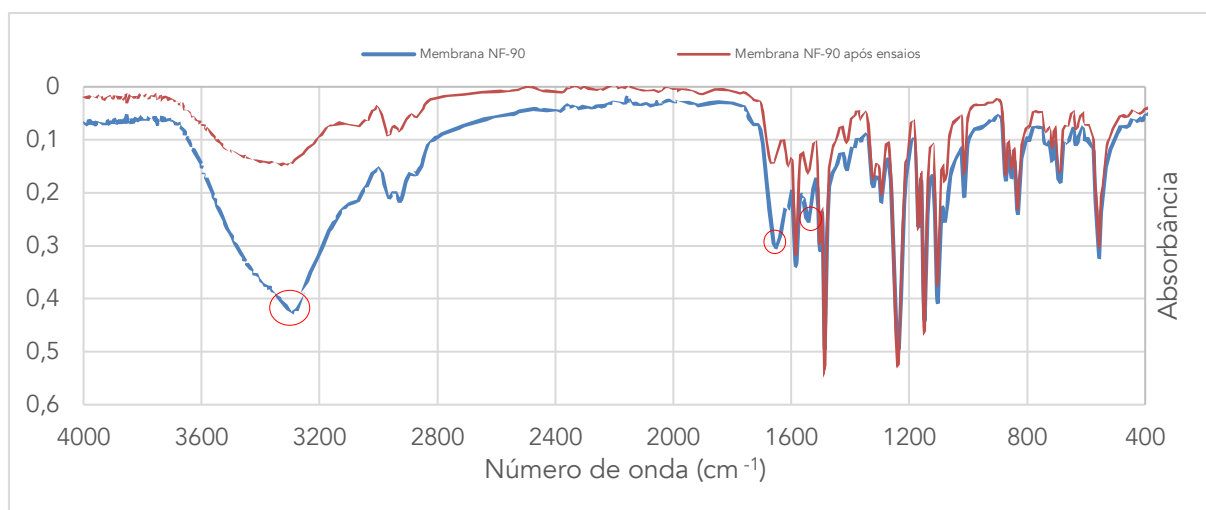
Tabela 10 – Permeabilidade hidráulica NF

Taxa de recuperação	Unidade	Inicial	Final
50%	$L\ h^{-1}m^{-2}\ bar^{-1}$	$4,62\pm1$	$4,61\pm1$
75%		$4,98\pm1$	$4,96\pm1$

Fonte: Elaborado pela autora.

Após os ensaios de permeação e análise da permeabilidade hidráulica da membrana de nanofiltração, esta foi levada para análise no espectrômetro infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) com o intuito de investigar se havia alguma modificação química em sua superfície. A análise de FTIR fornece evidências da presença de grupos funcionais presentes na estrutura de uma substância podendo ser utilizada na identificação de um composto ou para identificar a sua composição química. O espectro obtido por FTIR da membrana NF-90 está apresentado na Figura 43. Para efeitos de comparação realizou-se a análise do branco que é a membrana virgem (curva azul) e da membrana após os ensaios (curva vermelha). Neste caso, o objetivo era identificar qualquer substância presente na superfície de membrana.

Figura 43 – Espectro FTIR da membrana NF-90 após ensaios

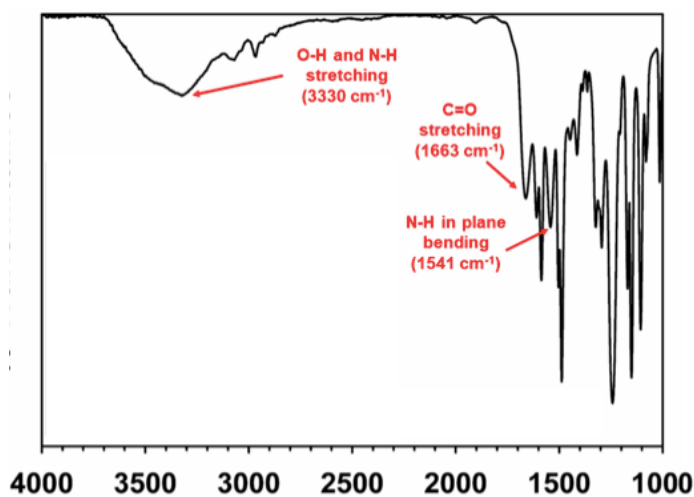


Fonte: Elaborado pela autora.

A membrana comercial NF-90 utilizada neste trabalho é uma membrana composta de uma película fina de poliamida, que são polímeros de cadeia molecular longa contendo o grupo amina (JUN *et al.*, 2019). Na Figura 43, curva azul, é possível observar a estrutura intrínseca

desta membrana. Os picos FTIR característicos relacionados à poliamida (circulados em vermelho no gráfico) referem-se as vibrações de alongamento O-H/N-H em 3330 cm^{-1} , a vibração de alongamento C=O em 1663 cm^{-1} e a flexão no plano N-H em 1541 cm^{-1} . Jun *et al.* (2019) caracterizou uma membrana de nanofiltração de poliamida, as curvas encontradas se assemelham a análise de FTIR realizada, conforme demonstra a Figura 44.

Figura 44 – Estrutura membrana NF-90 caracterizada por FTIR



Fonte: Adaptado de Jun *et al.* (2019).

É notório que os picos da FTIR encontrados para a NF-90 após os ensaios não demonstram outros picos de grande relevância, não sendo possível identificar qualquer substância na superfície da membrana ou ainda qualquer alteração de sua estrutura. Possivelmente o processo de ultrafiltração como pré-tratamento para a nanofiltração proporcionou ao processo maior sustentabilidade, ou seja, menor possibilidade de ocorrência de incrustações reversíveis.

5.5 Análise do Desempenho do Processo de Separação por Membranas para fins de reúso.

O tratamento de efluente utilizado pela lavanderia de *jeans* investigada tem como base processos convencionais de separação físico-químicos e biológicos. Estes tratamentos necessitam do uso frequente de produtos químicos, grande área construída e variadas etapas para que o efluente atinja padrões de descarte. Dentre as substâncias químicas que são diariamente utilizadas nestes tratamentos estão o policloreto de alumínio, soda ou alcalinizante (para ajuste do pH), polímeros e biocidas. Além disso, estes tratamentos promovem a geração de um lodo, que deve ser descartado de maneira adequada, gerando custos adicionais. Devido a estes aspectos, ambientalmente, tais tratamentos podem ser

considerados processos desinteressantes e obsoletos já que fazem uso de grande quantidade de químicos e apenas transferem a matéria poluente contida nos efluentes de um local para outro devido.

A indústria parceira ainda não realiza a prática do reúso em suas instalações. Como já mencionado ao longo deste estudo, o setor têxtil, devido à alta demanda hídrica necessitada para os seus processos, uso intensivo de produtos químicos e a alta geração de resíduos líquidos tornaram-se, dentre as indústrias, uma das mais poluentes da atualidade. Neste contexto, a gestão sustentável da água é questão de sobrevivências neste negócio. Ampliar o tratamento de efluentes, reciclagem e tecnologias adequadas para fins de reúso constituem metas da atualidade com base nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS).

A lavanderia que fica localizada na região metropolitana de Belo Horizonte tem o seu abastecimento totalmente dependente da concessionária, que tem como principal fonte de abastecimento a Bacia do Rio Paraopeba. Nos últimos anos tem sido observado que esta bacia tem sofrido grandes alterações no seu regime hidrológico influenciada pelas atividades antrópicas. Sendo as indústrias de transformação uma das principais responsáveis em volume de captação de água desta bacia, com 36% (ANA, 2022; IB CONSULTORIA E GESTÃO AMBIENTAL EIRELI, 2022; PBH, 2016). Tendo em vista este cenário incerto, a empresa deve estar atenta a gestão de água coletada para conservar os recursos hídricos e garantir a sustentabilidade dos empreendimentos, especialmente em épocas de possíveis escassez. A Confederação Nacional das Indústrias (2020) destaca que o uso de água de reúso nas indústrias é alternativa eficiente para garantir abastecimento de água nas indústrias mesmo durante crises hídricas e trazer maior competitividade e/ou redução de custos relativos à obtenção de água.

Muitas lavanderias de *jeans* vêm adotando a prática de reúso aplicando as técnicas convencionais de tratamento. Entretanto, tem-se se identificado que os tratamentos de efluentes comumente aplicados no Brasil tem sido considerado ineficientes nem mesmo para o despejo seguro dos efluentes conforme exige a legislação atual, quem dirá para serem reutilizados (ANA, 2017).

Silva e Xavier (2020) analisaram a implementação de reúso em lavanderias de *jeans* do agreste Pernambucano. A principal forma de tratamento escolhido foram os métodos físico-químico e biológicos. Os autores salientam que o sistema empregado para a reciclagem da água apesar de ser eficiente no que se propõe, se encontra ultrapassado, visto que apenas transfere a matéria poluente contida nos efluentes de um local para outro. Sendo necessário

buscar novas tecnologias avançadas. Junior (2022) em seu estudo também avaliou o reúso realizado nas lavanderias de *jeans* no agreste Pernambucano. As tecnologias aplicadas podem apresentar uma economia, no entanto, devido o método empregado, que consiste na separação de partes sólidas e líquidas através da adição de coagulantes não permite que toda água seja reutilizada já que estes tratamentos não permitem tratar a água de maneira eficiente.

Outra questão, muito explorada sobre estes tratamentos visando o reúso é a necessidade de grande área construída para armazenamento do lodo, despejo deste resíduo e tempo longo para finalizar o processo. Informações citadas pela Universidade Federal Rural de Pernambuco indicam que algumas lavanderias de grande porte da região de Pernambuco conseguem reutilizar água por tratamentos que se assemelham a o utilizado na lavanderia parceira como a coagulação floculação, para isto a água passa inicialmente por sistemas de gradeamento ou filtração. (MARCO ZERO CONTEÚDO, 2022).

Filho *et al.*, (2021) que também avaliara o reúso de águas de lavanderias localizadas no Arranjo Produtivo Local de Confecção do Agreste Pernambucano frisa a relevante necessidade de adoção de sistemas de tratamentos específicos de forma a garantir a possibilidade de reúso visto que a maioria destas lavanderias não o realizam de forma adequada. Ficou ainda evidenciado, que quando maior o reúso de água, menor é o custo da peça produzida corroborando com a importância da implantação de tecnologias adequadas para ampliação da prática de reúso nestas atividades industriais.

Os bons resultados dos parâmetros físico-químicos encontrados no presente estudo, aplicando os processos de separação por membranas, para os permeados indicam uma boa eficiência dos processos de separação estudados e possibilidade de reutilização desta água industrial nos processos da lavanderia. É notável a sustentabilidade conquistada, apenas com um processo físico de separação e sem que haja o uso de químicos, pode-se conquistar ótimos parâmetros de turbidez, remoção de cor, sólidos e DQO. Tais parâmetros estão dentre os principais abordados quando se deseja avaliar a qualidade da água. Além disso, cita-se a possibilidade de redução de produção de lodo, área construída e tempo de processo. Fica comprovado que os processos de separações por membranas aqui investigados são capazes de suprir as deficiências encontradas pelos tratamentos convencionais e ainda produzem uma água de qualidade possível de reutilização para as lavanderias de jeans.

Os ciclos realizados com a técnica de ultrafiltração possibilitaram melhorias significativas nos parâmetros avaliados para o efluente. Variados estudos foram conduzidos com membranas

convencionais de ultrafiltração para remover contaminantes como cor, turbidez em efluentes têxteis. Jiang *et al.* (2018) avaliaram membranas de ultrafiltração com pontos de cortes variados (entre 17 e 60 kDa) e obtiveram uma média 97% para remoção de cor. Damas *et al.* (2012) ao estudar membranas cerâmicas comerciais de ultrafiltração conquistaram remoções superiores a 99% e 98% de turbidez e cor respectivamente. Srivastava *et al.* (2011) investigaram o uso de membranas modificadas de PVDF para reutilização de efluentes secundários de efluentes têxteis e comprovaram a eficiência destas membranas na separação e purificação de corantes e reutilização destas águas. Os resultados citados para estas membranas convencionais corroboram os dados encontrados nesta pesquisa. A aplicação da membrana de PVDF recém-fabricada em efluente de lavanderia de *jeans* comprova a eficiência desta membrana nacional, principalmente para remoção da cor e turbidez.

A lavanderia de *jeans* abastece os seus processos produtivos com água, por meio da COPASA, que disponibiliza os parâmetros de qualidade em seu site, pelo Relatório de Qualidade da Água, considerando a edição mais atualizada a do ano de 2022. Quanto aos parâmetros físicos, a concessionária verifica a cor e a turbidez. Para o parâmetro cor, o limite é de 15 mg L⁻¹, já para a turbidez esse valor é de 5,0 NTU (COPASA, 2022). Como se trata de uma reutilização em processos de lavagens a qualidade da água não necessariamente precisa ser de alta qualidade. Além disso, muitas lavagens são realizadas em altas temperaturas que podem chegar de 70°C a 100°C (PAUL, 2015). O calor úmido pode ser considerado um tipo de esterilização, que pode matar as formas vegetativas dos patógenos bacterianos, vírus, fungos e esporos (ARCHANJO *et al.*, 2012).

Outros aspectos avaliados pela COPASA é a quantidade de cloro e fluoreto. Tais parâmetros são obrigatórios para a distribuição da água. O cloro é adicionado a água tratada e atua como uma segurança adicional contra eventuais contaminações já o fluoreto é adicionado para colaborar com a diminuição da carie dental. Estes podem ser considerados irrelevantes para a qualidade da água a ser utilizada nas lavagens *jeans* (COPASA, 2022).

Após a análise dos parâmetros de qualidade fornecidos pela concessionária avalia-se que os principais parâmetros de qualidade a serem avaliados para utilização na lavanderia seriam a turbidez e a cor. Considerando o processo de separação proposto neste estudo, para os 3 cenários avaliados, com apenas a membrana de ultrafiltração, conquistou-se 100% de remoção da turbidez e cor da água de lavanderia. Ou seja, a fibra de PVDF investigada é eficiente para se conquistar parâmetros adequados para possíveis fins de reúso.

O processo conjugado UF e NF permitiu um polimento do permeado ampliando as possibilidades de reutilização desta água industrial. A recuperação de 75% comprovado pelo processo de NF aumenta os ganhos de água reutilizada. Na literatura é possível encontrar estudos que comprovam o uso da água industrial obtida por PSM em etapas de beneficiamento têxtil. Agtas *et al.* (2020), por exemplo, utilizaram um sistema de membrana de UF/NF de cerâmica em escala piloto em efluentes têxteis. Os resultados se assemelham com os parâmetros de qualidades aqui encontrados (remoção 89% e 83,5% para demanda química de oxigênio e cor, respectivamente). O efluente tratado foi testado e pode ser reutilizado para processos de tingimento.

Requisitos de qualidade da água para uso nas etapas de beneficiamento têxtil, citados pela Confederação Nacional das Indústrias (2017) estão descritos na Tabela 11 comparados com os parâmetros dos permeado obtidos neste estudo. Analisando os dados, possivelmente o reúso pode ser possível tendo cuidado com as etapas de tingimento, visto que esta etapa exige um maior cuidado, mas etapas de acabamento, sobretingimentos, redução de cor, e acabamento final permitem maior flexibilidade (FERNANDES, 2010).

Tabela 11 – Requisitos de qualidade da água para uso na indústria têxtil

Processo	Cor				pH	Sólidos totais*	Sólidos suspensos*
	mg-Pt-CoL ⁻¹	Dureza*	Ferro*	Manganês*			
Branqueamento	5	25	0,1	0,01	2,0-10,5	100	5
Engomagem	5	25	0,3	0,05	6,5-10,0	100	5
Lavagem	5	25	0,1	0,01	3,0-10,5	100	5
Tingimento	5	25	0,1	0,01	3,5-10,0	100	5
UF	Atende	Atende	VNC**	VNC**	Atende	Não atende	Atende
UF + NF	Atende	Atende	VNC**	VNC**	Atende	Limite	Atende

*Unidade -mgL⁻¹. **VNC = valor não calculado.

Fonte: CNI (2017).

Para este estudo não foram possíveis realizar a análises de ferro e manganês, entretanto na literatura estudos mostram que apenas a ultrafiltração pode ser eficiente para remoção destes elementos. Ye *et al.*, (2022) analisam uma membrana de ultrafiltração para remoção de ferro, manganês e amônia. O estudo comprova a eficiência de remoção destes elementos, atingindo até 99,6%, por exemplo, para remoção de manganês.

Na indústria têxtil, a qualidade da água deve ser suficientemente para evitar problemas no processo e na qualidade do produto final. Embora atualmente seja utilizada água pura, que vem da concessionária, salienta-se a possibilidade de ser usada água de qualidade inferior sendo que os requisitos de qualidade da água dependem do processo. Considerando os bons resultados aqui encontrado sugere-se testes pilotos para comprovação do reúso e ajustes dos parâmetros e além disso, em algumas situações, em que os permeados apresentam características bastantes próximas aos requisitos de qualidade exigidos para as determinadas aplicações, sugere-se promover a sua mistura com a água proveniente do sistema de abastecimento, de maneira a adequar as características do efluente aos requisitos do processo. Segundo a CNI (2017), essa ação reduz a demanda de água proveniente do sistema de abastecimento e reduz a geração de efluentes de forma proporcional.

A vazão de efluente gerado diariamente na lavanderia de *jeans* parceira é em média de $16\text{m}^3\text{h}^{-1}$, considerando a entrada igual a saída de efluentes esta lavanderia demanda em média cerca de 11.680 m^3 de água potável mensalmente. Com base na Resolução ARSAE-MG n.173, de 24 de novembro de 2022, que aprovou o reajuste tarifário da Companhia de Saneamento de Minas Gerais, o custo do abastecimento para a indústria em $\text{R\$/m}^3$, para valores maiores que 200 m^3 é de $\text{R\$ } 16,55$. Considerando este valor, sem relacionar outros aspectos tarifários relacionados a atividade industrial (a industriais ainda devem pagar taxa de esgoto) o gasto mensal com este recurso fica em torno de $\text{R\$ } 193.304,00$ reais mensais. Com apenas o investimento da tecnologia de ultrafiltração e uma recuperação de 50% do efluente tratado, por exemplo, a indústria teria uma economia de 50% com os gastos hídricos potáveis. Sendo os ganhos ambientalmente ainda muito maiores, já que proporcionaria a preservação e qualidade dos recursos hídricos e menor geração de efluente para a rede coletora. Bastian (2019) cita que o reúso reduz o custo do processo uma vez que a água de reúso é cerca de 75% mais barata que a água potável e ainda há uma redução do custo da parcela de captação referente a cobrança pelo uso da água.

Cita-se também a possibilidade de reúso para atividades menos nobres. A água industrial poderia ser estocada mesmo que em períodos determinados para serem reutilizadas nas lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção de lagos e canais para fins paisagísticos, bem como para descarga dos vasos sanitários. Ou ainda, serem reutilizadas nas caldeiras, por meio de adequação da qualidade da água com utilização de abrandador, bombas e dosadores (BASTIAN, 2019).

Interessante destacar, neste estudo, é a avaliação de diferentes cenários de coleta do efluente. O uso de ozônio nas lavagens de *jeans* tem sido uma tendência e sua aplicação

tende a ser ampliada nos próximos anos. Esta adequação no processo da lavanderia, de certa forma, trouxe ao permeados melhorias aos parâmetros de qualidade avaliados o que pode contribuir para o reúso neste setor industrial. Já o cenário 3, onde foram coletadas amostras de lavagens específicas da máquina de lavar notou-se um permeado com ótima qualidade. Considera-se como viável a implantação de sistemas de filtração por membrana em escalas menores a fim de tratar o efluente das máquinas de lavar e reutilizá-lo nas lavagens posteriores.

Os resultados dos parâmetros investigados foram agrupados e comparados com estudos relacionados ao uso de processos de separação por membranas em efluentes têxteis, sendo alguns específicos sobre reúso, bem como literaturas que tratam de critérios de qualidade da água para reúso na indústria têxtil (Tabela 12). Nota-se que os resultados encontrados nesta investigação corroboram com os resultados encontrados neste estudo. Espera-se que tais parâmetros aqui avaliados contribuíssem com a análise de parâmetros para reúso em indústrias têxteis e ampliação do uso dos processos de separação por membrana para tal fim visto a sua viabilidade demonstrada.

Tabela 12 – Parâmetros físico-químicos dos permeados comparados com a literatura encontrada sobre PSM e efluentes têxteis

Processo	Turbidez NTU	pH	Cor (mgPt- CoL ⁻¹)	DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	Cloreto (mg L ⁻¹)	Dureza (mg L ⁻¹)	Sólidos Totais (mg L ⁻¹)	Sólidos Dissolvidos (mg L ⁻¹)	Referência
Ultrafiltração	3±1	7,23	VNC*	3703±416	122±6	50±1	90±1	90±1	Autora
Ultrafiltração	0	7,6	0	879±6	26±1	63±3	190±7	90±7	Autora
Ultrafiltração	0	7,91	0	390±10	34±1	81±0	120±1	120±1	Autora
Ultrafiltração + Nanofiltração	0	7,2	0	<LD**	37±0	12±2	80±55	80±55	Autora
Ultrafiltração + Nanofiltração	0	7,50	0	130±21	34±0	9±1	380±28	380±28	Autora
Ultrafiltração + Nanofiltração	0	7,62	0	<LD**	36±1	9±1	10±1	10±1	Autora
Ultrafiltração	1,01	8,36	-	68	-	-	9	590	Luogo et al. (2022)
Ultrafiltração	3,57	-	-	-	-	-	18,2	-	Curic e Dolar (2022)

Ultrafiltração	-	7,9	200	237	249	-	-	-	Buscio et al. (2015)
Microfiltração	-	7,9	-	55	-	-	-	-	Alvarenga (2009)
Microfiltração + Nanofiltração	-	7-11	0	612	-	-	-	-	Couto (2016)
Qualidade de água industrial têxtil	0,63	-	-	-	-	-	54,95	-	Freitas (2002)
Recomendações para água de reúso de tingimento	-	6,5 - 7,5	Não visível	-	-	-	20-50	-	Vajnhandl e Valh (2014)
Recomendação para água de reúso para tingimento	-	6,5-8,0	-	0 a 160	100-300	-	-	100 a 1000	Li and Zhao (1999)
Valores de referência para água de reúso na industrial têxtil	1	6-8	Não visível	60-80	-	-	-	500	Barredo-Damas et al. (2010)
Ultrafiltração	155,7	-	-	96	-	-	-	407	Johari et al. (2022)
Critérios de reúso tingimento de algodão	15	6-8	0-20	8-40	-	-	-	-	Alcaina-Miranda et al. (2009)

Ultrafiltração	0,1-07	6,77- 7,2	-	589-70	-	-	-	2710-3200	Samuchiwal; Bhattacharya; Malik (2021)
Nanofiltração	Baixo	12	Baixa	150	-	-	-	3200	Chandrasekhar; Sahu; Sridhar (2021)

***VNC: valor não calculado. **LD: limite de detecção (4,92 mg O₂ L⁻¹ APHA, 2017)**

Fonte: Elaborado pela autora.

6 CONCLUSÃO

As etapas de caracterização realizadas na fibra de PVDF foram primordiais para um conhecimento aprofundado das características da membrana. Os resultados da microscopia eletrônica de varredura juntamente com o teste de rejeição ao soluto atestaram que a membrana apresenta propriedades semelhantes a uma membrana de ultrafiltração com um ponto de corte de 66kDa.

A permeação do efluente de lavanderia de *jeans* na membrana de UF foi considerada desafiadora devido à complexidade deste efluente e da elevada carga de sais e íons. Contudo, o sistema de permeação apontou uma boa estabilidade para testes em maiores durações com variadas amostras do efluente e em cenários distintos de coleta. Isto foi observado nos ensaios com operação em que o sistema chegou a operar em intervalos de até 8 horas ininterruptas.

Os permeados dos efluentes de lavanderias de *jeans* aplicando a ultrafiltração obtiveram ótimas melhorias nos parâmetros de cor, turbidez e sólidos. Sendo possíveis resultados de redução da turbidez e cor de até 100%, e para sólidos totais de até 89%. As avaliações da permeabilidade hidráulica indicaram que após limpeza química com NaClO, o fluxo permeado foi recuperado indicando que se eventos de incrustações ocorreram, estes foram de predominantemente reversíveis. O processo de ultrafiltração, como esperado, foi pouco efetivo para a remoção de íons, visto que membranas de UF não apresentam boa eficiência para reter sais e íons.

Dentre os cenários avaliados, o Cenário 1 apresentou menor fluxo permeado nos ensaios de ultrafiltração. Dentre as justificativas para este menor fluxo permeado, destaca-se o tratamento utilizado nesse cenário, composto pela coagulação/floculação, com uma etapa preliminar simples de gradeamento. Já no Cenário 2 os efluentes foram coletados após peneira rotativa com escova, que foi implantada como melhoria no tratamento de efluentes da lavanderia parceira. A peneira rotativa proporcionou maior remoção destes sólidos e contribuiu para melhores condições de fluxo para o processo de ultrafiltração, minimizando a formação de torta sobre a superfície da membrana. Tratamentos preliminares adequados podem favorecer, portanto, maior vida útil da membrana, diminuindo processos reversíveis de incrustações e confirma-se como essencial a ser implantado anterior aos processos de separação por membrana. Comparando-o com o Cenário 1, a utilização do ozônio no Cenário 2 pode ter influenciado na qualidade final do efluente e proporcionado uma melhoria do fluxo permeado.

O processo conjugado da ultrafiltração com nanofiltração proporcionou melhorias significativas nos parâmetros físico-químicos analisados para os permeados atingindo até 100% para remoção de DQO e 96% dos sólidos totais. Destaca-se para a recuperação de 75% conquistada pelo processo de NF permitindo melhorar o desempenho do processo industrial em termos de volume de permeado gerado que poderá ser utilizado como água de reuso. O fluxo deste processo manteve-se constante ao longo dos ensaios. Os cálculos da permeabilidade hidráulica indicaram baixa ocorrência de eventos de incrustações. O espectro obtido por FTIR da membrana NF-90 após os ensaios não indicaram qualquer alteração química na superfície da membrana. Constata-se que o pré-tratamento com ultrafiltração promoveu maior sustentabilidade para o processo de nanofiltração.

A aplicação da membrana de PVDF recém-fabricada em efluente de lavanderia de *jeans* comprova a eficiência desta membrana nacional, principalmente para remoção da cor e turbidez quando aplicada em efluentes têxteis. Considerando os bons parâmetros conquistados pela fibra oca sugere-se testes pilotos para comprovação do seu uso direto para fins de reúso, visto que os requisitos de qualidade da água utilizada nos processos da lavanderia de *jeans* dependem do tipo de lavagem a ser realizada.

Os processos de separação propostos neste estudo e a conquista de bons parâmetros de qualidade dos permeados indicam que o uso direto de membranas de ultrafiltração e ultrafiltração conjugada com nanofiltração constituem alternativa para o tratamento de efluentes de lavanderia de *jeans* e permitem a reutilização da água industrial. Caso os PSM fossem implantados, na indústria de lavanderia de *jeans*, limitações encontradas nos tratamentos convencionais poderiam ser extintas, visto que permitiria a redução no uso de químicos, redução nas etapas de tratamento, área construída, redução na geração de lodo, bem como tempo de tratamento proporcionando um processo muito mais sustentável.

Salienta-se o potencial de recuperação do corante índigo. Sugere-se a análise desta recuperação por meio da fibra de ultrafiltração de PVDF em trabalhos futuros. Ao longo das permeações com o efluente de lavanderia identificou-se esta possibilidade de recuperação do corante índigo no concentrado. Após a limpeza da membrana de ultrafiltração notou-se a saída de grande quantidade de corante, que é insolúvel.

7 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Estudo da Agência Nacional de Águas aborda uso da água no setor industrial**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/noticias/estudo-da-agencia-nacional-de-aguas-aborda-uso-da-agua-no-setor-industrial/>. Acesso em: 25 fev. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Outros sistemas hídricos: Paraopeba**. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/outros-sistemas-hidricos/paraopeba>. Acesso em: 10 ago. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <https://pnsh.ana.gov.br/home>. Acesso em: 25 fev. 2023.
- AGÊNCIA REGULAMENTADORA DE SERVIÇOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO DE MINAS GERAIS. **Resolução ARSAE-MG n.173, de 24 de novembro de 2022**. Aprova reajuste tarifário da Companhia de Saneamento de Minas Gerais e dá Providências. 2022. Disponível em: http://www.arsae.mg.gov.br/wp-content/uploads/2022/06/Resolucao_Arsae_173_2022_Reajuste_Copasa.pdf. Acesso em: 20 mar. 2023.
- AGRESTE pernambucano tem mais de 800 lavanderias e nem 40% delas tratam a água da produção do jeans. **Globo Repórter**, 24 jul. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/globo-reporter/noticia/2022/07/24/agreste-pernambucano-tem-mais-de-800-lavanderias-e-nem-40percent-delas-tratam-a-agua-da-producao-do-jeans.ghtml>. Acesso em: 20 out. 2022.
- AGTAS, M. *et al.* Hot water recovery and reuse in textile sector with pilot scale ceramic ultrafiltration/nanofiltration membrane system. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120359, 2020.
- AGUIAR, A. O.; ANDRADE, L. H.; RICCI, B. C., *et al.* Gold acid mine drainage treatment by membrane separation processes: An evaluation of the main operational conditions. **Separation and Purification Technology**, v. 170, p. 360-369, 2016.
- ALARDHI, S. M.; ALRUBAYE, J. M.; ALBAYATI, T. M. Hollow fiber ultrafiltration membrane for methyl green dye removal. **Engineering and Technology Journal**, v. 38, n. 7, p. 1077-1083, 2020.
- ALCAINA-MIRANDA, M. I. *et al.* Nanofiltration as a final step towards textile wastewater reclamation. **Desalination**, v. 240, n. 1-3, p. 290-297, 2009.
- ALIBEIGI-BENI, S. *et al.* Design, and optimization of a hybrid process based on hollow-fiber membrane/coagulation for wastewater treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 8235-8245, 2021.
- ALVARENGA, R. N. **Tratamento de efluente têxtil através de processos redox e separação com membranas combinados**. 2009. Dissertação (Mestrado em Processos Catalíticos e Bi catalíticos) - Universidade de São Paulo, Lorena, 2009.
- ANADÃO, P. **Ciência e tecnologia de membranas**. São Paulo: Artliber Editora, 2010.
- AOUNI, A. *et al.* Reactive dyes rejection and textile effluent treatment study using ultrafiltration and nanofiltration processes. **Desalination**, v. 297, p. 87-96, 2012.

AQUAPOLO. **Águas industriais**: processo de produção. São Paulo: Aquapolo, 2023. Disponível em: <http://www.aquapolo.com.br/processo-producao/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

ARCHANJO, A. B. *et al.* Métodos de esterilização utilizados na indústria farmacêutica, farmácias, laboratórios e clínicas veterinárias. **Pubvet**, v. 6, n. 36, p. 1482, 2012.

ARJUN, D.; HIRANMAYEE, J.; FARHEEN, M. N. Technology of industrial denim washing review. **International journal of Industrial Engineering e Technology**, v.3, n. 4, p. 25-34, 2013.

ARYANTI, P. T. P. *et al.* Preparation of Highly Selective PSf/ZnO/PEG400 Tight Ultrafiltration Membrane for Dyes Removal. **Journal of Applied Polymer**, v. 139, n. 33, p. e52779, 2022.

ASLAM, M. *et al.* Membrane bioreactors for wastewater treatment: a review of mechanical cleaning by scouring agents to control membrane fouling. **Chemical Engineering Journal**, v. 307, p. 897-913, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **Perfil do Setor**. São Paulo: ABIT, 2022. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 10 abr. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Guia de implementação**: normas para confecção de jeans. Rio de Janeiro: ABNT; Sebrae, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-9800**: Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

AZEVEDO, L. **11 Marcas de Raw Denim Que Você Precisa Conhecer**. [S. l.]: Só queria ter um, 2017. Disponível em: <https://www.soqueriaterum.com.br/onde-comprar-raw-denim/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

BAIG, S.; LIECHTI, P. A. Ozone treatment for biorefractory COD removal. **Water Science Technology**, v. 43, n. 2, p.197-204, 2001.

BARREDO-DAMAS, S. *et al.* Application of tubular ceramic ultrafiltration membranes for the treatment of integrated textile wastewaters. **Chemical Engineering Journal**, v. 192, p. 211-218, 2012.

BASILE, A.; FIGOLI, A.; KHAYET, M. **Pervaporation, Vapour Permeation and Membrane Distillation**: Principles and Applications. Sawston: Woodhead Publishing, 2015.

BASTIAN, E. Y. O. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil**. São Paulo: CETESB:

BENDER, A. F.; SOUZA, J. B.; VIDAL, C. M. S. Tecnologias avançadas de tratamento visando à remoção de cor e fenol de efluente de indústria de celulose e papel. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, p. 571-582, 2019.

BERNARDINI, G. F. **Estudo bibliométrico sobre os processos de separação por membranas no Brasil**. 2021. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

BHARAGAVA, R. N.; CHOWDHARY, P. **Emerging and eco-friendly approaches for waste management**. Singapore: Springer, 2019.

BHATIA, D. *et al.* Biological methods for textile dye removal from wastewater: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 13, p. 1836-1876, 2017.

BORSI, I. *et al.* Optimization of hollow fibers membrane wastewater treatment: An experimental study. **Desalination**, v. 302, p. 80-86, 2012.

BOSTON CONSULTING GROUP. **Pulse of the fashion industry report**: 2019 update. Boston, BCG, 2019. Disponível em: https://web-assets.bcg.com/img-src/Pulse-of-the-Fashion-Industry2019_tcm9-237791.pdf. Acesso em: 16 mai. 2022.

BRASIL. Governo do Estado do Ceará. **Lei n. 16.033, de 20 de junho de 2016**. Dispõe sobre a política de reúso de água não potável no âmbito do estado do Ceará. Disponível em: <https://www2.al.ce.gov.br/legislacao5/leis2016/16033.htm>. Acesso em: 22 jun. 2022.

BRASIL. **Lei n. 14.026/20, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei n. 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília: Presidência da República, 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>. Acesso em: 25 fev. 2023.

BRUCHET, A.; LAINE, J. M. Efficiency of membrane processes for taste and odor removal. **Water Science and Technology**, v. 51, n. 6-7, p. 257-265, 2005.

BRUIJN, J. P. F. *et al.* Ultrafiltration performance of Carbosep membranes for the clarification of apple juice. **LWT - Food Science and Technology**, v. 36, n. 4, p. 397-406, 2003.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2ed. rev. São Paulo: Person Prentice Hall, 2008.

BUSCIO, V. *et al.* Reuse of textile wastewater after homogenization–decantation treatment coupled to PVDF ultrafiltration membranes. **Chemical Engineering Journal**, v. 265, p. 122-128, 2015.

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

CHAIM, M. S. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil**. Belo Horizonte: FIEMG; FEAM, 2013. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_textil.pdf. Acesso em: 10 dez. 2021.

CHANDRASEKHAR, S. S; SAHU, N.; SRIDHAR, S. Treatment of Textile Industrial Wastewater using Hydrophilized Polyamide Nanofiltration Membrane for Water Recovery and reuse. **Journal of Water Pollution & Purification Research**, v. 8, n. 3, p. 31-36, 2021.

CHEN, V. *et al.* Comparative study on the treatment of raw and biological treated textile effluents through submerged nanofiltration. **Journal of Environmental Management**, v. 284, p. 121-129, 2015.

CHEN, W., *et al.* Fluorescence excitation– emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter. **Environmental science & technology**, 37, n. 24, p. 5701-5710, 2003.

CHEN, Z. *et al.* Sustainability evaluation and implication of a large-scale membrane bioreactor plant. **Bioresource Technology**, v. 269, p. 246-254, 2019.

CHEQUER, F. M. D. *et al.* **Eco-Friendly Textile Dyeing and Finishing**. London: IntechOpen, 2013.

CHU, Z. *et al.* Improving pressure durability and fractionation property via reinforced PES loose nanofiltration hollow fiber membranes for textile wastewater treatment. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 108, p. 71-81, 2020.

COELHO, D. *et al.* Antibacterial Electrospun Poly(vinyl alcohol)/Enzymatic Synthesized Poly(catechol) Nanofibrous Midlayer Membrane for Ultrafiltration. **ACS applied materials & interfaces**, v. 9, n. 38, p. 33107-33118, 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA; FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **O uso racional da água no setor industrial**. 2 ed. Brasília: CNI, 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **O setor têxtil e de confecção e os desafios da sustentabilidade**. Brasília: CNI, 2017. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/bb/6f/bb6fdd8d-8201-41ca-981d-deef4f58461f/abit.pdf. Acesso em: 01 ago. 2021.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL; CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n. 8, de 21 de novembro de 2022**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte:

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n. 1, de 05 de maio de 2008**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte:

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução n. 54, de 28 de novembro de 2005**. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. Brasília: SINGREH, 2006. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2018/02/Resolu%C3%A7%C3%A3o-n%C2%BA-54-de-28-de-Novembro-de-2005-CNRH.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2023.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 357/2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, 17 mar. 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 89, 16 mai. 2011.

COPAM, 2008. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151>. Acesso em: 10 set. 2022.

COPAM/CERH-MG, 2022. Disponível em:
<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=56521>. Acesso em: 25 fev. 2023.

COPASA. **Qualidade da água**. Belo Horizonte: Copasa, 2022. Disponível em:
<https://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/abastecimento-de-agua/qualidade>. Acesso em: 20 mar. 2023.

COUTO, C. F. **Application of membranes separation processes on the treatment of textile effluent for water and dye reuse**. 2016. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

COUTO, C. F. *et al.* Hybrid MF and membrane bioreactor process applied towards water and indigo reuse from denim textile wastewater. **Environmental Technology**, v. 39, n. 6, p. 725-738, 2018.

CURIC, I.; DOLAR, D. Investigation of Pretreatment of Textile Wastewater for Membrane Processes and Reuse for Washing Dyeing Machines. **Membranes**, v.12, n. 5, p. 449, 2022.

DADI, D. *et al.* Environmental and health impacts of effluents from textile industries in Ethiopia: the case of Gelan and Dukem, Oromia Regional State. **Environmental monitoring and assessment**, v. 189, n. 1, p. 11, 2017.

DASGUPTA, J. *et al.* Remediation of textile effluents by membrane based treatment techniques: a state of the art review. **Journal of environmental management**, v. 147, p. 55-72, 2015.

DING, W. *et al.* Fouling behavior of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) ultrafiltration membrane by polyvinyl alcohol (PVA) and chemical cleaning method. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 12, p. 3018-3026, 2020.

DRIOLI, E.; GIONO, L. **Encyclopedia of Membranes**. Berlin: Springer, 2016.

DRIOLI, E.; IULIANELLI, A. Membrane engineering: Latest advancements in gas separation and pre-treatment processes, petrochemical industry and refinery, and future perspectives in emerging applications. **Fuel Processing Technology**, v. 206, p. 106464, 2020.

DUARTE, F. A. P. **Beneficiamento do vinhoto através da eletrodiálise conjugada com nanofiltração visando a sustentabilidade técnica e ambiental**. 2022. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos e Processos) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

DUTTA, M.; BHATTACHARJEE, S.; DE, S. Separation of reactive dyes from textile effluent by hydrolyzed polyacrylonitrile hollow fiber ultrafiltration quantifying the transport of multicomponent species through charged membrane pores. **Separation and Purification Technology**, v. 234, p. 116063, 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **A new textiles economy: Redesigning fashion's future**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2017. Disponível em:
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/a-new-textiles-economy- redesigning-fashions-future>. Acesso em: 26 jul. 2021.

EZUGBE, E. O.; RATHILAL, S. Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review. **Membranes**, v. 10, n. 5, p. 89, 2020.

FEBRATEX GROUP. **Confecção de jeans**: confira o panorama atual no Brasil. [S. l.]: Febratex Group, 2022. Disponível em: <https://agrestetex.com.br/confeccao-de-jeans-confira-o-panorama-atual-no-brasil/>. Acesso em: 01 ago. 2022.

FEBRATEX GROUP. **História da indústria têxtil**: quais os avanços até os dias atuais? [S. l.]: Febratex Group, 2019. Disponível em: <https://fcem.com.br/noticias/historia-da-industria-textil-quais-os-avancos-ate-os-dias-atuais/>. Acesso em: 01 ago. 2021.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Gestão das águas na Indústria**. Belo Horizonte: FIEMG, 2022. Disponível em: https://www7.fiemg.com.br/Cms_Data/Contents/central/Media/Documentos/Biblioteca/PDFs/FIEMG/Agua/FI-0069-14_20X20-CARTILHA-RECURSOS-HIDRICOS.pdf. Acesso em: 02 set. 2022.

FERNANDES, A. K. S. **Reúso de Água no Processamento de Jeans na Indústria Têxtil**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

FONSECA, G. S.; SANTOS, M. R. Impactos da seca em municípios de Minas Gerais. **Humboldt: Revista de Geografia Física e Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, p. e52601, 2020.

FORWARD OSMOSIS MEMBRANES, SYSTEMS AND APPLICATIONS. **Hollow fiber forward osmosis membrane modules**. [S. l.]: ForwardOsmosisTech, 2014. Disponível em: <https://www.forwardosmosistech.com/hollow-fiber-forward-osmosis-membrane-modules/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

FREITAS, K. R. **Caracterização e reúso do Efluente do Processo de Beneficiamento da Indústria Têxtil**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

FUJITA, R. M. L.; JORENTE, M. J. A indústria têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica e cultural. **Modapalavra e-periódico**, v. 8, n. 15, p. 153, 2015.

GOH, P. S.; ISMAIL, A. F. A review on inorganic membranes for desalination and wastewater treatment. **Desalination**, v. 434, p. 60-80, 2018.

GOSAVI, V.; SHARMA, S. A General Review on Various Treatment Methods for Textile Wastewater. **Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology**, v. 3, n. 1, p. 29-39, 2013.

GRAND VIEW RESEARCH. **Membrane Separation Technology Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (Microfiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration), By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2021 – 2028**. San Francisco: GVR, 2021. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/membrane-separation-technology-market>. Acesso em: 02 jul. 2022.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de separação com membranas**. Rio de Janeiro: Escola Piloto de Engenharia Química, 2006.

HOLKAR, R. C. *et al.* A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. **Journal Of Environmental Management**, v. 182, p. 351-366, 2016.

HOSSEINI, S. S. *et al.* A Recent progress in development of high performance polymeric membranes and materials for metal plating wastewater treatment: A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 9, p. 78-110, 2016.

HUANG, D. *et al.* Preparation of PVDF hollow fiber ultrafiltration membrane via phase inversion/chemical treatment method. **Desalination and Water Treatment**, v. 52, p. 5076 - 5083, 2013.

HWANG, S. T. Fundamentals of membrane transport. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 28, p. 1-15, 2011.

IB CONSULTORIA E GESTÃO AMBIENTAL EIRELI. **Diagnóstico das águas da bacia Paraopeba frente aos empreendimentos do setor minero industrial – 1997 a 2029 e pós-rompimento barragem B1 - Brumadinho**. Nova Lima: IB, 2019. Disponível em: https://www7.fiemg.com.br/Cms_Data/Contents/central/Media/Documentos/Biblioteca/PDFs/SDI/2019/BoletinsMeioAmbiente/Qualidade-das-guas-na-Bacia-Paraopeba-frente-ao-setor-minero-industrial-1997-a-2018-e-p-s-rompimento.pdf. Acesso em: 21 ago. 2022.

INTELIGÊNCIA DE MERCADO. **Brasil Têxtil 2021**: Relatório Setorial da Indústria Têxtil Brasileira. São Paulo: IEMI, 2021.

INTELIGÊNCIA DE MERCADO. **Brasil Têxtil 2021**: Relatório Setorial da Indústria Têxtil Brasileira – Versão Resenha. São Paulo: IEMI, 2022.

JIANG, M. *et al.* Conventional ultrafiltration as effective strategy for dye/salt fractionation in textile wastewater treatment. **Environmental Science**, v. 52, p.10698-10708, 2018.

JOHARI, N. A.; YUSOF, N.; ISMAIL, A. F. Performance of mixed matrix ultrafiltration membrane for textile wastewater treatment. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, n 7, p. 3015-3019, 2022.

JUNIOR, J. S. S. **Reúso de água como estratégia competitiva em lavanderias de jeans no Agreste pernambucano: o caso de Toritama**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Econômicas) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2022.

KAMALI, M. *et al.* Sustainability considerations in membrane-based technologies for industrial effluents treatment. **Chemical Engineering Journal**, v. 368, p. 474-494, 2019.

KANG, G. D.; CAO, Y. M. Application and modification of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) membranes – A review. **Journal of Membrane Science**, v. 463, p. 145-165, 2014.

KAPOOR, A. *et al.* Role of Membranes in Wastewater Treatment. *In*: INAMUDDIN, AHAMED, M. I.; LICHTFOUSE, E. (eds.). **Water Pollution and Remediation: Photocatalysis**. Singapore: Springer, 2021. p. 247-281.

KAVITHA, E. *et al.* Current status and future prospects of membrane separation processes for value recovery from wastewater. **Chemosphere**, v. 291, n. 2, p. 132690, 2022.

KAYKIOUGLU, G. *et al.* Evaluation of effects of textile wastewater on the quality of cotton fabric dye. **Membrane Water Treatment**, v. 8. n. 1, p.1-18. 2017.
Kertész S, *et al.* Modeling of Organic Fouling in an Ultrafiltration Cell Using Different Three-Dimensional Printed Turbulence Promoters. **Membranes**. 2023.

KHOUNI, I. *et al.* Decolourization of the reconstituted textile effluent by different process treatments: enzymatic catalysis, coagulation/flocculation and nanofiltration processes. **Desalination**, v. 268, n. 1-3, p. 27-37, 2011.

LEVI STRAUSS & CO. A **Product Lifecycle Approach to Sustainability**. San Francisco: Levi Strauss & Co., 2009. Disponível em: <http://www.levistrauss.com/sustainability/product/life-cycle-jean> Acesso em: 12 mai. 2022.

LIMA, R. C. O. *et al.* Use of Ceramic Membrane for Indigo Separation in Effluent from Textile Industry. **Materials Science Forum**, v. 798-799, p. 537-541, 2014.

LIU, H. *et al.* Poly(vinylidene fluoride) hollow fiber membrane for high-efficiency separation of dyes-salts. **Journal of Membrane Science**. v. 578, p. 43-52, 2019.

LUIZ, S. **Lavanderia em jeans e a sustentabilidade em moda**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Design de Moda) - Instituto Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2019.

LUIZ, S.; VALENTIM, A. F. Lavanderia em *jeans* e a sustentabilidade em moda: comparativo entre processos tradicionais e ecológicos. **Projética**, v. 12, n. 1, p. 297-326, 2021.

LUOGO, B. D. P. *et al.* Reuse of Water in Laundry Applications with Micro- and Ultrafiltration Ceramic Membrane. **Membranes**, v. 12, n. 2, p. 223, 2022.

MACÊDO, J. S. **Estudo de processo sustentável, utilizando ozônio, no beneficiamento de peças confeccionadas com jeans, para atender às tendências da moda**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Design) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.

MARCO ZERO CONTEÚDO. **Proposta para adiar o fim de um mundo agreste**. [S. l.]: Marco Zero Conteúdo, 2022. Disponível em: <https://marcozero.org/propostas-para-adiar-o-fim-de-um-mundo-agreste/>. Acesso em: 10 de mai. 2023.

MICHELON, M. **Separação e purificação de galacto-oligossacarídeos por nanofiltração**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **Deliberação Normativa nº 26, de 18 de dezembro de 2008**. Dispõe sobre procedimentos gerais de natureza técnica e administrativa a serem observados no exame de pedidos de outorga para o lançamento de efluentes em corpos de água superficiais no domínio do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais, 2008.

MIRANDA, A. M. I. *et al.* Nanofiltration as a final step towards textile wastewater reclamation. **Desalination**, v. 240, n. 1-3, p. 290-297, 2009.

MORADIHAMEDANI, P. Recent advances in dye removal from wastewater by membrane technology: a review. **Polymer Bulletin**, v. 79, p. 2603-2631, 2022.

MOREIRA, V. R. *et al.* Dead-end ultrafiltration as a cost-effective strategy for improving arsenic removal from high turbidity waters in conventional drinking water facilities. **Chemical Engineering Journal**. v. 417, p. 128132, 2021.

MOURA, P. G. *et al.* Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 791-808, 2020.

MULDER, M. **Basic Principles of Membrane Technology**. 2nd ed. Berlin: Springer, 1996.

MUSUMECI, T. *et al.* Tangential Flow Filtration Technique: An Overview on Nanomedicine Applications. **Pharmaceutical nanotechnology**, v. 6, n. 1, p. 48-60, 2018.

MUTAMIN, N. S. A. *et al.* Application of membrane bioreactor technology in treating high strength industrial wastewater: a performance review. **Desalination**, v. 305, p. 1-11, 2012.

MUTHU, S. S. **The Textile Institute Book Series**. [S. l.]: Paperback Edition, 2017.
 NAMVAR-MAHBOUB, M.; PAKIZEH, M. Development of a novel thin film composite membrane by interfacial polymerization on polyetherimide/modified SiO₂ support for organic solvent nanofiltration. **Separation and Purification Technology**, v. 119, p. 35-45, 2013.

NANDY, T. *et al.* Water conservation through implementation of ultrafiltration and reverse osmosis system with recourse to recycling of effluent in textile industry—A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 51, n. 1, p. 64-77, 2007.

NATH, K. **Membrane separation processes**. 2nd ed. New Delhi: PHI Learning Private, 2017.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. **PubChem Compound Summary for CID 10215**. [S. l.]: Indigo, 2023. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Indigo>. Acesso em: 25 fev. 2023.

NAWAZ, H. *et al.* Hybrid PVDF/PANI Membrane for Removal of Dyes from Textile Wastewater. **Advanced Engineering Materials**, v. 24, p. 2100719, 2022.

OLIVEIRA, A. T. C. **Determinação do fluxo crítico e fluxo limite em membrana de microfiltração utilizada no pós-tratamento de esgoto doméstico**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

OLIVEIRA, G. J. **Jeans, a alquimia da moda**. Espírito Santo: Edição independente, 2008.
 ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos, 2017**: Águas residuais: o recurso inexplorado, resumo executivo. [S. l.]: UNESCO, 2017. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247552_por. Acesso em: 22 mai. 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos, 2021**: O valor da água; fatos e dados. [S. l.]: UNESCO, 2021. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_por. Acesso em: 1 abr. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. [S. l.]: ONU, 2018. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/>. Acesso em: 02 jun. 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. [S. l.]: ONU, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2022.

ORNELAS, H. P. O. **Caracterização de membrana de fibra oca de poli(fluoreto de vinilideno) e sua aplicação como módulo de ultrafiltração no tratamento de água com**

matéria orgânica. 2021. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

PAUL, R. **Denim: Manufacture, Finishing and Applications**. Sawston: Woodhead Publishing, 2015.

PERIYASAMY, A. P.; PERIYASAMI, S. Critical Review on Sustainability in Denim: A Step toward Sustainable Production and Consumption of Denim. **ACS omega**, v. 8, n. 5, p. 4472-4490, 2023.

PORTO, A. E.; SCHOENHALS, M. Tratamento de efluentes, reúso de água e legislação aplicada em lavanderia têxtil industrial. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 10, n. 2, p. 68-80, 2013.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **Análise da vulnerabilidade às mudanças climáticas de Belo Horizonte**. Belo Horizonte: PBH, 2016. Disponível em: https://www.kas.de/c/document_library/get_file?uuid=81e6462d-a9af-ae09-9817-b797afbf41ad&groupId=252038. Acesso em: 05 set. 2021.

PUSPITASARI, V. *et al.* Cleaning and ageing effect of sodium hypochlorite on polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane. **Separation and Purification Technology**, v. 72, p. 301-308, 2010.

RAHMAN, T. U. *et al.* The Advancement in Membrane Bioreactor (MBR) Technology toward Sustainable Industrial Wastewater Management. **Membranes**, v. 13, n. 2, p. 181, 2023.

RAMOS, M. D. N. *et al.* A critical analysis of the alternative treatments applied to effluents from Brazilian textile industries. **Journal of Water Process**, v. 43, p. 102273, 2021.

RAMOS, M. D. N. *et al.* Critical analysis of the characteristics of industrial effluents from the textile sector in Brazil. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, p. 913-929, 2020.

RANGANATHAN, K.; KARUNAGARAN, K.; SHARMA, D. C. Recycling of wastewaters of textile dyeing industries using advanced treatment technology and cost analysis — Case studies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 3, p. 306-318, 2007.

REGULA, C. *et al.* Chemical cleaning/disinfection and ageing of organic UF membranes: A review. **Water research**, v. 56, p. 325-365, 2014.

RESENDE, L. P. **Reúso na indústria têxtil e lavanderias**. [S. l.]: Hydro, 2012. Disponível em: <https://docplayer.com.br/docview/21/1071055/#file=/storage/21/1071055/1071055.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2023.

RIBEIRO, M. C. M. **Avaliação da possibilidade de reúso de efluentes têxteis após tratamento complementar por processos oxidativos avançados**. 2009. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SAMUCHIWAL, S.; BHATTACHARYA, A.; MALIK, A. Treatment of textile effluent using an anaerobic reactor integrated with activated carbon and ultrafiltration unit (AN-ACF-UF process) targeting salt recovery and its reusability potential in the pad-batch process. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, p. 101770, 2021.

SARKER, U. K. *et al.* Superiority of Sustainable Ozone Wash Over Conventional Denim Washing Technique. **International Journal of Current Engineering and Technology**, v. 11, n. 5, p. 516-522, 2021.

SATHYA, K. *et al.* Comprehensive review on comparison among effluent treatment methods and modern methods of treatment of industrial wastewater effluent from different sources. **Applied water science**, v. 12, n. 4, p. 70, 2022.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso**. São Paulo: ABES, 2001.

SCOTT, K. **Handbook of Industrial Membranes**. Amsterdam: Elsevier Science, 1995.

SEPARATION PROCESS APPLICATION. **Membrane separation**. Cesano Maderno: Septra, 2023. Disponível em: <https://www.sepra.it/en/membrane-separation-t-1.html>. Acesso em: 25 fev. 2023.

SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Indústria 4.0: a moda a caminho do futuro**. Rio de Janeiro: Sebrae, 2018. Disponível em: https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/RJ/Anexos/Industria%204_0%20-%20WEB.PDF. Acesso em: 01 ago. 2021

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL DEPARTAMENTO NACIONAL; SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Movimentos: verão 2016/2017**. Rio de Janeiro: SEBRAE; SENAI, 2015.

SHERHAN, B. Y. *et al.* Produced water treatment using ultrafiltration and nanofiltration membranes. **Al-Khwarizmi Engineering Journal**, v. 12, n. 3, p. 10-18, 2016.

SIAGIAN, U. W. R. *et al.* High-Performance Ultrafiltration Membrane: Recent Progress and Its Application for Wastewater Treatment. **Current Pollution Reports**, v. 7, p. 448-462, 2021.

SILVA, B. L.; XAVIER, M. G. P. Inovação e tecnologia em lavanderias de jeans do polo têxtil do agreste pernambucano e a implementação das atividades de reúso de água. **Revista Biociência Negócios E Tecnologia**, v. 1, n. 1, p. 28-52, 2021.

SILVA, B. L.; XAVIER, M. G. P.; SOBRAL, M. F. F. Jeans Processing and Water Reuse Systems in a Brazilian Semiarid Region. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. e03027, 2022.

SILVA, R. A. J. **Modelo de gestão ambiental para reúso de águas de lavanderias do agreste de Pernambuco**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.

SIMÕES, C. P. P. **Avaliação operacional e remoção de bisfenol-a no tratamento de água por diferentes tipos de membranas: avaliação em escala piloto**. 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SINDITÊXTIL, 2009. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/producao_limpa/documentos/textil.pdf. Acesso em: 10 nov.2022.

SOFIYA, K., POONGUZHALI, E., KAPOOR, A. *et al.* Separation of carboxylic acids from aqueous solutions using hollow fiber membrane contactors. **Journal of Membrane Science and Research**, v. 5, p. 233-239, 2019.

- SONUNE, A.; GHATE, R. Developments in wastewater treatment methods. **Desalination**, v. 167, p. 55-63, 2004.
- SRIVASTAVA, H. P. *et al.* G. Performance of modified poly (vinylidene fluoride) membrane for textile wastewater ultrafiltration. **Desalination**, v. 282, p. 87-94, 2011.
- TANG, C.; CHEN, V. Nanofiltration of textile wastewater for water reuse. **Desalination**, v. 143, n. 1, p. 11-20, 2002.
- TIOSSI, M.; SIMON, A. I. Economia circular: suas contribuições para o desenvolvimento da sustentabilidade. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 11912-11927, 2021.
- TKACZYK, A.; MITROWSKA, K.; POSYNIK, A. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. **The Science of the total environment**, v. 717, p. 137222, 2020.
- TUNDISI, J. G. **Água no Século XXI: enfrentando a escassez**. 2 ed. São Carlos: RiMa, 2005.
- TUNDISI, J. G.; MATSUMURO, T. **Água no século 21**. São Paulo: Oficina de textos, 2011.
- UMBUZEIRO, G. A. *et al.* The contribution of azo dyes to the mutagenic activity of the Cristais river. **Chemosphere**, v. 60, n. 1, p. 55-64, 2005.
- UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND. **Water scarcity**. New York: UNICEF, 2021. Disponível em: <https://www.unicef.org/wash/water-scarcity>. Acesso em: 10 jun. 2022.
- UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC, AND CULTURAL ORGANIZATION. **United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change**. Paris: UNESCO, 2020. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985.locale=en>. Acesso em: 22 jul. 2021.
- UNITED NATIONS. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future**. New York: United Nations, 1987.
- URAGAMI, T. **Science and Technology of Separation Membranes**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.
- VAJNHANDL, S.; VALH, J. V. The status of water reuse in European textile sector. **Journal of Environmental Management**, v. 141, p. 29-35, 2014.
- VALH, J. V. *et al.* **Treatise on water science: Volume 4 - Water-quality engineering**. Tokyo: Elsevier; 2011.
- VAN DEN BRINK, P. *et al.* Potential of mechanical cleaning of membranes from a membrane bioreactor. **Journal of Membrane Science**, v. 429, p. 259-267, 2013.
- VAUTIER, M.; GUILLARD, S.; HERMANN, J. M. Photocatalytic Degradation of Dyes in water: Case Study of Indigo and of Indigo Carmine. **Journal of Catalysis**, v. 201, n. 1, p. 46-59, 2001.
- 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, n. 1, p. 154-168, 2012.
- VON SPRELING, M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

WANG, Q. *et al.* The color removal of dye waste- water by magnesium chloride/red mud (MRM) from aqueous solution. **Journal of Hazardous Materials**, v. 170, n. 2-3, p. 690-698, 2009.

WANG, X. *et al.* Reinvestigation of membrane cleaning mechanisms using NaOCl: Role of reagent diffusion. **Journal of Membrane Science**, v. 550, p. 278-285, 2018.

WERDESHEIM, R. B. **Otimização de processos têxteis em uma lavanderia industrial**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION; UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: five years into the SDGs**. Geneva: WHO; UNICEF, 2021.

XUE, Y. L. *et al.* Chapter 20 - Tubular membranes and modules. *In*: CHUNG, T. S.; FENG, Y. (eds.). **Hollow Fiber Membranes: Fabrication and Applications**. Tokyo: Elsevier, 2021. p. 431-448.

YANG, J. *et al.* Membrane-Based Processes Used in Municipal Wastewater Treatment for Water Reuse: State-Of-The-Art and Performance Analysis. **Membranes**, v. 10, n. 6, p. 131, 2020.

YE, W. *et al.* Enhanced fractionation of dye/salt mixtures by tight ultrafiltration membranes via fast bio-inspired co-deposition for sustainable textile wastewater management. **Chemical Engineering Journal**, v. 379, p. 122321, 2019.

YE, X. *et al.* Simultaneous removal of iron, manganese, and ammonia enhanced by preloaded MnO₂ on low-pressure ultrafiltration membrane. **Journal of Membrane Science**, v. 656, 2022.

YU, W. *et al.* A conductive PVDF-Ni membrane with superior rejection, permeance and antifouling ability via electric assisted in-situ aeration for dye separation. **Journal of Membrane Science**, v. 581, p. 401-412, 2019.

YULIWATI, E. *et al.* Critical Flux and Fouling Analysis of PVDF-Mixed Matrix Membranes for Reclamation of Refinery-Produced Wastewater: Effect of Mixed Liquor Suspended Solids Concentration and Aeration. **Membranes**, v. 12, p. 161, 2022.

ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. **Corantes Caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2016.

ZHANG, P.; LAW, K.; FANE, G. Determination of critical flux by mass balance technique combined with direct observation image analysis. **Journal of Membrane Science**, v. 365, n. 1-2, p. 106-113, 2010.

ZOCOLO, G. J. *et al.* Using SPE-LC-ESI-MS/MS analysis to assess disperse dyes in environmental water samples. **Journal of chromatographic science**, v. 53, n. 8, p. 1257-1264, 2015.

ZULIANI, G. **Projeto de Lei n. 2451/2020**. Dispõe sobre o reúso de água para fins não potáveis em novas edificações públicas federais e privadas residenciais, comerciais e industriais, e dá outras providências. Brasília: Câmara dos Deputados, 06 mai. 2020.

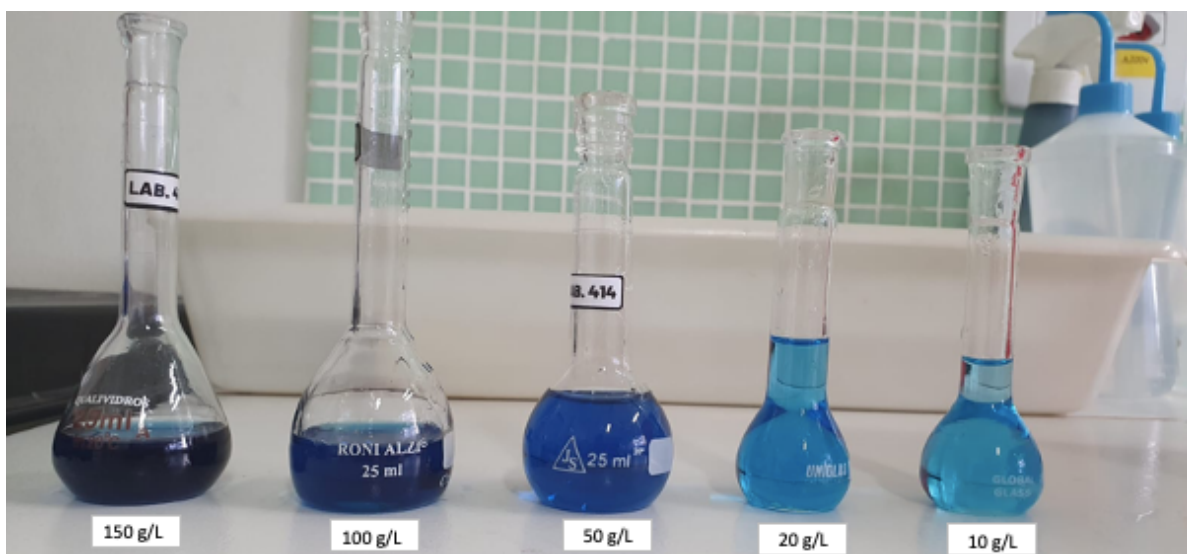
Disponível em: <https://www.camara.leg.br/propostas-legislativas/2251907>. Acesso em: 22 mai. 2022.

8 ANEXOS

8.1 Curva de calibração índigo blue

Preparou-se inicialmente uma solução estoque de 250 mg mL^{-1} de índigo blue comercial. Para isso, pesou-se $0,0066 \text{ g}$ de índigo blue comercial e transferiu-se para um balão volumétrico de 25 mL e completou-se com dimetilsulfóxido (DMSO). A partir da solução estoque, outras soluções com concentrações diferentes foram preparada - 50 mg mL^{-1} , 100 mg mL^{-1} , 150 mg mL^{-1} – Figura 45. Após o preparo destas soluções realizou-se a leitura das mesmas, utilizando-se uma cubeta de quartzo, no comprimento de onda de 611 nm (λ). As leituras foram realizadas no equipamento *Spetrophotometer V-110D*, marca MAPADA, disponível no CEFET-MG Campus I, sala 416. Com as leituras das absorbâncias e as diferentes concentrações plotou-se a curva de calibração para o índigo *blue*.

Figura 45 – Padrões analíticos de índigo blue em DMSO utilizados nas análises quantitativas



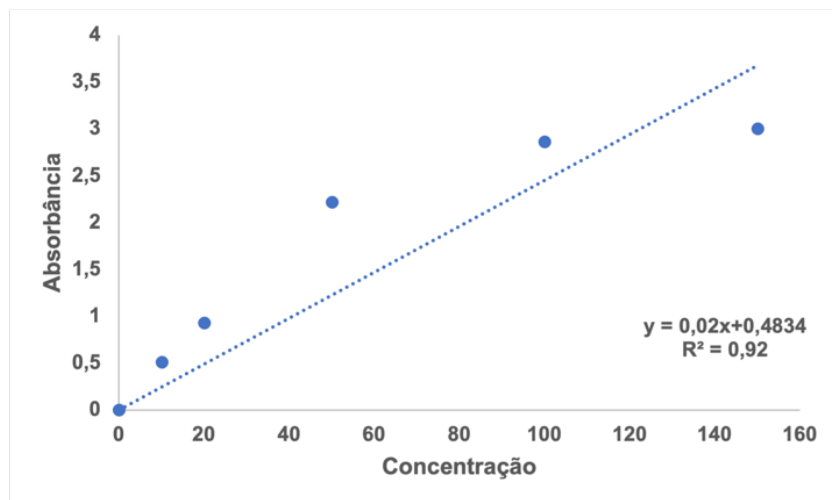
Fonte: Fotografia da autora (2023).

A quantificação por espectrofotometria na região do UV-Visível foi realizada a partir da equação da reta (Equação 5) obtida mediante gráfico, absorbância versus concentração (Figura 46).

$$y = 0,02 x + 0,4834$$

Equação 5

Figura 46 – Curva analítica para índigo blue em DMSO por espectroscopia na região do UV – visível ($\lambda = 611\text{nm}$)



Fonte: Elaborado pela autora.

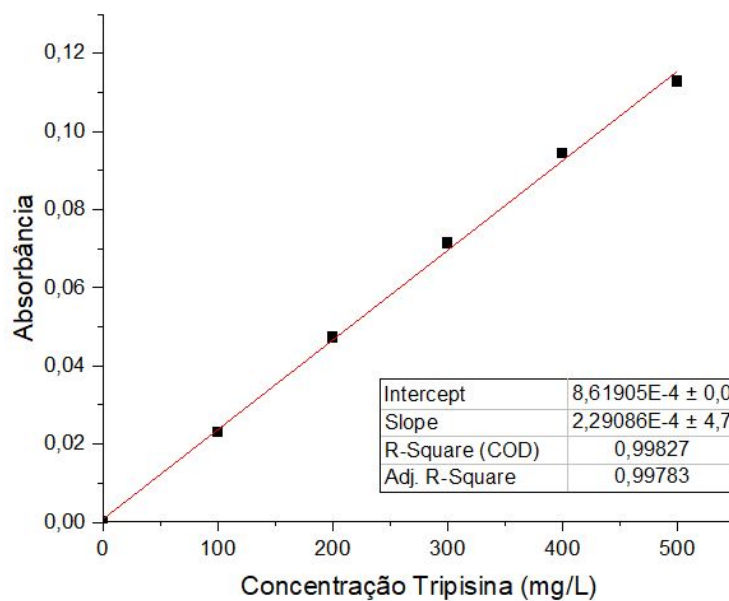
8.2 Curva de calibração BSA e Tripsina

Para a construção da curva de calibração foram medidas no espectrofotômetro a absorbância de 5 soluções de BSA e Tripsina, em concentrações diferentes, no comprimento de onda de 280 nm. As concentrações das soluções estão indicadas abaixo.

Solução 1: 500 mg/L
 Solução 2: 400 mg/L
 Solução 3: 300 mg/L
 Solução 4: 200 mg/L
 Solução 5: 100 mg/L

A quantificação por espectrofotometria na região do UV-Visível para a Tripsina foi realizada a partir da equação da reta (Equação 6) obtida mediante gráfico, absorbância versus concentração (Figura 47).

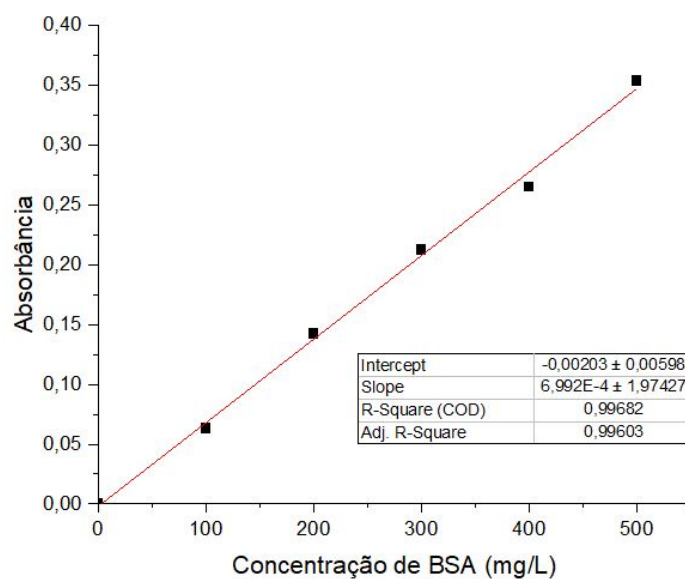
$$[] \text{concentração} = 2,29086 \times 10^{-4} \text{ABS} + 8,6190 \times 10^{-4} \quad \text{Equação 6}$$

Figura 47 – Curva de Calibração Tripisina

Fonte: Elaborado pela autora.

Repetiu-se o mesmo para a proteína BSA. A quantificação por espectrofotometria na região do UV-Visível para a BSA foi realizada a partir da equação da reta (Equação 7) obtida mediante gráfico, absorbância versus concentração (Figura 48).

$$[] \text{concentração} = 6,992 \times 10^{-4} \text{ABS} - 0,00203 \quad \text{Equação 7}$$

Figura 48 – Curva de Calibração BSA

Fonte: Elaborado pela autora.