



KALIANA SITONIO EÇA



Concentração de vinhaça por Microfiltração e Ultrafiltração combinadas e Nanofiltração direta

CAMPINAS

2011

KALIANA SITONIO EÇA

**Concentração de vinhaça por Microfiltração e
Ultrafiltração combinadas e Nanofiltração
direta**

*Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia de Alimentos, da Universidade
Estadual de Campinas, para obtenção do
título de Mestre em Engenharia de
Alimentos. Área de concentração:
Engenharia de Processos.*

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio Viotto.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

Ec11c Eça, Kaliana Sitonio.
Concentração de vinhaça por microfiltração e
ultrafiltração combinadas e nanofiltração direta. / Kaliana
Sitonio Eça. -- Campinas, SP: [s.n], 2011.

Orientador: Luiz Antonio Viotto
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Vinhaça. 2. Microfiltração. 3. Ultrafiltração. 4.
Nanofiltração. I. Viotto, Luiz Antonio. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de
Alimentos. III. Título.

Título em inglês: Vinasse concentration by combined microfiltration and
ultrafiltration and

direct nanofiltration

Palavras-chave em inglês (Keywords): Vinasse, Microfiltration, Ultrafiltration,
Nanofiltration

Titulação: Mestre em Engenharia de Alimentos

Banca examinadora: Luiz Antonio Viotto

Celso Costa Lopes

Sergio Rodrigues Fontes

Data da defesa: 01/03/2011

Programa de Pós Graduação: Programa em Engenharia de Alimentos

Este exemplar corresponde à redação final da dissertação Concentração de vinhaça por Microfiltração e Ultrafiltração combinadas e Nanofiltração direta defendida em ____/____/____ por Kaliana Sitonio Eça aprovado pela comissão julgadora em ____/____/____.

Prof. Dr. Luiz Antonio Viotto
(Orientador - DEA/ FEA/ UNICAMP)

Prof. Dr. Celso Costa Lopes
(Membro Titular - DEA/ FEA/ UNICAMP)

Prof. Dr. Sergio Rodrigues Fontes
(Membro Titular – SEM/EESC/USP)

Profa. Dra. Marcia de Souza Araki
(Suplente –Faculdade Pitágoras)

Profa. Dra. Rosiane Lopes da Cunha
(Suplente - DEA/ FEA/ UNICAMP)

Campinas – 2011

Dedico este trabalho a minha mãe, Karla Sitônio Barbosa de Eça, por ter me ofertado o amor mais forte, obstinado e duradouro que já existiu.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter colocado pessoas tão especiais na minha vida.

A minha mãe, Karla, por ter me ensinado o sentido mais puro e verdadeiro da palavra amor. Sempre presente, mesmo na ausência.

A meu pai, Duarte, por me passar os verdadeiros valores que uma pessoa deve honrar, por me ensinar a ser uma mulher livre e lutar firmemente pelos meus ideais.

A minha irmãzinha, Suzi, por suas palavras fortes e sensatas, pelos ensinamentos, risadas, brigas e principalmente pelas bobearias. Por ser a pessoa em que sempre me espelhei e sempre me orgulharei.

As minhas primas, Josy e Karina, pelo seu carinho e amor incondicional. Por serem minhas irmãs de coração, de sempre e para sempre.

A minha avó, Artemízia, por ser minha fortaleza, meu porto seguro. Por ser o reflexo singelo e amoroso da minha mãe.

A meu namorado, Matheus, que mesmo distante, me apoiou e me incentivou a seguir firme e persistente para mais uma conquista em minha vida.

A todos os meus familiares, por toda a dedicação, esforço, amor, compreensão e incentivo que eles tiveram comigo durante o curso, fazendo muitas vezes sacrifícios em prol da minha realização profissional.

A minha amiga, Thereza, pela sua alegria de viver, pelas infindas risadas, mesmo as de desespero, pelas conversas importantes e, principalmente, pelas conversas moles, por ser muito mais que uma simples amiga.

A meu amigo, Renato, por ser sempre tão atencioso e prestativo, por me aguentar “reclamando” todos os dias, pelos ensinamentos e palavras de apoio e confiança.

A minha amiga, Karina, pelos dias alegres e tristes, pelos altos e baixos constantes, por ensinar a ser mais feliz, sorridente e confiante.

A todos os meus amigos que me incentivaram e apoiaram em todos os momentos de dificuldades e desafios que surgiram ao longo desse período.

Ao Prof. Viotto, pela orientação, sabedoria, compreensão e acima de tudo pela confiança que depositou em mim.

Aos membros da banca, pelos conselhos e dicas fornecidas, que contribuíram de forma positiva neste trabalho.

Às técnicas de laboratório, Camilla, Cláudia e Joyce, sempre dispostas a ensinar e ajudar.

Ao Eduardo Zaine da Usina Éster, pela doação da vinhaça utilizada no trabalho.

A CAPES pela oportunidade para a realização dessa conquista, por meio da bolsa de estudo, a qual possibilitou a minha permanência em Campinas e consequentemente a realização desse estudo.

À UNICAMP, e em especial a Faculdade de Engenharia de Alimentos pelo acolhimento, e a possibilidade de crescimento pessoal, através da realização do projeto de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xix
RESUMO	xxi
ABSTRACT	xxiii
1. INTRODUÇÃO.....	25
2. OBJETIVO	27
2.1. Objetivos Específicos.....	27
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
3.1. Indústria Sucroalcooleira: Produtos e Sub-Produtos	29
3.2. Obtenção da Vinhaça	30
3.3. A Vinhaça	33
3.3.1. Usos da Vinhaça.....	35
3.3.2. Impactos Ambientais.....	38
3.3.3. Legislações Específicas.....	39
3.4. Processos de Separação por Membranas	41
3.4.1. Tipos de Processos	44
3.4.2. Fenômenos Envolvidos no Processo	45
3.4.3. Parâmetros Importantes para a Análise do Desempenho e Eficiência do Processo	46
3.5. Modelo Matemático.....	50
3.5.1. Modelo da Renovação da Superfície	50
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	53
4.1. Material.....	53
4.1.1. Matéria-Prima	53
4.1.2. Membranas.....	53
4.2. Célula de Laboratório.....	54
4.3. Métodos.....	57
4.3.1. Determinações Analíticas	57
4.3.2. Procedimento Experimental	58

4.3.2.1	Processo de MF e UF	62
4.3.2.2	Processo de NF	63
4.4.	Modelos Matemáticos	63
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1.	Características Físico-Químicas da Matéria-Prima	65
5.2.	Processo Seqüencial de MF e UF	66
5.2.1.	Fluxos de Permeado Obtidos no Processo de MF	66
5.2.2.	Produtos Obtidos no Processo de MF.....	68
5.2.3.	Fluxos de Permeado Obtidos no Processo de UF.....	74
5.2.4.	Produtos Obtidos no Processo de UF	79
5.2.5.	Diagrama do Processo Seqüencial de MF Seguido de UF – Análise Quantitativa.	85
5.3.	Processo de NF	87
5.3.1.	Fluxos de Permeado Obtidos no Processo de NF.....	87
5.3.2.	Produtos Obtidos no Processo de NF.....	89
5.3.3.	Diagrama do Processo de NF – Análise Quantitativa.....	95
5.4.	Ajuste ao Modelo Matemático Baseado na Teoria da Renovação de Superfície..	97
6.	CONCLUSÕES.....	101
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
	APÊNDICES	111
	Apêndice A :Curvas de Fluxos de Permeado da Microfiltração.....	111
	Apêndice B :Curvas de Fluxos de Permeado da Ultrafiltração	120
	Apêndice C:Curvas de Fluxos de Permeado da Nanofiltração.....	139
	Apêndice D: Ajuste ao Modelo Matemático Baseado na Teoria da Renovação da Superfície, onde o Fluxo é Variável com o Tempo (Microfiltração).....	158
	Apêndice E: Ajuste ao Modelo Matemático Baseado na Teoria da Renovação da Superfície, onde o Fluxo é Variável com o Tempo (Ultrafiltração).....	159
	Apêndice F: Ajuste ao Modelo Matemático Baseado na Teoria da Renovação da Superfície, onde o Fluxo é Variável com o Tempo (Nanofiltração).....	161
	Apêndice G: Curva padrão para determinação espectrofotométrica da DQO.	162

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1: Fluxograma de fabricação de derivados da cana-de-açúcar.	32
Figura 3.2: Vinhaça obtida a partir do caldo misto	33
Figura 3.3: Comparação esquemática entre Filtração Convencional (Filtração Frontal) e a Filtração em Escoamento Tangencial ou Filtração Tangencial.(HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006).....	42
Figura 3.4: Esquema do processo de separação por membranas.	43
Figura 3.5. Curva típica de fluxo permeado.....	49
FONTE: (MARSHALL & DAUFIN, 1995).....	49
Figura 4.1: Equipamento de escala laboratorial de célula de micro, ultra e nanofiltração.	55
Figura 4.2: Fotografia da unidade laboratorial.....	56
Figura 4.3: Fluxograma de processamento da vinhaça em laboratório.	59
Figura 4.4: Processo seqüencial da MF e UF.	62
Figura 4.5: Processo de nanofiltração.....	63
Figura 5.1: Curva de fluxo de permeado em função do tempo para as membranas CEL100 e PES005 nas pressões de 1,8 e 2,6 bar.....	67
Figura 5.2: Vinhaça <i>in natura</i> , concentrado e permeado obtido nos processos de MF....	69
Figura 5.3: Curva de fluxo de permeado em função do tempo para as membranas CEL30 e PES50 nas pressões de 3, 4 e 5 bar.....	75
Figura 5.4: Curva de fluxo de permeado em função do tempo para a membrana PES10 nas pressões de 3, 4 e 5 bar.....	76
Figura 5.5: Curva de fluxo de permeado em função do tempo para as membranas CEL10 e PES30 nas pressões de 3, 4 e 5 bar.....	77
Figura 5.6.: Concentrado e permeado do processo de UF utilizando a membrana CEL10.	79
Figura 5.7: Concentrado e permeado do processo de UF utilizando a membrana PES10.	80
Figura 5.8.: Diagrama do processo seqüencial de MF seguido de UF – análise quantitativa.	86
Figura 5.9: Curvas de fluxo de permeado em função do tempo para as membranas PES300, PES500 e PES1000 nas pressões de 15, 25 e 35 bar.	88

Figura 5.10: Vinhaça “ <i>in natura</i> ”, concentrado e permeado obtido nos processos de NF, utilizando a membrana PES500 a 35 bar.....	90
Figura 5.11.: Diagrama do processo de NF – análise quantitativa.	96
Figura 5.12: Dados experimentais do fluxo acumulado e a curva ajustada referente ao modelo de renovação de superfície do experimento de CEL 100 kDa a 2,6 bar.	99
Figura A.1: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana CEL100 a 1,8 bar.	113
Figura A.2: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana CEL100 a 2,6 bar.	115
Figura A.3: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES 0,05 micra a 1,8 bar.....	117
Figura A.4: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES005 a 2,6 bar.	120
Figura B.1: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana CEL10 a 3 bar.	122
Figura 2.2: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando membrana de CEL10 a 4 bar.	123
Figura B.3: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana CEL10 a 5 bar.	124
Figura B.4: Curva de fluxo acumulado e instantâneo utilizando membrana de CEL30 a 3 bar.	125
Figura B.5: Curva de fluxo acumulado e instantâneo utilizando membrana de CEL30 a 4 bar.	126
Figura B.6: Curva de fluxo acumulado e instantâneo utilizando membrana de CEL30 a 5 bar.	127
Figura B.7: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES10 a 3 bar.	129
Figura B.8: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES10 a 4 bar.	130
Figura B.9: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES10 a 5 bar.	132
Figura B.10: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES30 a 3 bar.	133

Figura B.11: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES30 a 4 bar.	134
Figura B.12: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES30 a 5 bar.	136
Figura B.13: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES50 a 3 bar.	137
Figura B.14: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES50 a 4 bar.	138
Figura B.15: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES50 a 5 bar.	139
Figura C.1: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES300 a 15 bar.	141
Figura C.2: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES300 a 25 bar.	143
Figura C.3: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES300 a 35 bar.	145
Figura C.4: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES500 a 15 bar.	148
Figura C.5: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES500 a 25 bar.	150
Figura C.6: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES500 a 35 bar.	152
Figura C.7: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES1000 a 15 bar.	154
Figura C.8: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES1000 a 25 bar.	156
Figura C.9: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES1000 a 35 bar.	158
Figura G.1: Curva padrão para determinação espectrofotométrica da DQO.	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Principais parâmetros físico-químicos da vinhaça.	34
Tabela 4.1: Características das membranas utilizadas.	54
Tabela 4.2: Análises e metodologias utilizadas para as determinações analíticas.	57
Tabela 4.3: Condições experimentais das corridas realizadas.	60
Tabela 5.1: Características físico-químicas da vinhaça <i>in natura</i>	65
Tabela 5.2: Resultados das análises de cinzas, sódio e potássio da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) obtidos por processos de MF de vinhaça.	70
Tabela 5.3: Resultados das análises de pH, sólidos totais, sólidos suspensos e sólidos dissolvidos da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) obtidos por processos de MF de vinhaça.	71
Tabela 5.4: Resultados da análise de DQO da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) do experimento selecionado na MF.	73
Tabela 5.5.: Resultados das análises de cinzas, sódio e potássio da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) obtidos pelos processos de UF.	80
Tabela 5.6.: Resultados das análises de pH, sólidos totais e sólidos dissolvidos da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) obtidos pelos processos de UF.	82
Tabela 5.7: Resultados da análise de DQO da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) do experimento selecionado na UF.	85
Tabela 5.8: Resultados das análises de pH, sólidos totais, sólidos suspensos e sólidos dissolvidos da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) obtidos por processos de NF de vinhaça.	91
Tabela 5.9: Resultados das análises de cinzas, sódio e potássio da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) obtidos por processos de NF de vinhaça.	93
Tabela 5.11: Resultados da análise de DQO da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) dos experimentos selecionados de NF.	94
Tabela 5.11: Parâmetros obtidos para o modelo de renovação de superfície.	98
Tabela A.1: Dados experimentais da MF utilizando a membrana CEL100 a 1,8 bar.	111
Tabela A.2: Dados experimentais da MF utilizando a membrana CEL100 a 2,6 bar.	113
Tabela A.3: Dados experimentais da MF utilizando a membrana PES005 a 1,8 bar.	115
Tabela A.4: Dados experimentais da MF utilizando a membrana PES005 a 2,6 bar.	117

Tabela B.1: Dados experimentais da UF utilizando a membrana CEL10 a 3 bar.	121
Tabela B.2: Dados experimentais da UF utilizando a membrana CEL10 a 4 bar.	122
Tabela B.3: Dados experimentais da UF utilizando a membrana CEL10 a 5 bar.	123
Tabela B.4: Dados experimentais da UF utilizando a membrana CEL30 a 3 bar.	125
Tabela B.5: Dados experimentais para UF utilizando a membrana CEL30 a 4 bar.	126
Tabela B.6: Dados experimentais para UF utilizando a membrana CEL30 a 5 bar.	127
Tabela B.7: Dados experimentais para UF utilizando a membrana PES10 a 3 bar.	127
Tabela B.8: Dados experimentais para UF utilizando a membrana PES10 a 4 bar.	129
Tabela B.9: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES10 a 5 bar.	131
Tabela B.10: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES30 a 3 bar.	132
Tabela B.11: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES30 a 4 bar.	133
Tabela B.12: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES30 a 5 bar.	135
Tabela B.13: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES50 a 3 bar.	136
Tabela B.14: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES50 a 4 bar.	137
Tabela B.15: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES50 a 5 bar.	138
Tabela C.1: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES300 a 15 bar.	139
Tabela C.2: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES300 a 25 bar.	142
Tabela C.3: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES300 a 35 bar.	144
Tabela C.4: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES500 a 15 bar.	146
Tabela C.5: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES500 a 25 bar.	148
Tabela C.6: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES500 a 35 bar.	150
Tabela C.7: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES1000 a 15 bar.	152
Tabela C.8: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES1000 a 25 bar.	154
Tabela C.9: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES1000 a 35 bar.	156

LISTA DE SÍMBOLOS

AP = Área de permeação da membrana (m^2)

FC = Fator de concentração

J = Fluxo de permeado ($kg/ m^2.s$, $kg/ m^2.h$, $L/ m^2.s$, $L/ m^2.h$)

J_0 = Fluxo inicial de permeado

J_F = Fluxo final de permeado

$m_{alimentação}$ = Massa inicial de alimentação (g, kg)

$m_{permeado}$ = Massa de permeado (g, kg)

$m_{concentrado}$ = massa de concentrado (g, kg)

P_e = Pressão de entrada (bar)

P_s = Pressão de saída (bar)

P_T = Pressão transmembrana (bar)

R^2 = Coeficiente de determinação

t = Tempo (s, min, h)

v = Velocidade (m/s)

λ = Taxa de declínio do fluxo (h^{-1})

C_R = Concentração de soluto no permeado

C_C = Concentração de soluto no concentrado

R = Retenção

RESUMO

O uso da vinhaça, como fonte de nutrientes, matéria orgânica e água, foi uma das grandes revoluções no manejo da cultura da cana-de-açúcar. Ela é o principal efluente das destilarias de álcool e sua importância está também relacionada à economia de fertilizantes. A normativa P4.231 fez com que o setor sucroalcooleiro se preparasse para aplicar a vinhaça em distâncias maiores sendo que uma das soluções para o transporte de grandes volumes de vinhaça é o seu uso na forma concentrada nestas áreas. Em consequência do contexto estabelecido, o objetivo desse trabalho foi concentrar vinhaça por microfiltração (MF) seguido de ultrafiltração (UF) e nanofiltração (NF) direta. Os ensaios foram conduzidos em uma unidade laboratorial a 60°C e 500 rpm. O desempenho dos processos foi avaliado através da retenção de sólidos totais e fluxo de permeado. Para MF, as membranas poliméricas de celulose (CEL) de 100 kDa e polietersulfona (PES) de 0,05 µm, foram submetidas às pressões de 1,8 e 2,6 até fator de concentração (FC) igual a 4, sendo o permeado direcionado para a UF, com membranas de CEL de 10kDa e 30kDa e PES de 10kDa, 30kDa e 50kDa, nas pressões de 3, 4 e 5 bar até FC igual a 2. Para NF direta, foram utilizadas as membranas de PES de 300 Da, 500 Da e 1000 Da, nas pressões de 15, 25 e 35 bar até FC igual a 4. Os resultados da MF mostraram retenções de 34% a 41% e fluxos de permeado estabilizados por volta de 34 kg/h.m² para a celulose de 100kDa e 17 kg/h.m² para a PES de 0,05 µm, a FC=4. O processo selecionado na MF e submetidos à UF foi a celulose 100 kDa a 1,8 bar. Os resultados mostraram que a concentração por MF seguida de UF teve baixa retenção mas foi efetivo para o preparo do permeado resultando em altos fluxos na UF. Maiores retenções de sólidos totais foram obtidas na NF direta, de 75 a 85%, que também apresentou retenções satisfatórias de minerais. Os fluxos na NF se estabilizaram por volta de 45 kg/h.m², com FC=4. Concluiu-se que os processos de NF direta apresentaram os melhores desempenhos quando utilizada a pressão de 35 bar. Tanto concentrados finais obtidos pela MF seguida de UF como o da NF direta podem ser utilizados para aplicação em áreas mais distantes das usinas visto que apresentaram concentrações de 3,2 e 7,8% de sólidos totais, respectivamente. Além disso, todos os permeados estéreis formados poderão ser concentrados posteriormente ou utilizados em outros processos.

Palavras chave: *Vinhaça; Membrana; Microfiltração, Ultrafiltração e Nanofiltração.*

ABSTRACT

The use of vinasse as a source of nutrients, organic matter and water, was one of the greatest revolutions in the management of sugar cane crop. It is the main effluent from alcohol distilleries and its importance is also related to the economy with fertilizer. The technical guidelines P4.231 made the sugar cane sector to carry the vinasse to long-distance areas and a solution to reduce transportation costs is its use in concentrated form. Inside this context, the objective of this work was to study the concentration of vinasse by microfiltration (MF) followed by ultrafiltration (UF) and nanofiltration (NF) directly. The process was carried out in a laboratory unit at 60°C and 500 rpm. The process effectiveness was evaluated by the permeate flux and total solids concentration. For MF, the polymeric membranes used were cellulose 100 kDa (CEL) and PES 0.05 µm, at 1.8 and 2.6 bar until concentration factors (CF) of 4. Selected permeate from the MF was subjected to UF, for which 10 kDa, 30 kDa e 50 kDa molecular weight cut off PES and CEL membranes were evaluated, under three pressure conditions (3, 4 and 5 bar) until CF of 2. For NF directly, the membranes used were PES of 300 Da, 500 Da and 1000 Da, at 15, 25 and 35 bar until CF=4. Results of MF showed retention coefficients in the range of 34-41% and permeate flux stabilized around 34 kg/m².h for CEL and 17 kg/m².h for PES at CF=4. The selected MF process was cellulose 100 kDa at 1.8 bar. Results showed that the concentration by MF followed by UF had little changes on total solids retention, but was quite effective to prepare the permeate for concentration by UF, resulting in higher flux. Highest solids retentions were obtained in NF directly, 75-85%, and also satisfactory minerals retentions. The permeate flux stabilized around 45 kg/m².h at CF=4 for the NF. It was concluded that the best performance was with NF directly can allow its transportation to long-distance areas from distilleries with reduced costs, in which showed total solids concentrations of 3,2 and 7,8%, respectively. Also all sterile permeate may be concentrated and further used in other processes.

Key Words: *Vinasse, Concentration, Microfiltration, Ultrafiltration and Nanofiltration.*

1. INTRODUÇÃO

A vinhaça é um subproduto do processo de fabricação de etanol obtida a partir da destilação do caldo fermentado da cana-de-açúcar. Trata-se de uma suspensão de sólidos orgânicos e minerais, com elevadas DQO (Demanda Química de Oxigênio) e DBO (Demanda Biológica de Oxigênio), de onde vem seu grande potencial poluidor. É rica em matéria orgânica e potássio, com significativos teores de cálcio, magnésio e enxofre e outros minerais em pequena quantidade (PINTO, 1999).

A crescente produção de etanol e açúcar no Brasil leva, inevitavelmente, ao aumento da produção da vinhaça, agravando o problema do destino desse resíduo.

Na literatura, diversos fins para o uso da vinhaça são propostos, que vão desde a recuperação do potássio nela existente em teores razoáveis à fertirrigação da cana-de-açúcar. É possível que a razão que explica porque a fertirrigação veio a constituir a solução "vencedora" para o problema da destinação da vinhaça seja uma simples análise custo-benefício. É a solução mais difundida no país por trazer resultados positivos na produtividade agrícola da cana, além de gerar economia com a aquisição de fertilizantes.

Seu aproveitamento além de representar uma reciclagem de recursos naturais, permite atender com muito mais eficiência aos requisitos da legislação de controle da poluição.

A Norma Técnica P4.231 (CETESB, 2006) "Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola", em vigor no estado de São Paulo, estabelece os critérios e procedimentos para a aplicação da vinhaça no solo. Por apresentar elevado conteúdo de água, a vinhaça, sofre restrição para ser aplicada em áreas longe das destilarias ou terras descontínuas devido aos custos de transporte. Uma das soluções para o transporte de grandes volumes de vinhaça é

o seu uso na forma concentrada nestas áreas, desta forma, a fertirrigação de vinhaça concentrada torna-se uma solução atrativa para o setor sucroalcooleiro.

A tecnologia de membrana é utilizada quando se deseja concentrar, fracionar e/ou purificar compostos. Esse processo baseia-se na permeação de um ou mais componentes de uma suspensão/solução através de uma membrana seletiva. Elas são alternativas importantes e atraentes para substituição de processos convencionais de tratamentos de águas residuárias e para a purificação de águas de superfície (Baker et al, 1991; AHMAD et al, 2005).

As substâncias contidas na vinhaça “in natura”, responsáveis pelo seu efeito fertilizante estarão, em princípio, presentes no produto concentrado. As vantagens da concentração da vinhaça visando sua aplicação ao solo são a maior estabilidade do produto e a redução do volume a ser transportado, sendo o último fator responsável pela redução dos investimentos necessários ao transporte do produto, da destilaria à plantação.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o desempenho de várias membranas de MF, UF e NF quanto à retenção de sólidos totais e fluxo de permeado no processo de concentração de vinhaça.

2. OBJETIVO

Avaliar o desempenho de membranas de micro, ultra e nanofiltração na concentração de vinhaça.

2.1. Objetivos Específicos

Para cada um dos processos de micro, ultra e nanofiltração foram determinadas:

A influência dos materiais das membranas, o diâmetro de poro, e a pressão utilizada no fluxo de permeado;

Os coeficientes de retenção de sólidos totais, sódio e potássio;

As características físico-químicas da alimentação, do concentrado e do permeado obtidos pelos diversos processos;

Os ajustes das curvas de fluxo de permeado ao modelo matemático semi-empírico da Renovação de Superfície.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Indústria Sucroalcooleira: Produtos e Sub-Produtos

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, destacando-se como estados produtores de cana: São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Goiás, Alagoas, Mato Grosso do Sul, Pernambuco e Rio de Janeiro (CONAB, 2010).

Segundo Mallet et al. (2000) a cana de açúcar apresenta-se como matéria-prima para 92 produtos com tecnologias dominadas, sendo seus principais derivados o açúcar e o álcool. Ela é matéria prima de produtos cuja complexidade tecnológica vai do artesanato ao limite do conhecimento biotecnológico.

A previsão do total de cana a ser moída na safra 2010/11 é de 651.514,3 mil toneladas, com incremento de 7,8% em relação a safra 2009/10. Do total da cana esmagada, 209.023,7 mil toneladas (45,13%) serão destinadas à produção de açúcar, as quais devem produzir 38.151,7 mil toneladas do produto. O restante, 357.490,9 mil toneladas (54,87%), serão destinadas à produção de álcool, gerando um volume total de 28.416,9 milhões de litros de álcool (Conab, 2010).

Diferentes tipos de açúcares podem ser produzidos sendo que seu mercado é tanto industrial, nos segmentos de alimentos e bebidas, como doméstico. Seu valor econômico depende do mercado a que se destina (UNICA, 2010).

No caso da produção de álcool são três grandes grupos de produtos: alcoóis neutros, utilizados na fabricação de bebidas, cosméticos e produtos farmacêuticos; álcool etílico hidratado carburante (AEHC), mistura hidroalcoólica com no mínimo 92,6° GL, mas chegando até 96°GL, usado para consumo direto como combustível em automóveis; e álcool etílico anidro carburante (AEAC), apresentando no mínimo 99,3° GL, adicionado à gasolina para formar combustível

conhecido como “gasool” (gasolina brasileira “aditivada” com álcool anidro). (UNICA, 2010).

Além destes produtos principais, vários outros produtos podem ser fabricados a partir da cana. Comercialmente são produzidos adoçantes (frutose, glucose, sorbitol e glicerol), ácidos orgânicos (ascórbico, cítrico, glucônico e láctico), aminoácidos (MSG, lisina, treonina), enzimas e extratos de leveduras, entre outros (Mallet et al., 2000).

Quanto à utilização dos subprodutos da produção de açúcar e álcool alguns destes têm se destacado pela sua importância comercial ou mesmo por ajudar a reduzir custos pela substituição de produtos. Os subprodutos mais importantes são: o bagaço, a vinhaça (também chamado de vinhoto ou restilo), a torta de filtro e a levedura.

A previsão é que a médio e longo prazo as usinas passem a operar como “bio-refinarias”, utilizando integralmente a cana, a palha e o bagaço na geração de múltiplos produtos (Mallet et al., 2000).

3.2. Obtenção da Vinhaça

A cana que chega à usina é picada, lavada e moída para extração do caldo. Este é rico em sacarose, glicose, contém leveduras e matéria nitrogenada. O caldo é tratado por processos de clarificação, concentração e centrifugação e é então direcionado para a fabricação de álcool, de açúcar e mel final (melaço).

O açúcar e mel final são formados após processos de cozimento do caldo. O mel final, também chamado mel pobre ou melaço, é considerado um subproduto da indústria sucroalcooleira que pode ser utilizado tanto na indústria de alimentação animal como também pode ser direcionado à fabricação de álcool dando origem ao mosto de melaço.

Três tipos de mostos podem ser formados na indústria sucroalcooleira. Um a partir do melaço, outro a partir do caldo da cana e o último obtido pela mistura dos dois mostos.

O mosto é enviado às dornas de fermentação e resulta no que é chamado de vinho. Este passa por um processo de centrifugação para recuperação do fermento (leveduras) a ser reutilizado no processo de fermentação. Este vinho então é enviado para as colunas de destilação para produção do álcool hidratado, que por sua vez produz como resíduo a vinhaça.

Elias Neto (1988) afirma que os produtos obtidos a partir da destilação do vinho são basicamente, o álcool e a vinhaça, à qual atribui três origens possíveis, conforme o tipo de mosto:

- vinhaça de mosto de caldo: produzida de caldo direto para a fermentação alcoólica, normalmente em destilarias autônomas,
- vinhaça de mosto de melaço: mosto preparado com melaço, subproduto da produção de açúcar, normalmente em destilarias anexas,
- vinhaça de mosto misto: mosto preparado com caldo direto e melaço, normalmente em destilarias anexas.

Na Figura 3.1 é apresentado um fluxograma esquemático da fabricação de produtos e subprodutos gerados a partir da cana-de-açúcar.

Fluxo esquemático para fabricação de produtos derivados da cana-de-açúcar

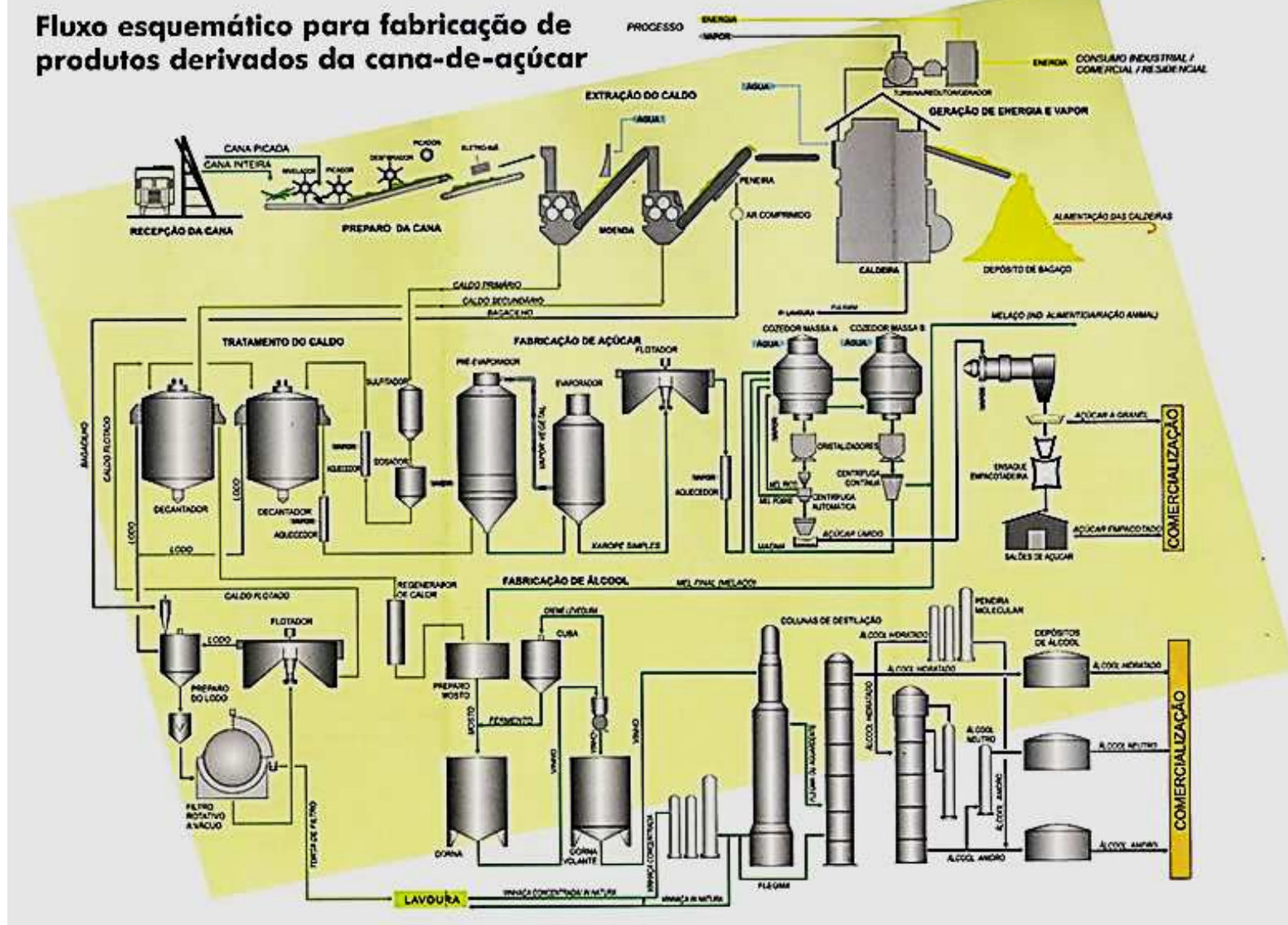


Figura 3.1: Fluxograma de fabricação de derivados da cana-de-açúcar.
Fonte: (GRUPO FARIAS, 2010)

3.3. A Vinhaça

Também conhecida como vinhoto e restilo, a vinhaça é um subproduto da indústria sucroalcooleira gerado na etapa de destilação do vinho. É o principal efluente gerado nas destilarias, possui alto poder poluidor e pode ter diversas aplicações.

Segundo Freire & Cortez (2000) a vinhaça de cana-de-açúcar é um líquido de cor marrom escuro, de natureza ácida, que sai da bica de destilação à temperatura de aproximadamente 107°C, com cheiro que vai do adstringente ao nauseabundo, característica que esta relacionada ao teor residual de açúcar o qual, por sua vez, provoca um processo de putrefação tão logo a vinhaça é descarregada, liberando gases fétidos que tornam os ambientes insuportáveis.



Figura 3.2: Vinhaça obtida a partir do caldo misto

A composição química da vinhaça é bastante variável, dependendo principalmente da composição do vinho submetido à destilação, o qual, por sua vez, está relacionado com outros fatores, tais como: natureza e composição da matéria prima, sistema usado no preparo do mosto, método de fermentação adotado, sistema de condução da fermentação alcoólica, tipo de levedura utilizada, tipo de equipamento de destilação empregado e modo de destilação adotado e tipo de flegma separado (GLÓRIA & ORLANDO FILHO, 1984).

A Tabela 3.1. apresenta uma composição detalhada da vinhaça estabelecendo os limites mínimos e máximos. Estes valores foram obtidos

através de um estudo de caracterização físico-química feita a partir da média aritmética de 64 amostras de vinhaça fornecidas por 28 usinas do estado de São Paulo (ELIAS NETO & NAKAHODO, 1995).

Tabela 3.1: Principais parâmetros físico-químicos da vinhaça.

Parâmetro	Mínimo	Médio	Máximo
pH	3,50	4,15	4,90
Temperatura (°C)	65	89	111
DBO ₅ (mg.L ⁻¹)	6.680	16.950	75.330
DQO (mg.L ⁻¹)	9.200	28.450	97.400
Sólidos Totais (mg.L ⁻¹)	10.780	25.155	38.680
Sólidos Suspensos Totais (mg.L ⁻¹)	260	3.967	9.500
Sólidos Suspensos Fixos (mg.L ⁻¹)	40	3.632	9.070
Sólidos Suspensos Voláteis (mg.L ⁻¹)	40	3.632	9.070
Sólidos Dissolvidos Totais (mg.L ⁻¹)	1.509	18.420	33.680
Sólidos Dissolvidos Fixos (mg.L ⁻¹)	921	11.872	24.020
Sólidos Dissolvidos Voláteis (mg.L ⁻¹)	588	6.580	15.000
Resíduos Sedimentáveis 1h (mg.L ⁻¹)	0,20	2,29	20,00
Nitrogênio (mg.L ⁻¹)	90	357	885
Nitrogênio Amoniacal (mg.L ⁻¹)	1	11	65
Fósforo Total (mg.L ⁻¹)	18	60	188
Potássio Total (mg.L ⁻¹)	814	2.035	3.852
Cálcio (mg.L ⁻¹)	71	515	1.096
Magnésio (mg.L ⁻¹)	97	226	456
Ferro (mg.L ⁻¹)	2	25	200
Sódio (mg.L ⁻¹)	8	52	220
Cloreto (mg.L ⁻¹)	480	1.219	2.300
Sulfato (mg.L ⁻¹)	790	1.538	2.800
Sulfito (mg.L ⁻¹)	5	36	153
Etanol (% v/v)	0,01	0,09	1,19
Levedura (% v/v)	0,38	1,35	5,00
Glicerol (% v/v)	0,26	0,59	2,50

Fonte: ELIAS NETO & NAKAHODO (1995)

Bolsanello (1980) estudou a composição de diferentes tipos de vinhaça oriundas da região de Campos-RJ, e constatou que se trata de um material

composto por uma fração variável de sólidos totais entre 2% e 7%, dentre os quais a maioria é solúvel e 75% são orgânicos e biodegradáveis. É rico em matéria orgânica e potássio, cerca de 10%, e é relativamente pobre em nitrogênio e carente em fósforo. Além desses elementos, apresenta teores apreciáveis de cálcio, magnésio e enxofre, como também de outros minerais em menores quantidades.

Ela apresenta nitrogênio, fósforo, óxidos, potássio, sulfatos, além de todas as substâncias induzidas na transformação de cana em álcool e açúcar, tais como: água, glicerina, alcoóis superiores, furfural, aldeídos, ácido succínico e acético (Decloux & Bories, 2002).

Seu elevado DBO justifica sua alta ação redutora, exigindo uma elevada quantidade de oxigênio para a decomposição da matéria orgânica. Quando disposta em cursos d'água, provoca grandes prejuízos à vida aquática e causa problemas de insalubridade pelo aumento de sua turbidez, pela produção de gases fétidos, além de conferir gosto e odor desagradáveis à água, podendo também agravar problemas relacionados às doenças endêmicas e proliferação de insetos (Freire & Cortez, 2000).

3.3.1. Usos da Vinhaça

O tratamento dado à vinhaça depende do uso a que ela se destina. A princípio, este resíduo era simplesmente descartado nos rios e riachos próximos à destilaria, acarretando muitos problemas. Devido, principalmente, ao aumento das preocupações com o meio ambiente, este hábito ficou cada vez mais difícil de ser prolongado. Com o advento do Pró-Álcool, e o aumento substancial da produção de álcool, cresceram as preocupações com o destino a ser dado ao resíduo. Assim, vários processos relacionados à destinação da vinhaça foram estudados a partir da década de 70, com o intuito de redução de volume, a diminuição do caráter poluidor e a utilização para diversos fins.

No Brasil a vinhaça é aplicada diretamente no solo como fertilizante e fonte de potássio. Esta é a prática mais difundida no país, tendo se consolidado, como "a solução" para o problema da destinação da vinhaça, principalmente por proporcionar ao solo benefícios de natureza química, física e biológica resultando em maiores produtividades.

Glória & Orlando Filho (1984) enumeraram os seguintes efeitos da vinhaça no solo: a) elevação do pH; b) aumento da disponibilidade de alguns íons; c) aumento da capacidade de troca catiônica (CTC); d) aumento da capacidade de retenção de água e) melhoria da estrutura física do solo.

Canellas (2003) estudou as propriedades químicas do solo cultivado com cana-de-açúcar e observou que a adição de matéria orgânica na lavoura por um longo prazo, 35 anos, através da preservação da palhada por ocasião da colheita ou pela adição de vinhaça, alterou as propriedades químicas do solo e proporcionou melhoria na fertilidade do solo e na qualidade da matéria orgânica do solo. Este verificou ainda acréscimo de 14% nos teores de carbono do solo na área de cana cultivados com vinhaça, quando comparadas a terras em que não se aplicou vinhaça, resultado importante visto que para solos tropicais é notadamente difícil aumentar os teores de matéria orgânica no solo.

Barbosa et. al. (2006), que utilizou vinhaça concentrada, indicou que o seu uso promoveu acréscimo na produtividade da cana-de-açúcar. Para ele, a vinhaça concentrada, com 40,75 kg/m³ de K₂O, pode substituir o uso de adubos minerais ou pode ser aplicada com a complementação nitrogenada, promovendo aumento de produtividade por área plantada.

Além da fertirrigação, outras formas de utilização da vinhaça foram estudadas. Algumas delas são:

Reciclagem da vinhaça no processo de fermentação.

- Diretamente na alimentação animal.
- Após de tratada, usada para produção de fungos.
- Uso em materiais de construção.
- Diretamente incinerada.

- Biodigestão (sendo o efluente fertirrigado no campo)

Longo (1994), avaliou os efeitos da aplicação da vinhaça *in natura* e biodigerida em propriedades físicas, químicas e bioquímicas de um solo latossolo vermelho amarelo, e verificou que com o emprego da vinhaça, tanto *in natura* como biodigerida, houve melhorias nos atributos do solo estudado, promovendo diminuição na densidade do mesmo, aumento da porosidade total, no pH, na estabilidade de agregados, na atividade da uréase, no N-total e C-orgânico, sendo que a vinhaça biodigerida, por apresentar teor de matéria orgânica inferior ao da *in natura*, ocasionou efeito menos marcante.

A biodigestão pode reduzir o potencial poluidor da vinhaça, normalizando a DBO e o pH, e ao mesmo tempo produzir gás metano e um fertilizante como resíduo. Uma tecnologia bastante utilizada neste caso é o UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), reator anaeróbico de fluxo ascendente em camadas de lodos. O reator UASB pode tratar efluentes com mais de 30 kg COD/m³ reator/dia, sendo por este motivo uma boa opção tecnológica para o Brasil (CORTEZ et al., 1998).

Além disto, a vinhaça também foi estudada por Rolim (1996), que obteve o chamado solo-vinhaça concentrada, um material formado a partir da mistura de solo arenoso ou argiloso com vinhaça concentrada a 19% de sólidos totais, utilizado para fazer tijolos de construção. Ele concluiu que os tijolos confeccionados com solo arenoso e argiloso tratados com 12% de vinhaça concentrada não apresentaram diferenças no que se refere a resistência à compressão simples, porém os valores obtidos são inferiores aos preconizados para tijolos de solo-cimento. Por outro lado, tendo em vista os resultados alcançados, eles podem ser recomendados para uso em ambientes protegidos ou em paredes revestidas e tratadas com produtos hidrofugantes.

3.3.2. Impactos Ambientais

A vinhaça como fator de poluição dos cursos d'água, é um dos resíduos industriais mais agressivos, ao devido a:

- alta taxa redutora, exigindo, conseqüentemente, uma alta taxa de oxigênio para se oxidar;
- ser um dos mais volumosos resíduos produzidos;
- ser muito ácido e corrosivo;
- alta nocividade aos animais aquáticos, como: peixes, sapos e crustáceos, dizimando a fauna piscosa por asfixia, devido à alta DBO;
- dizimar os seres da microflora e microfauna, que formam o plâncton dos rios;
- provocar à água poluída cheiro nauseoso, devido à formação de gases pútridos ocasionados pela decomposição anaeróbica ou putrefação da matéria orgânica coloidal, cor anormal, gosto desagradável, turbidez elevada e alta taxa de resíduo;
- propiciar o aparecimento de endemias, como amebíase e esquistossomose, devido à poluição das águas, além de aumentar extraordinariamente a população de pernilongos e insetos.

Ludovice (1997) afirma em seu estudo que os solos sob os canais de escoamento de vinhaça não impermeabilizados são excessivamente suscetíveis a contaminação por percolação da ordem de 91,4%, colocando em risco a potabilidade dos lençóis freáticos.

Lyra, Rolim e Silva (2003), em experimento de campo, trabalharam em uma área de 12 ha, fertirrigada com vinhaça, na qual foram instalados 30 poços de monitoramento com profundidade de 3 m, para avaliar a qualidade da água do lençol freático, concluindo que o poder de remoção do solo nas condições estudadas, para as variáveis DBO e DQO, foi satisfatória, indicando a eficiência da redução desses parâmetros, e apesar do impacto sobre a qualidade de

água do lençol freático ter sido consideravelmente minimizado, não foi o suficiente para garantir o atendimento a todas as exigências dos parâmetros ambientais, para uma taxa de aplicação de $300 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, nas condições do estudo.

3.3.3. Legislações Específicas

Partindo da necessidade de disciplinar o manejo de resíduos agroindustriais para evitar ou reduzir a ocorrência de poluição, o governo federal e estadual tem se manifestado através de políticas públicas na forma de normas técnicas e projetos de lei.

Na década de 70, diversos dispositivos legais foram propostos especificamente sobre a preservação de depósitos naturais de águas subterrâneas e disposição de resíduos agroindustriais, como é o caso da vinhaça.

No estado de São Paulo, a norma técnica mais recente é a P4.231 da CETESB, de dezembro de 2006. Esta tem como objetivo estabelecer os critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação no solo da vinhaça, gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana-de-açúcar. (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2006)

Para efeito de elaboração e cumprimento desta norma, considerou-se a necessidade de disciplinar o uso da vinhaça para evitar a ocorrência de poluição. Sendo assim, esta teve por base as legislações federais e estaduais já existentes e suas disposições.

Segue abaixo uma lista com alguns dispositivos legais que fundamentaram esta norma técnica.

Legislação Federal:

- Portaria do Ministério do Interior nº 323, de 29 de novembro de 1978 – Proíbe o lançamento direto ou indireto de vinhaça em coleções de água, pelas destilarias instaladas ou que venham a se instalar no Brasil.
- Portaria do Ministério do Interior nº 124, de 20 de agosto de 1980 – Estabelece normas para localização e construção de instalações que armazenem substâncias que possam causar poluição hídrica.
- Portaria do Ministério do Interior nº 158, de 03 de novembro de 1980 – Dispõe sobre o lançamento de vinhoto em coleções hídricas e sobre efluentes de destilarias e usinas de açúcar.

Legislação Estadual:

- Decreto nº 32.955, de 07 de junho de 1991– Regulamenta a Lei nº 6.134, de 02 junho de 1988 que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas.
- Decreto nº 41.719, de 16 de abril de 1997 – Regulamenta a Lei nº 6.171, de 04 de julho de 1988 que dispõe sobre uso, conservação e preservação do solo agrícola.

A Norma Técnica P4.231, CETESB, também especifica as restrições quanto às áreas de aplicação, suspende o armazenamento/disposição deste resíduo em áreas de sacrifício, determina procedimentos para monitoramento, verificação de contaminação, impermeabilização dos tanques e canais, caracterização do solo e da vinhaça e traça exigências e procedimentos para o “plano de aplicação de vinhaça” (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2006).

3.4. Processos de Separação por Membranas

Os processos de filtração com membranas baseiam-se na permeação de um ou mais componentes de uma suspensão/solução através de uma membrana seletiva, permitindo, assim, a concentração, o fracionamento e a purificação destes compostos. A membrana, então, pode ser definida como uma barreira seletiva que separa duas fases, o concentrado e o permeado, além de restringir o transporte de uma ou várias espécies químicas de maneira específica. Esse transporte pode ocorrer por difusão ou convecção e é induzido por um gradiente de potencial químico (pressão, concentração e temperatura) ou potencial elétrico (CHERYAN, 1998).

Esta nova tecnologia surgiu no início da década de 70, e veio para se associar aos processos clássicos de separação como destilação, filtração, adsorção, troca iônica, centrifugação, extração por solvente e cristalização com o objetivo de otimizar os processos (HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006). Atualmente, as membranas são uma das mais importantes aplicações industriais, e estudos mostram grandes aplicações para esta tecnologia, como por exemplo, purificação de água, tratamento de efluentes industriais, desidratação de solventes, recuperação de voláteis orgânicos, concentração de proteínas e muitos outros (SCOTT, 1995).

Dentre algumas vantagens relacionadas a essa tecnologia pode-se frisar as seguintes: seletividade da membrana; economia de energia, por se tratar de um processo em que não ocorre mudança de fase; facilidade de operação e simplicidade de escalonamento.

Segundo Habert, Borges e Nobrega (2006), uma das principais características dos processos de separação por membranas (PSM) é que eles podem ser operados em escoamento tangencial, além da operação clássica do tipo filtração frontal. Na filtração de escoamento tangencial a solução ou suspensão escoam paralelamente à superfície da membrana enquanto o permeado é transportado transversalmente a mesma. Neste caso, o escoamento paralelo à membrana limita o acúmulo do material retido sobre a

mesma, tornando possível uma operação do sistema em condições de regime estabelecido de transferência de massa. (Figura 3.3).

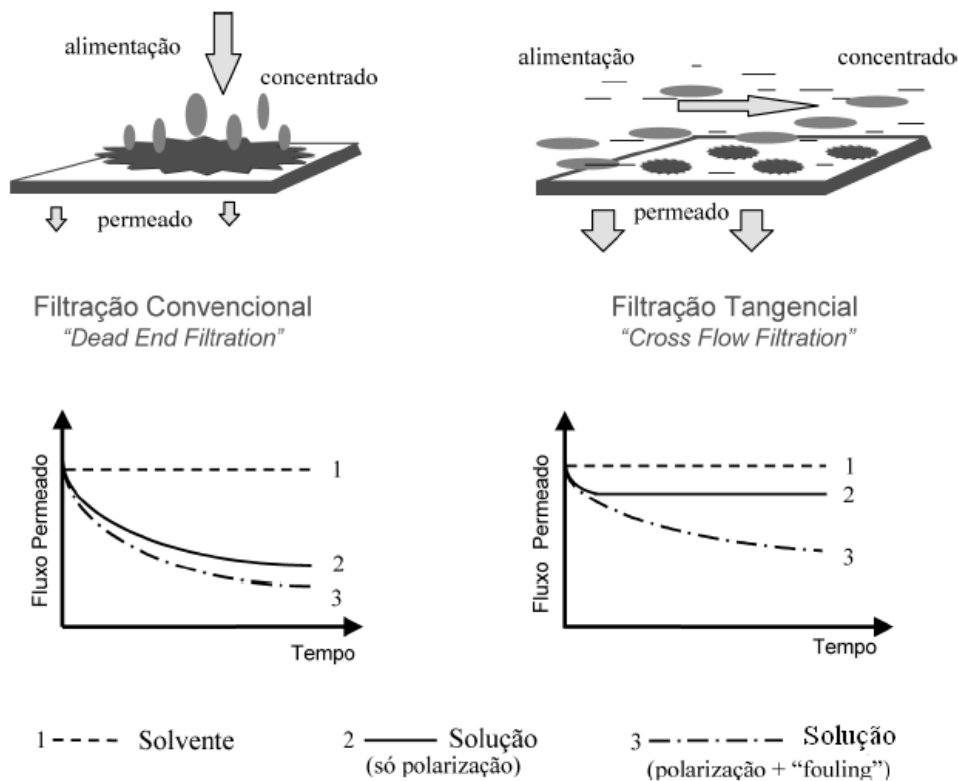


Figura 3.3: Comparação esquemática entre Filtração Convencional (Filtração Frontal) e a Filtração em Escoamento Tangencial ou Filtração Tangencial.(HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006)

Uma unidade de separação por membranas é bem simples e é basicamente composta por um tanque de alimentação, uma bomba para impulsionar o fluido, tubulações e um suporte para a membrana, além de manômetros e termômetros para controle das condições operacionais. A Figura 3.4 esquematiza um processo de separação com membranas.

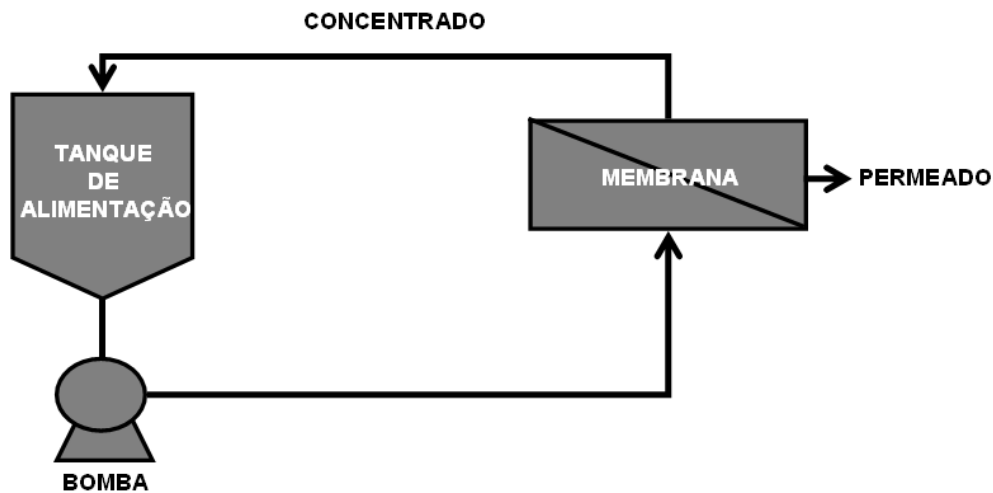


Figura 3.4: Esquema do processo de separação por membranas.

O mecanismo de separação que ocorre na prática de maneira mais complexa devido à influência de diversos parâmetros, depende da: composição da membrana, configuração do equipamento, superfície da membrana, pressão, temperatura e condições de escoamento do fluido.

A seletividade das membranas está associada à relação entre a massa molar dos elementos presentes na solução/suspensão e o tamanho dos poros da membrana. Porém, outras propriedades das moléculas podem influenciar a afinidade das espécies com o material da membrana, como por exemplo, a forma, carga elétrica, solubilidade e taxa de difusão. A performance de separação de uma membrana é afetada por sua composição, morfologia e características e também por parâmetros do processo como temperatura, pressão, velocidade e interações entre componentes da alimentação e da superfície da membrana (LU & HWANG, 1993).

3.4.1. Tipos de Processos

O fator que distingue os processos mais comuns de separação por membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa) é a aplicação de pressão hidráulica. Entretanto, a natureza da membrana controla quais componentes permearão e quais ficarão retidos, uma vez que os mesmos são diferencialmente separados de acordo com suas massas molares ou tamanho de partícula (CHERYAN, 1998).

A microfiltração é o processo de separação com membranas mais próximo da filtração clássica. Utiliza membranas porosas com poros na faixa entre 0,1 e 10 μm , sendo, portanto indicado para a retenção de materiais em suspensão e emulsões. Como as membranas de microfiltração têm poros relativamente grandes, as pressões empregadas como forças motrizes para o transporte são pequenas, dificilmente ultrapassando 3 bar. Nela, o solvente e todo o material solúvel permeia a membrana, apenas o material em suspensão é retido (HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006).

Já as membranas de UF apresentam diâmetro de poro de 0,001 a 0,1 μm e são submetidas a pressões de até 15 bar. É um processo de separação por membranas utilizado quando se deseja purificar e fracionar soluções contendo macromoléculas, ela separa compostos de alta massa molecular de compostos de baixa massa molecular (CHERYAN, 1998).

A nanofiltração é uma aplicação de utilização mais recente, e define um processo com membranas capazes de efetuar separações de moléculas de massa molecular média (entre 500 e 2000 Dalton), situando-se entre o limite superior da ultrafiltração e o limite inferior da osmose inversa (HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006)

Alguns aspectos importantes das membranas de nanofiltração são: 1) a rejeição quase total de íons com mais de uma carga negativa como sulfatos (SO_4^{2-}) e fosfatos (PO_4^{3-}); 2) a rejeição parcial de cloreto de sódio (NaCl), que pode variar de 0 a 70% e 3) a rejeição de materiais dissolvidos e íons de

cargas positivas em solução está relacionada ao tamanho e formato da molécula em questão. Portanto, a eficiência de um processo de nanofiltração depende do tamanho das partículas presentes na solução e das cargas moleculares (SCHÄFER; FANE; WAITE, 2006).

As membranas de NF apresentam estrutura assimétrica constituindo de uma pele filtrante (0,5 - 3µm), sustentada por uma subcamada de alta porosidade (100 – 300 µm) de espessura que oferece pouca resistência ao fluxo de solvente. Em geral, essas membranas possuem tamanho de poros na faixa de 5 a 10Å e massa molar média de corte variando de 500 a 2000g/mol. (HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006)

3.4.2. Fenômenos Envolvidos no Processo

No processo de separação com membranas, especialmente nos casos de ultrafiltração e microfiltração, observa-se uma queda inicial do fluxo permeado com o tempo, sendo que este decréscimo é ocasionado por fenômenos que limitam o transporte de solventes tais como a polarização da concentração, camada polarizada e a incrustação (“fouling”). Os fenômenos são devido à presença de espécies no fluido de alimentação que não podem passar para o permeado. Estes diferem, pois na polarização da concentração, as espécies acumuladas na parede da membrana encontram-se dispersas na solução, enquanto que na camada polarizada as espécies se depositam na superfície da membrana e na incrustação estas aderem dentro da matriz da mesma (CHERYAN, 1998).

A partir do início do processo de filtração, ocorre um acúmulo de solutos próximo à superfície da membrana por transporte convectivo. Parte do solvente é removida do fluido, o que ocasiona uma maior concentração de solutos na superfície da membrana em relação à solução. Esse fenômeno é conhecido como polarização da concentração e é responsável pela diferença observada entre o fluxo de permeado final e inicial, comparando-se com o fluxo de água pura (CHERYAN, 1998).

A partir da formação da polarização da concentração, uma situação de equilíbrio ocorre quando a concentração do soluto próxima à superfície filtrante excede seu limite de solubilidade, ocorrendo então a formação da camada polarizada, devido à precipitação por saturação especialmente de macromoléculas. Esta cria uma resistência adicional ao fluxo de permeado perturbando o funcionamento hidrodinâmico do sistema. A resistência ao fluxo de permeado cresce à medida que aumenta a espessura da camada polarizada. Este fenômeno é reversível, pois ao se reduzir o fluxo a zero, o gradiente de concentrações deixa de existir (SCHÄFER; FANE; WAITE, 2006).

O declínio do fluxo de permeado pode ocorrer também devido à incrustação ("fouling"). Trata-se da ação mecânica de bloqueio dos poros superficiais ou internos da membrana, dependendo de sua morfologia. A ocorrência deste fenômeno é função da distribuição dos tamanhos dos poros da membrana e dos solutos. Quando uma membrana apresenta distribuição de diâmetro de poros muito próxima a do diâmetro do soluto presente na solução, o fenômeno de incrustação é favorecido (HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006).

Incrustação pode ser definida como uma deposição pelo menos parcialmente irreversível de partículas retidas (colóides, macromoléculas, sais, etc.) na superfície da membrana ou dentro da membrana na parede do poro, que causa um declínio contínuo do fluxo (NOBLE; STERN, 1995).

3.4.3. Parâmetros Importantes para a Análise do Desempenho e Eficiência do Processo

Segundo Cheryan (1998), os parâmetros que mais influem no fluxo de permeado são a pressão transmembrana, a concentração da alimentação, a temperatura e a turbulência da alimentação (provocada pela velocidade tangencial).

O fluxo de permeado nas operações de ultrafiltração diminui quando a concentração da solução de alimentação aumenta. À medida que se processa uma determinada solução, há um aumento no teor de solutos e, conseqüentemente, na viscosidade do fluido. Com o aumento da concentração de solutos, a camada polarizada torna-se mais espessa, causando um decréscimo da difusividade e uma diminuição significativa no fluxo de permeado (CHERYAN, 1998).

O aumento da temperatura pode resultar em aumento de fluxo de permeado devido à redução da viscosidade da solução e aumento da difusividade, ou seja, mobilidade das moléculas. Por isso, é favorável aumentar a temperatura de operação sem provocar danos na membrana e no produto (CHERYAN, 1998).

Para fluidos que não contém muitos componentes causadores de incrustação, altas pressões podem aumentar o valor de fluxo, pois maior será a força motriz. Porém, casos nos quais se formam com facilidade a camada polarizada e a incrustação, o aumento na pressão resulta na compactação das partículas sobre a superfície da membrana, ocasionando um declínio acelerado do fluxo. Assim, utilizando valores mais baixos de pressão, tem-se um fluxo inicial mais baixo, mas que é mantido com o tempo (PORTER, 1990). De acordo com Cheryan (1998), o aumento da pressão transmembrana tende a aumentar o fluxo até a consolidação da camada polarizada, no chamado fluxo limite, após o qual este se torna independente da pressão, apenas aumentando a espessura desta camada. Outro parâmetro de controle importante é a pressão transmembrana. O gradiente de pressão entre os lados do concentrado e do permeado é denominado pressão transmembrana (Equação 3.1).

$$P_T = P_C - P_P \quad \textbf{Equação (3.1)}$$

onde, P_C e P_P são, respectivamente, as pressões nas correntes do concentrado e do permeado.

Porém, na prática, ela pode ser calculada como a média das pressões de entrada e saída da membrana, conforme expresso na Equação 3.2 (CHERYAN, 1998):

$$P_T = \frac{P_E + P_S}{2}$$

Equação (3.2)

na qual, PE e PS são, respectivamente, as pressões de entrada e de saída da membrana no lado do concentrado.

Ainda segundo Cheryan (1998), um acréscimo na velocidade de escoamento ou na turbulência do fluido a ser micro ou ultrafiltrado causa o arraste das partículas retidas na superfície da membrana, diminuindo a espessura da camada polarizada, provocando o aumento do fluxo de permeado.

Para avaliar o desempenho ou eficiência de uma membrana é necessária a análise de dois parâmetros: o fluxo através da membrana e a sua capacidade de retenção a um ou mais componentes (MULDER, 2003).

O fluxo (J) é definido como o volume ou massa que atravessa a membrana por unidade de área e tempo (Equação 3.3) (CHERYAN, 1998):

$$J = \frac{m_p}{A_p \cdot t}$$

Equação (3.3)

onde, mP é a massa de permeado obtido no tempo t e AP é a área de permeação.

De acordo com Marshall & Daufin (1995), o declínio no fluxo de permeado durante processos de micro e ultrafiltração ocorrem em três etapas, como indicado na Figura 3.5. Estas etapas distintas são : formação da camada polarizada (estágio I), fouling (estágio II) e consolidação do fouling (estágio III), que representam resistências adicionais à transferência de massa através da membrana. O primeiro estágio (I) é caracterizado por uma queda acentuada no fluxo que ocorre nos primeiros minutos devido à polarização da concentração na superfície da membrana. Nesse estágio, a perda do fluxo pode ser reversível. No estágio II, a variação do fluxo é decrescente, inicia-se a

precipitação dos solutos acumulados, que leva ao bloqueio dos poros e à adsorção dos componentes na membrana, ocasionando a formação do fouling. A diminuição do fluxo devido a este último fenômeno é irreversível. Por fim, no terceiro estágio (III) ocorre a consolidação do fouling, nesse estágio o fluxo decresce contínua e lentamente, tendendo à estabilidade.

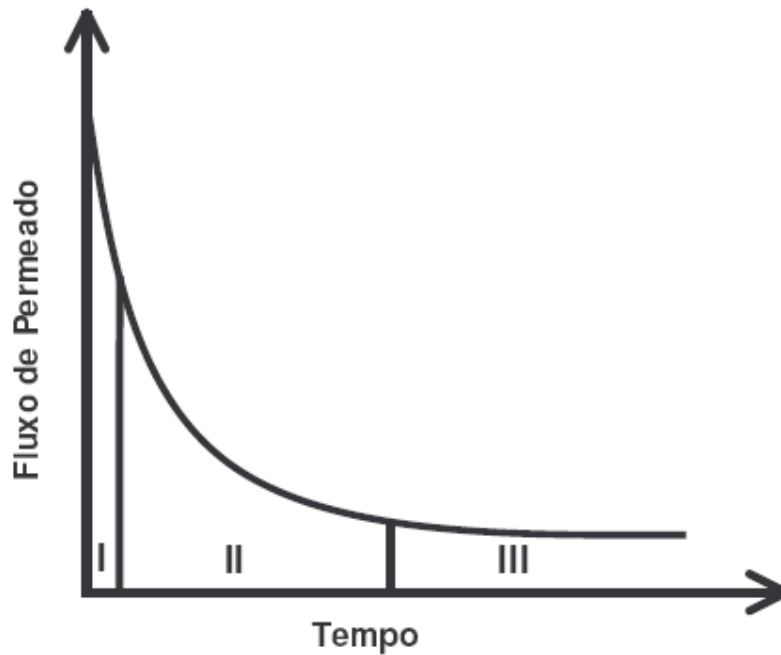


Figura 3.5. Curva típica de fluxo permeado
FONTE: (MARSHALL & DAUFIN, 1995)

Para se avaliar o grau de retenção de um componente pela membrana, utiliza-se o coeficiente de retenção, definido pela Equação 3.4:

$$R = \left(1 - \frac{C_P}{C_C}\right) * 100 \quad \text{Equação (3.4)}$$

na qual, C_P e C_C são, respectivamente, a concentração de soluto no permeado e no concentrado.

O fator de concentração (FC) quantifica a redução de massa atingida pelo processo. É a razão entre a massa inicial da alimentação ($m_{\text{alimentação}}$) pela massa de concentrado ($m_{\text{concentrado}}$). (Equação 3.5):

$$FC = \frac{m_{\text{alimentação}}}{m_{\text{concentrado}}} \quad \text{Equação (3.5)}$$

3.5. Modelo Matemático

3.5.1. Modelo da Renovação da Superfície

Diversos modelos matemáticos foram propostos para descrever a curva do fluxo de permeado, sendo a maior parte deles semi-empíricos. Modelos exponenciais freqüentemente ajustam razoavelmente bem os resultados experimentais.

A Equação 3.6 mostra um modelo proposto a partir da teoria de renovação de superfície, no qual o fluxo é representado como uma função do tempo, considerando fator de concentração constante:

$$J = J_F + (J_O - J_F)e^{(-\lambda \cdot t)} \quad \text{Equação (3.6)}$$

na qual, J_O e J_F são, respectivamente, os fluxos inicial e final de permeado, λ é a taxa de declínio do fluxo e t é o tempo.

Mondor, Girard e Moresoli (2000) avaliaram o comportamento do fluxo de permeado durante a filtração convencional de suco de maçã despectinizado utilizando membranas tubulares de cerâmica de 0,2, 0,1 e 0,02 mm. Esses autores aplicaram o modelo baseado na teoria da renovação da superfície considerando o fluxo de permeado como uma função do FC e encontraram coeficientes de determinação superiores a 0,93.

Ongaratto (2009), estudou processos de micro e ultrafiltração de suco de pitanga. O estudo foi realizado em célula de laboratório, a 35°C, 2 bar e 500

RPM até atingir o fator de concentração igual a 2. As membranas utilizadas foram: polifluoreto de vinilideno (PVDF) de 150 kDa e de 500 kDa, polietersulfona de 150 kDa e celulose de 30 kDa. De um modo geral, o modelo se ajustou bem aos dados experimentais, visto que foram obtidos coeficientes de determinação superiores a 0,88.

Silva (2010), aplicou o modelo baseado na teoria da renovação da superfície no estudo do processo de ultrafiltração de polpa de mamão utilizando a membrana de celulose de 30 kDa a 2 bar, e considerando o fluxo de permeado como uma função do tempo, encontrou taxas de declínio do fluxo entre $1,1356 h^{-1}$ e R^2 de 0,992.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

4.1.1. Matéria-Prima

Foram utilizados, aproximadamente, 60L de vinhaça fornecida pela Usina Açucareira Ester S. A., Cosmópolis, SP, coletada em Novembro de 2009.

Os ensaios foram realizados com matéria prima proveniente de um mesmo lote para redução da variabilidade das características físico-químicas da mesma.

As amostras foram acondicionadas em porções padronizadas de 1L sob congelamento a -18°C. Para realização dos experimentos, as amostras foram descongeladas, homogeneizadas e aquecidas até a temperatura de 60°C.

4.1.2. Membranas

Foram utilizadas membranas poliméricas planas da marca Microdyn-Nadir (Wiesbaden, Alemanha) de diferentes materiais e massas moleculares de corte (MWCO) para a realização dos processos de concentração. A Tabela 4.1. apresenta as principais características das mesmas.

Tabela 4.1: Características das membranas utilizadas.

Processo	Material	MWCO
Microfiltração	PES	0,05 μm
	CEL	100kDa
Ultrafiltração	CEL	30kDa
	CEL	10kDa
	PES	50kDa
	PES	30kDa
	PES	10kDa
	PES	1000Da
Nanofiltração	PES	500Da
	PES	300Da

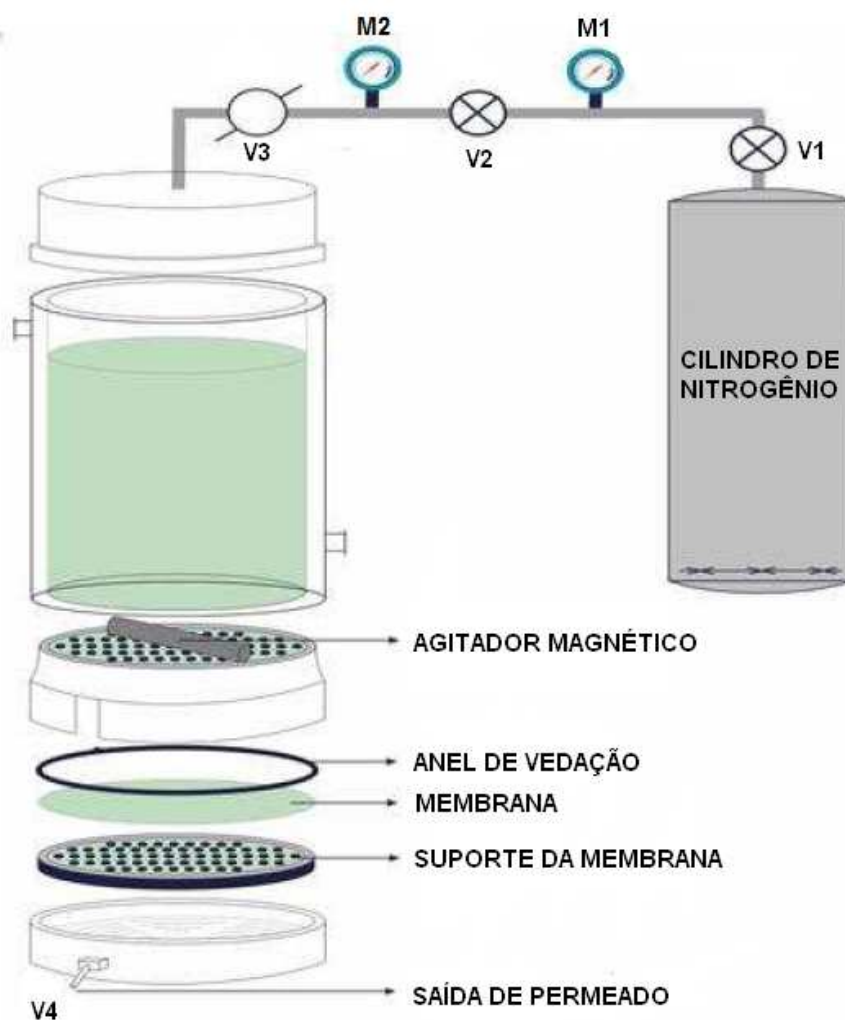
CEL= Celulose; PES= Polietersulfona

Através da Tabela 4.1. observa-se que as membranas são constituídas de materiais poliméricos sintéticos (PES e CEL). É importante ressaltar que apesar do poro de 0,05 μm ser característica de uma membrana de UF, o fornecedor a considera como de MF alegando que 0,05 μm está bem no limite do que se considera micro e ultrafiltração.

4.2. Célula de Laboratório

Os experimentos de micro, ultra e nanofiltração foram conduzidos em célula laboratorial que está instalada no Laboratório de Medidas Físicas (LAMEFI), DEA, FEA, UNICAMP.

A célula laboratorial é de aço inox AISI 304, constituída de um cilindro encamisado de diâmetro interno de 8,1 cm e altura de 27 cm, com capacidade para 800 mL de amostra e que opera até uma pressão de 40 bar (Figura 4.1 e 4.2).



V1 – Válvula abre/fecha do cilindro de nitrogênio
M1 – Manômetro 1: fornece a leitura da pressão interna do cilindro de nitrogênio quando V1 está aberta
V2 – Válvula de regulagem: regula a pressão no interior da célula
M2 – Manômetro 2: fornece a leitura da pressão no interior da célula

Figura 4.1: Equipamento de escala laboratorial de célula de micro, ultra e nanofiltração.

Na parte inferior deste cilindro há uma base e uma saída de permeado. Sobre a base é montado um suporte que serve de apoio ao disco de membrana. Anéis de vedação são utilizados para evitar os possíveis vazamentos entres essas partes. Logo acima da membrana existe outro suporte que serve de apoio para o agitador magnético. O agitador magnético promove turbulência na amostra, com o intuito de arrastar partículas próximas

à superfície da membrana e dessa forma diminuir efeitos negativos da polarização da concentração e formação da camada gel, aumentando consequentemente o fluxo de permeado.

Na parte superior do cilindro existe a entrada do gás nitrogênio que é utilizado para fornecer a pressão para o interior da célula gerando a força motriz do processo. O ajuste de pressão é feito por meio da válvula de regulação V2. A válvula V1 permite abrir e fechar o cilindro de nitrogênio e V3 é uma válvula de escape, que quando está aberta, permite a retirada do gás do interior da célula para o ambiente externo. Os manômetros M1 e M2 são usados respectivamente para leitura da pressão no interior do cilindro e leitura da pressão no interior da célula.

A temperatura do processo é controlada por meio da circulação de água aquecida através de um banho termostático modelo NT281 (Nova Técnica, Piracicaba, SP) na camisa do equipamento.



Figura 4.2: Fotografia da unidade laboratorial

4.3. Métodos

4.3.1 Determinações Analíticas

As caracterizações da matéria-prima, concentrado e permeado foram realizadas através de análises físico-químicas em triplicata. A Tabela 4.2 apresenta as análises realizadas, juntamente com suas respectivas metodologias.

Tabela 4.2: Análises e metodologias utilizadas para as determinações analíticas.

Análise	Tipo de Método	Número do Método
pH	Potenciométrico	981.12 (AOAC, 1997)
Sólidos Totais	Secagem em estufa	2540-B (APHA, AWWA, WPCF., 2005)
Sólidos Suspensos	Gravimétrico	2540-C (APHA, AWWA, WPCF., 2005)
Sólidos Dissolvidos	Gravimétrico	2540-D (APHA, AWWA, WPCF., 2005)
Cinzas	Incineração em mufla	3030 (APHA, AWWA, WPCF., 2005)
Potássio	Fotometria de chama	3500-K (APHA, AWWA, WPCF., 2005)
Sódio	Fotometria de chama	3500-Na (APHA, AWWA, WPCF., 2005)
DQO	Colorimétrico	5220 (APHA, AWWA, WPCF., 2005)

Os equipamentos utilizados para realização das análises foram: balança analítica (marca BEL Engineering), chapa aquecedora (marca Marconi, modelo MA085), pHmetro (marca QUIMIS, modelo Q400AS), estufa de secagem e esterilização (marca FANEM, modelo 320-SE), estufa com circulação de ar (marca MARCONI, modelo MA035), mufla (marca QUIMIS, modelo 318.D21), fotômetro de chama (marca Analyser, modelo 910M), bomba de vácuo (marca TECNAL, modelo TE-058), espectrofotômetro (marca HACH, modelo DR/4000U) e bloco digestor (marca HACH).

Com exceção da análise de Sódio e Potássio, realizada no Laboratório de Engenharia de Processos (LEP), DEA, FEA, UNICAMP, e a análise de Demanda Química de Oxigênio (DQO), realizada no Laboratório de Processos

Fermentativos e Tratamento de Águas Residuárias, DEA, FEA, UNICAMP, as outras análises foram realizadas no LAMEFI.

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) foi determinada somente nos processos selecionados. Os valores de DQO foram calculados a partir da equação da reta gerada pela solução padrão de biftalato ácido de potássio, de acordo com a Figura G.1 apresentada no Apêndice G. Para realização das análises, as amostras foram diluídas 100 vezes.

Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente, fazendo uso do software estatístico SAS® (Statistical Analysis System), versão 9.2, para verificar as diferenças significativas entre as amostras de alimentação, permeado e concentrado. Para a análise estatística, utilizou-se o teste de Tukey e estabeleceu-se como nível de significância 95%.

4.3.2 Procedimento Experimental

Para a concentração de vinhaça, amostras da matéria-prima foram descongeladas em refrigerador por um intervalo de 24h e em seguida foram aquecidas em banho-maria até a temperatura de 60°C, para assim serem submetidas ao processo de filtração. As condições experimentais pré-estabelecidas foram 60° C e 500 rpm.

No início de cada processo, a membrana foi submersa em água destilada por 30 min e em seguida o sistema foi operado com água destilada sob as mesmas condições operacionais da corrida. Estabelecidas estas condições e drenada a água, a vinhaça, pré-aquecida foi transferida para a unidade laboratorial.

O fluxograma das etapas do trabalho na preparação da membrana e no processamento da vinhaça está representado na Figura 4.3.

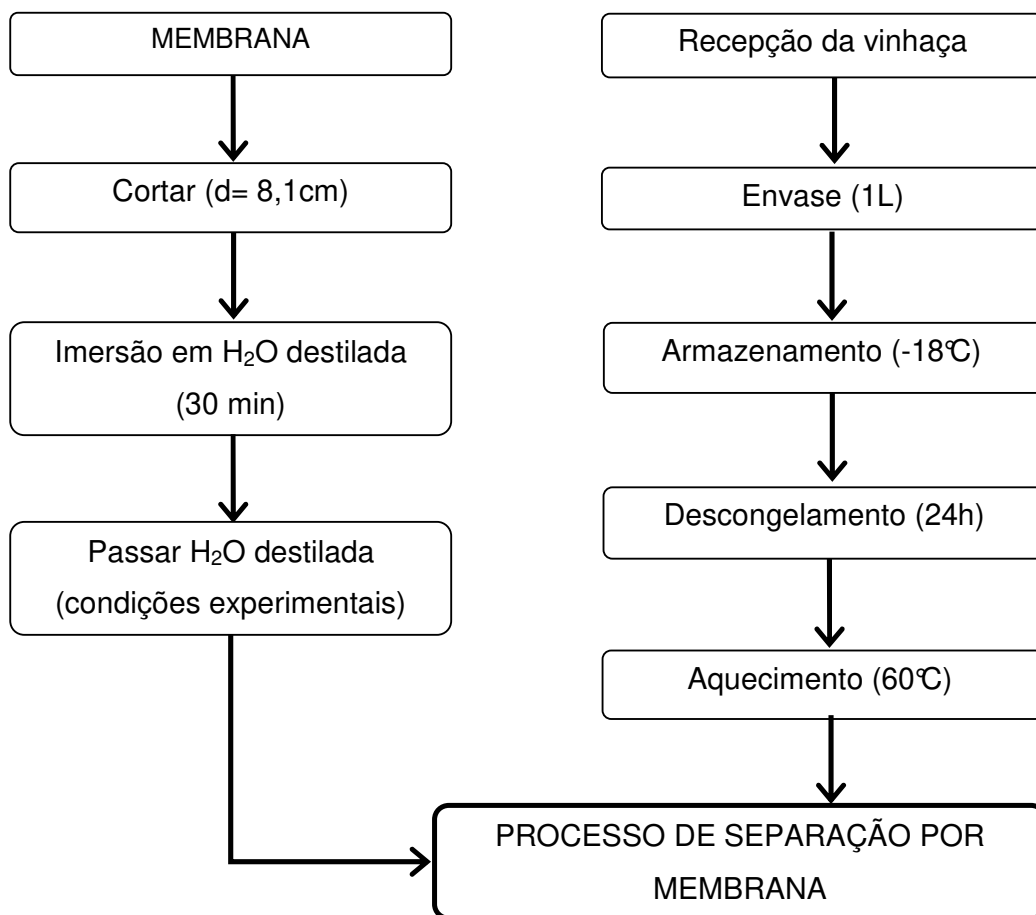


Figura 4.3: Fluxograma de processamento da vinhaça em laboratório.

A Tabela 4.3 especifica a pressão a ser utilizada em cada membrana operando a 60°C e 500 rpm.

Tabela 4.3: Condições experimentais das corridas realizadas.

	Nº da corrida	Material	MWCO	Pressões (bar)
MF	1	PES	0,05 µm	1,8
	2	PES	0,05 µm	2,6
	3	CEL	100kDa	1,8
	4	CEL	100kDa	2,6
UF	5	CEL	30kDa	3
	6	CEL	30kDa	4
	7	CEL	30kDa	5
	8	CEL	10kDa	3
	9	CEL	10kDa	4
	10	CEL	10kDa	5
	11	PES	50kDa	3
	12	PES	50kDa	4
	13	PES	50kDa	5
	14	PES	30kDa	3
	15	PES	30kDa	4
	16	PES	30kDa	5
	17	PES	10kDa	3
	18	PES	10kDa	4
	19	PES	10kDa	5
NF	20	PES	1000Da	15
	21	PES	1000Da	25
	22	PES	1000Da	35
	23	PES	500Da	15
	24	PES	500Da	25
	25	PES	500Da	35
	26	PES	300Da	15
	27	PES	300Da	25
	28	PES	300Da	35

Para a etapa de concentração por membranas foram estudados dois procedimentos em paralelo. Um que utilizava processos seqüenciais de MF e UF e outro que utilizava a NF direta para obtenção do concentrado de vinhaça.

Para a MF, utilizou-se 800 mL de vinhaça e o processo sucedeu-se até um FC = 4, gerando 600 mL de permeado e 200 mL de concentrado. Feito o procedimento para as 4 combinações entre as membranas e as pressões,

selecionou-se a condição que gerou o melhor fluxo de permeado ou coeficiente de retenção, sendo este permeado, direcionado para UF.

Selecionado o processo de MF, foi necessário fazer uma série de 10 repetições desta corrida para se obter volume de permeado suficiente para realizar todas as corridas de UF. O processo de UF partiu de um volume inicial de 400 mL sendo concentrado até um $FC = 2$, gerando 200 mL de permeado e concentrado.

4.3.2.1 Processo de MF e UF

Na Figura 4.4 está o procedimento experimental da concentração da vinhaça pelo processo seqüencial de MF e UF.

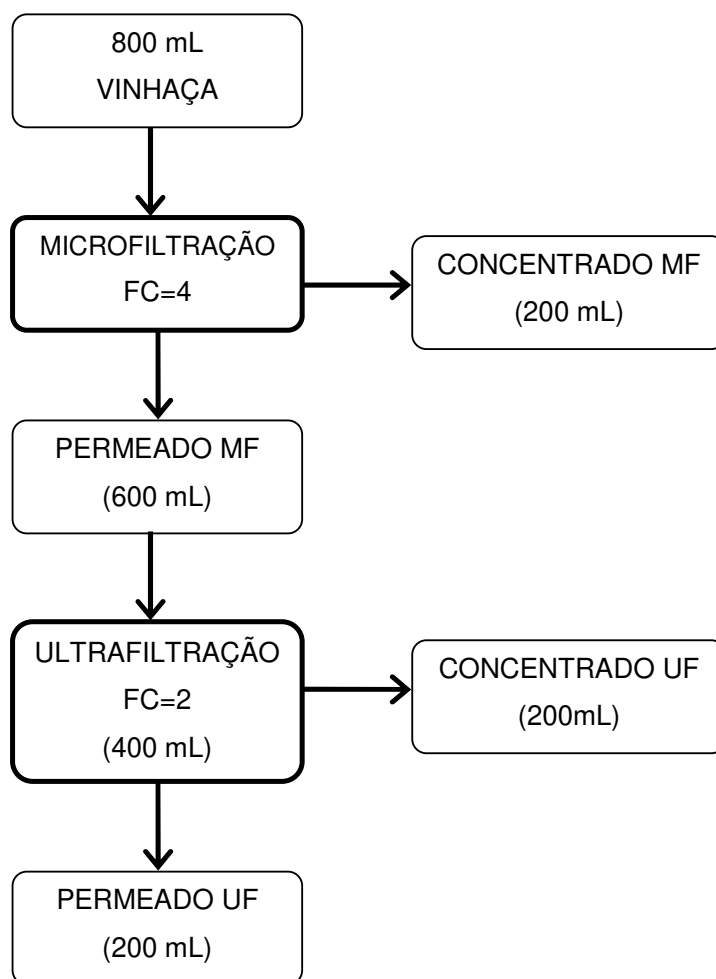


Figura 4.4: Processo seqüencial da MF e UF.

4.3.2.2 Processo de NF

A Figura 4.5 apresenta o processo de nanofiltração da vinhaça. Para este processo, utilizou-se 800 mL de vinhaça e o processo sucedeu-se até um $FC = 4$, gerando 600 mL de permeado e 200 mL de concentrado.

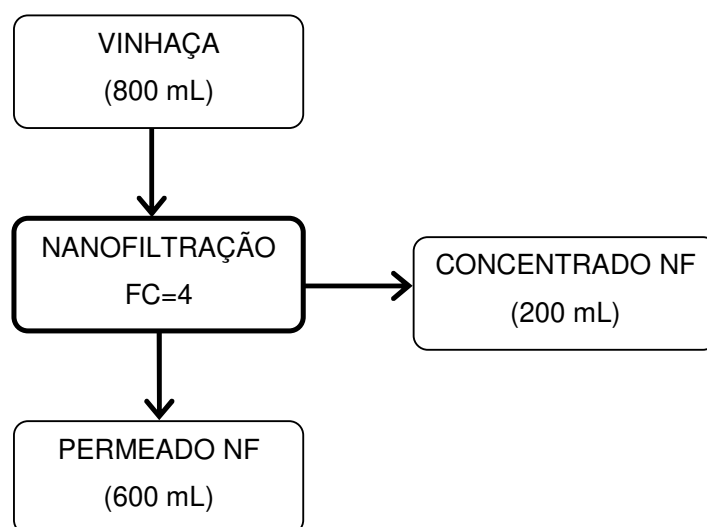


Figura 4.5: Processo de nanofiltração.

Desta forma, foram realizadas 38 corridas: 14 de MF, das quais 4 foram para a seleção e 10 para acúmulo de volume de permeado para submeter a UF; 15 de UF; 9 de NF.

4.4. Modelos Matemáticos

Foi realizado o ajuste dos dados experimentais de fluxo acumulado de permeado por tempo ao modelo matemático baseado na teoria de renovação de superfície, apresentado na Equação 3.6, utilizando o software Statistica 9.2,

que gerou como resposta o valor de “ λ ” (taxa de declínio de fluxo), R^2 (coeficiente de determinação), fluxo inicial e final.

Como inicialmente há variações das condições operacionais e o sistema ainda está se ajustando aos parâmetros previamente estabelecidos para o processo, os primeiros pontos experimentais podem gerar valores de fluxo nas condições um pouco diferente daquelas desejadas. Assim, os três primeiros pontos das curvas de fluxo versus tempo correspondentes aos 90 segundos iniciais de cada ensaio foram desconsiderados no ajuste ao modelo matemático, obtendo-se, dessa forma, resultados mais consistentes com a realidade das condições experimentais definidas.

Em todos os casos, o valor inicial do fluxo (J_0) e final (J_f), foram autorizados a variar, a fim de minimizar o provável impacto dos erros experimentais dos fluxos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Características Físico-Químicas da Matéria-Prima

As características físico-químicas da vinhaça *in natura* proveniente de mosto misto utilizada para os experimentos estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Características físico-químicas da vinhaça *in natura*.

Determinações	Vinhaça <i>in natura</i>
Sólidos Totais (%)	2,95±0,09
Umidade (%)	97,05±0,09
Sólidos Suspensos (mg/L)	1142±36
Sólidos Dissolvidos (mg/L)	25697±62
Sódio (mg/L)	900±58
Potássio (mg/L)	1275±65
Cinzas (%)	0,80±0,01
pH	3,93±0,04
DQO (mg/L)	26750±177

* média em triplicata ± desvio padrão

Observa-se que a vinhaça é constituída basicamente de água (97%) e que seu conteúdo de sólidos totais representa aproximadamente 3% da sua composição.

O valor de cinzas de 0,80±0,01% foi muito semelhante ao encontrado por Rodella, Parazzi e Cardoso (1980), ao estudar a composição vinhaça obtida de destilaria autônoma.

Dentre os minerais, podemos destacar a presença de potássio como o componente mais abundante. Os valores de potássio encontrados para a

vinhaça se enquadram nos limites estabelecidos por Elias Neto & Nakahodo (1995), de 814 a 3852 (mg/L de K₂O).

O sódio apresentou uma concentração consideravelmente acima do que se relata na literatura. Lyra, Rolim e Silva (2003), que estudaram a topossequência de solos fertirrigados com vinhaça verificaram teores de 350 mg/L.

O pH encontrado na caracterização da matéria-prima foi de $3,93 \pm 0,04$ e condiz com o relatado por Santana (1985), que encontrou como média aritmética de quatro amostras de vinhaça de mosto misto analisadas um pH de $3,95 \pm 0,34$.

O valor de DQO determinado para a vinhaça utilizada foi de 26750 ± 177 mg/L, confirmando o levantamento relatado por ANA (2009) que estabelece como limites 25000 a 40000 mg/L.

Os valores encontrados para sólidos dissolvidos e sólidos suspensos também se encontram dentro da faixa de concentração apresentado por Elias Neto & Nakahodo (1995).

5.2. Processo Seqüencial de MF e UF

5.2.1. Fluxos de Permeado Obtidos no Processo de MF

A Figura 5.1. apresenta o perfil dos fluxos de permeado dos experimentos de MF.

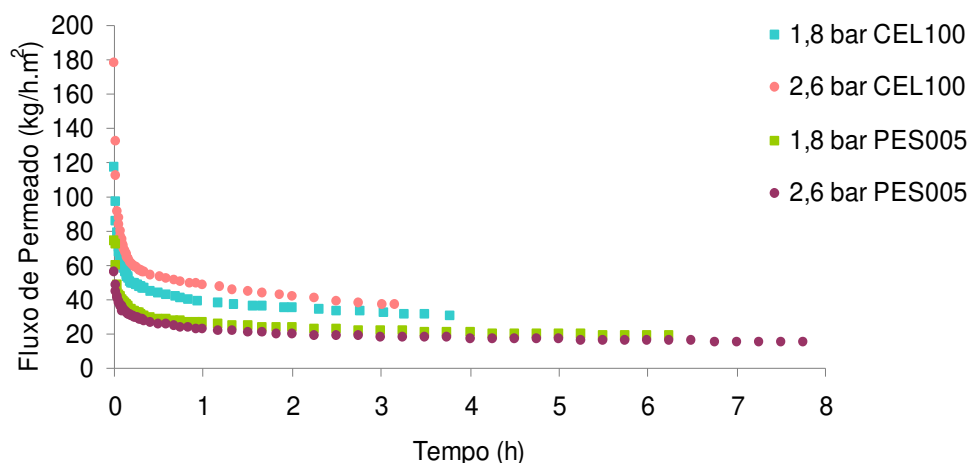


Figura 5.1: Curva de fluxo de permeado em função do tempo para as membranas CEL100 e PES005 nas pressões de 1,8 e 2,6 bar.

O comportamento da queda de fluxo de permeado apresentou-se similar às curvas típicas de fluxo de permeado, descritas no modelo de Marshall & Daufin (1995).

Foram observadas quedas bruscas nos fluxos de permeado nos primeiros minutos dos processos de MF. De acordo com Cheryan (1998) este é um comportamento especialmente acentuado nos processos de MF, principalmente pela resistência à permeação causada pelo bloqueio físico dos poros após alguns segundos ou minutos de processo.

O material da membrana e a massa molecular de corte são fatores que interferem no desempenho do fluxo de permeado. A membrana CEL100 apresentou fluxos mais elevados quando comparados aos da PES005 (MWCO $\approx$ 500kDa) nas pressões de 1,8 e 2,6 bar. Isso pode estar relacionado ao fato de que a membrana PES005 ficou mais suscetível ao entupimento dos poros por possuir massa molecular de corte 5 vezes maior que a membrana CEL100, de 100 kDa.

De acordo com Fukumoto, Delakis e Girard (1998), para fluidos que apresentam uma composição com a presença de partículas com tamanhos variados, o fluxo pode não aumentar proporcionalmente com o tamanho do

poro devido ao fenômeno do *fouling*. Isso pode ser devido ao fato de que as partículas do soluto que apresentam mesmo tamanho que os poros da membrana podem causar uma maior possibilidade de entupimento dos mesmos, ou seja, escolher uma membrana com poros maiores não significa obter melhores fluxos.

Na Figura 5.1, também pode ser observado o efeito da pressão nas curvas obtidas. Neste caso, o aumento da pressão ocasionou comportamentos diferentes de fluxos para as membranas CEL100 e PES005. Para a membrana CEL100 foram obtidos fluxos de 23,71 e 26,56 kg/h.m² para as pressões de 1,8 para 2,6 bar, respectivamente. Já para a membrana PES005 o comportamento foi exatamente o contrário, o aumento da pressão gerou diminuição do fluxo, fato que pode ser explicado pela maior compactação da camada polarizada.

Ainda na Figura 5.1 mostra-se que os processos que utilizaram a membrana PES005 tenderam ao estágio estacionário em um intervalo de tempo menor que os processos com a membrana CEL100, porém, os fluxos obtidos para a membrana CEL100 foram consideravelmente melhores, conforme apresentados no Apêndice A.

5.2.2. Produtos Obtidos no Processo de MF

A vinhaça usada como alimentação nos processos de microfiltração e os produtos obtidos (concentrado e permeado) ao ser atingido fator de concentração igual a 4 estão apresentados na Figura 5.2. O concentrado apresentou-se opaco, turvo e com presença de partículas suspensas visíveis a olho nu o que lhe aferiu uma coloração um pouco mais clara que a vinhaça. O permeado encontra-se límpido, com cor brilhante e clarificado apesar de escuro, mostrando que a microfiltração não foi eficiente na remoção de cor.



Figura 5.2: Vinhaça *in natura*, concentrado e permeado obtido nos processos de MF.

Como podemos observar na Figura 5.2, a vinhaça se apresenta com uma cor marrom escuro o que condiz com a descrição apresentada por Freire & Cortez (2000), porém, quando foi coletada diretamente da bica de destilação, esta se apresentava com uma cor mais clara com tons pardos. Esse escurecimento ocorre devido à oxidação da mesma quando exposta ao ar, conforme relatado por Silva & Silva (1986).

A Tabela 5.2 e 5.3. apresentam os resultados das análises físico-químicas das amostras de alimentação, concentrado e permeado obtidos para os experimentos realizados com as membranas de CEL100 e PES005 para as pressões de 1,8 e 2,6 bar.

Tabela 5.2: Resultados das análises de cinzas, sódio e potássio da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) obtidos por processos de MF de vinhaça.

Membrana	P (bar)	Corrente	Cinzas (%)	Sódio (mg/L)	CR (%) Sódio	Potássio (mg/L)	CR (%) Potássio
CEL100	1,8	A	0,80±0,01 ^b	950±50 ^{bcd}		1250±50 ^{bc}	
		P	0,77±0,00 ^c	850±50 ^{de}	26	1200±0 ^{bc}	8
		C	0,85±0,00 ^a	1150±50 ^a		1300±0 ^{abc}	
CEL100	2,6	A	0,80±0,01 ^b	850±50 ^{de}		1350±15 ^{ab}	
		P	0,76±0,01 ^c	800±0 ^e	20	1350±50 ^{ab}	7
		C	0,87±0,00 ^a	1000±0 ^{bc}		1450±50 ^a	
PES005	1,8	A	0,80±0,01 ^b	850±50 ^{de}		1300±100 ^{abc}	
		P	0,75±0,02 ^c	800±0 ^e	16	1250±50 ^{bc}	7
		C	0,87±0,02 ^a	950±50 ^{bc}		1350±50 ^{ab}	
PES005	2,6	A	0,80±0,01 ^b	950±50 ^{de}		1200±0 ^{bc}	
		P	0,76±0,00 ^c	900±0 ^{de}	14	1150±50 ^c	4
		C	0,87±0,00 ^a	1050±50 ^{ab}		1200±0 ^{bc}	

Letras diferentes (na mesma coluna) significam diferença estatística, considerando nível de confiabilidade de 95%.

Os valores de cinzas variam pouco entre os diferentes experimentos realizados. Para o concentrado, esse valor variou de 0,85% a 0,87% e no permeado variou de 0,75% a 0,77%, observando-se portanto, que este componente foi identificado em ambas as frações obtidas. No geral, não houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) na concentração de cinzas entre as amostras de concentrado obtidas para cada membrana estudada, mostrando que nem a pressão nem o tipo de membrana influenciam na retenção desse componente. Isso pode ser justificado pelo fato de que as cinzas, por serem elementos de pequena massa molecular atravessam as membranas de microfiltração e a camada polarizada, que por sua vez, não exerce nenhum efeito filtrante que resulte em retenção destes componentes.

De acordo com Kuberkar & Davis (2000), em estudos com membranas de MF, a presença de partículas grandes causa a formação de uma camada que serve como uma segunda membrana que age como um filtro e retém muitas das pequenas partículas antes que elas alcancem a superfície da

membrana, porém algumas chegam à superfície da membrana, causando uma resistência extra à permeação.

Para todos os processos de microfiltração as retenções de potássio e sódio foram muito pequenas. Foram encontradas coeficientes de retenção na faixa de 4 a 8% para o potássio e de 14 a 26% para o sódio. Este fato é esperado quando se leva em conta as massas moleculares de corte dessas membranas e o tamanho das substâncias em questão. As pequenas retenções encontradas podem ser explicadas pela existência de uma torta que se forma no processo e que possui relativo poder filtrante ou talvez pela interação desses íons com compostos de maiores massas moleculares.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados das análises de pH, sólidos totais, sólidos suspensos e sólidos dissolvidos obtidos para a alimentação e as frações de permeado e concentrado geradas pelos processos de MF de vinhaça.

Tabela 5.3: Resultados das análises de pH, sólidos totais, sólidos suspensos e sólidos dissolvidos da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) obtidos por processos de MF de vinhaça.

Membrana	P (bar)	Corrente	pH	Sólidos Totais (%)	CR (%) Sólidos Totais	Sólidos Suspensos (mg/l)	Sólidos Dissolvidos (mg/l)
CEL100	1,8	A	3,91±0,04 ^d	2,84±0,00 ^h		1120±0 ^d	25770±230 ^d
		P	4,01±0,02 ^b	2,50±0,01 ^j	34	0±0 ^e	23813±70 ^e
		C	3,99±0,01 ^{bc}	3,80±0,02 ^d		4430±30 ^b	31507±311 ^b
CEL100	2,6	A	3,96±0,00 ^c	2,94±0,00 ^g		1190±10 ^c	25620±160 ^d
		P	4,01±0,01 ^b	2,56±0,00 ⁱ	37	0±0 ^e	21813±70 ^f
		C	3,98±0,01 ^{bc}	4,09±0,00 ^c		4620±40 ^a	33507±311 ^a
PES005	1,8	A	3,88±0,00 ^d	3,04±0,00 ^e		1150±10 ^{cd}	25690±230 ^d
		P	3,92±0,01 ^d	2,57±0,00 ⁱ	41	0±0 ^e	24130±110 ^e
		C	3,90±0,01 ^d	4,36±0,02 ^a		4453±31 ^b	30380±20 ^c
PES005	2,6	A	3,96±0,01 ^c	2,97±0,00 ^f		1110±10 ^d	25710±250 ^d
		P	4,06±0,01 ^a	2,52±0,00 ^j	41	0±0 ^e	23720±57 ^e
		C	3,98±0,01 ^{bc}	4,29±0,00 ^b		4460±53 ^b	31530±99 ^b

Letras diferentes (na mesma coluna) significam diferença estatística, considerando nível de confiabilidade de 95%.

Através da Tabela 5.3 pode-se verificar que os valores de pH não foram influenciados pelo processo de separação por membranas. Os valores encontrados vão de 3,88 à 4,06.

Considerada a análise estatística a 5% de significância, pode-se verificar na Tabela 5.3, que todas as frações obtidas nos ensaios de microfiltração para as análises de sólidos totais, suspensos e dissolvidos possuem concentrações estatisticamente diferentes.

Foi verificado o valor médio de 2,95% para a concentração de sólidos totais da vinhaça. As pequenas diferenças encontradas na concentração de sólidos da matéria-prima deve-se à pequenas variações na composição da porção de amostra utilizada para cada experimento. O concentrado apresentou concentrações de 3,80 a 4,36%, estes limites variam devido às retenções proporcionadas pelo processo de filtração.

Considerando a variação apresentada na porcentagem de sólidos totais presentes na vinhaça *in natura* pode-se observar, através da razão entre a concentração no concentrado e na alimentação, que os processos com a membrana PES005 são os que possuem melhores retenções, e que não foram verificadas influências das pressões para este parâmetro. O comportamento de retenção observado, pode ser explicado apenas pelas diferentes massas moleculares de corte apresentadas entre as membranas CEL100 e PES005.

Em sua maioria, para os valores de sólidos dissolvidos observou-se que não houve diferenças significativas entre os resultados obtidos para as amostras de alimentação e de permeado entre si. Verificou-se concentrações de sólidos dissolvidos de 21813 a 24130 mg/l para o permeado, e na faixa de 30380 a 33507 mg/l para o concentrado. Os sólidos suspensos, por sua vez foram 100% retidos em todas as membranas, sendo a concentração média dos concentrados gerados de 4491 ± 39 mg/l.

A Tabela 5.3 também apresenta os coeficientes de retenção de sólidos totais, calculada pela Equação 3.4. Os processos com a membrana CEL100 obtiveram retenções de 34% e 37% para as pressões de 1,8 e 2,6 bar, respectivamente. Já para a membrana PES005 houve 41% de retenção para

ambas as pressões estudadas. Para este caso pode-se dizer que o fenômeno de retenção foi mais fortemente influenciado pela formação da camada polarizada do que pela variação da pressão aplicada.

Como as retenções de sólidos totais foram muito parecidas, optou-se pela escolha do processo principalmente em função das análises dos fluxos de permeado.

Conforme as características relacionadas aos coeficientes de retenção de sólidos totais obtidos pela membrana CEL100 em ambas as pressões utilizadas e o aumento de fluxo (16%) obtido através da elevação da pressão de 1,8 para 2,6 bar, no $FC = 4$, optou-se pelo processo que proporcionou menor gasto de energia, selecionando a corrida executada a 1,8 bar.

O processo escolhido, CEL100 a 1,8 bar, partiu de vinhaça com 2,8% de sólidos totais gerando um concentrado de 3,8% e um permeado de 2,5%, aumentando em cerca de 34% a concentração dos sólidos totais presentes na vinhaça.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados da análise de DQO das frações obtidas pelo processo de selecionado de MF. Estes foram determinados a partir da equação gerada pela curva padrão apresentada na Figura G.1, disposta no Apêndice G.

Tabela 5.4: Resultados da análise de DQO da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) do experimento selecionado na MF.

Membrana	P (bar)	Correntes	DQO (mg O ₂ /L)
CEL100	1,8	A	26750±890
		P	20583±471
		C	39000±354

As frações de permeado e concentrado apresentaram valores de 20583 e 39000 mg O₂/L, respectivamente, partindo de uma vinhaça com 26750 mg O₂/L. Observa-se que o valor obtido para a fração concentrada apresenta um

valor 2 vezes maior que o correspondente a fração de permeado. O DQO é um parâmetro que mede a quantidade de matéria orgânica suscetível de ser oxidada por meios químicos. Ele é um parâmetro importante a se determinar para a vinhaça principalmente por que indica o grau de agressividade deste poluente para a vida aquática quando lançado nos cursos de água.

Brito & Rolim (2005), utilizaram vinhaça com DQO de 48860 mgO₂/L no solo. Nesse estudo, obteve-se que independente da dose de vinhaça aplicada, foram encontrados ótimas taxas de remoção no lixiviado, mostrando a eficiência do solo na remoção de matéria orgânica.

5.2.3. Fluxos de Permeado Obtidos no Processo de UF

O permeado selecionado no processo de microfiltração da vinhaça foi então submetido aos processos de ultrafiltração com o objetivo de retenção máxima dos componentes que permearam pelas membranas de microfiltração.

As Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam os perfis de fluxo nos experimentos realizados de UF.

A Figura 5.3 apresenta as curvas de permeação das membranas CEL30 e PES50, nas pressões de 3, 4 e 5 bar. Os processos resultaram em fluxos extremamente altos comparados aos obtidos nos processos de MF e NF, como pode ser observado através das tabelas dos Apêndices A, B e C. Os valores de pressão influenciaram no fluxo de permeado, que aumentou com a elevação da pressão aplicada.

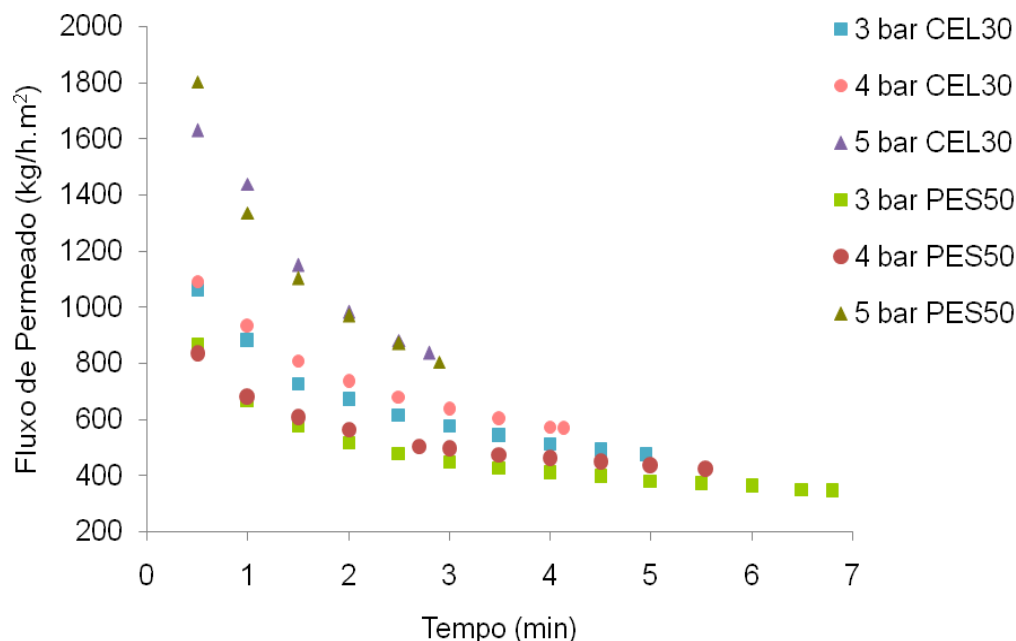


Figura 5.3: Curva de fluxo de permeado em função do tempo para as membranas CEL30 e PES50 nas pressões de 3, 4 e 5 bar.

O comportamento dos fluxos e a influência do diâmetros dos poros das membranas foi estudada por Chamchong & Noomhorm (1991) e por Fukumoto, Delaquis e Girard (1998) que observaram melhores fluxos de permeado em membranas com menor diâmetro de poro, para algumas membranas de MF e UF. Isto pode ser justificado pela maior suscetibilidade das membranas de maior diâmetro de poro ao entupimento, fato este que influencia no comportamento de fluxo. Pode-se supor que este tenha sido o fenômeno aqui observado comparando-se as curvas na Figura 5.3.

Observa-se que a pequena diferença entre a massa molecular de corte das membranas utilizadas, 50 e 30 kDa, não exerceu influência no desempenho dos fluxos de permeado, para a pressão transmembrana de 5 bar, sendo os comportamentos apresentados a essa pressão muito semelhantes.

Nas pressões de 3 e 4 bar, para ambas as membranas, foi observada uma queda mais suavizada nos fluxos de permeado nos primeiros minutos seguida de uma tendência à estabilização. Esses fluxos foram altos, na faixa de 400 e 500 kg/h.m² para a membrana CEL30, e de 350 a 450 kg/h.m² para a membrana PES50, nas pressões de 3 e 4 bar, respectivamente.

A Figura 5.4 mostra as curvas de permeação para a membrana PES10 a 3, 4 e 5 bar.

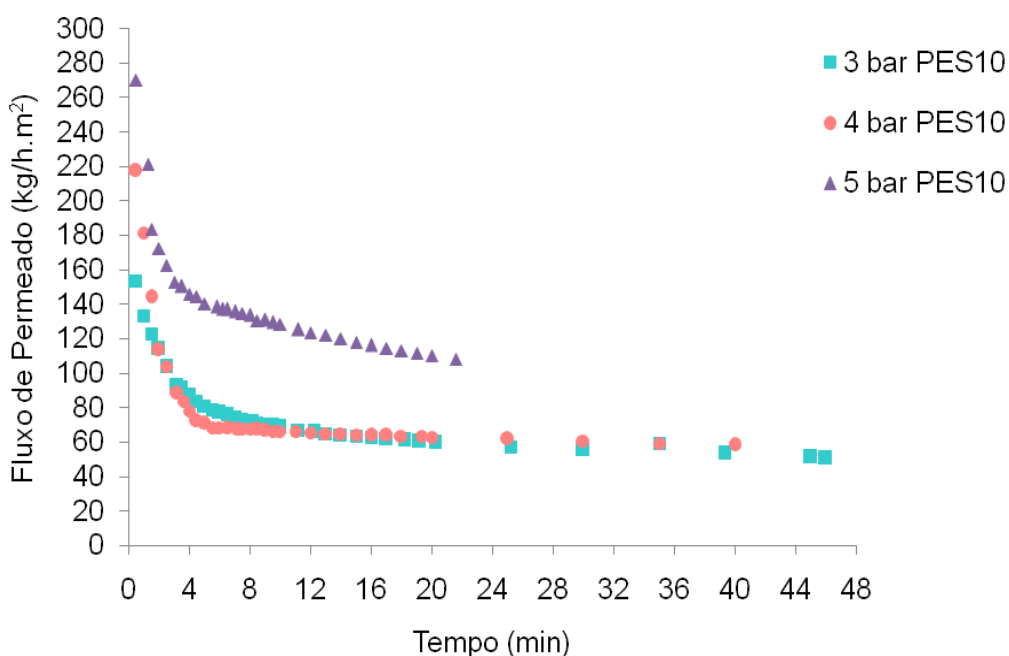


Figura 5.4: Curva de fluxo de permeado em função do tempo para a membrana PES10 nas pressões de 3, 4 e 5 bar.

Pode-se observar que o comportamento dessas curvas é muito semelhante aos obtidos pelas membranas CEL30 e PES50, com quedas bruscas de fluxos nos primeiros segundos ou minutos, tendendo à estabilidade. A única diferença foi que esse se deu a fluxos bem menores que as estabelecidas nas membranas CEL30 e PES50.

Observou-se que o aumento da pressão foi muito significativo para a variação de 4 para 5 bar e praticamente não teve influência de 3 para 4 bar.

Para estas duas pressões observa-se uma tendência à estabilização para fluxos próximos de 60 e 70 kg/h.m^2 , respectivamente. Já para a pressão de 5 bar, pode-se verificar que apesar desse processo não ter atingido a estabilidade no FC estudado, muito provavelmente, se prosseguisse o processo de concentração, essa etapa poderia atingir fluxos de permeado na faixa de 100 kg/h.m^2 ou menos, mas com grande possibilidade de estabilização ou de queda suave. Assim podemos dizer que dentro das condições de pressão estudadas, esta é a que apresenta melhor fluxo.

Na Figura 5.5, podemos notar que para as diferentes massas moleculares de corte, o aumento da pressão influencia na elevação do fluxo de permeado, observando valores mais elevados para a pressão de 5 bar, mas que tendem a ser menores ao longo da concentração que a 4 bar. A membrana CEL10 tende a se estabilizar com queda suave a 5 bar, enquanto que a 4 bar indica uma queda muito suave do fluxo, permanecendo quase estável.

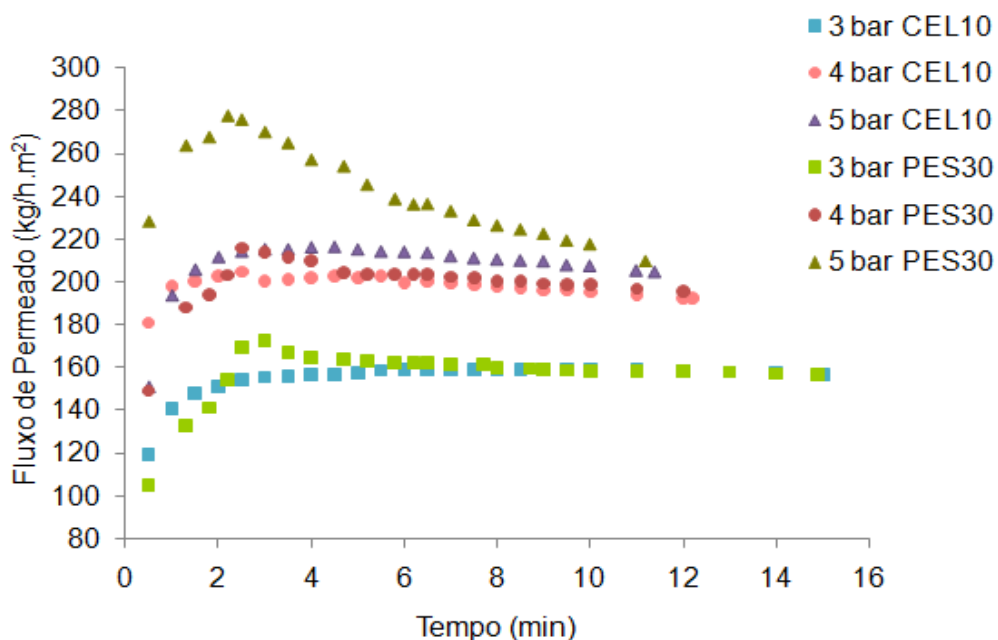


Figura 5.5: Curva de fluxo de permeado em função do tempo para as membranas CEL10 e PES30 nas pressões de 3, 4 e 5 bar.

Os processos com as membranas CEL10 e PES30 apresentaram comportamentos diferenciados dos estabelecidos para a CEL30, PES10 e PES50. Muito provavelmente esse comportamento está associado a dinâmica de formação da camada polarizada, à afinidade de particulados presentes na matéria prima com as membranas em questão e, principalmente, com a massa molecular de corte destas membranas.

Ao colocar a matéria prima na unidade de filtração, as primeiras interações já começaram a acontecer, por se tratar de um material com composição diversificada, com compostos de diferentes massas moleculares. Antes de se iniciar o processo pode ter ocorrido a deposição de particulados de menores tamanhos que foram atraídos pela forte interação destes com os materiais das membranas, formando uma camada inicial. No início do processo, o efeito da velocidade tangencial e da pressão provocaram uma mudança na estrutura desta camada pré-formada induzindo o aumento do fluxo. Estabelecidas as condições operacionais, obteve-se uma maior estabilidade dessa camada que acarretou em fluxos com quedas típicas de fluxo de permeado ou quedas mais suaves tendendo a estabilização.

Para a membrana PES30, observa-se comportamentos semelhantes para as pressões de 3 e 4 bar. Nota-se uma instabilidade para os primeiros 5min, seguido de uma tendência a estabilização com pequenas flutuação até o final dos processos, fato que não procede para o caso da pressão de 5 bar. Deve-se notar que o processo de estabilização acontece a altos fluxos de permeado, de aproximadamente 160 e 200 kg/h.m² para 3 e 4 bar, respectivamente. Já a 5 bar, a queda do fluxo de permeado se mantém ao longo do processo de concentração. Observa-se que a elevação da pressão de 3 para 5 bar representou um aumento de quase 32% no valor do fluxo de permeado.

5.2.4. Produtos Obtidos no Processo de UF

A Figura 5.6, mostra a fração de concentrado e permeado obtidas pelo processo de UF utilizando a membrana CEL10. Esta figura representa bem todos os processos de ultrafiltração, com exceção do obtido pela membrana PES10, apresentada na Figura 5.7.

Através das frações apresentadas, nota-se que ambas possuem características bem semelhantes, sendo difícil a distinção por avaliação visual. Isso mostra também que a maioria dos processos de ultrafiltração não obtiveram respostas favoráveis quanto a retenção de sólidos, os quais estão associados à cor.



Figura 5.6.: Concentrado e permeado do processo de UF utilizando a membrana CEL10.

Através de uma análise visual da Figura 5.7, podemos averiguar uma retenção de elementos, tendo em vista a apresentação límpida e clarificada do permeado.



Figura 5.7: Concentrado e permeado do processo de UF utilizando a membrana PES10.

A Tabela 5.5 apresenta os teores de cinzas, sódio e potássio, e os coeficientes de retenção de sódio e potássio obtidos para as frações dos processos de UF.

Tabela 5.5.: Resultados das análises de cinzas, sódio e potássio da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) obtidos pelos processos de UF.

Membrana	P (bar)	Corrente	Cinzas (%)	Sódio (mg/L)	CR (%) Sódio	Potássio (mg/L)	CR (%) Potássio
CEL10	3	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}		1450±50 ^{abc}	
		P	0,77±0,01 ^{hi}	800±0 ^{cde}	6	1350±50 ^{bcd}	10
		C	0,79±0,01 ^{fg}	850±50 ^{bcde}		1500±0 ^{ab}	
CEL10	4	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}		1450±50 ^{abc}	
		P	0,77±0,00 ^{hi}	800±0 ^{cde}	11	1400±0 ^{bc}	7
		C	0,79±0,01 ^g	900±0 ^{abcd}		1500±0 ^{ab}	
CEL10	5	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}		1450±50 ^{abc}	
		P	0,78±0,01 ^{gh}	800±100 ^{cde}	6	1400±100 ^{bc}	7
		C	0,77±0,01 ^{hi}	850±150 ^{bcde}		1500±100 ^{ab}	
CEL30	3	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}		1450±50 ^{abc}	
		P	0,78±0,00 ^{gh}	750±50 ^{bcde}	12	1300±0 ^{cde}	13
		C	0,78±0,00 ^{gh}	850±150 ^{bcde}		1500±50 ^{abc}	
CEL30	4	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}		1450±50 ^{abc}	
		P	0,75±0,00 ^{jk}	800±0 ^{cde}	6	1350±50 ^{bcd}	7
		C	0,81±0,00 ^{cde}	850±50 ^{bcde}		1450±50 ^{abc}	
CEL30	5	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}		1450±50 ^{abc}	
		P	0,76±0,00 ⁱ	850±50 ^{de}	0	1300±0 ^{cde}	10
		C	0,79±0,00 ^{fg}	850±50 ^{bcde}		1450±0 ^{ab}	

Letras diferentes (na mesma coluna) significam diferença estatística, considerando nível de confiabilidade de 95%.

Continuação - Tabela 5.5

Membrana	P (bar)	Corrente	Cinzas (g/100g)	Sódio (mg/L)	R(%) Sódio	Potássio (mg/L)	R(%) Potássio
PES10	3	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}	26	1450±50 ^{abc}	28
		P	0,73±0,01 ^{lm}	700±0 ^e		1150±50 ^e	
		C	0,80±0,00 ^{ef}	950±50 ^{abc}		1600±0 ^a	
PES10	4	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}	30	1450±50 ^{abc}	18
		P	0,73±0,00 ^m	700±0 ^e		1150±50 ^e	
		C	0,81±0,00 ^{de}	1000±0 ^{ab}		1400±100 ^{bc}	
PES10	5	A	0,78±0,00 ^{gh}	900±0 ^a	29	1450±50 ^{abc}	25
		P	0,71±0,00 ⁿ	750±50 ^{de}		1200±0 ^{de}	
		C	0,82±0,00 ^{cd}	1050±50 ^a		1600±0 ^a	
PES30	3	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}	11	1450±50 ^{abc}	7
		P	0,74±0,01 ^{jk}	800±0 ^{cde}		1350±50 ^{bcd}	
		C	0,81±0,01 ^{cde}	900±100 ^{abcd}		1450±50 ^{abc}	
PES30	4	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}	12	1450±50 ^{abc}	10
		P	0,69±0,01 ^o	750±50 ^{de}		1350±50 ^{bcd}	
		C	0,86±0,01 ^a	850±50 ^{bcde}		1500±0 ^{ab}	
PES30	5	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}	17	1450±50 ^{abc}	13
		P	0,74±0,01 ^{kl}	750±50 ^{de}		1300±0 ^{cde}	
		C	0,83±0,01 ^b	900±0 ^{abcd}		1500±0 ^{ab}	
PES50	3	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}	11	1450±50 ^{abc}	7
		P	0,75±0,01 ^j	800±0 ^{cde}		1350±50 ^{bcd}	
		C	0,79±0,00 ^g	900±0 ^{abcd}		1450±50 ^{abc}	
PES50	4	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}	11	1450±50 ^{abc}	10
		P	0,78±0,01 ^{gh}	800±0 ^{cde}		1350±50 ^{bcd}	
		C	0,78±0,01 ^{gh}	900±0 ^{abcd}		1500±0 ^{ab}	
PES50	5	A	0,78±0,00 ^{gh}	850±50 ^{bcde}	12	1450±50 ^{abc}	7
		P	0,72±0,00 ^{mn}	750±50 ^{de}		1400±0 ^{bc}	
		C	0,82±0,00 ^{bc}	850±50 ^{bcde}		1500±0 ^{ab}	

Letras diferentes (na mesma coluna) significam diferença estatística, considerando nível de confiabilidade de 95%.

Com relação às cinzas ocorreu um comportamento muito semelhante ao obtido nos processos de MF. Em todos os processos é notada sua presença em ambas as frações, com valores médios de 0,78% no permeado e 0,81% no concentrado.

Para a maioria dos processos de UF a retenção de potássio foi muito pequena, sendo uma exceção os processos com a membrana PES10 que obteve retenções na faixa de 18% e 28%. Isto pode ser justificado

provavelmente pelo entupimento parcial dos poros por moléculas de soluto e pela formação de uma torta filtrante próximo à superfície da membrana, dificultando a passagem de solutos de baixa massa molecular.

Esta retenção relativamente baixa para a maioria das membranas de UF é completamente aceitável visto que o tamanho do poros da membrana é substancialmente maior que os particulados minerais. Outro fator importante é que como a alimentação da UF é o permeado gerado pela MF, a retenção de sólidos é muito baixa, logo a formação na camada polarizada não influenciou na retenção destas partículas menores.

A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos pelas análises de pH, sólidos totais e sólidos dissolvidos da alimentação e frações geradas pelos processos de UF.

Tabela 5.6.: Resultados das análises de pH, sólidos totais e sólidos dissolvidos da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) obtidos pelos processos de UF

Membrana	P (bar)	Corrente	pH	Sólidos Totais (%)	R(%) Sólidos Totais	Sólidos Dissolvidos (mg/l)
CEL10	3	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,53±0,00 ^{hi}	7	23813±70 ^{hi}
		P	3,97±0,03 ^b	2,37±0,01 ^{mn}		19515±145 ^p
		C	3,98±0,01 ^b	2,54±0,03 ^h		26120±10 ^{de}
CEL10	4	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,53±0,01 ^{hi}	9	23813±70 ^{hi}
		P	3,97±0,02 ^b	2,41±0,01 ^{kl}		22360±145 ^{lm}
		C	3,98±0,02 ^b	2,66±0,00 ^f		24197±714 ^{gh}
CEL10	5	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,53±0,00 ^{hi}	10	23813±70 ^{hi}
		P	4,05±0,01 ^a	2,33±0,00 ^o		22625±265 ^{kl}
		C	3,99±0,01 ^b	2,60±0,00 ^g		23090±190 ^{jk}
CEL30	3	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,51±0,01 ⁱ	4	23813±70 ^{hi}
		P	4,01±0,01 ^b	2,44±0,01 ^j		22443±110 ^l
		C	4,01±0,01 ^{ab}	2,56±0,00 ^h		23390±160 ^{ij}
CEL30	4	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,51±0,01 ⁱ	7	23813±70 ^{hi}
		P	4,00±0,01 ^b	2,39±0,00 ^{lm}		22710±75 ^{kl}
		C	3,99±0,01 ^b	2,56±0,00 ^h		23913±67 ^{hi}
CEL30	5	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,51±0,01 ⁱ	4	23813±70 ^{hi}
		P	3,99±0,02 ^b	2,46±0,00 ^j		21120±120 ^o
		C	4,00±0,01 ^b	2,56±0,00 ^h		25355±115 ^f

Letras diferentes (na mesma coluna) significam diferença estatística, considerando nível de confiabilidade de 95%.

Continuação - Tabela 5.6

Membrana	P (bar)	Corrente	pH	Sólidos Totais (%)	R(%) Sólidos Totais	Sólidos Dissolvidos (mg/l)
PES10	3	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,51±0,01 ⁱ	37	23813±70 ^{hi}
		P	4,01±0,01 ^b	1,89±0,00 ^s		18340±86 ^q
		C	4,04±0,01 ^{ab}	2,99±0,00 ^b		26810±160 ^{bc}
PES10	4	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,51±0,01 ⁱ	41	23813±70 ^{hi}
		P	4,00±0,01 ^b	1,73±0,00 ^u		17170±26 ^r
		C	4,00±0,02 ^b	2,93±0,00 ^c		27730±204 ^a
PES10	5	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,51±0,01 ⁱ	44	23813±70 ^{hi}
		P	4,00±0,01 ^b	1,78±0,01 ^t		17540±20 ^r
		C	3,99±0,01 ^b	3,17±0,01 ^a		27350±130 ^{ab}
PES30	3	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,51±0,01 ⁱ	14	23813±70 ^{hi}
		P	3,99±0,01 ^b	2,27±0,03 ^p		21870±0 ^{nm}
		C	4,01±0,01 ^b	2,62±0,00 ^g		25770±20 ^{ef}
PES30	4	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,51±0,01 ⁱ	21	23813±70 ^{hi}
		P	3,99±0,01 ^b	2,24±0,00 ^q		21200±85 ^o
		C	3,99±0,01 ^b	2,82±0,00 ^d		26425±445 ^{cd}
PES30	5	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,51±0,01 ⁱ	22	23813±70 ^{hi}
		P	4,00±0,00 ^b	2,17±0,00 ^r		20000±50 ^p
		C	4,01±0,01 ^{ab}	2,78±0,00 ^e		24720±20 ^g
PES50	3	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,53±0,00 ^{hi}	10	23813±70 ^{hi}
		P	4,00±0,01 ^b	2,38±0,00 ^{mn}		21630±300 ^{no}
		C	4,01±0,01 ^{ab}	2,65±0,01 ^f		23805±285 ^{hi}
PES50	4	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,53±0,00 ^{hi}	7	23813±70 ^{hi}
		P	3,99±0,01 ^b	2,36±0,01 ⁿ		22335±195 ^{lm}
		C	3,99±0,01 ^b	2,55±0,01 ^h		23515±255 ^{ij}
PES50	5	A	4,01±0,02 ^{ab}	2,54±0,00 ^h	4	23813±70 ^{hi}
		P	4,00±0,01 ^b	2,33±0,00 ^o		23780±120 ^{hi}
		C	4,00±0,01 ^b	2,43±0,00 ^{jk}		22275±95 ^{lm}

Letras diferentes (na mesma coluna) significam diferença estatística, considerando nível de confiabilidade de 95%.

A composição das frações obtidas nos processos de ultrafiltração convalidam os fatos ressaltados nas Figuras 5.6 e 5.7. Através das análises de sólidos totais verificamos composições muito semelhantes entre as frações de concentrado e permeado para os estudos com as membranas CEL10, CEL30, PES30 e PES50, nas 3 condições de pressão utilizadas. Obteve-se

concentrações médias de sólidos totais no concentrado de 2,6%, partindo de vinhaça com concentração média de 2,5%.

Para os sólidos dissolvidos o mesmo comportamento se manteve, a concentração de sólidos dissolvidos nos concentrados, obteve-se valores, como esperado, muito próximos para as condições de 4 e 5 bar, 27730 e 27350 mg/L, respectivamente, isto mostra que o aumento de 1bar na pressão do processo não gerou mudanças nas características de retenções desses sólidos.

Através da Tabela 5.6, podemos observar que a retenção de sólidos totais aumenta com a pressão aplicada, para a maioria dos processos estudados. Essa tendência geral também foi observada por Bhattacharya et. al. (2001), que estudou processos de UF do caldo da cana. Nas maiores pressões, a camada polarizada torna-se mais compacta tendo por consequência a retenção maior de solutos devido à resistência formada.

As retenções de sólidos totais na UF atingiram níveis que variaram de 4% a 22% para as membranas CEL10, CEL30, PES30 e PES50, com exceção para a membrana PES10, que obteve retenções de 37%, 41% e 44%, para as pressões de 3, 4 e 5 bar, respectivamente.

Pode ser observado na Tabela 5.6 que a elevação da pressão influenciou no aumento da retenção de ST para a membrana PES10, então julgou-se como mais interessante o processo realizado a 5 bar. Este processo partiu de uma alimentação de 2,51% de sólidos totais e gerou um concentrado com 3,17%.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados da análise de DQO das frações obtidas pelo processo selecionado de UF, que foram determinados a partir da equação gerada pela curva padrão apresentada na Figura G.1, disposta no Apêndice G.

Tabela 5.7: Resultados da análise de DQO da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) do experimento selecionado na UF.

Membrana	P (bar)	Correntes	DQO (mg O ₂ /L)
PES10	5	A	20583±471
		P	18000±750
		C	27875±875

Os valores de DQO encontrados para as frações do processo em questão partiram de um permeado de MF contendo 20583±471 mgO₂/L e atingiram valores de 27875±875 mgO₂/L para o concentrado e 18000±750 mgO₂/L para o permeado. Pode-se observar uma redução considerável da demanda química de oxigênio quando comparados os resultados da análise para a alimentação e as frações de permeado, esta se deve a retenção de matéria orgânica através do processo de filtração.

5.2.5. Diagrama do Processo Seqüencial de MF Seguido de UF – Análise Quantitativa.

A Figura 5.8 tem por objetivo permitir visualização global do processo seqüencial de MF seguido de UF, dando uma idéia quantitativa do resultado obtido, para o balanço de massa, pela melhor combinação de processos, partindo do valor pressuposto de 100 kg de vinhaça para base dos cálculos.

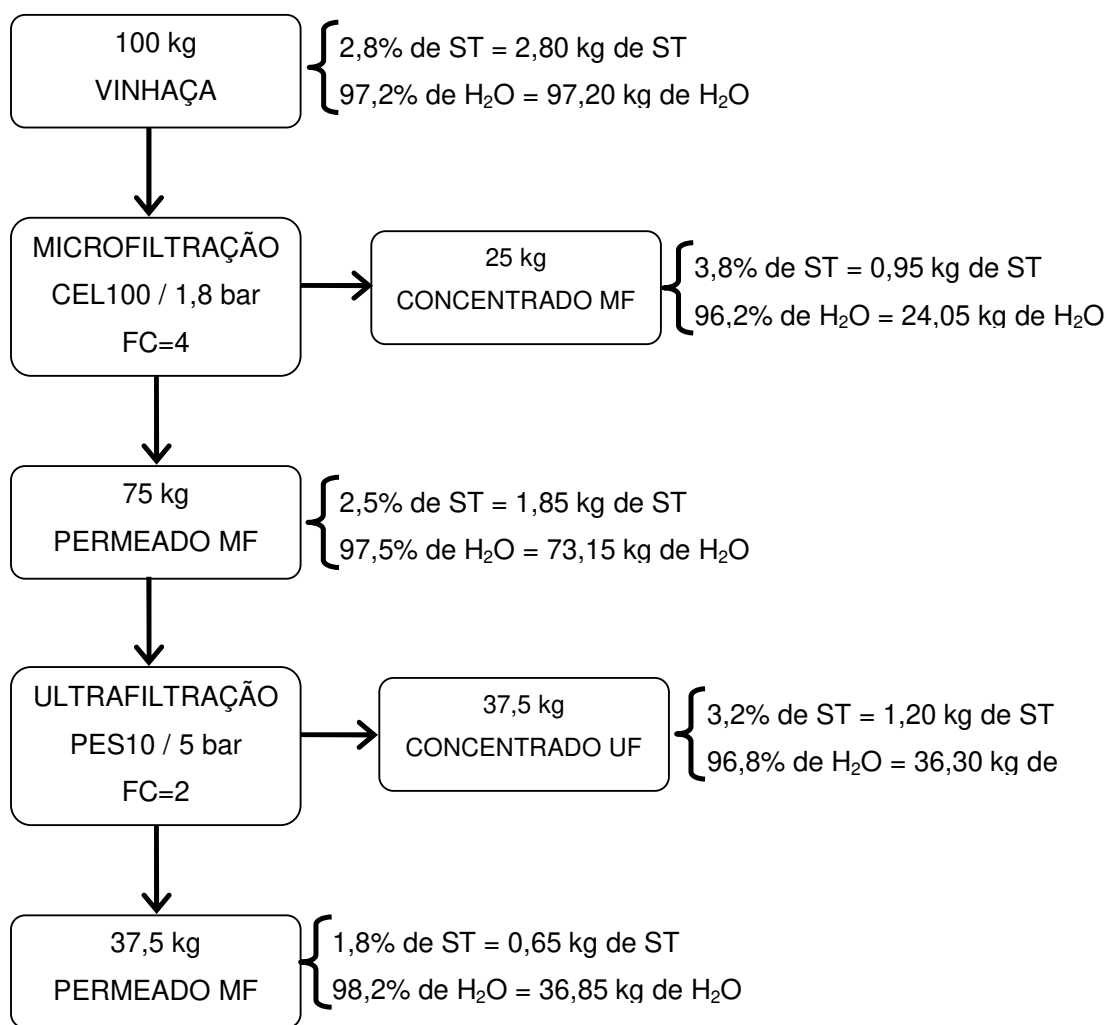


Figura 5.8.: Diagrama do processo seqüencial de MF seguido de UF – análise quantitativa.

Considerando o processo seqüencial de clarificação por microfiltração, com a membrana CEL100 a 1,8 bar, seguido de concentração por ultrafiltração, com a membrana PES10 a 5 bar, pode-se verificar alguns resultados em termos de balanço de massa.

O processo de clarificação por microfiltração partiu de 100 kg de vinhaça dos quais 2,8 kg eram sólidos totais e resultou em um concentrado com 3,8 % de ST e um permeado com 2,5% de ST. Analisando quantitativamente, da vinhaça *in natura* para a fração concentrada elevou-se cerca de 1% a

concentração de sólidos totais e obteve-se um produto com um volume de água cerca de 4 vezes menor que o inicial.

O permeado obtido pelo processo de MF ainda tinha uma quantidade elevada de sólidos em sua composição. Este foi submetido ao processo de UF, e gerou uma retenção de 44% quando utilizada a membrana PES10 na pressão de 5 bar, até um fator de concentração igual a 2, o que resultou em um concentrado com 3,2% de ST.

Considerando a mistura das duas frações concentradas, foi gerado 62,5 kg de vinhaça concentrada com aproximadamente 3,44% de ST. Assim, conseguiu-se uma redução de volume de cerca de 37,5 L e foi obtido um fluido com 2,15 kg de ST.

É importante enfatizar que os resultados obtidos utilizaram fatores de concentração baixos, $FC = 4$ para MF e $FC = 2$ para UF. Extrapolando essas condições, provavelmente conseguiria-se, com fatores de concentração mais elevados, resultados mais atrativos.

Vale salientar que o permeado resultante de ambos processos é estéril, apresentando diversas aplicações, como é o caso dos processos fermentativos ou até posterior concentração por osmose reversa (OR) para obtenção de água para reuso.

5.3. Processo de NF

5.3.1. Fluxos de Permeado Obtidos no Processo de NF

A Figura 5.9 apresenta as curvas de permeação obtidas para a vinhaça *in natura* nanofiltrada em três condições de pressão, 15, 25 e 35 bar, para as membranas de polietersulfona com massas moleculares de corte de 300, 500 e 1000 Da até atingir o fator de concentração igual a 4.

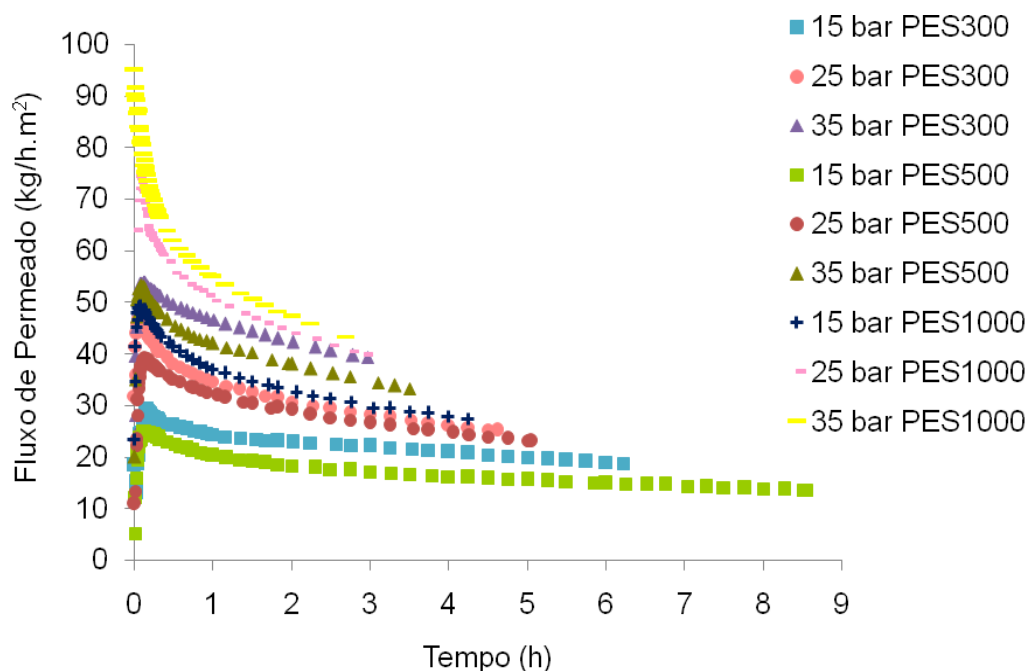


Figura 5.9: Curvas de fluxo de permeado em função do tempo para as membranas PES300, PES500 e PES1000 nas pressões de 15, 25 e 35 bar.

Pode-se verificar que para quase todos os processos de NF, exceto para os com a membrana PES1000 a 25 e 35 bar, apresentaram um comportamento diferente das corridas típicas de MF e UF descritas por Marshall e Daufin (1995). Verificou-se que houve um aumento do fluxo nos primeiros minutos seguido de uma quebras bruscas no fluxos ou tendência dos fluxos se manterem estáveis, este comportamento pode ter sido ocasionado pela consolidação da incrustação.

Nos primeiros minutos da corrida, a tendência crescente do fluxo de permeado está associada à dinâmica da formação da camada polarizada que é gerado pela presença de partículas de diferentes tamanhos na composição da alimentação.

A distribuição deste material na superfície da membrana momentos antes do início da corrida pode ter permitido uma interação forte com a membrana, que ocasionou uma forte atração e conseqüentemente um maior entupimento. Logo ao se iniciar a corrida esta camada polarizada mudou sua

estrutura devido ao efeito de velocidade tangencial, logo e o fluxo de permeado agiu de maneira a desobstruir a membrana, provocando assim o aumento de fluxo de permeado. Acrescido a isso podemos considerar que o aumento da pressão ainda que rápido, cerca de um minuto, também provocou o aumento do fluxo nos primeiros instantes. Estes fenômenos sobrepostos levaram a um período de no máximo de 10 minutos para que o fluxo se estabilizasse.

Comportamento semelhante aos obtidos para as três condições de pressão estudadas nos processos com a PES500 e a PES300 e para a condição a 15 bar com a PES1000, foram obtidos na UF com as membranas CEL10 e PES30.

Um comportamento particular pode ser verificado para os processos de nanofiltração aqui apresentados. Observa-se que para a mesma pressão, o desempenho obtido para os fluxos de permeado foi melhor quando utilizada a membrana PES300 comparado às respostas apresentadas pela PES500. Isso pode estar relacionado com o fato de que a membrana PES500 ficou mais susceptível ao entupimento dos poros criando uma resistência maior ao fluxo de permeado do que a PES300.

As melhores condições de fluxos se deram para a pressão de 35bar, independente da membrana utilizada.

5.3.2. Produtos Obtidos no Processo de NF

A Figura 5.10 representa a vinhaça *in natura* e as frações de concentrado e permeado formados pelo processo de nanofiltração.



Figura 5.10: Vinhaça “*in natura*”, concentrado e permeado obtido nos processos de NF, utilizando a membrana PES500 a 35 bar.

O permeado se mostra nitidamente mais claro que o concentrado e que a vinhaça em si. Este encontra-se translúcido, brilhante e com tom amarelo claro. Já o concentrado ficou turvo, encorpado e carregado de partículas em suspensão e decantadas, com tons mais opaco que a vinhaça.

A remoção de cor e contaminantes da vinhaça foi relatado por Nataraj, Hosamani e Aminabhavi (2006), obtido por um processo híbrido de NF e osmose reversa (OR), nos quais se empregou membranas poliamídicas em espiral, de 6,5 cm de diâmetro e 53,3 cm de comprimento. A NF obteve reduções de 80, 95 e 45% na redução de sólidos dissolvidos, condutividade e concentração de íons cloreto, respectivamente, na pressão de 30-50 bar. Este processo foi eficiente na remoção de cor e de partículas coloidais. Já o processo de OR obteve a redução de 99% na demanda química de oxigênio, potássio e resíduos de sólidos dissolvidos.

Fersi, Gzara e Dhahbi (2005) utilizaram o processo de nanofiltração, com membrana de poliamida a 10 bar e 30°C para o tratamento de efluentes biologicamente tratados oriundos da indústria têxtil. Foi observada a ocorrência de declínio do fluxo de permeado no decorrer do processo de 50 l/h.m² para valores próximos de 10 l/h.m². Os permeados obtidos tiveram remoção de turbidez, cor e sólidos dissolvidos superior a 90%, além de uma considerável redução de DQO.

A Tabela 5.8 apresenta os resultados das análises de pH, sólidos totais, suspensos e dissolvidos obtidos para as corridas de nanofiltração.

Tabela 5.8: Resultados das análises de pH, sólidos totais, sólidos suspensos e sólidos dissolvidos da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) obtidos por processos de NF de vinhaça.

Membrana	P (bar)	Corrente	pH	Sólidos Totais (%)	CR (%) ST	Sólidos Suspensos (mg/l)	Sólidos Dissolvidos (mg/l)
PES1000	15	A	3,94±0,02 ^d	2,84±0,00 ⁱ		1150±10 ^b	25620±160 ^g
		P	4,02±0,02 ^{ab}	1,37±0,00 ^j	75	0±0 ^c	17367±741 ^{jk}
		C	3,99±0,01 ^{abc}	6,28±0,02 ^h		4400±122 ^a	52720±130 ^{ab}
PES1000	25	A	3,94±0,02 ^d	2,84±0,00 ⁱ		1150±10 ^b	25620±160 ^g
		P	4,02±0,02 ^{ab}	1,43±0,00 ^m	79	0±0 ^c	16833±42 ^k
		C	3,99±0,02 ^{abc}	6,95±0,01 ^e		4440±122 ^a	53403±145 ^{ab}
PES1000	35	A	3,94±0,02 ^d	2,84±0,00 ⁱ		1150±10 ^b	25620±160 ^g
		P	4,03±0,01 ^a	1,37±0,00 ^o	81	0±0 ^c	16767±179 ^k
		C	3,98±0,02 ^{bcd}	7,18±0,01 ^c		4507±130 ^a	53587±133 ^{ab}
PES500	15	A	3,94±0,02 ^d	2,84±0,00 ⁱ		1150±10 ^b	25620±160 ^g
		P	3,99±0,02 ^{abc}	1,40±0,00 ⁿ	80	0±0 ^c	20367±530 ⁱ
		C	3,96±0,01 ^{cd}	7,05±0,00 ^d		4655±301 ^a	43600±144 ^e
PES500	25	A	3,94±0,02 ^d	2,84±0,00 ⁱ		1150±10 ^b	25620±160 ^g
		P	4,02±0,02 ^{ab}	1,21±0,00 ^p	84	0±0 ^c	18440±557 ^j
		C	3,99±0,02 ^{abc}	7,34±0,00 ^b		4527±167 ^a	47787±503 ^d
PES500	35	A	3,94±0,02 ^d	2,84±0,00 ⁱ		1150±10 ^b	25620±160 ^g
		P	4,02±0,02 ^{ab}	1,17±0,01 ⁿ	85	0±0 ^c	18613±363 ^j
		C	4,00±0,01 ^{abc}	7,78±0,01 ^a		4527±306 ^a	49087±232 ^c
PES300	15	A	3,94±0,02 ^d	2,84±0,00 ⁱ		1150±10 ^b	25620±160 ^g
		P	4,02±0,02 ^{ab}	1,54±0,00 ^k	77	0±0 ^c	22767±147 ^h
		C	3,99±0,01 ^{abc}	6,71±0,00 ^g		4533±297 ^a	37720±40 ⁱ
PES300	25	A	3,94±0,02 ^d	2,84±0,00 ⁱ		1150±10 ^b	25620±160 ^g
		P	4,01±0,02 ^{ab}	1,47±0,00 ^l	79	0±0 ^c	17470±50 ^{jk}
		C	3,99±0,02 ^{abc}	6,90±0,00 ^f		4700±220 ^a	54280±340 ^a
PES300	35	A	3,94±0,02 ^d	2,84±0,00 ⁱ		1150±10 ^b	25620±160 ^g
		P	4,02±0,02 ^{ab}	1,47±0,00 ⁿ	80	0±0 ^c	17414±134 ^{jk}
		C	3,99±0,01 ^{abc}	7,01±0,00 ^d		4590±269 ^a	53580±940 ^{ab}

Letras diferentes (na mesma coluna) significam diferença estatística, considerando nível de confiabilidade de 95%.

De acordo com os valores de pH expostos na Tabela 5.8, pode-se observar que estes apresentaram pequenas variações para as frações obtidas pelo processo de nanofiltração. Os valores se encontraram nos limites de 3,94

a 4,03. Apesar da vinhaça ser ácida, Silva & Ribeiro (1998) relataram em seu trabalho que sua aplicação nos canaviais não provoca danos ao solo, visto que quando aplicada, ela provoca a elevação do pH do solo, devido à ação de microrganismos presentes no meio. Logo, a aplicação do concentrado gerado pelo processo de NF, com um pH de 4,03, não seria um problema para aplicação no solo.

Em todos os ensaios os valores de pH para o permeado foram superiores aos verificados no concentrado, estes resultados indicam que o concentrado é mais ácido.

Através das análises das concentrações de sólidos totais dispostos na Tabela 5.8 podemos observar pela relação estabelecida na Equação 3.4 que os coeficientes de retenção variam de 75% a 85%, verificando-se assim uma boa capacidade da nanofiltração na retenção desses componentes.

Os coeficientes de retenção mais elevados foram obtidos para a membrana PES500, apresentando valores de 80%, 84% e 85%, para as pressões de 15, 25 e 35 bar respectivamente. A maior retenção, estabelecida para a pressão de 35 bar, partiu de vinhaça com 2,84% de ST e gerou uma fração de concentrado com 7,78%.

Foram observados coeficientes de retenção de ST de 80% tanto para a membrana PES500 a 15 bar como para a membrana PES300 a 35 bar, e suas concentrações de ST no concentrado foram de 7,05% e 7,01%, respectivamente.

Com relação aos sólidos dissolvidos pode-se observar que para os processos com a membrana PES1000, as frações de permeado e concentrado são estatisticamente semelhantes e obtiveram valores médios de 16989 ± 373 mg/L para o permeado e de 53236 ± 136 mg/L o concentrado. Concentrações semelhantes a estas foram obtidas para os processos a 25 e 35 bar para a membrana PES300.

Como fato esperado e claramente verificado na Figura 5.10, os sólidos suspensos foram retidos em 100%.

A Tabela 5.9 apresenta os resultados das análises de cinzas, sódio e potássio obtidos para a alimentação, e para as frações de permeado e concentrado obtidos pelos processos de NF.

Tabela 5.9: Resultados das análises de cinzas, sódio e potássio da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) obtidos por processos de NF de vinhaça.

Membrana	P (bar)	Corrente	Cinzas (g/100g)	Sódio (mg/L)	CR (%) Sódio	Potássio (mg/L)	CR (%) Potássio
PES1000	15	A	0,80±0,01 ⁱ	850±50 ^c	81	1450±150 ^e	76
		P	0,56±0,00 ^{jk}	400±0 ^d		800±0 ^f	
		C	1,49±0,01 ^g	2200±0 ^a		3300±100 ^{abc}	
PES1000	25	A	0,80±0,01 ⁱ	850±50 ^c	76	1450±150 ^e	73
		P	0,54±0,00 ^k	450±50 ^{cd}		850±50 ^{ef}	
		C	1,55±0,07 ^f	1900±100 ^{ab}		3200±0 ^{abc}	
PES1000	35	A	0,80±0,01 ⁱ	850±50 ^c	78	1450±150 ^e	64
		P	0,48±0,00 ^m	450±50 ^{cd}		1000±0 ^{ef}	
		C	1,73±0,01 ^b	2000±0 ^{ab}		2800±0 ^{bcd}	
PES500	15r	A	0,80±0,01 ⁱ	850±50 ^c	82	1450±150 ^e	79
		P	0,54±0,00 ^j	400±0 ^d		750±50 ^{ef}	
		C	1,55±0,00 ^h	2200±0 ^a		3600±0 ^a	
PES500	25	A	0,80±0,01 ⁱ	850±50 ^c	81	1450±150 ^e	76
		P	0,50±0,00 ^{kl}	400±100 ^d		800±0 ^{ef}	
		C	1,69±0,00 ^e	2100±100 ^{ab}		3400±0 ^{ab}	
PES500	35	A	0,80±0,01 ⁱ	850±50 ^c	78	1450±150 ^e	63
		P	0,42±0,00 ^m	450±50 ^{cd}		1000±0 ^{ef}	
		C	1,90±0,00 ^d	2000±0 ^{ab}		2700±0 ^{cd}	
PES300	15	A	0,80±0,01 ⁱ	850±50 ^c	74	1450±150 ^e	56
		P	0,59±0,01 ^k	500±0 ^{cd}		1100±0 ^f	
		C	1,35±0,00 ^f	1933±115 ^{ab}		2500±100 ^d	
PES300	25	A	0,80±0,01 ⁱ	850±50 ^c	68	1450±150 ^e	61
		P	0,53±0,00 ^{lm}	550±50 ^{cd}		1050±100 ^{ef}	
		C	1,60±0,00 ^c	1700±100 ^b		2700±50 ^{cd}	
PES300	35	A	0,80±0,01 ⁱ	850±50 ^c	72	1450±150 ^e	63
		P	0,49±0,00 ⁿ	500±0 ^{cd}		1000±0 ^{ef}	
		C	1,64±0,01 ^a	1800±0 ^{ab}		2650±50 ^{cd}	

Letras diferentes (na mesma coluna) significam diferença estatística, considerando nível de confiabilidade de 95%.

Através da Tabela 5.9, pode-se observar que houve um aumento da concentração de cinzas com a elevação da pressão para todas as membranas

estudadas, sendo mais acentuada para a membrana PES300, principalmente na pressão de 35 bar, na qual foi atingido níveis de concentração de 1,9% partindo de vinhaça com 0,8%.

As retenções máximas resultantes para o processo de nanofiltração foram obtidas para a membrana PES500 na condição de 15 bar, com valores de 79% e 82% para potássio e sódio, respectivamente. Essa membrana pode ter apresentado maior incrustação, formando uma camada dinâmica adjacente à membrana constituída por diversos compostos que ficam retidos e que atuou como uma segunda membrana, representando uma resistência adicional à permeação do fluido e responsável pela retenção de compostos minerais observada para esses processos.

A Tabela 5.11 apresenta os resultados de DQO realizados para as corridas que obtiveram os melhores resultados na NF.

Tabela 5.11: Resultados da análise de DQO da alimentação (A), permeado (P) e concentrado (C) dos experimentos selecionados de NF.

Membrana	P (bar)	Correntes	DQO (mg O ₂ /L)
PES300	35	A	27125±375
		P	14625±875
		C	69125±625
PES500	35	A	27125±375
		P	15000±750
		C	77500±1000
PES1000	35	A	27125±375
		P	12000±500
		C	72625±4375
PES1000	25	A	27125±375
		P	15750±750
		C	71500±750

Pode-se observar que os valores de concentração obtidos para todas as frações de concentrados avaliadas apresentaram-se superiores às da vinhaça em cerca de 3,5 vezes.

Os processos de NF se mostraram como alternativa eficiente para remoção de DQO, tendo em vista que seu permeado resultante apresentou valores que variaram de 12000 a 15750 mg O₂/L.

Lyra, Rolim e Silva (2003) e Brito & Rolim (2005) concluíram que o solo tem um papel fundamental para manutenção da qualidade das águas dos lençóis freáticos, visto que este é eficiente na remoção do DQO. Em seu trabalho os autores utilizaram uma vinhaça com DQO de 48860 mgO₂/L e puderam tirar esta conclusão. Assim os resultados alcançados com os processos de membranas, seja MF ou MF seguida de UF, geraram concentrados com DQO inferiores aos da vinhaça utilizada pelos autores. Já a NF superou em muito, assumindo o valor de 77500±1000 mgO₂/L, fazendo-se necessária a averiguação das condições de uso no solo deste material com elevado DQO.

5.3.3. Diagrama do Processo de NF – Análise Quantitativa

A Figura 5.11 apresenta resultados quantitativos para o processo que resultou em maior capacidade de retenção da NF, partindo do valor considerado de 100 kg de vinhaça para a base dos cálculos.

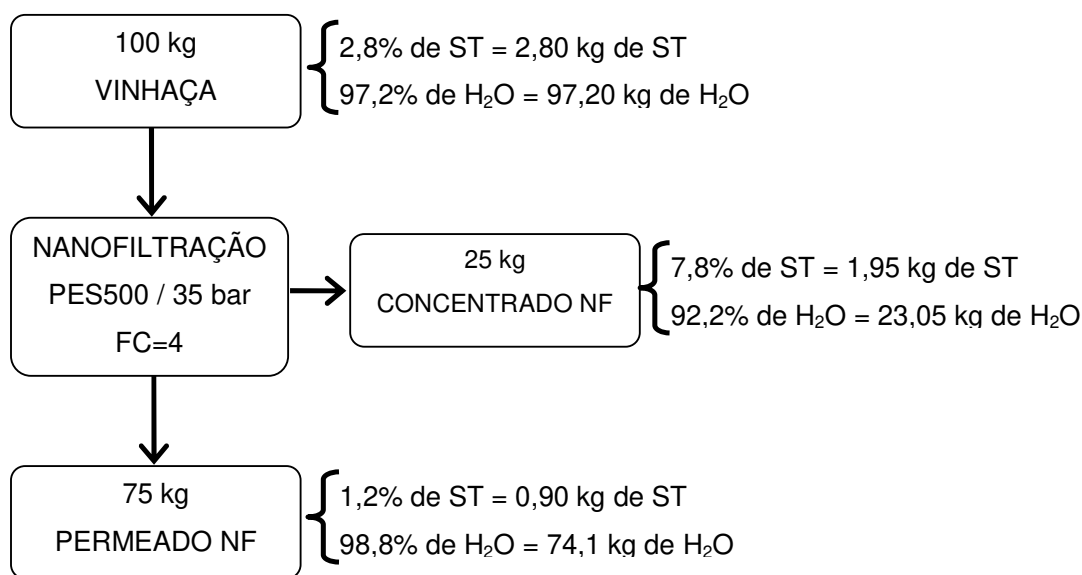


Figura 5.11.: Diagrama do processo de NF – análise quantitativa.

Considerando uma massa inicial de vinhaça de 100 kg, no experimento com a membrana PES500 a 35 bar, atingiu-se $FC = 4$, concentração de aproximadamente 8% de sólidos totais na fração de concentrado, atingindo retenções de sólidos de 85%. Ou seja, dos 2,8 kg de sólidos totais presentes em 100 kg de vinhaça in natura, obteve-se pelo processo de NF 1,95 kg nos 25 kg de fluido concentrado. Reduziu-se o volume 4 vezes e elevou-se a concentração desses compostos em 5 pontos percentuais.

Um caminhão tanque utilizado para transportar vinhaça aos canaviais, pouparia em cerca de 4 vezes o volume a transportar de fluido na forma concentrada, facilitando então o processo de aplicação da vinhaça por dispersão em áreas mais afastadas da usina.

5.4. Ajuste ao Modelo Matemático Baseado na Teoria da Renovação de Superfície

Os dados das curvas de fluxo de permeado foram ajustadas conforme modelo matemático baseado na teoria da renovação de superfície (Equação 3.6). Na Tabela 5.11 são apresentados os valores de fluxo inicial (J_0) e final (J_F) utilizados para o ajuste, a taxa de declínio de fluxo (λ) e o coeficiente de determinação (R^2) para todos os ensaios estudados.

Os gráficos que apresentam os dados experimentais e as curvas ajustadas referentes ao modelo de renovação de superfície em que o comportamento do fluxo é variável com o tempo, estão disponíveis no Apêndice B.

Tabela 5.11: Parâmetros obtidos para o modelo de renovação de superfície.

	Membrana	Pressão (bar)	J_0	J_F	λ (h^{-1})	R^2
MF	CEL100	1,8	77,80	36,02	4,9903	0,94500
	CEL100	2,6	93,20	44,50	5,0407	0,93468
	PES005	1,8	44,32	21,65	2,4648	0,95205
	PES005	2,6	38,16	17,31	1,7425	0,95654
UF	CEL30	3	1018,09	383,34	0,3985	0,99976
	CEL30	4	1125,40	457,81	0,4404	0,99995
	CEL30	5	1993,89	421,79	0,4920	0,99676
	PES10	3	130,83	57,24	0,2012	0,95984
	PES10	4	233,77	63,83	0,6034	0,97098
	PES10	5	182,28	107,98	0,1410	0,96909
	PES30	3	182,88	156,50	0,2523	0,93569
	PES30	4	216,65	171,90	0,0541	0,76001
	PES30	5	314,94	186,47	0,1461	0,99482
	PES50	3	731,65	311,75	0,3665	0,99842
	PES50	4	875,85	401,85	0,5451	0,99432
	PES50	5	2557,97	744,91	1,0902	0,99829
NF	PES300	15	25,61	50,87	0,0404	0,45308
	PES300	25	47,13	26,47	0,9328	0,98058
	PES300	35	53,14	26,75	0,2588	0,87367
	PES500	15	23,82	13,23	0,3232	0,88814
	PES500	25	36,89	15,18	0,2061	0,74084
	PES500	35	53,36	33,37	0,8181	0,97951
	PES1000	15	49,38	27,77	0,8092	0,98559
	PES1000	25	73,67	43,24	1,8163	0,96592
	PES1000	35	89,76	48,64	2,4132	0,98135

Considerando os resultados obtidos pode-se verificar que de maneira genérica o modelo da teoria de renovação de superfície se ajustou bem aos dados experimentais, uma vez que os coeficientes de determinação (R^2) encontrados foram, em sua maioria, maiores que 0,90.

O valor de λ está associado à taxa de declínio de fluxo, ou seja, quanto mais acentuada a queda de fluxo nos primeiros minutos do experimento, estágio I da curva descrita por Marshall e Daufin (1995), maiores valores de λ devem ser esperados. Analisando os dados da Tabela 5.11 observa-se que para a maioria dos experimentos em que se tem alto fluxo de permeado inicial, a taxa de declínio também é alta, mostrando a ocorrência de uma queda acentuada do fluxo de permeado no início do processo.

O maior valor de taxa de declínio de fluxo (λ) foi encontrado no experimento realizado com a membrana CEL100, a pressão de 2,6 bar, mostrando uma tendência de maior estabilidade no valor do fluxo pelo tempo quando comparado aos demais experimentos, e ainda indicando que o fluxo atinge um valor constante mais rapidamente, como pode ser observado na curva apresentada na Figura 5.12.

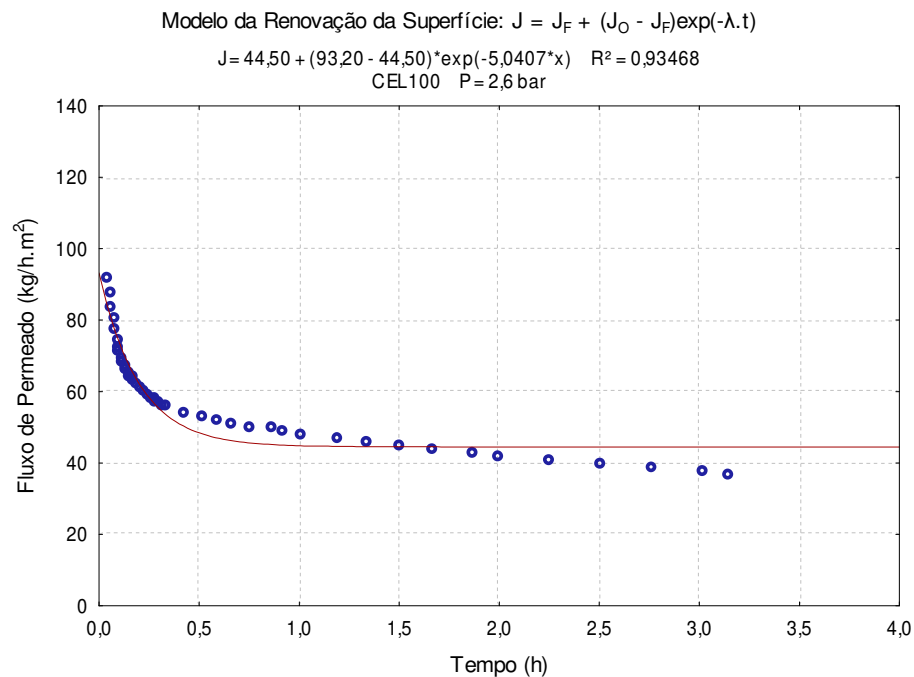


Figura 5.12: Dados experimentais do fluxo acumulado e a curva ajustada referente ao modelo de renovação de superfície do experimento de CEL 100 kDa a 2,6 bar.

Alguns ensaios não se ajustaram muito bem, ou mesmo não se ajustaram à este modelo matemático proposto, como foram os casos da PES300 a 15 bar e a membrana CEL10 para as pressões de 3, 4 e 5 bar, respectivamente, e geraram baixos coeficientes de correlação.

6. CONCLUSÕES

O processo de MF seguido por UF, só atingiu resultados razoáveis na retenção de sólidos totais quando utilizada a combinação da CEL100 seguida de PES10.

Os processos de MF geraram um permeado límpido porém com coloração escura. Quando este foi submetido ao processo de UF, para a maioria das membranas, observa-se concentrados e permeados com a mesma coloração, exceto para a membrana PES10.

Os resultados da MF mostraram coeficientes de retenção de 34% a 41% e fluxos de permeado estabilizados por volta de 34 kg/h.m² para a CEL100.

A UF obteve coeficientes de retenção baixos, porém seus ensaios resultaram nos maiores fluxos obtidos entre todos os processos.

O estudo mostra que o processo de NF direta é adequado e pode ser uma alternativa para a concentração de vinhaça obtendo concentrações máximas de 7,8% de sólidos totais no concentrado final a FC = 4.

As membranas de nanofiltração apresentaram os melhores desempenhos de fluxo e coeficientes de retenção quando utilizada a pressão de 35 bar, com fluxos entre 23,22 e 30,01 kg/h.m² e coeficientes de retenção entre 80% e 85%.

As retenções de minerais também foram maiores para as membranas de nanofiltração, com coeficientes de retenção que variaram de 56% a 79% para o potássio e 68% a 82% para o sódio.

Os processos de NF geraram um permeado límpido e de coloração amarela clara e seus concentrados apresentaram-se marrom com presença de partículas suspensas e decantadas.

Os fluxos de permeado obtidos para os processos de MF, UF e NF apresentaram curvas típicas de permeação, sendo exceções as curvas obtidas

para a membrana CEL10 e PES30. Foram obtidos bons ajustes pelo modelo da renovação da superfície, com coeficientes de correlação superiores a 0,9.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste estudo, verificou-se alguns pontos que podem ser averiguados. Dentre eles, temos:

- Avaliar em unidade piloto as melhores condições obtidas em unidade laboratorial;
- Estudar a retenção de sólidos totais, sódio e potássio utilizando fatores de concentração mais elevados;
- Estudar procedimentos de limpeza da membrana para determinar suas condições de uso;
- Estudar a viabilidade econômica do uso da vinhaça concentrada para fertirrigação dos canaviais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, A.L.; SARIF, M.; ISMAIL, S., Development of an integrally skinned ultrafiltration membrane for wastewater treatment; effect of different formulations of PSf/NMP/PVP on flux and rejection. **Desalination**. n. 179. p 257–263. 2005.

ANA, FIESP, ÚNICA, CTC. **Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília, 2009, 288 p..

AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 16th ed., 3. rev., Gaithersburg, 1997.

APHA, AWWA, WPCF. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 21^a ed. Washington: American Public Health Association, 2005.

BAKER, R.W. et al. **Membrane Separation Systems-Recent Development and Future Direction**. Noyes Data Corporation, New York, 1991.

BARBOSA, V.; DURIGAN, A.M.P.R.; GLÓRIA, N.A.; MUTTON, M.A. Uso de vinhaça concentrada na adubação de soqueira de cana-de-açúcar. **STAB**, v. 24, n.6, p. 26-31, jul-ago 2006.

BHATTACHARYA, P.K; SHILPI AGARWAL, S. De, RAMA GOPAL, U.V.S.. Ultrafiltration of sugar cane juice for recovery of sugar: analysis of flux and retention. **Separation and Purification Technology** 21 (2001) 247–259

BOLSANELLO, J.; VIEIRA, J. R. Caracterização da composição química dos diferentes tipos de vinhaça da Região de Campos-RJ. **Brasil Açucareiro**. vol. 96, n° 5, p. 45-58, Nov/1980.

BRASIL. Portaria do Ministério do Interior nº 158, de 03 de novembro de 1980 – Dispõe sobre o lançamento de vinhaça em coleções hídricas e sobre efluentes de destilarias e usinas de açúcar.

BRASIL. Portaria do Ministério do Interior nº 323, de 29 de novembro de 1978 – Proíbe o lançamento de vinhaça em coleções de água.

BRITO, F.L., ROLIM, M.M., Comportamento do efluente e do solo fertirrigado com vinhaça. **Agropecuária Técnica**, Areia, PB, v.26, n.1, p.60–67, 2005.

CANELLAS, L. P. et al. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhço e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo [online]**. 2003, vol.27, n.5, pp. 935-944.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma técnica P4.231, de 2006. Vinhaça - critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola.** São Paulo, 12 p., dez. 2006.

CHAMCHONG, M.; NOOMHORM, A. Effect of pH and enzymatic treatment on microfiltration and ultrafiltration of tangerine juice. **Journal of Food Process Engineering.** V.14, p. 21-34, 1991.

CHERYAN, M. **Ultrafiltration and Microfiltration Handbook.** Lancaster: Technomic Publ. Co., Illinois, 1998. 526p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Avaliação da safra agrícola de cana-de-açúcar.** Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/boletim_cana_setembro_2010.pdf>. Acesso em: 13 outubro 2010.

CORTEZ, L. A. B., FREIRE, W. J., ROSILLO-CALLE, F., "Biodigestion of vinasse in Brazil". **International Sugar Journal**, v.100, nº1196, pp. 403-413, 1998.

DECLoux, M., BORIES, A.. Stillage treatment in the French alcohol fermentation industry. **International Sugar Journal.** v.104, p.509–517, 2002.

ELIAS NETO, A. **Biodigestão da vinhaça com reator anaeróbio de manta de lodo.** São Carlos, EESC/USP, 1988. 30p.

ELIAS NETO, A.; NAKAHODO, T. **Caracterização físico-química da vinhaça – Projeto nº9500278.** Relatório Técnico da Seção de Tecnologia de Tratamento de Águas do Centro de tecnologia Copersucar. Piracicaba, 26p, 1995.

FERSI, C.; GZARA, L.; DHAHBI. Treatment of textile effluents by membrane technologies. **Desalination.** v.185, p.399–409, 2005.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar.** Guaíra: Livraria e Editora Agropecuária, 2000.

FUKUMOTO, L. R.; DELAQUIS, P.; GIRARD, B.. Microfiltration and ultrafiltration ceramic membranes for apple juice clarification. **Journal of Food Science,** v. 63, n. 5, p. 845-850, 1998.

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

GLÓRIA, N.; ORLANDO FILHO, J.. Aplicação de vinhaça: Um resumo e discussões sobre o que foi pesquisado. **Álcool e Açúcar,** n. 15, p.22-27, mar./abr. 1984.

GRUPO FARIAS. Formulário Industrial. Disponível em: <http://www.grupofarias.com.br/fluxograma_industrial.htm> Acesso em: 21 outubro 2010.

HABERT, A.C.; BORGES, C.P.; NOBREGA, R.. Processos **de separação com membranas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2006, 180 p.

KUBERKAR, V. T.; DAVIS, R. H. Modeling of fouling reduction by secondary membranes. **Journal of Membrane Science**, v. 168, 243-258, 2000.

LONGO, R.M.,. **Efeito da vinhaça in natura e biodigerida em propriedades de um solo cultivado com cana-de-açúcar**. 1994. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 1994.

LU, W.M.; HWANG, K.J.; JU, S.C.. Studies on the mechanism of cross-flow filtration, **Chemical Engineering Science**, n. 5, v. 48, p. 863-872, 1993.

LUDOVICE, M.T.F.. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático**. 1997. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

LYRA, M.R.C.C.; ROLIM, M.M.; SILVA, J.A.A.; OLIVEIRA, L.A.A.; SOUZA, L.F.C.; CRISTOVAM, M.J.; QUEIROGA, G.M. 2003 a. **Avaliação da qualidade de água de lençol freático em uma área fertirrigada com vinhaça**. In: *22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Joinville, Santa Catarina, Brazil. Disponível em: <<http://www.cepis.opsoms.org/bvsacd/abes22/dii.pdf>>. Acesso em 21/11/2010.

LYRA, M. R. C. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A. Topossequência de solos fertirrigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.525-532, 2003.

MALLET, Sinclair, GUERRA, Guy and MARTA, José Manuel Carvalho. Pelo enquadramento do álcool em uma nova regulamentação. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. **Proceedings online...** Available from: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022000000200054&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 18 outubro 2010.

MARSHALL, A. D.; DAUFIN, G. **Physico-chemical aspects of membrane fouling by dairy fluids**. In: **Fouling and cleaning in pressure driven membrane processes**. Brussels: International Dairy Federation, 1995. cap. 1, p.8-35. IDF Special Issue, 9504.

MONDOR, M.; GIRARD, B.; MORESOLI, C. Modeling flux behavior for membrane filtration of apple juice. **Food Research International**, Barking, v.33, p.539-548, 2000.

MULDER, M.. **Basic Principles of Membrane technology**. 2ª [s. L.]: Kluwer Academic Publishers, 2003. 564 p.

NATARAJ, S.K.; HOSAMANI, K.M.; AMINABHAVI, T.M.. Distillery wastewater treatment by the membrane-based nanofiltration and reverse osmosis processes. **Water Research**, n.40, p.2349-2356, 2006.

NOBLE, R. D.; STERN, S. A..**Membrane Separations Technology - Principles and Applications**. Elsevier, Amsterdam. 718 pg. 1995.

ONGARATTO, R.S.; **Micro e Ultrafiltração de suco de pitanga: Estudo dos parâmetros de operação e do mecanismo de incrustação**. 2009. 207 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

PINTO, C.P.. Tecnologia da digestão anaeróbica da vinhaça e desenvolvimento sustentável. 1999. 147 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de sistemas energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PORTER, M. C. **Handbook of industrial membrane technology**, EUA: Westwood Noyes, 1990, 620 p..

RODELLA, A.A. ; CARDOSO, A.C. ; PARAZZI, C.. Composição de vinhaça de destilarias autônomas. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 96, n. 4, p. 25-28, 1980.

ROLIM, Mário Monteiro. Avaliação físico-mecânica do material solo-vinhaça concentrada e sua utilização para fins de fabricação de tijolos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas. 1996, 102 p.

SANTANA, S.S.. Economicidade da aplicação de vinhaça em comparação à adubação mineral. **Álcool & Açúcar**, n. 23, p.26-38, ago. 1985.

SÃO PAULO. **Lei nº 7.641**, de 19 de dezembro de 1991 - Dispõe sobre a proteção ambiental das bacias dos Rios Pardo, Mogi-Guaçu e Médio Grande e estabelece critérios para o uso e ocupação do solo. In: Assembléia Legislativa do estado de São Paulo. São Paulo, 1991.

SCHÄFER, A.I.; FANE, A.G; WAITE, T.D.. **Nanofiltration – Principles and Applications**. Elsevier, Great Britain, 2006, 560 p.

SCOTT, K. **Handbook of Industrial Membranes**. Oxford: Elsevier, 1995, 912 p..

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V.. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.30, n.6, nov./dez. 2006

SILVA, A. J. N.; RIBEIRO, M. R. Caracterização de um Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: propriedades químicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 291-299, 1998.

SILVA, F.C.; **Aplicação de membranas poliméricas para obtenção de licopeno concentrado a partir de polpa de mamão (*Carica papaya* L.)**. 2010. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

SILVA, L.C.F.; ZAMBELLO Jr., E.; ORLANDO F^o, J.; ARRUDA F^o, H.C.. Utilização da vinhaça seca e das cinzas de caldeira como fertilizantes na cultura de cana-de-açúcar. **STAB**, v.1, n.6, p.35-41, jul./ago. 1983.

SILVA, M.A.; SILVA, G.L.. Utilização agrícola da vinhaça e demais efluentes líquidos. **Álcool e Açúcar**, n. 31, p.12-25, nov./dez. 1986.

UNICA. UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br>>. Acesso em: 19 outubro 2010.

APÊNDICES

Apêndice A :Curvas de Fluxos de Permeado da Microfiltração

Todos os experimentos foram realizados a temperatura 60°C e área de permeação de 0,00515 m². A massa inicial de alimentação foi de 0,8 kg e todas as corridas foram realizadas até fator de concentração igual a 4. As pressões utilizadas foram 1,8 e 2,6 bar. Nas tabelas a seguir são apresentados os dados obtidos para fluxo de permeado para cada experimento.

Tabela A.1: Dados experimentais da MF utilizando a membrana CEL100 a 1,8 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	5,05	117,6	5,05	117,601	1,01
1,0	8,33	96,992	3,28	76,383	1,01
1,5	11,1	86,163	2,77	64,506	1,01
2,0	13,57	79,003	2,47	57,52	1,02
2,5	15,93	74,194	2,36	54,958	1,02
3,0	18,27	70,91	2,34	54,493	1,02
3,5	20,34	67,667	2,07	48,205	1,03
4,0	22,44	65,321	2,1	48,904	1,03
4,5	24,5	63,393	2,06	47,972	1,03
5,0	26,47	61,642	1,97	45,876	1,03
5,5	28,48	60,293	2,01	46,808	1,04
6,0	30,38	58,956	1,9	44,246	1,04
6,5	32,38	58,004	2	46,575	1,04
7,0	34,18	56,855	1,8	41,917	1,04
7,5	36,04	55,952	1,86	43,315	1,05
8,0	37,94	55,22	1,9	44,246	1,05
8,5	39,68	54,356	1,74	40,52	1,05
9,0	41,57	53,781	1,89	44,013	1,05
9,5	43,36	53,144	1,79	41,684	1,06
10	45,15	52,571	1,79	41,684	1,06

11	48,11	50,925	2,96	34,465	1,06
12,2	52,19	49,81	4,08	39,589	1,07
13	55,7	49,889	3,51	51,087	1,07
14	59,15	49,195	3,45	40,171	1,08
15,2	63,4	48,566	4,25	41,238	1,09
16	66,21	48,183	2,81	40,899	1,09
17	69,71	47,746	3,5	40,753	1,1
18	73,15	47,319	3,44	40,054	1,1
19	76,63	46,961	3,48	40,52	1,11
20	79,9	46,517	3,27	38,075	1,11
25	96,64	45,01	16,74	38,983	1,14
30	112,85	43,8	16,21	37,749	1,16
35	128,5	42,749	15,65	36,445	1,19
41	146,61	41,636	18,11	35,145	1,22
45	158,45	40,999	11,84	34,465	1,25
50	172,62	40,199	14,17	32,998	1,27
56	189,9	39,485	17,28	33,534	1,31
70	227,57	37,854	37,67	31,33	1,4
81	258,41	37,146	30,84	32,645	1,48
94	294,95	36,535	36,54	32,728	1,58
100	310,96	36,207	16,01	31,069	1,64
115	349,23	35,359	38,27	29,707	1,77
120	362	35,125	12,77	29,738	1,83
138	406,5	34,298	44,5	28,786	2,03
150	434,27	33,71	27,77	26,945	2,19
166	469,67	32,944	35,4	25,762	2,42
182	507	32,436	37,33	27,166	2,73
196	536,78	31,888	29,78	24,768	3,04
210	565,74	31,368	28,96	24,086	3,41
227	600,36	30,795	34,62	23,712	4

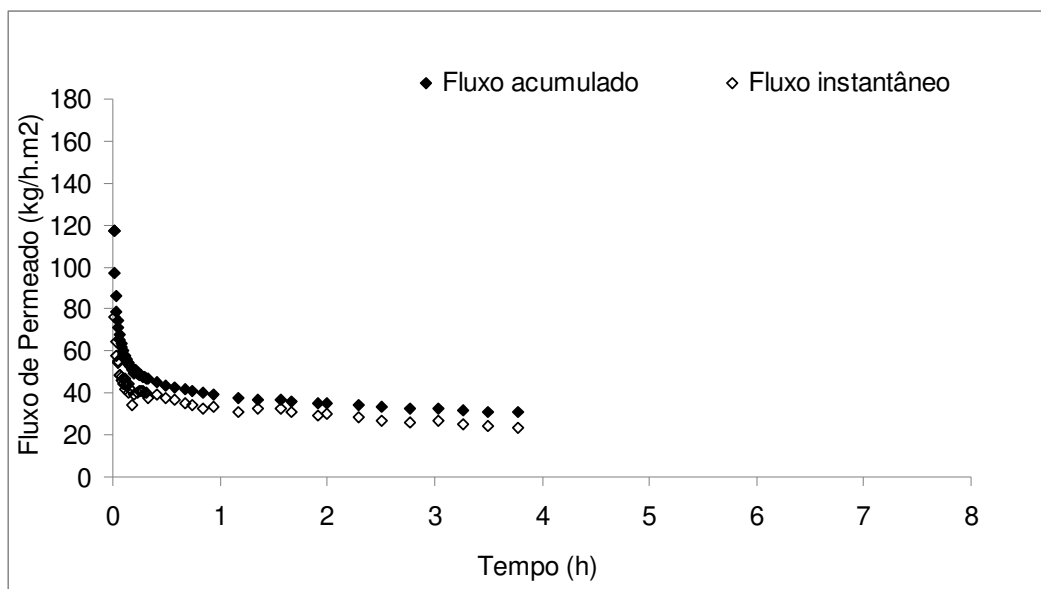


Figura A.1: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana CEL100 a 1,8 bar.

Tabela A.2: Dados experimentais da MF utilizando a membrana CEL100 a 2,6 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	7,66	178,382	7,66	178,382	1,01
1,0	11,37	132,389	3,71	86,396	1,01
1,5	14,49	112,478	3,12	72,657	1,02
2,3	18,08	91,530	3,59	52,251	1,02
3,0	22,61	87,755	4,53	75,351	1,03
3,5	25,07	83,402	2,46	57,287	1,03
4,0	27,62	80,400	2,55	59,383	1,04
4,5	29,94	77,469	2,32	54,027	1,04
5,0	32,17	74,916	2,23	51,931	1,04
5,5	34,45	72,932	2,28	53,095	1,05
6,0	36,69	71,201	2,24	52,164	1,05
6,5	39,07	69,988	2,38	55,424	1,05
7,0	41,33	68,748	2,26	52,630	1,05
7,5	43,54	67,596	2,21	51,465	1,06
8,0	45,82	66,689	2,28	53,095	1,06
8,5	47,97	65,712	2,15	50,068	1,06

9,0	50,13	64,855	2,16	50,301	1,07
9,5	52,34	64,151	2,21	51,465	1,07
10	54,44	63,388	2,10	48,904	1,07
11	58,71	62,146	4,27	49,719	1,08
12	62,92	61,052	4,21	49,020	1,09
13	67,31	60,288	4,39	51,116	1,09
14	71,52	59,483	4,21	49,020	1,10
15	75,75	58,801	4,23	49,253	1,10
16	79,90	58,146	4,15	48,321	1,11
17	84,04	57,561	4,14	48,205	1,12
18	88,16	57,028	4,12	47,972	1,12
19	92,22	56,515	4,06	47,273	1,13
20	96,30	56,064	4,08	47,506	1,14
25	116,68	54,343	20,38	47,460	1,17
31	140,86	52,907	24,18	46,924	1,21
35	156,47	52,054	15,61	45,440	1,24
40	176,07	51,253	19,60	45,643	1,28
45	195,08	50,477	19,01	44,269	1,32
51	217,52	49,662	22,44	43,547	1,37
55	231,98	49,111	14,46	42,092	1,41
60	249,57	48,432	17,59	40,963	1,45
71	288,63	47,334	39,06	41,346	1,56
80	316,58	46,077	27,95	36,164	1,66
90	346,88	44,877	30,30	35,277	1,77
100	376,72	43,864	29,84	34,745	1,89
112	410,79	42,706	34,07	33,058	2,06
120	432,78	41,993	21,99	32,006	2,18
135	470,90	40,615	38,12	29,591	2,43
150	508,36	39,461	37,46	29,078	2,74
165	544,59	38,431	36,23	28,123	3,13
181	581,89	37,433	37,30	27,144	3,67
189	600,14	36,973	18,25	26,562	4,00

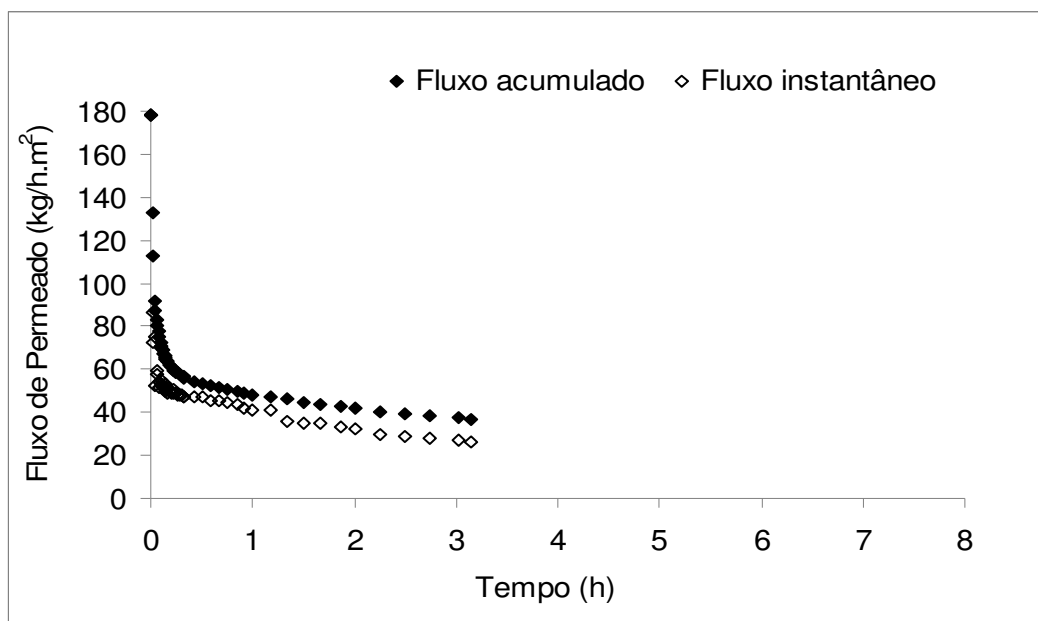


Figura A.2: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana CEL100 a 2,6 bar.

Tabela A.3: Dados experimentais da MF utilizando a membrana PES005 a 1,8 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m²)	FC
0,5	3,20	74,520	3,20	74,520	1,00
1,0	6,23	72,540	3,03	70,561	1,01
1,5	7,73	60,004	1,50	34,931	1,01
2,0	8,32	48,438	0,59	13,740	1,01
2,5	9,50	44,246	1,18	27,479	1,01
3,0	11,13	43,198	1,63	37,958	1,01
3,5	12,70	42,250	1,57	36,561	1,02
4,0	14,29	41,597	1,59	37,027	1,02
4,5	15,79	40,856	1,50	34,931	1,02
5,0	17,19	40,031	1,40	32,602	1,02
5,5	18,65	39,483	1,46	34,000	1,02
6,0	20,01	38,832	1,36	31,671	1,03
6,5	21,43	38,388	1,42	33,068	1,03
7,0	22,72	37,792	1,29	30,041	1,03
7,5	24,11	37,431	1,39	32,369	1,03

8,0	25,35	36,896	1,24	28,876	1,03
8,5	26,65	36,506	1,30	30,274	1,03
9,0	27,93	36,134	1,28	29,808	1,04
9,5	29,14	35,716	1,21	28,178	1,04
10	30,33	35,315	1,19	27,712	1,04
11	32,80	34,719	2,47	28,760	1,04
12	35,23	34,184	2,43	28,294	1,05
13	37,58	33,659	2,35	27,363	1,05
14	39,89	33,176	2,31	26,897	1,05
15	42,26	32,804	2,37	27,596	1,06
16	44,56	32,428	2,30	26,781	1,06
17	46,79	32,048	2,23	25,965	1,06
18	48,68	31,490	1,89	22,007	1,06
19	50,46	30,923	1,78	20,726	1,07
20	52,66	30,658	2,20	25,616	1,07
25	63,68	29,659	11,02	25,663	1,09
30	74,28	28,830	10,60	24,685	1,10
35	84,81	28,214	10,53	24,522	1,12
40	95,03	27,663	10,22	23,800	1,13
45	105,55	27,311	10,52	24,498	1,15
50	115,67	26,937	10,12	23,567	1,17
55	125,60	26,590	9,93	23,124	1,19
60	135,30	26,257	9,70	22,589	1,20
70	153,76	25,576	18,46	21,494	1,24
80	172,15	25,056	18,39	21,413	1,27
90	190,62	24,661	18,47	21,506	1,31
100	208,12	24,233	17,50	20,376	1,35
110	226,14	23,937	18,02	20,982	1,39
120	243,23	23,601	17,09	19,899	1,44
135	267,68	23,087	24,45	18,979	1,50
150	291,75	22,647	24,07	18,684	1,57
165	315,43	22,259	23,68	18,382	1,65
180	338,87	21,921	23,44	18,195	1,73
195	362,02	21,617	23,15	17,970	1,82
210	383,51	21,264	21,49	16,682	1,92
225	405,13	20,965	21,62	16,782	2,02
240	425,84	20,660	20,71	16,076	2,14
255	447,57	20,437	21,73	16,868	2,27

270	468,72	20,213	21,15	16,418	2,41
285	489,33	19,992	20,61	15,998	2,57
300	508,00	19,717	18,67	14,493	2,73
315	530,50	19,609	22,50	17,466	2,96
330	546,60	19,286	16,10	12,498	3,15
345	565,20	19,075	18,60	14,438	3,40
360	587,80	19,012	22,60	17,543	3,76
375	600,60	18,649	12,80	9,936	4,00

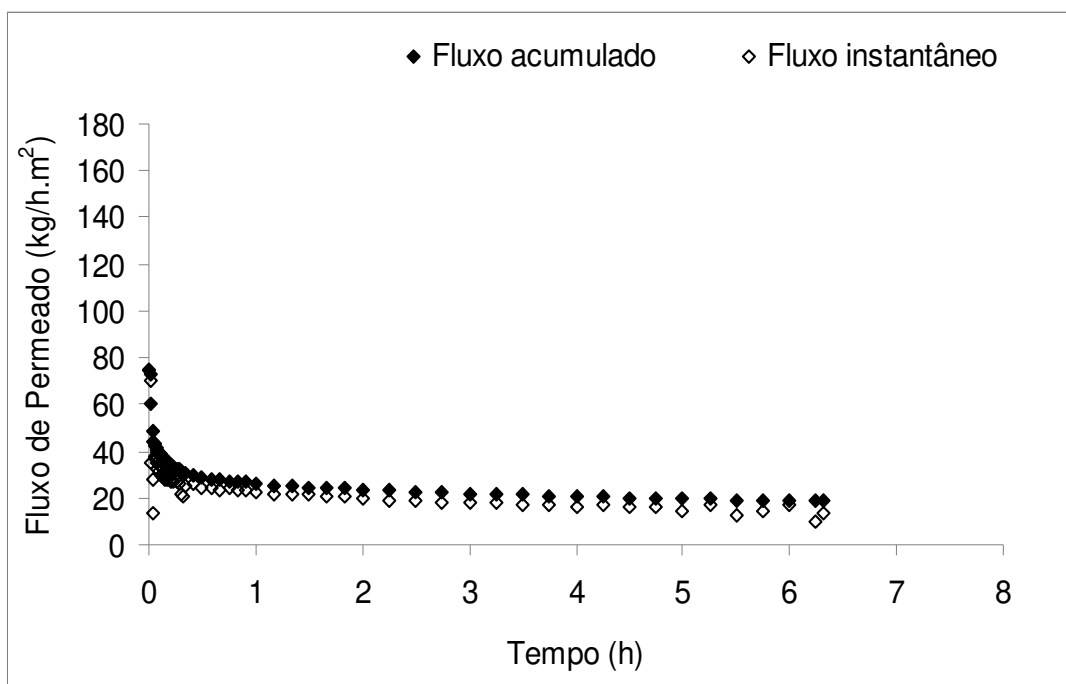


Figura A.3: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES 0,05 micra a 1,8 bar.

Tabela A.4: Dados experimentais da MF utilizando a membrana PES005 a 2,6 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	2,40	55,890	2,40	55,890	1,00
1,0	4,14	48,205	1,74	40,520	1,01
1,5	5,71	44,324	1,57	36,561	1,01
2,0	7,19	41,859	1,48	34,465	1,01

2,5	8,79	40,939	1,60	37,260	1,01
3,0	10,11	39,239	1,32	30,739	1,01
3,5	11,55	38,424	1,44	33,534	1,01
4,0	12,81	37,289	1,26	29,342	1,02
4,5	14,09	36,458	1,28	29,808	1,02
5,0	15,35	35,746	1,26	29,342	1,02
5,5	15,59	33,005	0,24	5,589	1,02
6,0	17,84	34,621	2,25	52,397	1,02
6,5	18,97	33,982	1,13	26,315	1,02
7,0	20,19	33,584	1,22	28,411	1,03
7,5	21,33	33,115	1,14	26,548	1,03
8,0	22,49	32,733	1,16	27,013	1,03
8,5	23,61	32,342	1,12	26,082	1,03
9,0	24,71	31,968	1,10	25,616	1,03
9,5	25,87	31,708	1,16	27,013	1,03
10	26,94	31,368	1,07	24,918	1,03
11	29,26	30,972	2,32	27,013	1,04
12	31,37	30,439	2,11	24,568	1,04
13	33,65	30,139	2,28	26,548	1,04
14	35,77	29,750	2,12	24,685	1,05
15	37,86	29,389	2,09	24,335	1,05
16	39,92	29,051	2,06	23,986	1,05
17	41,91	28,705	1,99	23,171	1,06
18	43,96	28,437	2,05	23,870	1,06
19	45,91	28,135	1,95	22,705	1,06
20	47,95	27,916	2,04	23,753	1,06
25	57,42	26,743	9,47	22,053	1,08
30	66,33	25,744	8,91	20,749	1,09
35	76,52	25,456	10,19	23,730	1,11
40	84,83	24,693	8,31	19,352	1,12
45	92,57	23,952	7,74	18,024	1,13
50	101,17	23,560	8,60	20,027	1,14
55	108,66	23,004	7,49	17,442	1,16
60	116,22	22,554	7,56	17,605	1,17
70	131,72	21,910	15,50	18,048	1,20
80	149,88	21,814	18,16	21,145	1,23
90	162,61	21,038	12,73	14,822	1,25
100	176,32	20,530	13,71	15,964	1,28

110	190,79	20,195	14,47	16,848	1,31
120	204,87	19,879	14,08	16,394	1,34
135	225,69	19,466	20,82	16,161	1,39
150	246,10	19,103	20,41	15,843	1,44
165	266,12	18,780	20,02	15,540	1,50
180	285,25	18,452	19,13	14,850	1,55
195	305,84	18,262	20,59	15,983	1,62
210	323,48	17,936	17,64	13,693	1,68
225	342,47	17,723	18,99	14,741	1,75
240	360,43	17,486	17,96	13,941	1,82
255	378,00	17,260	17,57	13,639	1,89
270	396,02	17,078	18,02	13,988	1,98
285	413,63	16,899	17,61	13,670	2,07
300	430,17	16,696	16,54	12,839	2,16
315	447,68	16,548	17,51	13,592	2,26
330	464,35	16,384	16,67	12,940	2,38
345	480,38	16,213	16,03	12,443	2,50
360	496,88	16,071	16,50	12,808	2,63
375	515,00	15,991	18,12	14,066	2,80
390	527,60	15,752	12,60	9,781	2,92
405	543,60	15,628	16,00	12,420	3,11
420	558,80	15,492	15,20	11,799	3,30
435	573,20	15,343	14,40	11,178	3,51
450	588,20	15,220	15,00	11,644	3,76
465	601,20	15,054	13,00	10,091	4,00

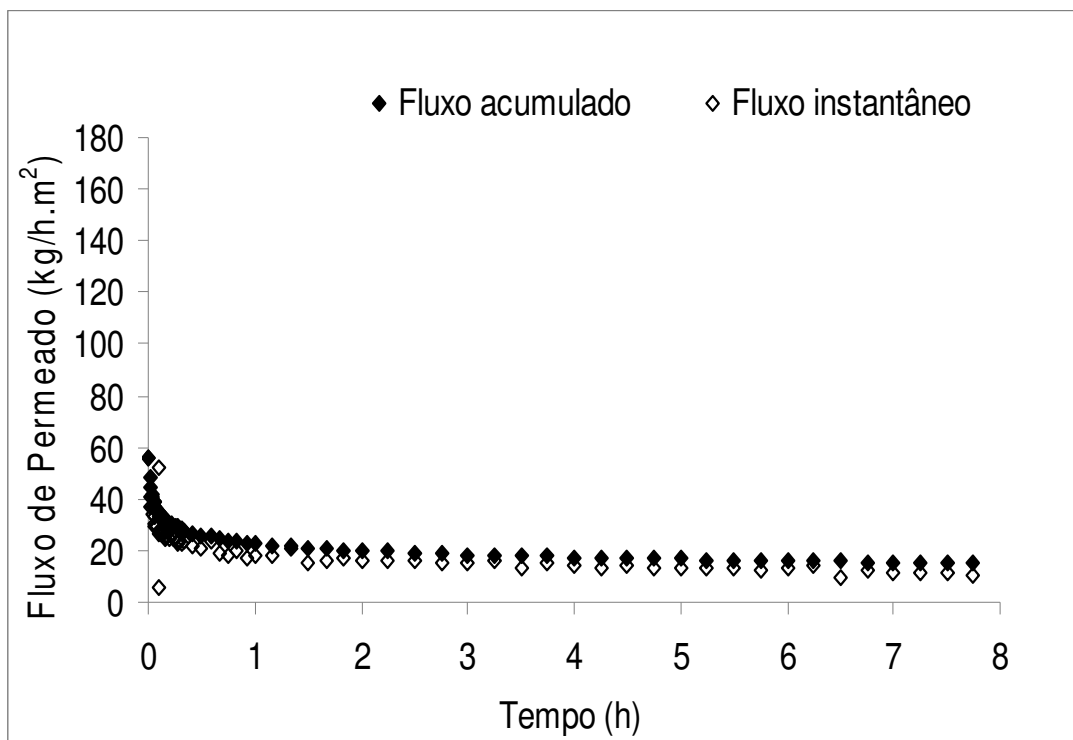


Figura A.4: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES005 a 2,6 bar.

Apêndice B :Curvas de Fluxos de Permeado da Ultrafiltração

Todos os experimentos foram realizados a temperatura 60°C e área de permeação de 0,00515 m². A massa inicial de alimentação foi de 0,4 kg e todas as corridas foram realizadas até fator de concentração igual a 2. As pressões utilizadas foram 3, 4 e 5 bar. Nas tabelas a seguir são apresentados os dados obtidos para fluxo de permeado para cada experimento.

Tabela B.1: Dados experimentais da UF utilizando a membrana CEL10 a 3 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	5,11	118,999	5,11	118,999	1,01
1,0	12,08	140,656	6,97	162,313	1,03
1,5	19,07	148,030	6,99	162,779	1,05
2,0	25,98	151,252	6,91	160,916	1,07
2,5	33,11	154,209	7,13	166,039	1,09
3,0	40,02	155,327	6,91	160,916	1,11
3,5	46,89	155,992	6,87	159,984	1,13
4,0	53,72	156,375	6,83	159,053	1,15
4,5	60,53	156,621	6,81	158,587	1,18
5,0	67,70	157,656	7,17	166,971	1,20
5,5	74,90	158,566	7,20	167,669	1,23
6,0	81,84	158,820	6,94	161,615	1,25
6,5	88,70	158,892	6,86	159,752	1,28
7,0	95,58	158,986	6,88	160,217	1,31
7,5	102,34	158,882	6,76	157,423	1,34
8,0	109,37	159,184	7,03	163,710	1,37
8,5	116,12	159,067	6,75	157,190	1,40
9,0	122,92	159,027	6,80	158,354	1,44
9,5	129,90	159,212	6,98	162,546	1,48
10	136,73	159,204	6,83	159,053	1,51
11	150,03	158,810	13,30	154,861	1,59
12	163,28	158,432	13,25	154,279	1,68
13	176,27	157,880	12,99	151,252	1,78
14	189,91	157,947	13,64	158,820	1,89
15	201,60	156,491	11,69	136,115	2,00

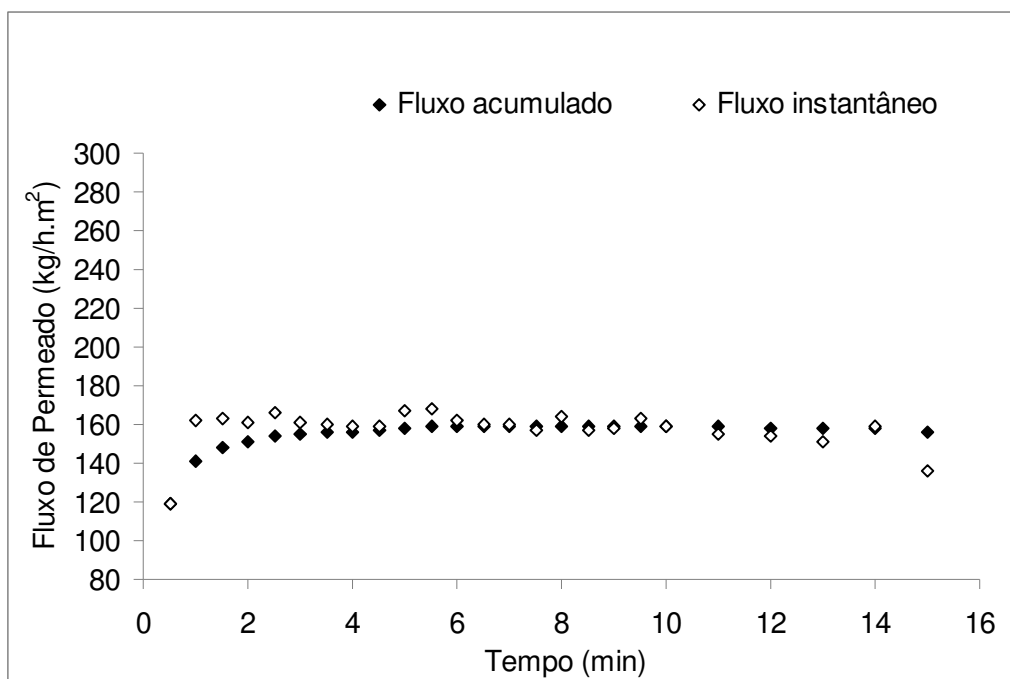


Figura B.1: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana CEL10 a 3 bar.

Tabela B.2: Dados experimentais da UF utilizando a membrana CEL10 a 4 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	7,77	180,943	7,77	180,943	1,02
1,0	17,00	197,943	9,23	214,943	1,04
1,5	25,81	200,349	8,81	205,162	1,07
2,0	34,86	202,950	9,05	210,751	1,09
2,5	43,98	204,836	9,12	212,381	1,12
3,0	51,68	200,582	7,70	179,313	1,15
3,5	60,41	200,970	8,73	203,299	1,18
4,0	69,35	201,873	8,94	208,189	1,21
4,5	78,32	202,652	8,97	208,888	1,24
5,0	86,76	202,042	8,44	196,546	1,27
5,5	95,68	202,558	8,92	207,724	1,31
6,0	102,89	199,670	7,21	167,902	1,34
6,5	111,77	200,218	8,88	206,792	1,38
7,0	120,00	199,606	8,23	191,655	1,42

7,5	128,10	198,874	8,10	188,628	1,47
8,0	135,77	197,608	7,67	178,614	1,51
8,5	143,83	197,025	8,06	187,696	1,55
9,0	151,55	196,067	7,72	179,779	1,60
9,5	160,38	196,570	8,83	205,628	1,66
10	167,64	195,195	7,26	169,067	1,71
11	183,19	193,910	15,55	181,060	1,83
12	198,56	192,664	15,37	178,964	1,97
12,2	201,38	192,197	2,82	164,176	2,00

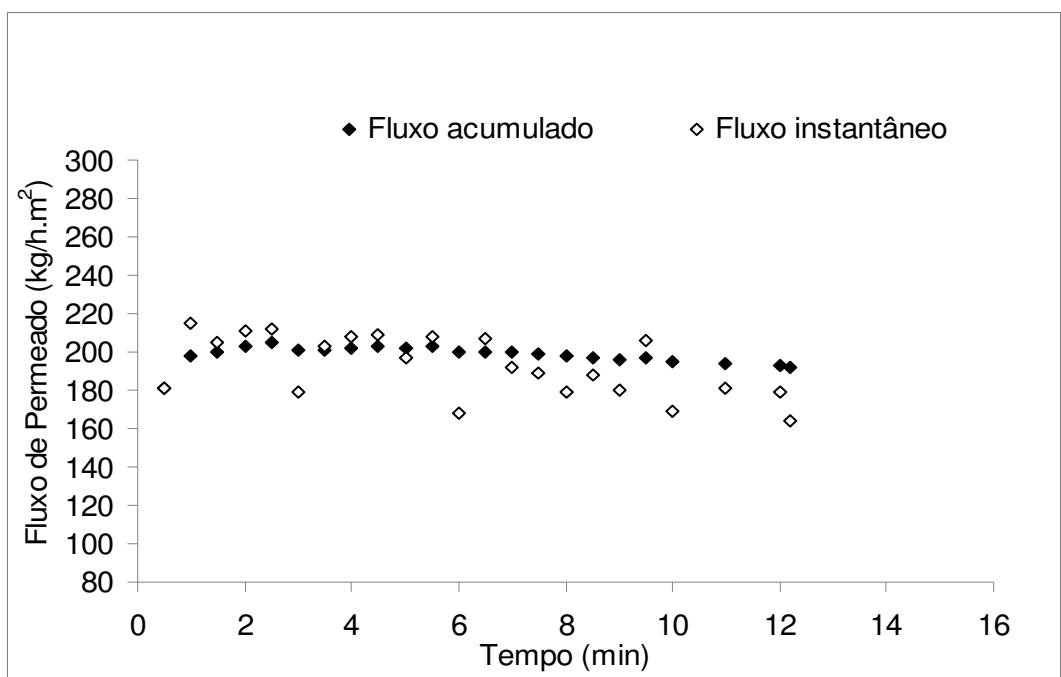


Figura 2.2: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando membrana de CEL10 a 4 bar.

Tabela B.3: Dados experimentais da UF utilizando a membrana CEL10 a 5 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m²)	FC
0,5	6,49	151,135	6,49	151,135	1,02
1,0	16,64	193,751	10,15	236,367	1,04
1,5	26,51	205,783	9,87	229,847	1,07
2,0	36,35	211,624	9,84	229,148	1,10

2,5	46,01	214,291	9,66	224,956	1,13
3,0	55,48	215,331	9,47	220,532	1,16
3,5	64,69	215,209	9,21	214,477	1,19
4,0	74,28	216,224	9,59	223,326	1,23
4,5	83,63	216,392	9,35	217,737	1,26
5,0	92,40	215,176	8,77	204,231	1,30
5,5	101,20	214,244	8,80	204,929	1,34
6,0	110,31	214,069	9,11	212,148	1,38
6,5	119,27	213,653	8,96	208,655	1,42
7,0	127,55	212,165	8,28	192,820	1,47
7,5	136,00	211,139	8,45	196,779	1,52
8,0	144,63	210,504	8,63	200,970	1,57
8,5	153,34	210,052	8,71	202,833	1,62
9,0	162,09	209,703	8,75	203,765	1,68
9,5	169,58	207,846	7,49	174,423	1,74
10	178,27	207,572	8,69	202,368	1,80
11	194,01	205,363	15,74	183,272	1,94
11,4	200,48	204,766	6,47	188,337	2,00

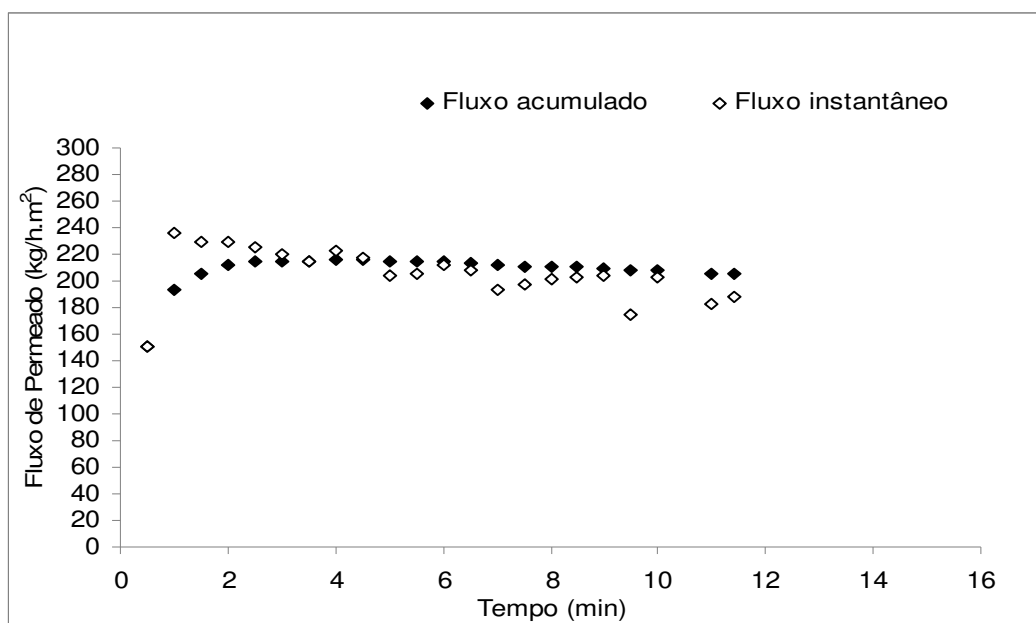


Figura B.3: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana CEL10 a 5 bar.

Tabela B.4: Dados experimentais da UF utilizando a membrana CEL30 a 3 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h·m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h·m ²)	FC
0,5	45,50	1059,577	45,50	1059,577	1,13
1,0	75,55	879,682	30,05	699,787	1,23
1,5	93,62	726,722	18,07	420,803	1,30
2,0	115,10	670,095	21,48	500,213	1,40
2,5	132,20	615,719	17,10	398,215	1,49
3,0	148,68	577,062	16,48	383,776	1,59
3,5	162,52	540,667	13,84	322,298	1,68
4,0	175,98	512,265	13,46	313,448	1,78
4,5	188,82	488,570	12,84	299,010	1,89
5,0	200,57	471,793	11,75	304,030	2,00

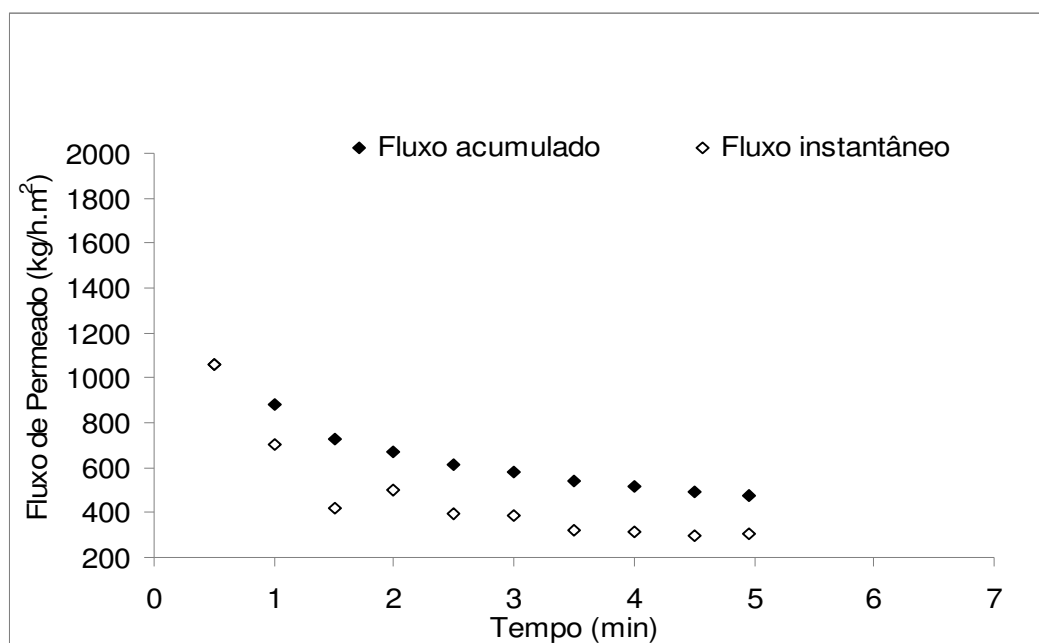


Figura B.4: Curva de fluxo acumulado e instantâneo utilizando membrana de CEL30 a 3 bar.

Tabela B.5: Dados experimentais para UF utilizando a membrana CEL30 a 4 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h·m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h·m ²)	FC
0,5	46,90	1092,179	46,90	1092,179	1,13
1,0	79,86	929,866	32,96	767,553	1,25
1,5	104,28	809,470	24,42	568,678	1,35
2,0	126,12	734,252	21,84	508,597	1,46
2,5	146,11	680,505	19,99	465,515	1,57
3,0	163,67	635,242	17,56	408,927	1,69
3,5	180,61	600,848	16,94	394,489	1,82
4,0	196,62	572,346	16,01	372,831	1,96
4,1	200,85	566,256	4,23	378,868	2,00

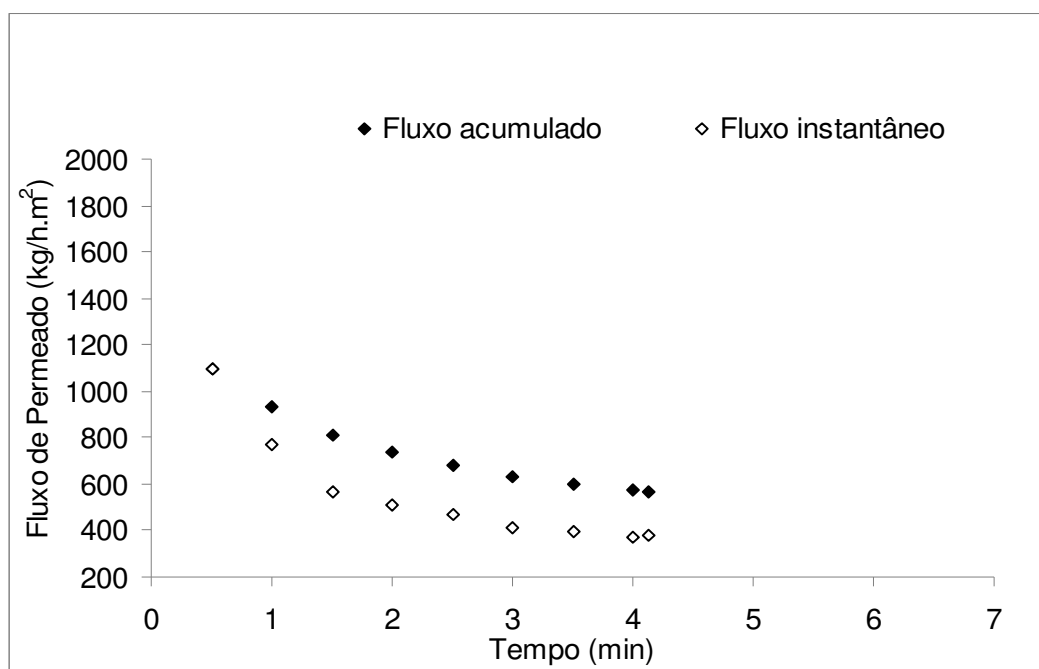


Figura B.5: Curva de fluxo acumulado e instantâneo utilizando membrana de CEL30 a 4 bar.

Tabela B.6: Dados experimentais para UF utilizando a membrana CEL30 a 5 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	70,00	1630,118	70,00	1630,118	1,21
1,0	123,50	1437,997	53,50	1245,876	1,45
1,5	148,11	1149,699	24,61	573,103	1,59
2,0	168,80	982,729	20,69	481,816	1,73
2,5	189,02	880,357	20,22	470,871	1,89
2,8	200,97	835,727	11,95	463,807	2,00

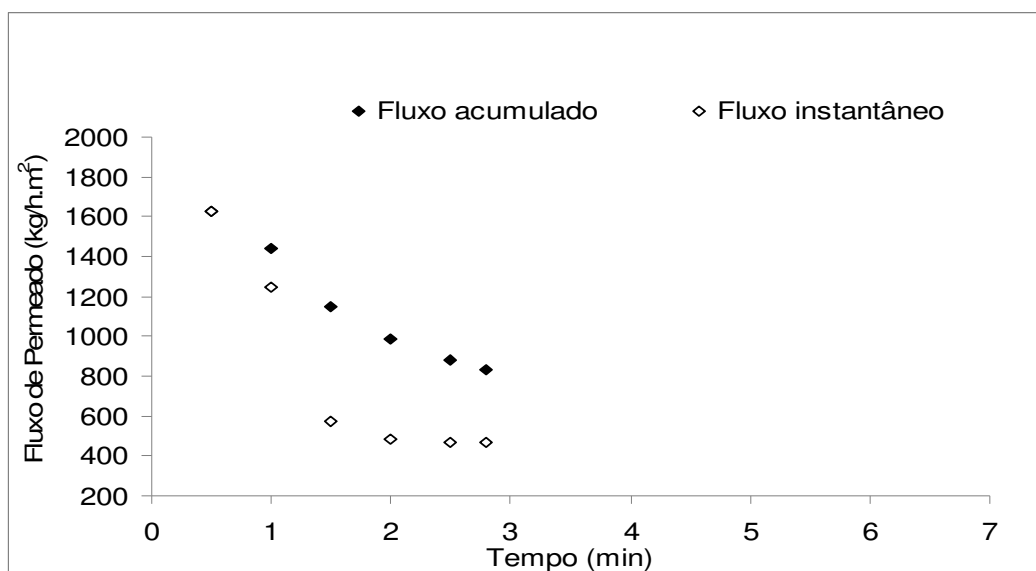


Figura B.6: Curva de fluxo acumulado e instantâneo utilizando membrana de CEL30 a 5 bar.

Tabela B.7: Dados experimentais para UF utilizando a membrana PES10 a 3 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	6,60	153,697	6,60	153,697	1,02
1,0	11,47	133,553	4,87	113,410	1,03
1,5	15,82	122,802	4,35	101,300	1,04
2,0	19,60	114,108	3,78	88,026	1,05

2,5	22,24	103,582	2,64	61,479	1,06
3,2	25,72	93,586	3,48	57,886	1,07
3,5	27,41	91,187	1,69	65,593	1,07
4,0	29,90	87,037	2,49	57,986	1,08
4,5	32,36	83,731	2,46	57,287	1,09
5,0	34,80	81,040	2,44	56,821	1,10
5,5	37,35	79,071	2,55	59,383	1,10
6,0	39,80	77,237	2,45	57,054	1,11
6,5	42,33	75,827	2,53	58,917	1,12
7,0	44,80	74,520	2,47	57,520	1,13
7,5	47,25	73,355	2,45	57,054	1,13
8,2	50,48	71,680	3,23	53,727	1,14
8,5	52,11	71,383	1,63	63,264	1,15
9,0	54,46	70,457	2,35	54,725	1,16
9,5	56,80	69,617	2,34	54,493	1,17
10	59,16	68,884	2,36	54,958	1,17
11,2	64,44	66,993	5,28	51,232	1,19
12,2	69,15	65,997	4,71	54,842	1,21
13	72,69	65,106	3,54	51,523	1,22
14	77,42	64,390	4,73	55,075	1,24
15	81,85	63,536	4,43	51,582	1,26
16	86,14	62,687	4,29	49,951	1,27
17	90,67	62,102	4,53	52,746	1,29
18,2	95,30	60,969	4,63	44,925	1,31
19,2	99,63	60,420	4,33	50,417	1,33
20,2	103,51	59,665	3,88	45,178	1,35
25,2	124,26	57,415	20,75	48,321	1,45
30	143,78	55,804	19,52	47,351	1,56
35	178,44	59,363	34,66	80,714	1,81
39,3	180,55	53,493	2,11	5,714	1,82
45	197,97	51,225	17,42	35,585	1,98
46	200,35	50,713	2,38	27,712	2,00

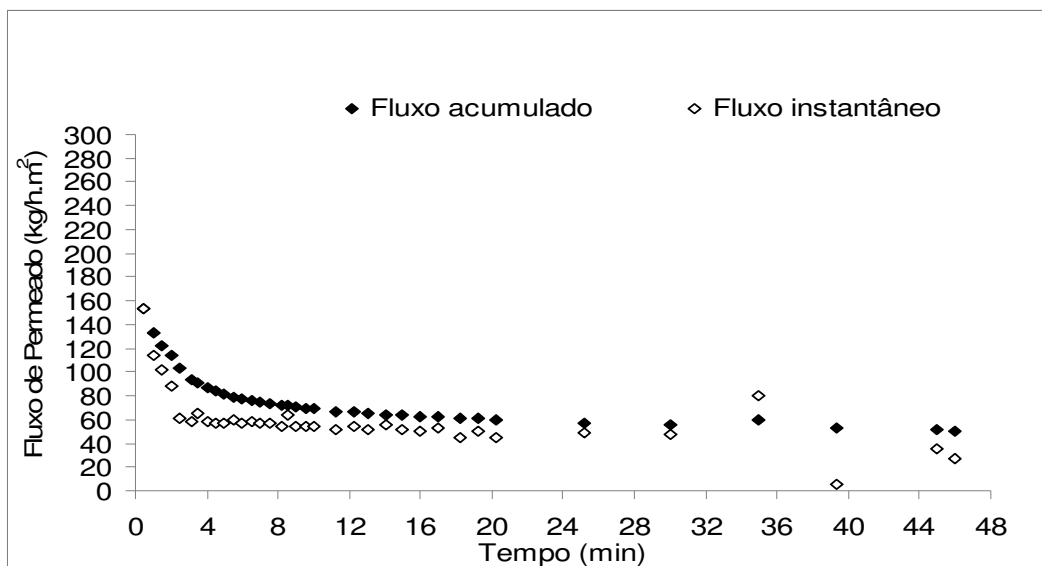


Figura B.7: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES10 a 3 bar.

Tabela B.8: Dados experimentais para UF utilizando a membrana PES10 a 4 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	9,34	217,504	9,34	217,504	1,02
1,0	15,61	181,758	6,27	146,012	1,04
1,5	18,57	144,149	2,96	68,931	1,05
2,0	19,50	113,526	0,93	21,657	1,05
2,5	22,35	104,095	2,85	66,369	1,06
3,2	24,29	88,383	1,94	32,270	1,06
3,6	25,86	83,641	1,57	45,702	1,07
4,0	26,81	78,042	0,95	27,654	1,07
4,5	27,90	72,191	1,09	25,383	1,07
5,0	30,41	70,817	2,51	58,451	1,08
5,5	32,33	68,444	1,92	44,712	1,09
6,0	35,18	68,271	2,85	66,369	1,10
6,5	37,95	67,981	2,77	64,506	1,10
7,2	41,71	67,453	3,76	62,543	1,12
7,5	43,58	67,658	1,87	72,579	1,12
8,0	46,41	67,548	2,83	65,903	1,13
8,5	49,10	67,260	2,69	62,643	1,14

9,0	51,58	66,731	2,48	57,753	1,15
9,5	54,28	66,528	2,70	62,876	1,16
10	56,83	66,171	2,55	59,383	1,17
11	62,48	66,136	5,65	65,787	1,19
12	67,79	65,777	5,31	61,828	1,20
13	72,69	65,106	4,90	57,054	1,22
14	78,00	64,872	5,31	61,828	1,24
15	82,86	64,320	4,86	56,588	1,26
16	87,77	63,873	4,91	57,171	1,28
17	93,25	63,869	5,48	63,807	1,30
18	98,15	63,491	4,90	57,054	1,33
19,3	105,01	63,353	6,86	61,443	1,36
20	108,10	62,934	3,09	51,399	1,37
25	132,48	61,702	24,38	56,775	1,50
30	156,11	60,590	23,63	55,028	1,64
35	178,60	59,416	22,49	52,373	1,81
40	200,41	58,338	21,81	50,790	2,00

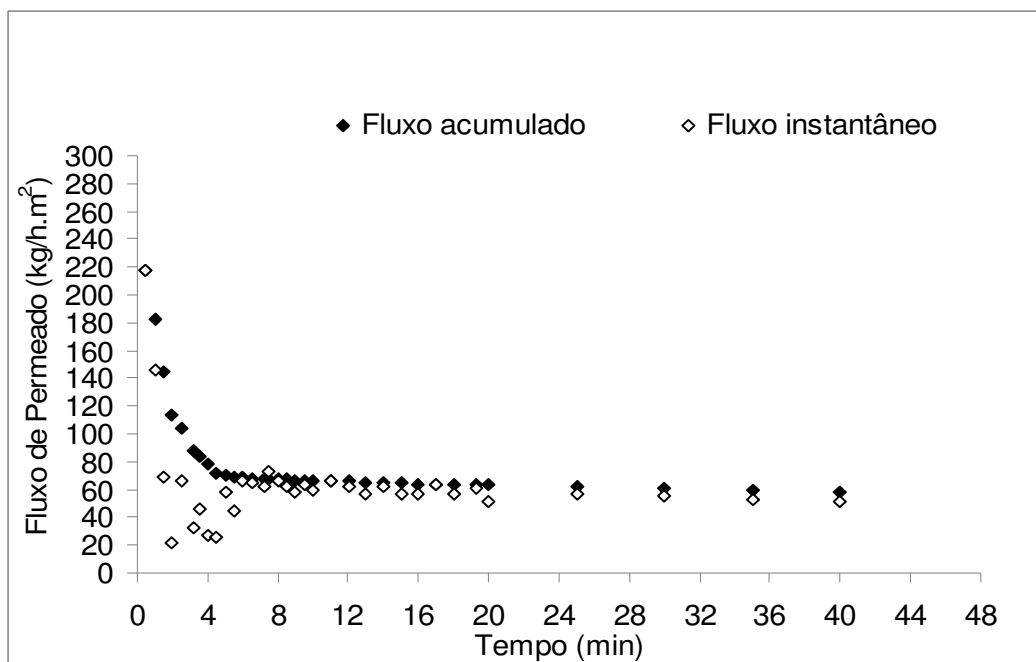


Figura B.8: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES10 a 4 bar.

Tabela B.9: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES10 a 5 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h·m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h·m ²)	FC
0,5	11,61	270,367	11,61	270,367	1,03
1,3	24,70	221,230	24,70	190,520	1,07
1,5	23,66	183,660	26,66	114,108	1,07
2,0	29,66	172,676	29,66	69,862	1,08
2,5	34,98	162,919	34,98	123,889	1,10
3,0	39,40	152,921	39,40	102,930	1,11
3,5	45,25	150,536	45,25	136,231	1,13
4,0	50,10	145,837	50,10	112,944	1,14
4,5	55,91	144,667	55,91	135,300	1,16
5,0	60,22	140,237	60,22	100,369	1,18
5,8	69,04	138,600	69,04	128,372	1,21
6,2	73,02	137,133	73,02	115,855	1,22
6,5	76,56	137,145	76,56	137,396	1,24
7,0	81,69	135,882	81,69	119,464	1,26
7,5	86,69	134,586	86,69	116,437	1,28
8,0	91,89	133,742	91,89	121,095	1,30
8,5	95,46	130,766	95,46	83,136	1,31
9,0	101,17	130,888	101,17	132,971	1,34
9,5	105,70	129,552	105,70	105,492	1,36
10	110,26	128,383	110,26	106,191	1,38
11,2	120,55	125,326	120,55	99,845	1,43
12	127,42	123,637	127,42	99,990	1,47
13	136,34	122,116	136,34	103,862	1,52
14	144,28	119,997	144,28	92,451	1,56
15	151,95	117,951	151,95	89,307	1,61
16	159,86	116,335	159,86	92,102	1,66
17	167,40	114,656	167,40	87,794	1,72
18	174,77	113,054	174,77	85,814	1,77
19	182,23	111,675	182,23	86,862	1,83
20	189,38	110,254	189,38	83,252	1,89
21,6	200,68	108,179	200,68	82,234	2,00

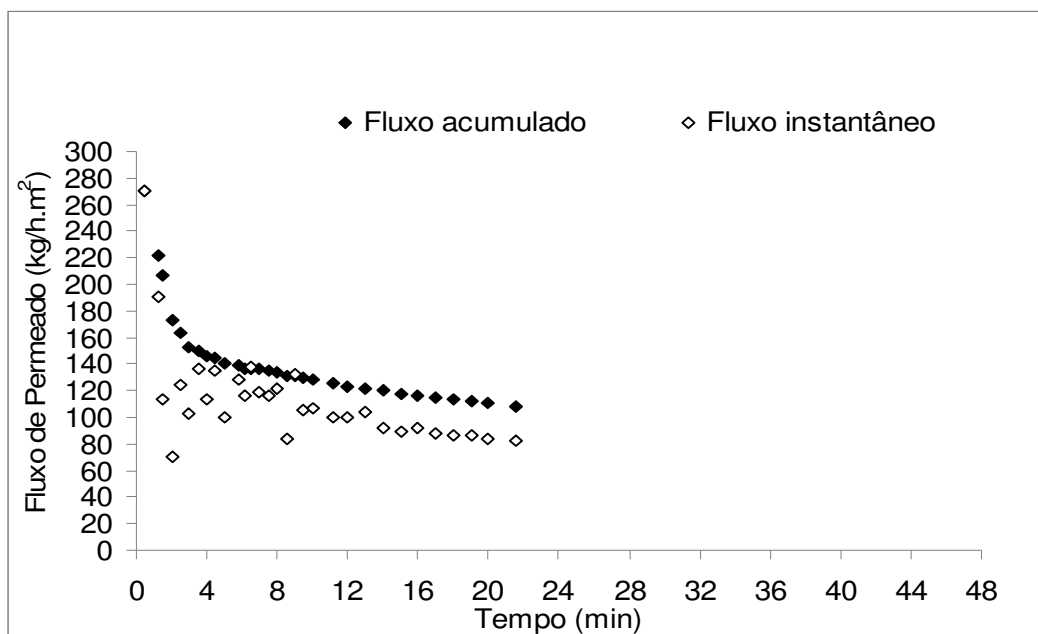


Figura B.9: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES10 a 5 bar.

Tabela B.10: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES30 a 3 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	4,50	104,793	4,50	104,793	1,01
1,3	14,80	132,559	10,30	149,913	1,04
1,8	21,81	141,083	7,01	163,245	1,06
2,2	29,14	154,226	7,33	213,371	1,08
2,5	36,32	169,160	7,18	278,673	1,10
3,0	44,43	172,443	8,11	188,861	1,12
3,5	50,16	166,871	5,73	133,437	1,14
4,0	56,55	164,613	6,39	148,807	1,16
4,7	66,02	163,557	9,47	157,523	1,20
5,2	72,81	163,034	6,79	158,121	1,22
5,8	80,88	162,369	8,07	156,608	1,25
6,2	86,30	162,073	5,42	157,772	1,28
6,5	90,60	162,295	4,30	166,893	1,29
7,0	97,12	161,548	6,52	151,834	1,32
7,7	106,82	161,530	9,70	161,348	1,36

8,0	109,82	159,839	3,00	116,437	1,38
8,7	119,19	159,519	9,37	155,859	1,42
9,0	122,90	159,001	3,71	143,994	1,44
9,5	129,50	158,722	6,60	153,697	1,48
10	135,99	158,343	6,49	151,135	1,52
11	149,50	158,249	13,51	157,306	1,60
12	162,92	158,083	13,42	156,258	1,69
13	176,13	157,754	13,21	153,813	1,79
14	188,93	157,132	12,80	149,039	1,90
14,9	200,31	156,534	11,38	147,228	2,00

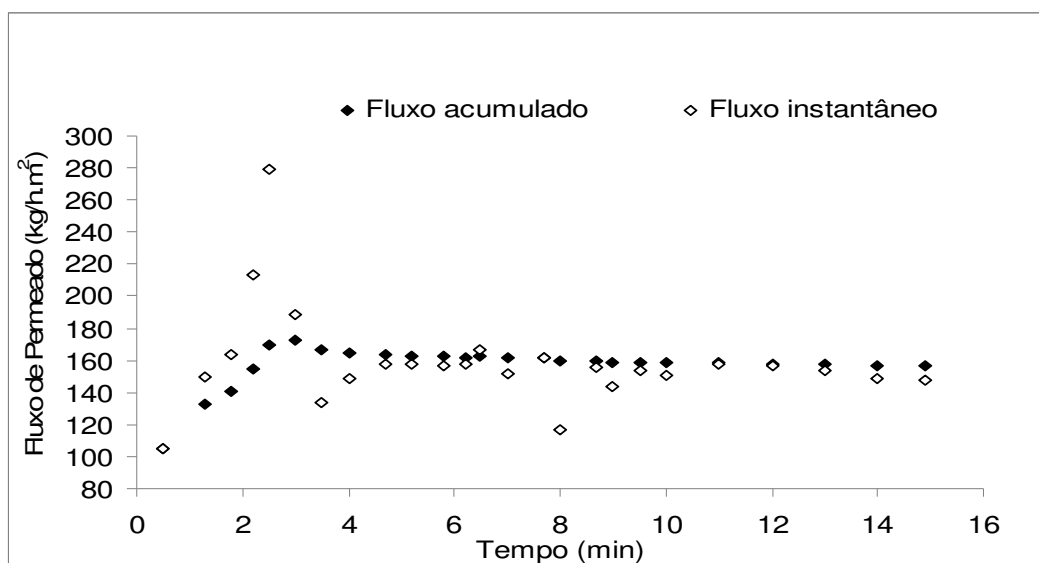


Figura B.10: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES30 a 3 bar.

Tabela B.11: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES30 a 4 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	6,40	149,039	6,40	149,039	1,02
1,3	20,99	188,001	14,59	212,352	1,06
1,8	29,98	193,932	8,99	209,354	1,08
2,2	38,36	203,024	8,38	243,936	1,11
2,5	46,37	215,967	8,01	310,887	1,13

3,0	55,07	213,740	8,70	202,600	1,16
3,5	63,64	211,716	8,57	199,573	1,19
4,0	72,20	210,169	8,56	199,340	1,22
4,7	82,56	204,533	10,36	172,327	1,26
5,2	90,83	203,384	8,27	192,587	1,29
5,8	101,38	203,524	10,55	204,735	1,34
6,2	108,40	203,577	7,02	204,347	1,37
6,5	113,77	203,801	5,37	208,422	1,39
7,0	121,68	202,401	7,91	184,203	1,43
7,5	129,98	201,793	8,30	193,285	1,48
8,0	137,64	200,330	7,66	178,382	1,52
8,5	146,26	200,354	8,62	200,737	1,57
9,0	154,02	199,263	7,76	180,710	1,62
9,5	162,11	198,691	8,09	188,395	1,68
10	170,59	198,630	8,48	197,477	1,74
11	185,87	196,747	15,28	177,916	1,86
12	201,34	195,362	15,47	180,128	2,00

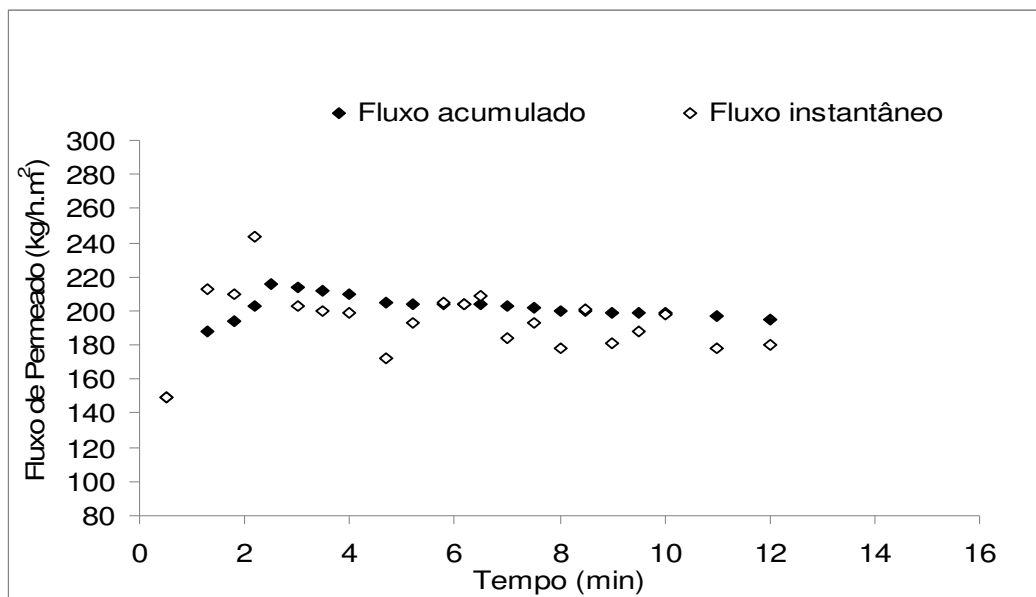


Figura B.11: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES30 a 4 bar.

Tabela B.12: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES30 a 5 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	9,80	228,217	9,80	228,217	1,02
1,3	29,46	263,864	19,66	286,144	1,08
1,8	41,41	267,870	11,95	278,284	1,11
2,2	52,51	277,914	11,10	323,113	1,15
2,5	59,30	276,189	6,79	263,536	1,17
3,0	69,64	270,289	10,34	240,792	1,21
3,5	79,69	265,110	10,05	234,038	1,25
4,0	88,38	257,268	8,69	202,368	1,28
4,7	102,60	254,180	14,22	236,534	1,34
5,2	109,63	245,481	7,03	163,710	1,37
5,8	118,93	238,756	9,30	180,477	1,42
6,2	125,78	236,217	6,85	199,398	1,45
6,5	131,97	236,403	6,19	240,248	1,49
7,0	140,14	233,107	8,17	190,258	1,53
7,5	147,41	228,853	7,27	169,299	1,58
8,0	155,51	226,339	8,10	188,628	1,63
8,5	163,82	224,408	8,31	193,518	1,68
9,0	171,90	222,395	8,08	188,162	1,74
9,5	178,85	219,208	6,95	161,847	1,80
10	186,84	217,551	7,99	186,066	1,86
11,2	201,57	209,555	14,73	142,926	2,00

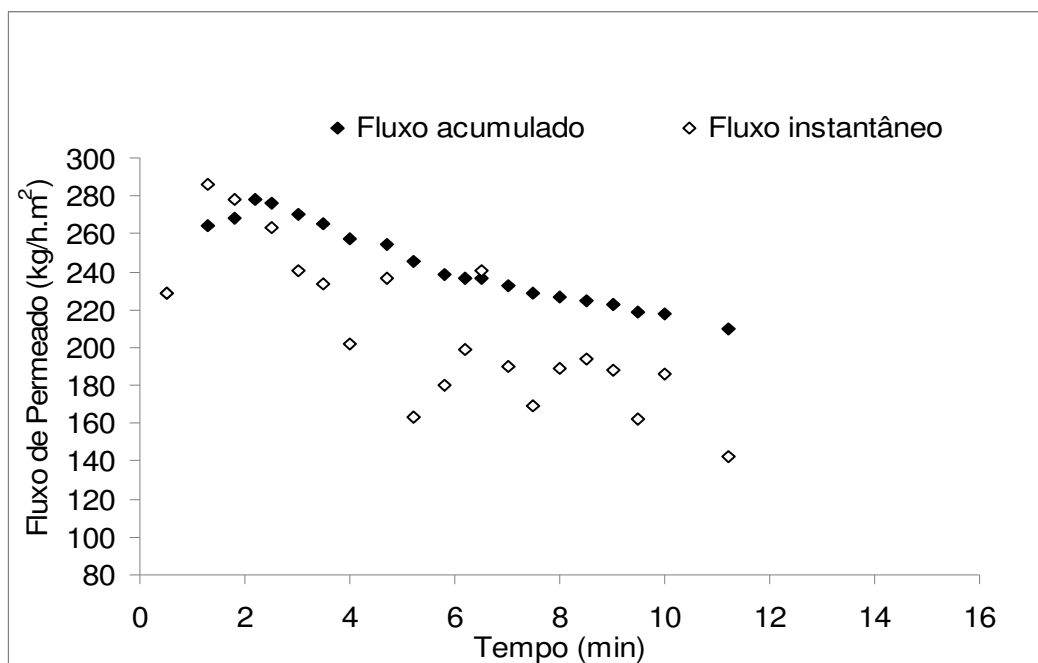


Figura B.12: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES30 a 5 bar.

Tabela B.13: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES50 a 3 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	37,00	861,634	37,00	861,634	1,10
1,0	57,27	666,835	20,27	472,036	1,17
1,5	74,04	574,733	16,77	390,530	1,23
2,0	88,64	516,049	14,60	339,996	1,28
2,5	102,59	477,811	13,95	324,859	1,34
3,0	115,77	449,330	13,18	306,928	1,41
3,5	128,19	426,459	12,42	289,230	1,47
4,0	140,16	407,995	11,97	278,750	1,54
4,5	152,86	395,524	12,70	295,750	1,62
5,0	163,39	380,493	10,53	245,216	1,69
5,5	174,44	369,296	11,05	257,326	1,77
6,0	185,72	360,411	11,28	262,682	1,86
6,5	194,99	349,293	9,27	215,874	1,95
6,8	200,53	343,369	5,54	215,020	2,00

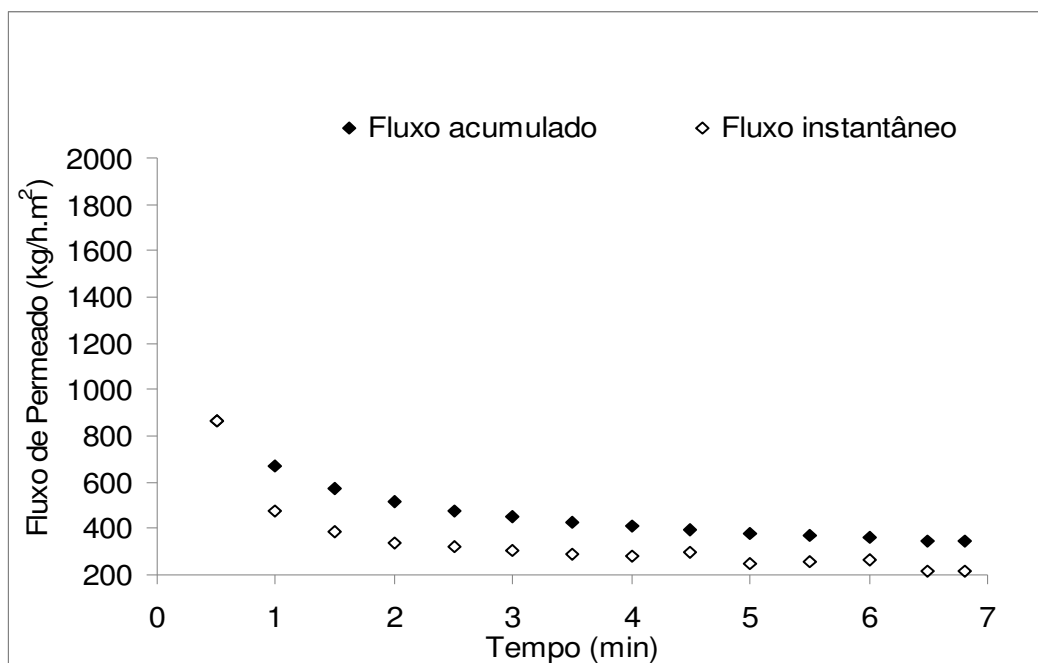


Figura B.13: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES50 a 3 bar.

Tabela B.14: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES50 a 4 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m²)	FC
0,5	35,73	832,059	35,73	832,059	1,10
1,0	58,28	678,595	22,55	525,131	1,17
1,5	78,03	605,705	19,75	459,926	1,24
2,0	96,84	563,788	18,81	438,036	1,32
2,7	117,01	504,604	20,17	335,505	1,41
3,0	127,10	493,305	10,09	391,617	1,46
3,5	142,34	473,533	15,24	354,900	1,55
4,0	157,60	458,762	15,26	355,366	1,65
4,5	172,36	445,980	14,76	343,722	1,75
5,0	186,04	433,239	13,68	318,572	1,87
5,6	200,60	420,852	14,56	308,241	2,00

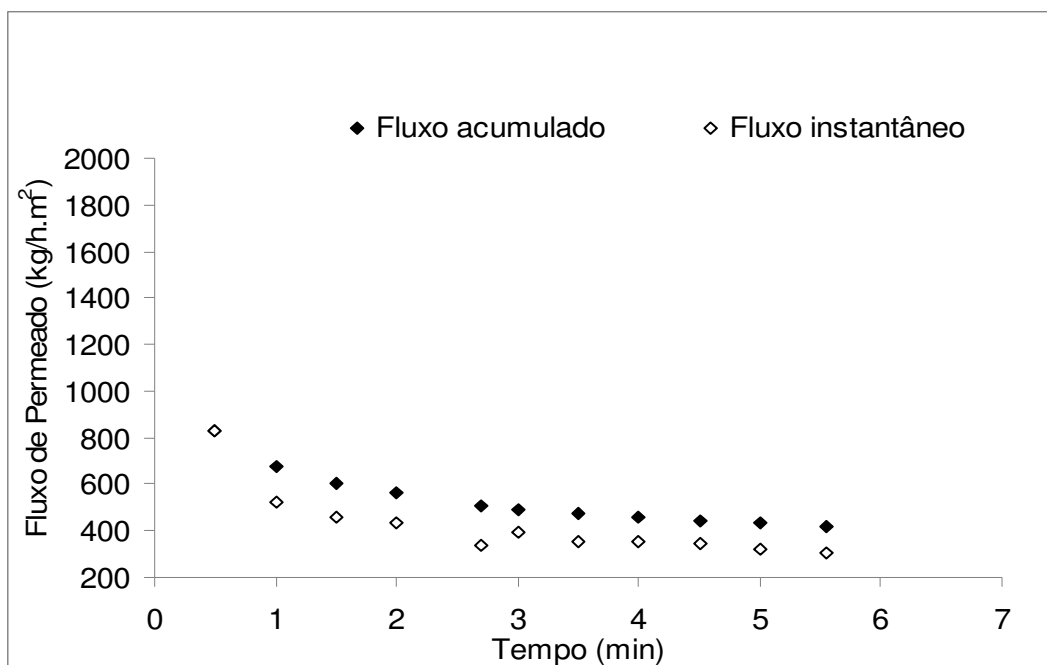


Figura B.14: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES50 a 4 bar.

Tabela B.15: Dados experimentais da UF utilizando a membrana PES50 a 5 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	1802,45	1059,577	77,40	1802,445	1,24
1,0	1335,42	879,682	37,29	868,387	1,40
1,5	1102,27	726,722	27,31	635,979	1,55
2,0	968,93	670,095	24,43	568,911	1,71
2,5	871,55	615,719	20,70	482,049	1,88
2,9	803,25	577,062	12,93	376,383	2,00

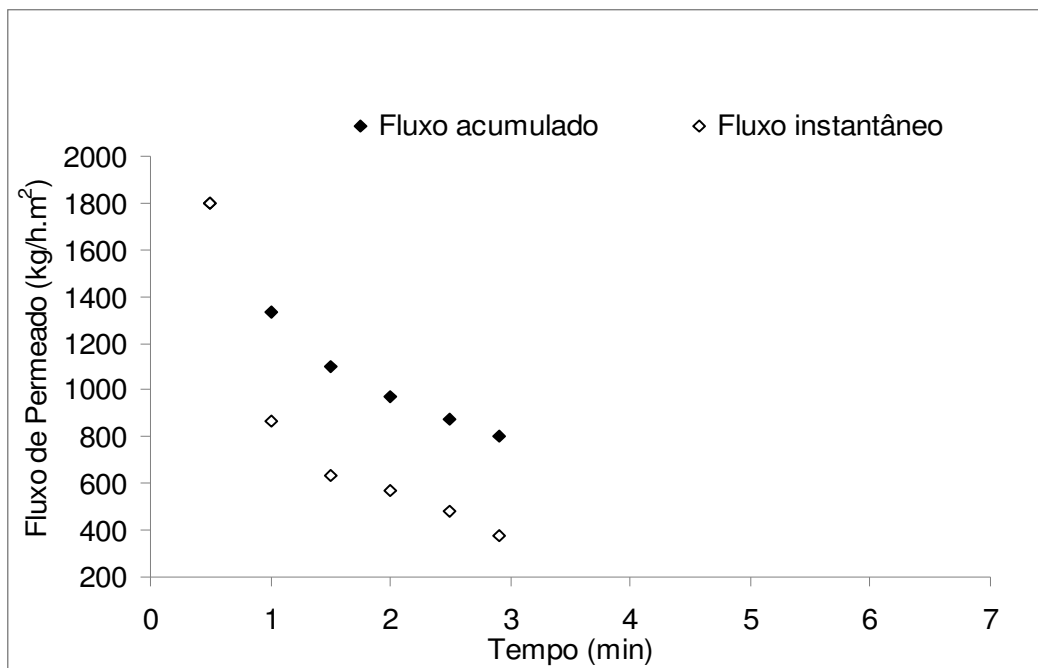


Figura B.15: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES50 a 5 bar.

Apêndice C: Curvas de Fluxos de Permeado da Nanofiltração

Todos os experimentos foram realizados a temperatura 60°C e área de permeação de 0,00515 m². A massa inicial de alimentação foi de 0,8 kg e todas as corridas foram realizadas até fator de concentração igual a 4. As pressões utilizadas foram 15, 25 e 35 bar. Nas tabelas a seguir são apresentados os dados obtidos para fluxo de permeado para cada experimento.

Tabela C.1: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES300 a 15 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	0,79	18,397	0,79	18,397	1,00
1,0	1,16	13,507	0,37	8,616	1,00
1,7	1,92	13,151	0,76	12,642	1,00

2,2	2,92	15,454	1,00	23,287	1,00
2,5	4,03	18,770	1,11	43,082	1,01
3,0	5,12	19,872	1,09	25,383	1,01
3,5	6,11	20,327	0,99	23,055	1,01
4,0	7,77	22,618	1,66	38,657	1,01
4,5	9,34	24,167	1,57	36,561	1,01
5,0	10,41	24,242	1,07	24,918	1,01
5,7	11,73	23,962	1,32	21,957	1,01
6,0	12,82	24,879	1,09	42,305	1,02
6,5	14,39	25,777	1,57	36,561	1,02
7,2	16,06	25,972	1,67	27,779	1,02
7,5	16,64	25,833	0,58	22,511	1,02
8,0	17,90	26,053	1,26	29,342	1,02
8,7	20,32	27,195	2,42	40,254	1,03
9,0	21,10	27,298	0,78	30,274	1,03
9,5	23,43	28,717	2,33	54,260	1,03
10	25,11	29,237	1,68	39,123	1,03
11	27,46	29,067	2,35	27,363	1,04
12,2	29,90	28,537	2,44	23,676	1,04
13	31,55	28,258	1,65	24,015	1,04
14	33,79	28,103	2,24	26,082	1,04
15	35,88	27,852	2,09	24,335	1,05
16	37,46	27,261	1,58	18,397	1,05
17	40,08	27,452	2,62	30,507	1,05
18	42,24	27,324	2,16	25,150	1,06
19	44,25	27,118	2,01	23,404	1,06
20	46,31	26,961	2,06	23,986	1,06
25	56,90	26,501	10,59	24,661	1,08
30	67,41	26,163	10,51	24,475	1,09
35	77,24	25,696	9,83	22,892	1,11
40	87,45	25,456	10,21	23,776	1,12
45,2	97,39	25,088	9,94	22,257	1,14
50,7	107,78	24,753	10,39	21,996	1,16
55	116,06	24,570	8,28	22,421	1,17
60	125,47	24,349	9,41	21,913	1,19
70	144,12	23,973	18,65	21,716	1,22
81	164,52	23,650	20,40	21,594	1,26
94	189,07	23,420	24,55	21,989	1,31

100	199,41	23,219	10,34	20,066	1,33
110	218,07	23,083	18,66	21,727	1,37
121	237,38	22,843	19,31	20,440	1,42
135	263,53	22,729	26,15	21,749	1,49
154	297,60	22,501	34,07	20,879	1,59
166	318,54	22,343	20,94	20,318	1,66
180	342,53	22,157	23,99	19,952	1,75
195	366,19	21,866	23,66	18,366	1,84
212	393,40	21,607	27,21	18,637	1,97
225	412,26	21,334	18,86	16,892	2,06
240	433,30	21,022	21,04	16,332	2,18
255	454,91	20,772	21,61	16,775	2,32
270	474,81	20,476	19,90	15,447	2,46
285	492,90	20,137	18,09	14,042	2,61
300	512,45	19,889	19,55	15,176	2,78
315	531,31	19,639	18,86	14,640	2,98
330	549,68	19,395	18,37	14,260	3,20
345	567,52	19,154	17,84	13,848	3,44
360	586,40	18,966	18,88	14,656	3,75
373	600,19	18,736	13,79	12,351	4,00

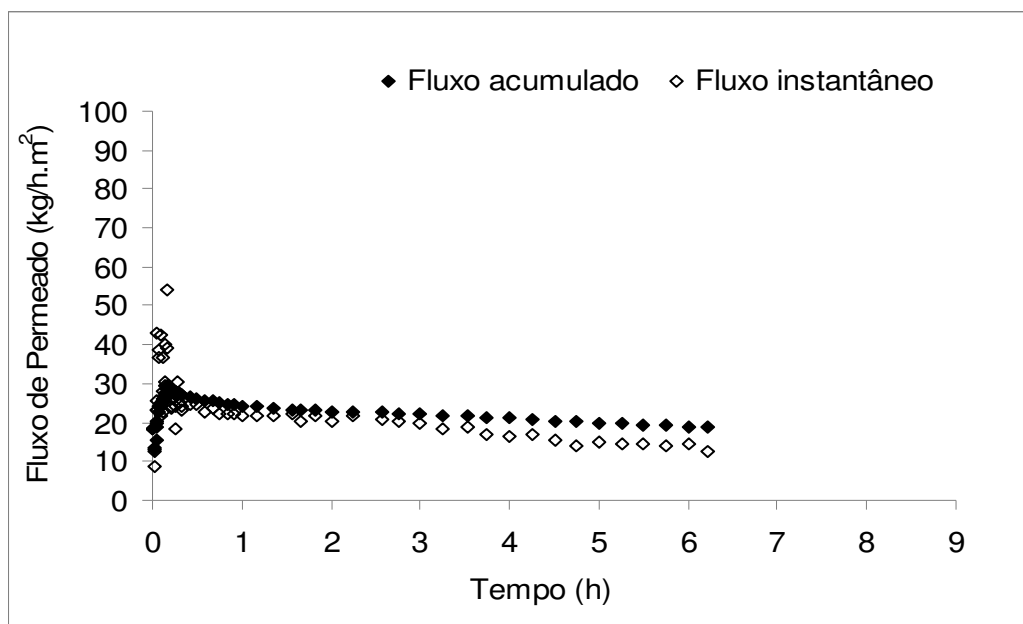


Figura C.1: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES300 a 15 bar.

Tabela C.2: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES300 a 25 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h·m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h·m ²)	FC
0,5	1,37	31,904	1,37	31,904	1,00
1,0	3,07	35,746	1,70	39,589	1,00
1,5	5,34	41,452	2,27	52,862	1,01
2,2	8,30	43,929	2,96	49,236	1,01
2,5	9,71	45,224	1,41	54,725	1,01
3,0	11,85	45,993	2,14	49,835	1,02
3,5	14,02	46,641	2,17	50,534	1,02
4,2	16,85	46,713	2,83	47,074	1,02
4,5	18,24	47,196	1,39	53,949	1,02
5,0	20,40	47,506	2,16	50,301	1,03
5,5	22,32	47,252	1,92	44,712	1,03
6,0	24,11	46,788	1,79	41,684	1,03
6,5	25,84	46,288	1,73	40,287	1,03
7,0	27,66	46,009	1,82	42,383	1,04
7,5	29,58	45,923	1,92	44,712	1,04
8,0	31,18	45,381	1,60	37,260	1,04
8,5	33,00	45,205	1,82	42,383	1,04
9,0	34,63	44,802	1,63	37,958	1,05
9,7	36,88	44,270	2,25	37,426	1,05
10	37,83	44,048	0,95	36,872	1,05
11	41,16	43,569	3,33	38,774	1,05
12	44,66	43,334	3,50	40,753	1,06
13	47,84	42,849	3,18	37,027	1,06
14,5	52,33	42,022	4,49	34,853	1,07
15	54,11	42,003	1,78	41,452	1,07
16	57,11	41,561	3,00	34,931	1,08
17	59,91	41,034	2,80	32,602	1,08
18	63,23	40,902	3,32	38,657	1,09
19,2	66,80	40,510	3,57	34,640	1,09
20	69,62	40,532	2,82	41,044	1,10
25	84,25	39,239	14,63	34,069	1,12
30	98,52	38,238	14,27	33,231	1,14
35	112,79	37,523	14,27	33,231	1,16
40	126,41	36,797	13,62	31,717	1,19
45	140,40	36,328	13,99	32,579	1,21

50	153,27	35,693	12,87	29,971	1,24
55	166,13	35,170	12,86	29,948	1,26
60	178,77	34,692	12,64	29,435	1,29
71	205,98	33,780	27,21	28,802	1,35
80	227,59	33,125	21,61	27,958	1,40
90	250,69	32,433	23,10	26,897	1,46
100	273,59	31,856	22,90	26,664	1,52
110	297,93	31,536	24,34	28,341	1,59
120	317,14	30,772	19,21	22,368	1,66
136	350,95	30,047	33,81	24,605	1,78
150	379,33	29,445	28,38	23,603	1,90
165	408,85	28,852	29,52	22,915	2,05
180	439,55	28,433	30,70	23,831	2,22
195	465,22	27,779	25,67	19,926	2,39
211	492,16	27,159	26,94	19,605	2,60
225	517,60	26,786	25,44	21,158	2,83
240	542,78	26,333	25,18	19,546	3,11
255	566,02	25,845	23,24	18,040	3,42
270	588,31	25,371	22,29	17,303	3,78
277	600,01	25,221	11,70	19,462	4,00

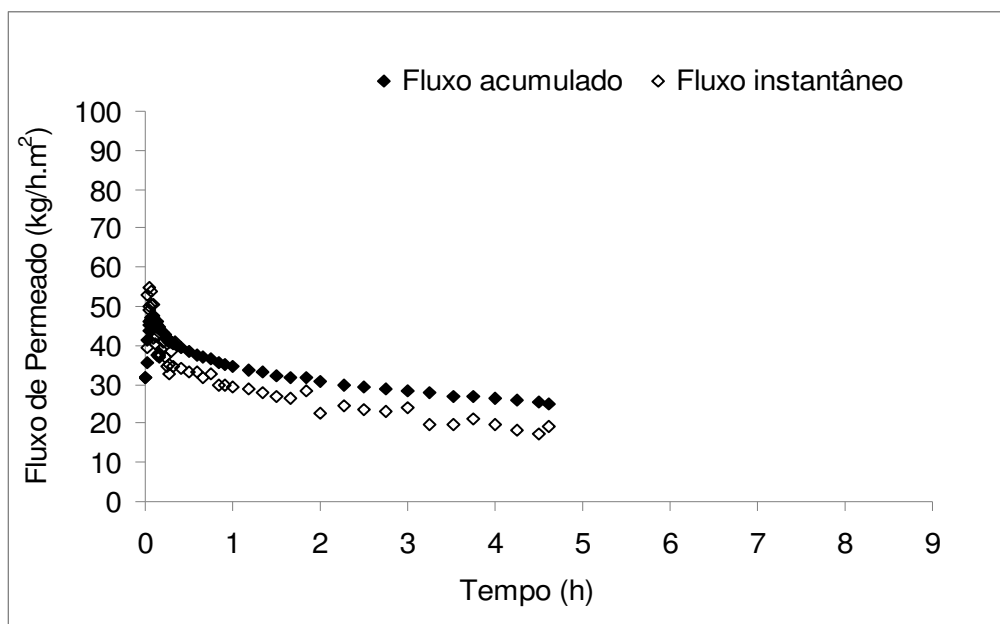


Figura C.2: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES300 a 25 bar.

Tabela C.3: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES300 a 35 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h·m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h·m ²)	FC
0,8	1,67	24,306	1,67	24,306	1,00
1,0	2,42	28,178	0,75	43,664	1,00
1,5	5,10	39,589	2,68	62,410	1,01
2,0	7,76	45,178	2,66	61,944	1,01
2,5	10,45	48,671	2,69	62,643	1,01
3,2	13,86	50,432	3,41	56,721	1,02
3,5	15,54	51,698	1,68	65,205	1,02
4,0	18,06	52,571	2,52	58,684	1,02
4,5	20,68	53,509	2,62	61,013	1,03
5,0	22,86	53,235	2,18	50,767	1,03
5,5	25,30	53,561	2,44	56,821	1,03
6,0	27,52	53,406	2,22	51,698	1,04
6,5	29,97	53,686	2,45	57,054	1,04
7,0	32,33	53,777	2,36	54,958	1,04
7,5	34,30	53,251	1,97	45,876	1,04
8,0	36,95	53,779	2,65	61,712	1,05
8,5	39,09	53,547	2,14	49,835	1,05
9,0	41,20	53,302	2,11	49,136	1,05
9,5	43,37	53,157	2,17	50,534	1,06
10	45,58	53,072	2,21	51,465	1,06
11	49,97	52,894	4,39	51,116	1,07
12,7	57,24	52,479	7,27	49,794	1,08
13	58,90	52,755	1,66	64,428	1,08
14	62,91	52,322	4,01	46,691	1,09
15	67,19	52,156	4,28	49,835	1,09
16,3	72,75	51,968	5,56	49,799	1,10
17,7	78,30	51,509	5,55	46,159	1,11
18	79,56	51,465	1,26	48,904	1,11
19	83,77	51,336	4,21	49,020	1,12
20	87,88	51,162	4,11	47,856	1,12
25	107,95	50,278	20,07	46,738	1,16
30	128,07	49,707	20,12	46,854	1,19
36	151,11	48,874	23,04	44,712	1,23
40	166,23	48,388	15,12	44,013	1,26

45	185,90	48,101	19,67	45,806	1,30
50	204,53	47,630	18,63	43,384	1,34
55	222,61	47,127	18,08	42,104	1,38
61	244,45	46,661	21,84	42,383	1,44
70	275,70	45,860	31,25	40,430	1,52
80	310,03	45,124	34,33	39,973	1,63
90	343,35	44,421	33,32	38,797	1,75
100	375,69	43,744	32,34	37,656	1,88
110	406,35	43,013	30,66	35,700	2,02
121	439,52	42,295	33,17	35,111	2,21
138	489,79	41,326	50,27	34,431	2,56
150	524,00	40,675	34,21	33,194	2,88
167	570,00	39,742	46,00	31,506	3,45
178	602,04	39,382	32,04	33,915	4,00

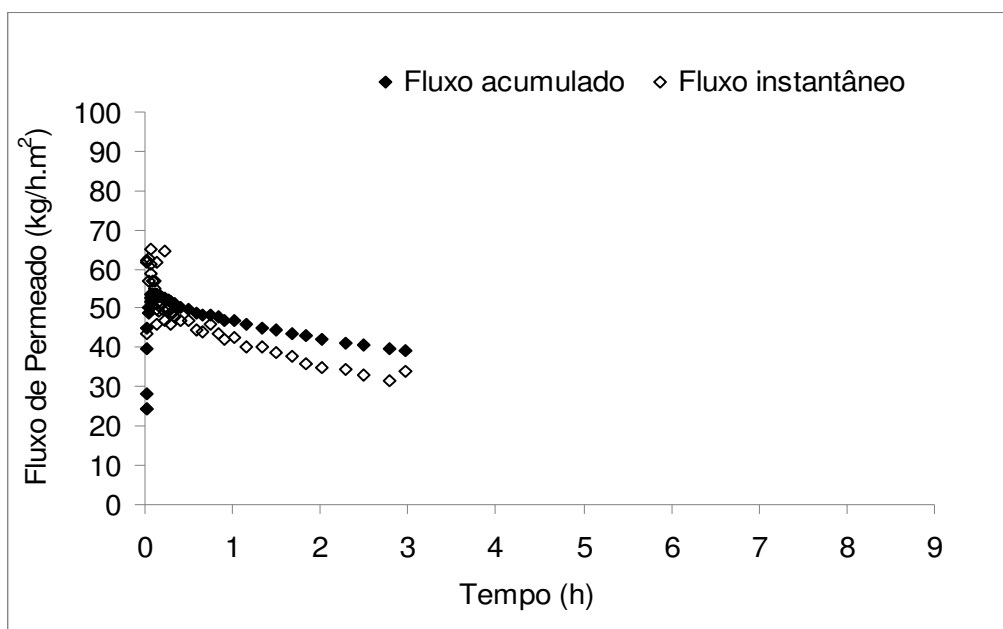


Figura C.3: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES300 a 35 bar.

Tabela C.4: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES500 a 15 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,7	0,31	10,945	0,47	10,945	1,00
1,0	1,06	13,390	0,68	15,835	1,00
1,5	1,58	22,188	2,28	33,185	1,00
2,0	2,74	23,346	0,58	33,767	1,01
2,7	4,50	28,085	2,02	47,041	1,01
3,2	5,77	31,089	1,98	46,109	1,01
3,5	6,58	33,201	1,97	45,876	1,01
4,0	7,77	34,465	1,86	43,315	1,01
4,5	8,98	35,604	1,92	44,712	1,02
5,0	10,26	36,468	1,90	44,246	1,02
5,5	11,09	37,175	1,90	44,246	1,02
6,0	12,30	37,706	1,87	43,547	1,02
6,5	13,46	38,156	1,87	43,547	1,03
7,0	14,70	38,640	1,93	44,945	1,03
7,5	15,97	38,874	1,81	42,150	1,03
8,0	17,00	38,643	1,51	35,164	1,03
8,5	17,82	39,000	1,92	44,712	1,04
9,0	18,99	38,838	1,55	36,095	1,04
9,5	20,08	38,853	1,68	39,123	1,04
10	20,90	38,948	1,75	40,753	1,04
11	23,27	38,785	4,19	37,529	1,05
12	25,24	38,153	1,68	27,945	1,05
13	27,06	37,657	3,37	32,699	1,06
14	29,37	37,884	2,86	41,626	1,06
15	31,24	37,656	2,96	34,465	1,06
16	33,01	37,333	2,79	32,486	1,07
17	34,77	37,191	3,00	34,931	1,07
18	36,74	36,872	2,70	31,438	1,08
19	38,84	36,690	3,50	33,961	1,08
20	40,41	36,858	2,81	40,899	1,09
25	49,42	35,809	16,65	32,311	1,11
31	60,04	35,168	10,65	31,001	1,13
36	68,29	34,638	13,51	31,461	1,15
40	74,49	33,750	20,52	29,866	1,18

45	82,26	33,438	7,46	28,954	1,20
51	91,66	32,988	12,39	28,853	1,22
55	97,68	32,643	9,70	28,236	1,24
60	104,54	32,016	19,04	27,712	1,28
71	121,21	31,516	16,24	27,013	1,31
80	134,11	30,681	31,87	26,506	1,38
90	148,14	30,345	13,21	25,636	1,41
100	162,16	29,605	29,88	24,851	1,49
110	175,32	29,639	15,57	30,215	1,54
120	189,02	29,229	21,23	24,720	1,60
138	212,37	28,251	26,32	20,431	1,69
150	227,40	27,712	29,45	22,860	1,80
165	247,91	27,142	27,62	21,440	1,92
180	264,42	26,620	26,90	20,881	2,05
196	284,00	26,136	26,19	20,330	2,20
210	300,16	25,592	30,45	19,697	2,40
227	320,09	25,235	19,48	18,902	2,55
240	334,41	24,726	28,39	18,365	2,80
255	352,84	24,369	19,76	17,698	3,01
270	368,38	23,994	20,59	17,125	3,27
285	384,70	23,585	20,90	16,224	3,57
300	401,30	23,206	20,61	15,998	3,93
315	416,49	23,114	3,61	14,011	4,00

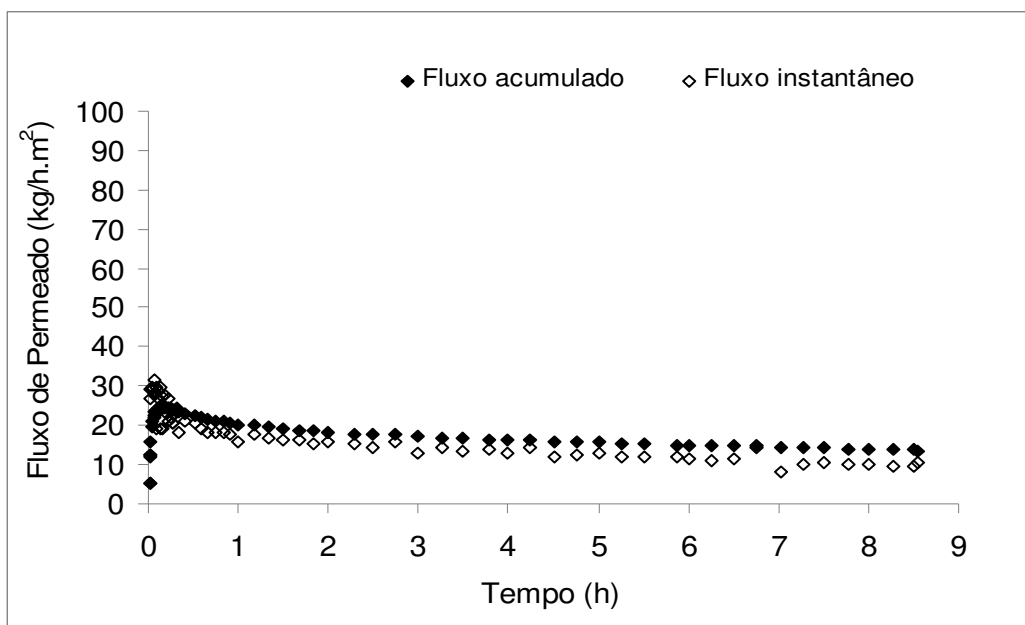


Figura C.4: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES500 a 15 bar.

Tabela C.5: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES500 a 25 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	0,31	10,945	0,47	10,945	1,00
1,0	1,06	13,390	0,68	15,835	1,00
1,8	1,58	22,188	2,28	33,185	1,00
2,0	2,74	23,346	0,58	33,767	1,01
2,5	4,50	28,085	2,02	47,041	1,01
3,0	5,77	31,089	1,98	46,109	1,01
3,5	6,58	33,201	1,97	45,876	1,01
4,0	7,77	34,465	1,86	43,315	1,01
4,5	8,98	35,604	1,92	44,712	1,02
5,0	10,26	36,468	1,90	44,246	1,02
5,5	11,09	37,175	1,90	44,246	1,02
6,0	12,30	37,706	1,87	43,547	1,02
6,5	13,46	38,156	1,87	43,547	1,03
7,0	14,70	38,640	1,93	44,945	1,03
7,5	15,97	38,874	1,81	42,150	1,03

8,0	17,00	38,643	1,51	35,164	1,03
8,5	17,82	39,000	1,92	44,712	1,04
9,0	18,99	38,838	1,55	36,095	1,04
9,5	20,08	38,853	1,68	39,123	1,04
10	20,90	38,948	1,75	40,753	1,04
11,3	23,27	38,785	4,19	37,529	1,05
12	25,24	38,153	1,68	27,945	1,05
13,2	27,06	37,657	3,37	32,699	1,06
14	29,37	37,884	2,86	41,626	1,06
15	31,24	37,656	2,96	34,465	1,06
16	33,01	37,333	2,79	32,486	1,07
17	34,77	37,191	3,00	34,931	1,07
18	36,74	36,872	2,70	31,438	1,08
19,2	38,84	36,690	3,50	33,961	1,08
20	40,41	36,858	2,81	40,899	1,09
26	49,42	35,809	16,65	32,311	1,11
30	60,04	35,168	10,65	31,001	1,13
35	68,29	34,638	13,51	31,461	1,15
43	74,49	33,750	20,52	29,866	1,18
46	82,26	33,438	7,46	28,954	1,20
51	91,66	32,988	12,39	28,853	1,22
55	97,68	32,643	9,70	28,236	1,24
63	104,54	32,016	19,04	27,712	1,28
70	121,21	31,516	16,24	27,013	1,31
84	134,11	30,681	31,87	26,506	1,38
90	148,14	30,345	13,21	25,636	1,41
104	162,16	29,605	29,88	24,851	1,49
110	175,32	29,639	15,57	30,215	1,54
120	189,02	29,229	21,23	24,720	1,60
135	212,37	28,251	26,32	20,431	1,69
150	227,40	27,712	29,45	22,860	1,80
165	247,91	27,142	27,62	21,440	1,92
180	264,42	26,620	26,90	20,881	2,05
195	284,00	26,136	26,19	20,330	2,20
213	300,16	25,592	30,45	19,697	2,40
225	320,09	25,235	19,48	18,902	2,55
243	334,41	24,726	28,39	18,365	2,80
256	352,84	24,369	19,76	17,698	3,01

270	368,38	23,994	20,59	17,125	3,27
285	384,70	23,585	20,90	16,224	3,57
300	401,30	23,206	20,61	15,998	3,93
303	416,49	23,114	3,61	14,011	4,00

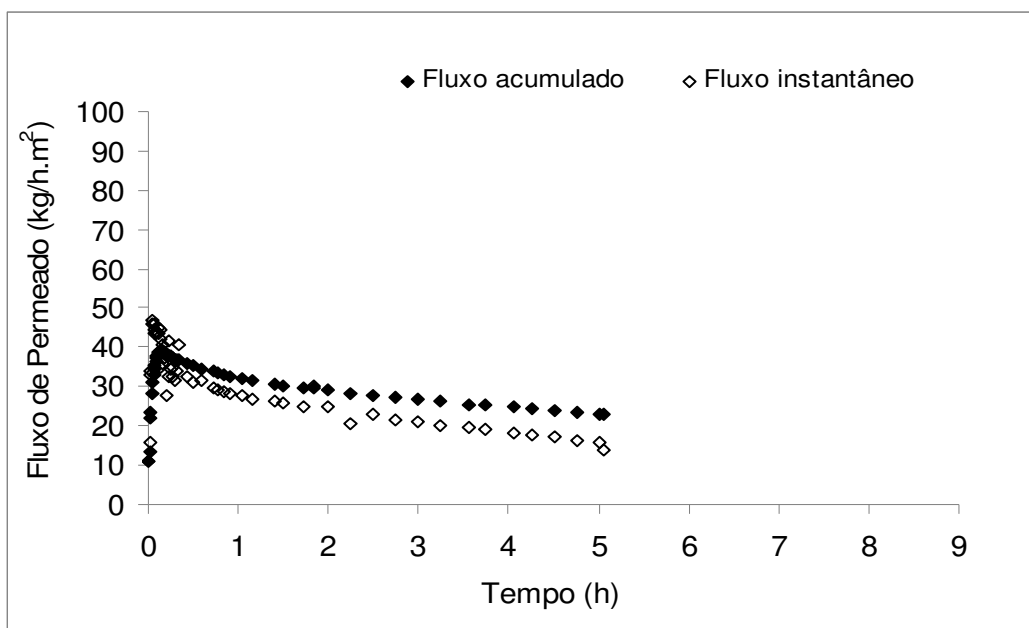


Figura C.5: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES500 a 25 bar.

Tabela C.6: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES500 a 35 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	0,86	20,027	0,86	20,027	1,00
1,0	3,01	35,048	2,15	50,068	1,00
1,7	6,89	47,191	3,88	64,539	1,01
2,0	8,69	50,592	1,80	69,862	1,01
2,5	11,08	51,605	2,39	55,657	1,01
3,0	13,00	50,456	1,92	44,712	1,02
3,7	16,37	51,516	3,37	56,056	1,02
4,0	18,10	52,688	1,73	67,145	1,02

4,5	20,56	53,199	2,46	57,287	1,03
5,0	22,74	52,956	2,18	50,767	1,03
5,5	25,21	53,370	2,47	57,520	1,03
6,0	27,06	52,513	1,85	43,082	1,03
6,5	29,57	52,970	2,51	58,451	1,04
7,0	31,99	53,212	2,42	56,356	1,04
7,5	33,68	52,288	1,69	39,356	1,04
8,0	36,11	52,557	2,43	56,588	1,05
8,7	38,69	51,781	2,58	42,915	1,05
9,2	40,49	51,245	1,80	41,917	1,05
9,5	42,03	51,514	1,54	59,771	1,06
10	44,01	51,244	1,98	46,109	1,06
11	47,69	50,481	3,68	42,849	1,06
12,5	53,63	49,956	5,94	46,109	1,07
13,2	56,56	49,892	2,93	48,737	1,08
14	60,09	49,976	3,53	51,378	1,08
15	63,73	49,470	3,64	42,383	1,09
16	67,51	49,129	3,78	44,013	1,09
17,2	71,87	48,653	4,36	42,305	1,10
18	75,10	48,580	3,23	47,011	1,10
19	78,55	48,138	3,45	40,171	1,11
20	82,40	47,972	3,85	44,828	1,11
25	100,36	46,742	17,96	41,824	1,14
31	121,00	45,448	20,64	40,054	1,18
36	138,00	44,634	17,00	39,589	1,21
41	154,64	43,917	16,64	38,750	1,24
46	171,12	43,315	16,48	38,378	1,27
50	184,44	42,951	13,32	38,774	1,30
55	201,32	42,620	16,88	39,309	1,34
60	217,00	42,111	15,68	36,515	1,37
71	251,72	41,281	34,72	36,752	1,46
80	279,95	40,746	28,23	36,522	1,54
90	312,00	40,365	32,05	37,318	1,64
105	351,38	38,965	39,38	30,569	1,78
118	387,07	38,194	35,69	31,966	1,94
120	392,11	38,047	5,04	29,342	1,96
135	431,11	37,183	39,00	30,274	2,17
152	473,36	36,261	42,25	28,938	2,44

165	504,54	35,604	31,18	27,927	2,70
186	551,07	34,497	46,53	25,799	3,20
199	578,78	33,865	27,71	24,819	3,60
210	600,72	33,308	21,94	23,224	4,00

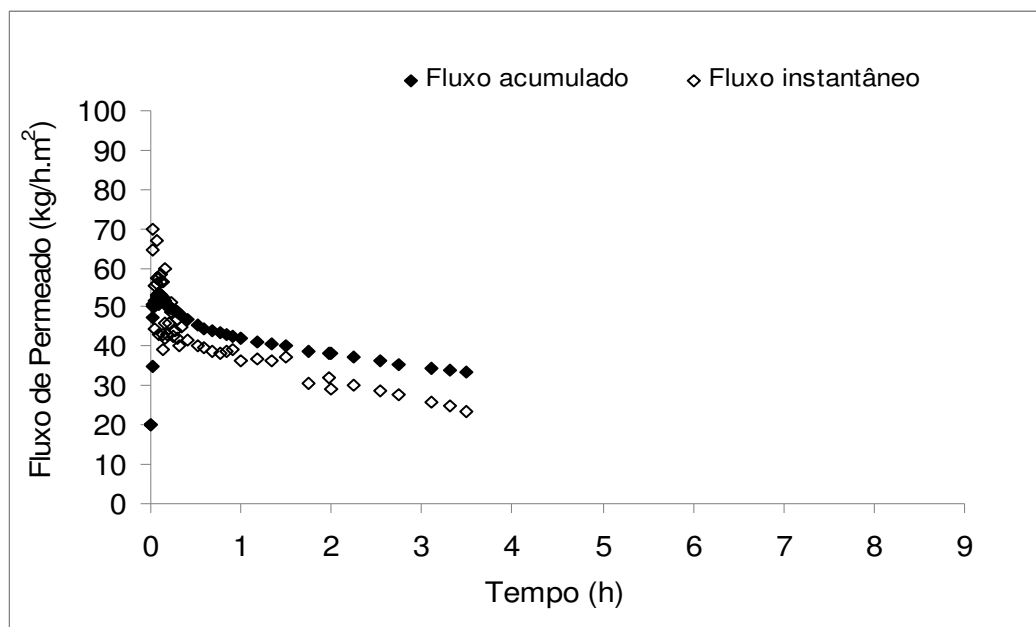


Figura C.6: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES500 a 35 bar.

Tabela C.7: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES1000 a 15 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	1,01	23,520	1,01	23,520	1,00
1,0	2,97	34,582	1,96	45,643	1,00
1,5	5,33	41,374	2,36	54,958	1,01
2,0	7,77	45,236	2,44	56,821	1,01
2,7	10,81	46,618	3,04	50,567	1,01
3,0	12,39	48,088	1,58	61,324	1,02
3,5	14,68	48,837	2,29	53,328	1,02
4,2	17,68	49,014	3,00	49,902	1,02
4,5	19,12	49,473	1,44	55,890	1,02

5,0	20,77	48,368	1,65	38,424	1,03
5,5	22,51	47,654	1,74	40,520	1,03
6,0	24,66	47,856	2,15	50,068	1,03
6,5	26,88	48,151	2,22	51,698	1,03
7,0	29,01	48,255	2,13	49,602	1,04
7,5	31,17	48,391	2,16	50,301	1,04
8,0	33,25	48,394	2,08	48,438	1,04
8,5	35,01	47,958	1,76	40,986	1,05
9,0	37,03	47,907	2,02	47,041	1,05
9,5	38,71	47,445	1,68	39,123	1,05
10	40,35	46,982	1,64	38,191	1,05
11	44,41	47,009	4,06	47,273	1,06
12,7	50,16	45,988	5,75	39,383	1,07
13	51,10	45,769	0,94	36,484	1,07
14	55,04	45,776	3,94	45,876	1,07
15,3	59,88	45,570	4,84	43,350	1,08
16	61,88	45,032	2,00	33,268	1,08
17	65,44	44,821	3,56	41,452	1,09
18,2	69,37	44,380	3,93	38,133	1,09
19	71,80	44,001	2,43	35,368	1,10
20,4	75,99	43,373	4,19	34,848	1,10
26,7	96,50	42,083	20,51	37,907	1,14
30	106,58	41,366	10,08	35,566	1,15
35	121,49	40,417	14,91	34,722	1,18
40	135,71	39,504	14,22	33,115	1,20
45	150,08	38,833	14,37	33,464	1,23
50	163,76	38,135	13,68	31,857	1,26
55,5	178,83	37,518	15,07	31,904	1,29
60	190,91	37,048	12,08	31,257	1,31
70	217,60	36,195	26,69	31,077	1,37
80	243,59	35,454	25,99	30,262	1,44
90	268,42	34,727	24,83	28,911	1,50
103	299,28	33,832	30,86	27,640	1,60
110	315,69	33,416	16,41	27,296	1,65
124	346,24	32,512	30,55	25,408	1,76
136	372,72	31,911	26,48	25,694	1,87
150	405,01	31,439	32,29	26,855	2,03
166	437,70	30,701	32,69	23,790	2,21

183	463,80	29,510	26,10	17,877	2,38
195	492,45	29,405	28,65	27,799	2,60
210	521,10	28,893	28,65	22,239	2,87
225	550,45	28,486	29,35	22,783	3,21
240	574,92	27,892	24,47	18,995	3,55
255	600,18	27,405	25,26	19,608	4,00

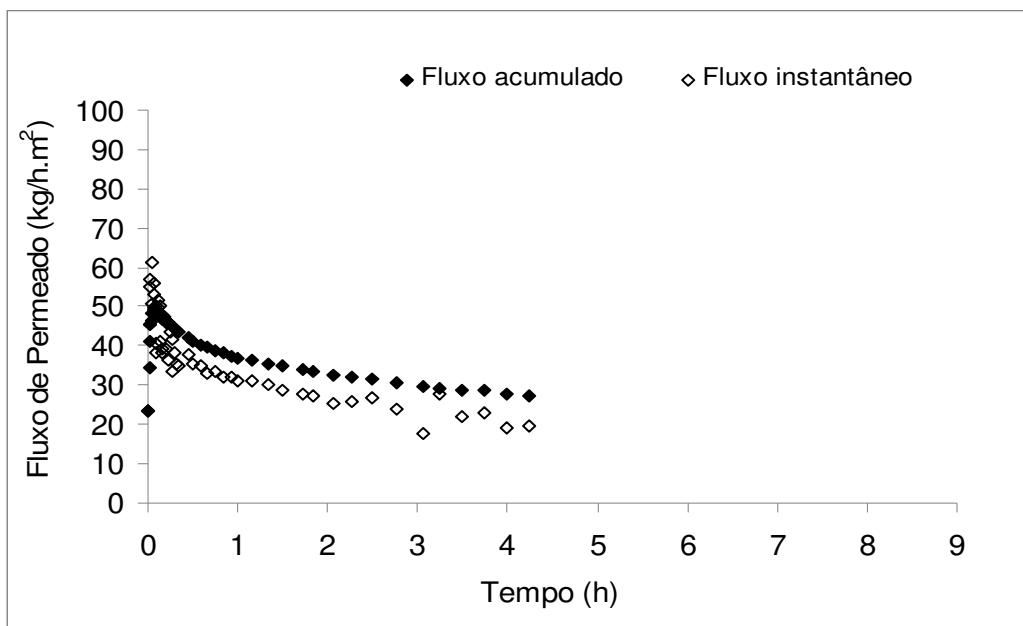


Figura C.7: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES1000 a 15 bar.

Tabela C.8: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES1000 a 25 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	2,74	63,807	2,74	63,807	1,00
1,0	6,00	69,862	3,26	75,917	1,01
1,7	10,54	72,191	4,54	75,518	1,01
2,0	12,77	74,345	2,23	86,552	1,02
2,5	15,96	74,333	3,19	74,287	1,02
3,0	19,04	73,899	3,08	71,725	1,02
3,5	22,00	73,189	2,96	68,931	1,03

4,2	25,93	71,886	3,93	65,371	1,03
4,7	28,88	71,547	2,95	68,698	1,04
5,0	30,70	71,492	1,82	70,638	1,04
5,7	34,01	69,474	3,31	55,058	1,04
6,0	35,68	69,241	1,67	64,817	1,05
6,5	38,05	68,160	2,37	55,191	1,05
7,0	40,53	67,417	2,48	57,753	1,05
7,5	42,90	66,602	2,37	55,191	1,06
8,0	44,59	64,899	1,69	39,356	1,06
8,5	46,80	64,109	2,21	51,465	1,06
9,0	49,47	64,002	2,67	62,177	1,07
9,5	51,58	63,219	2,11	49,136	1,07
10	54,14	63,039	2,56	59,616	1,07
11	59,66	63,151	5,52	64,273	1,08
12	64,08	62,177	4,42	51,465	1,09
13	69,30	62,070	5,22	60,780	1,09
14	74,62	62,061	5,32	61,944	1,10
15	78,69	61,083	4,07	47,390	1,11
16	83,66	60,882	4,97	57,869	1,12
17,2	88,88	60,168	5,22	50,650	1,12
18	92,77	60,010	3,89	56,618	1,13
19	97,09	59,499	4,32	50,301	1,14
20	101,77	59,249	4,68	54,493	1,15
25	123,92	57,716	22,15	51,582	1,18
30	143,77	55,801	19,85	46,225	1,22
35	164,39	54,689	20,62	48,019	1,26
41	187,61	53,280	23,22	45,061	1,31
46	207,97	52,642	20,36	47,413	1,35
50	224,18	52,206	16,21	47,195	1,39
55	241,65	51,158	17,47	40,676	1,43
60	259,66	50,390	18,01	41,941	1,48
70	295,01	49,072	35,35	41,160	1,58
82	335,59	47,653	40,58	39,375	1,72
90	362,00	46,834	26,41	38,439	1,82
100	393,70	45,841	31,70	36,911	1,97
110	424,41	44,925	30,71	35,758	2,13
120	454,22	44,073	29,81	34,710	2,31
136	499,68	42,780	45,46	33,083	2,66

150	537,21	41,701	37,53	31,213	3,03
165	575,04	40,579	37,83	29,365	3,54
176	601,24	39,776	26,20	27,733	4,00

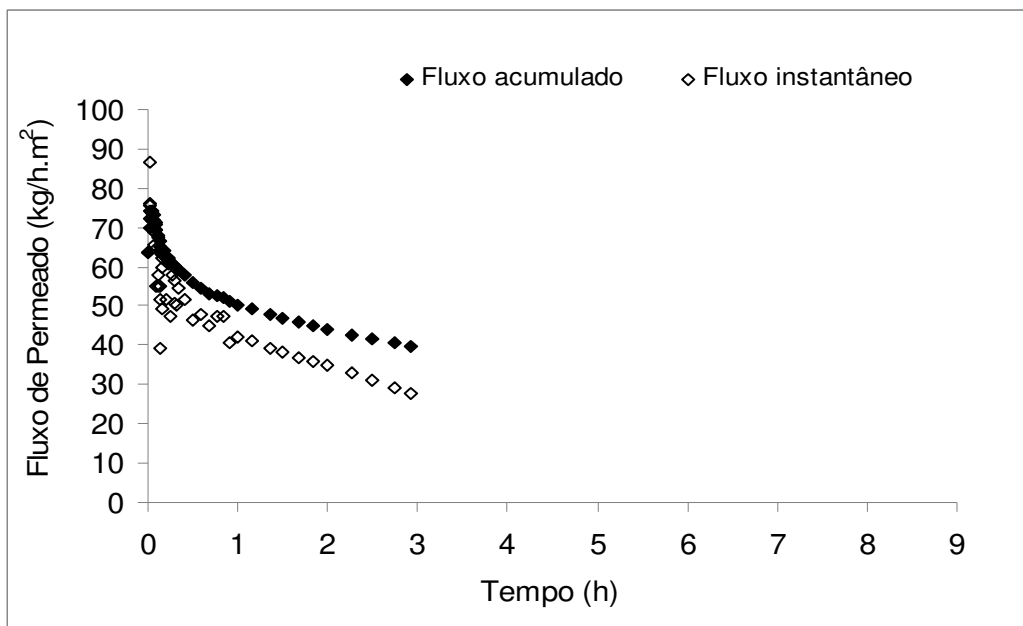


Figura C.8: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES1000 a 25 bar.

Tabela C.9: Dados experimentais da NF utilizando a membrana PES1000 a 35 bar.

t (min)	Massa perm. (g)	Fluxo ac. (kg/h*m ²)	Massa isnt. (g)	Fluxo inst. (kg/h*m ²)	FC
0,5	4,08	95,013	4,08	95,013	1,01
1,0	7,85	91,403	3,77	87,794	1,01
1,5	11,61	90,122	3,76	87,561	1,01
2,0	15,31	89,133	3,70	86,163	1,02
2,7	20,22	87,198	4,91	81,672	1,03
3,2	23,80	86,600	3,58	83,369	1,03
3,5	26,17	87,062	2,37	91,985	1,03
4,0	28,89	84,097	2,72	63,342	1,04
4,5	32,39	83,809	3,50	81,506	1,04
5,0	35,78	83,322	3,39	78,944	1,05

5,5	38,74	82,014	2,96	68,931	1,05
6,0	41,71	80,943	2,97	69,164	1,06
6,5	44,91	80,449	3,20	74,520	1,06
7,0	47,35	78,761	2,44	56,821	1,06
7,5	50,62	78,587	3,27	76,150	1,07
8,0	53,17	77,387	2,55	59,383	1,07
8,5	55,94	76,629	2,77	64,506	1,08
9,0	58,72	75,969	2,78	64,739	1,08
9,5	61,30	75,133	2,58	60,082	1,08
10	64,06	74,590	2,76	64,273	1,09
11	69,33	73,387	5,27	61,362	1,09
12	74,47	72,259	5,14	59,849	1,10
13	79,59	71,286	5,12	59,616	1,11
14	84,88	70,594	5,29	61,595	1,12
15	89,80	69,707	4,92	57,287	1,13
16	94,69	68,909	4,89	56,938	1,13
17	99,59	68,212	4,90	57,054	1,14
18	104,57	67,643	4,98	57,986	1,15
19	109,27	66,964	4,70	54,725	1,16
20	114,18	66,474	4,91	57,171	1,17
25	137,29	63,943	23,11	53,817	1,21
30	160,06	62,123	22,77	53,025	1,25
35	181,70	60,447	21,64	50,394	1,29
40	202,63	58,984	20,93	48,741	1,34
45	223,42	57,810	20,79	48,415	1,39
51	247,66	56,543	24,24	47,041	1,45
56	267,34	55,586	19,68	45,830	1,50
60	282,99	54,918	15,65	45,556	1,55
70	320,79	53,360	37,80	44,013	1,67
81	360,40	51,807	39,61	41,928	1,82
91	394,46	50,472	34,06	39,658	1,97
100	424,00	49,369	29,54	38,217	2,13
110	455,99	48,267	31,99	37,248	2,33
120	486,15	47,172	30,16	35,117	2,55
135	533,12	45,981	46,97	36,460	3,00
161	600,14	43,403	67,02	30,014	4,00

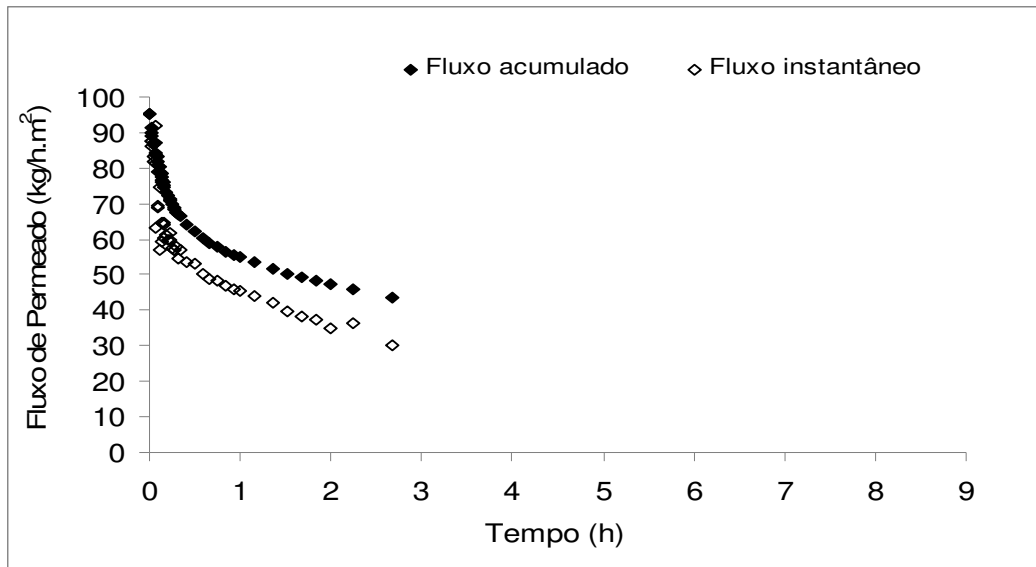
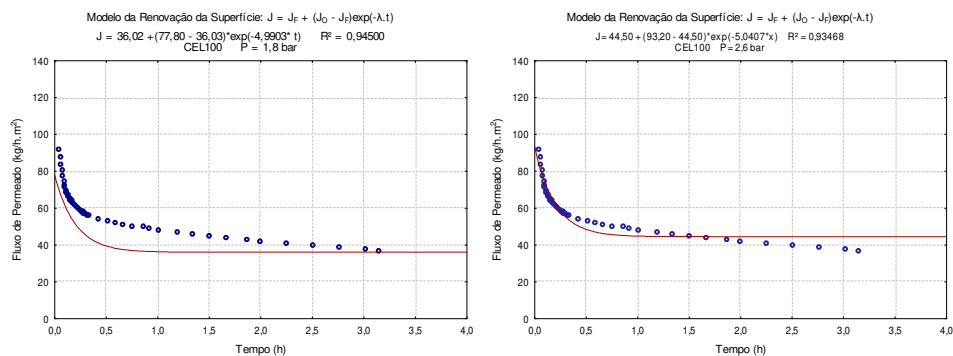
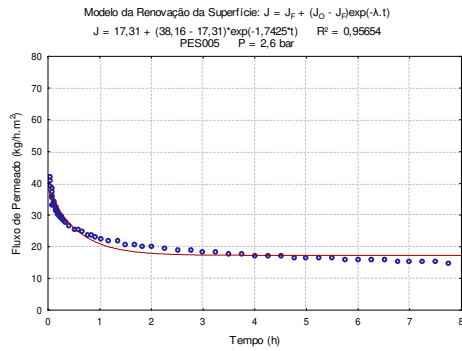
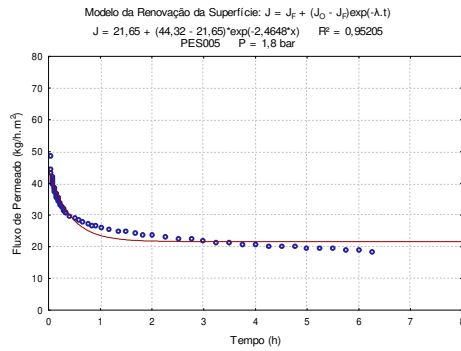


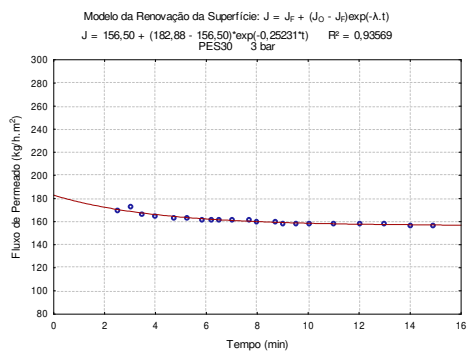
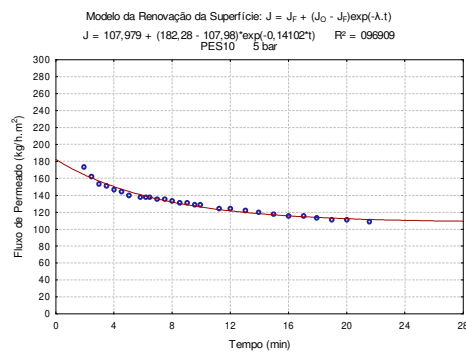
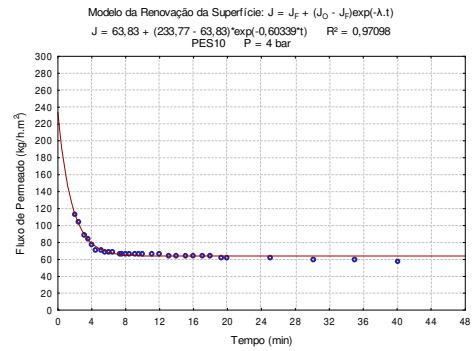
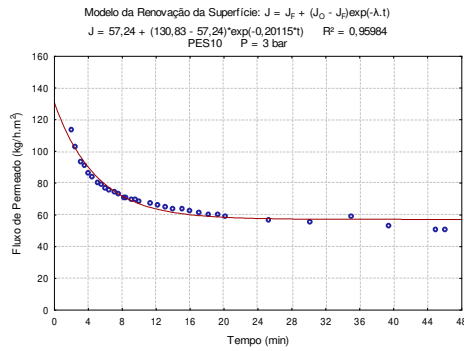
Figura C.9: Curvas de fluxo acumulado e instantâneo utilizando a membrana PES1000 a 35 bar.

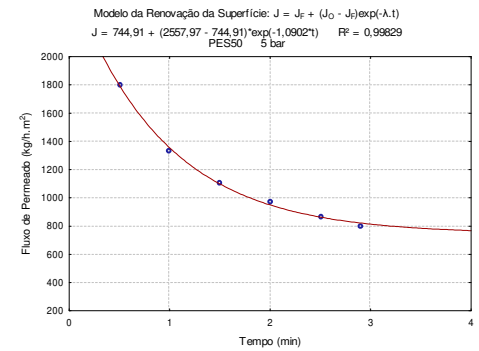
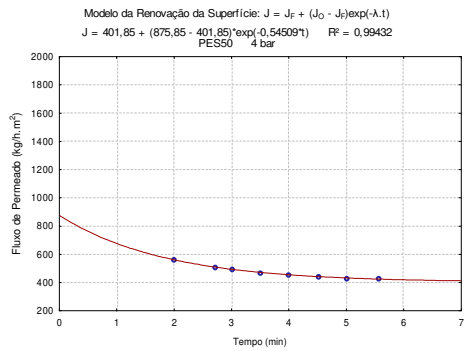
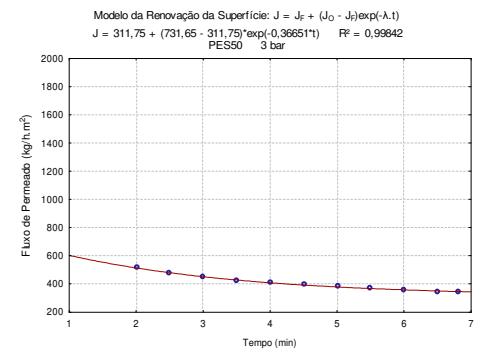
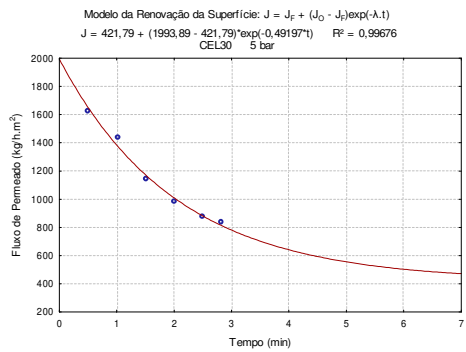
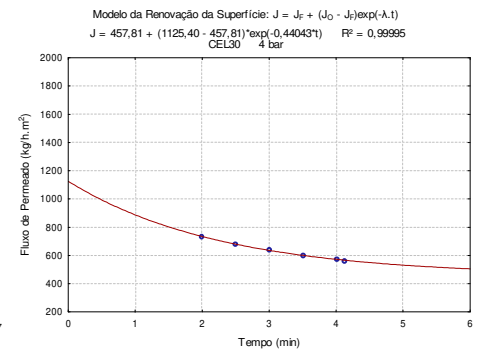
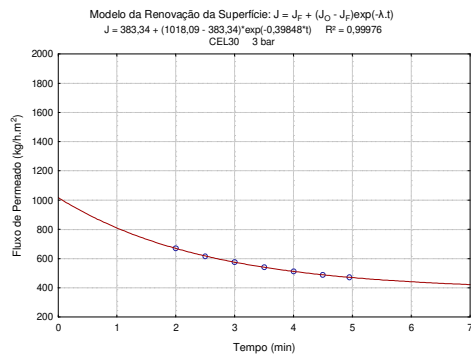
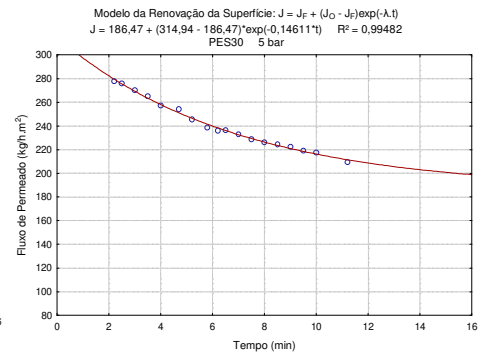
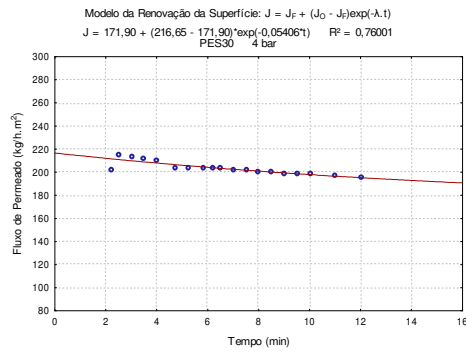
Apêndice D: Ajuste ao Modelo Matemático Baseado na Teoria da Renovação da Superfície, onde o Fluxo é Variável com o Tempo (Microfiltração).



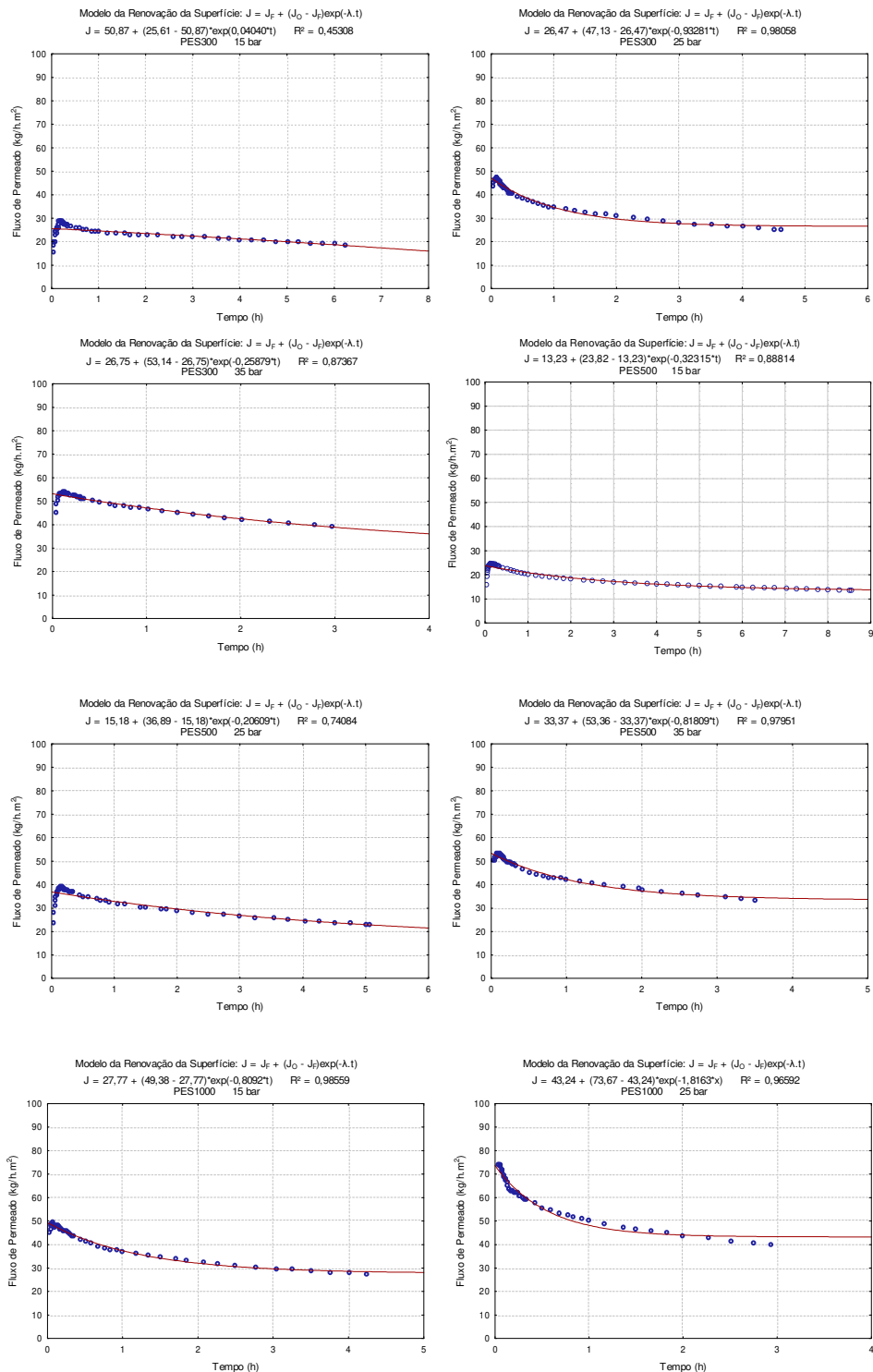


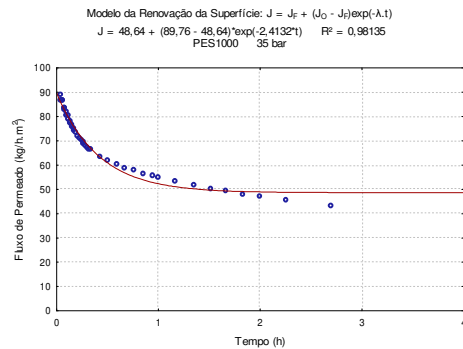
Apêndice E: Ajuste ao Modelo Matemático Baseado na Teoria da Renovação da Superfície, onde o Fluxo é Variável com o Tempo (Ultrafiltração).





Apêndice F: Ajuste ao Modelo Matemático Baseado na Teoria da Renovação da Superfície, onde o Fluxo é Variável com o Tempo (Nanofiltração).





Apêndice G: Curva padrão para determinação espectrofotométrica da DQO.

Os valores de DQO foram calculados a partir da equação da reta gerada pela solução padrão de biftalato ácido de potássio, de acordo com a Figura .A curva de calibração obtida espectrofotometricamente possui coeficiente de correlação próximo de 1 ($R^2 = 0,9976$) que reflete boa qualidade dos resultados experimentais.

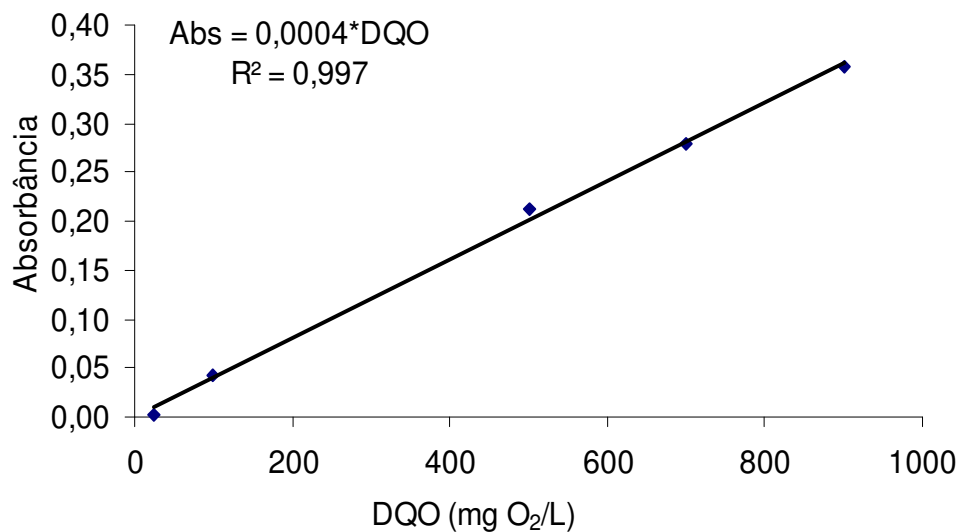


Figura G.1: Curva padrão para determinação espectrofotométrica da DQO.