



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**



**PRODUÇÃO DE ÁGUA DE COCO (*Cocos nucifera*) UTILIZANDO
MEMBRANAS DE MICRO E ULTRAFILTRAÇÃO DE CELULOSE, PES E PVDF**

Isabel Cristina do Nascimento Debien

Engenheira de Alimentos

Prof. Dr. Luiz Antônio Viotto

Orientador

Dissertação de mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia de Alimentos
da Universidade Estadual de Campinas
para a obtenção do Título de Mestre em
Engenharia de Alimentos.

Campinas – SP
MARÇO, 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

D351p	<p>Debien, Isabel Cristina do Nascimento</p> <p>Produção de água de coco (<i>Cocos nucifera</i>) utilizando membranas de micro e ultrafiltração de celulose, PES e PVDF / Isabel Cristina do Nascimento Debien. -- Campinas, SP: [s.n.], 2010.</p> <p>Orientador: Luiz Antônio Viotto Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos</p> <p>1. Água de coco. 2. Microfiltração. 3. Ultrafiltração. 4. Polifenoloxidase. 5. Peroxidase. I. Viotto, Luiz Antônio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.</p> <p>(cars/fea)</p>
-------	---

Titulo em inglês: Coconut water processing using micro and ultrafiltration membranes of cellulose, PES and PVDF

Palavras-chave em inglês (Keywords): Coconut water, Microfiltration, Ultrafiltration, Polyphenoloxidase, Peroxidase

Titulação: Mestre em Engenharia de Alimentos

Banca examinadora: Luiz Antônio Viotto
Sérgio Pérsio Ravagnani
Rosiane Lopes Cunha

Programa de Pós Graduação: Programa em Engenharia de Alimentos

Este exemplar corresponde à redação final da dissertação defendida em ___/___/___ por Isabel Cristina do Nascimento Debien aprovada pela comissão julgadora em ___/___/___.

Prof. Dr. Luiz Antônio Viotto
Orientador – DEA – FEA – UNICAMP

Prof. Dr. Sérgio Pérsio Ravagnani (Membro)
DTP – FEQ – UNICAMP

Profa. Dra. Rosiane Lopes da Cunha (Membro)
DEA – FEA – UNICAMP

Dra. Márcia de Souza Araki (Suplente)

Prof. Dr. Celso Costa Lopes (Suplente)
DEA – FEA – UNICAMP

“Não haverá borboletas se a vida não passar por longas e silenciosas metamorfoses.”

Rubem Alves

Dedico aos meus pais, Cristina e Fleury,
por terem acreditado, apoiado e sonhado comigo.

AGRADECIMENTOS

Obrigada,

Professor Dr. Luiz Antônio Viotto – pela oportunidade e confiança, pelos ensinamentos, orientação e compreensão do meu jeito de ser. Sinceramente muito obrigada!

Camilla (LAMEFI/DEA/FEA) – por ter sido tão prestativa nos momentos mais necessários, pelo bom humor, paciência e acima de tudo pela amizade.

Professores da banca – sua disponibilidade, carinho, o compartilhar de seus conhecimentos comigo, passaram-me segurança para seguir em frente confiante.

CAPES – pelo financiamento deste trabalho.

Amigos do LAMEFI – pelos almoços, cafés, happy hours, bons momentos de descontração. Em especial Ricardo, pela “co-orientação”, brilhantismo e por aplacar meus lamentos, Flávio e Vitor, pelas corridas e análises infundáveis.

Joyce (LEP/DEA/FEA), Renata e Diego (Laboratório de Instrumentação/DTA/FEA) – por disponibilizar equipamentos e ajudar nas difíceis análises.

Professora Dra. Hélia Sato (DCA/FEA) – pela atenção e generosidade.

Amigos de Campinas, que graças a Deus não são poucos – por suportarem meu humor oscilante, pelos momentos de estudo, churrascos, companheirismo e por sempre estarem por perto na hora certa.

Cocotas – que me receberam e ampararam de forma tão calorosa em Campinas e por me mostrarem que conviver é uma arte. E como fizemos arte!

Ana e Rodrigo – minha família em Campinas, pelos puxões de orelha e pelo carinho incondicional.

Simone – seu carinho e suavidade me faziam voltar à calma. Sem sua ajuda jamais teria concluído esse trabalho!

Amigos de BH – mesmo de longe sempre me apoiaram e vibraram com as minhas conquistas. Em especial o Bruno, que apesar dos 600 km de distância participou da parte mais importante desse trabalho.

Emocionada agradeço às presenças marcantes de todos os meus familiares apesar da distância, em especial à mamãe e papai e meus irmãos, Bia e Dan, por todo apoio, compreensão e amor incondicional.

A Deus-Pai, obrigada do fundo da minha alma.

A todos que estiveram comigo nessa jornada e cujo nome não mencionei aqui – minha gratidão. Vocês sabem quem são. Sim, vocês! Obrigada!

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	xi
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
NOMENCLATURA	xxi
RESUMO.....	xxiii
ABSTRACT	xxv
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Geral.....	3
2.2 Específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 COQUEIRO.....	4
3.2 VARIEDADES DE COCO PARA A EXTRAÇÃO DA ÁGUA.....	4
3.2.1 Variedade Gigante	5
3.2.2 Variedade Anã	5
3.2.3 Variedade Híbrida	6
3.3 ÁGUA DE COCO.....	6
3.4 ENZIMAS	8
3.4.1 Enzima Polifenoloxidase (PFO)	8
3.4.2 Enzima Peroxidase (POD)	10
3.5 PROCESSAMENTO DA ÁGUA DE COCO	11
3.6 TECNOLOGIA DE MEMBRANAS	12
3.6.1 Tipos de processos.....	14
3.6.1.1 Microfiltração (MF)	15
3.6.1.2 Ultrafiltração (UF)	15
3.6.2 Características das membranas	15
3.6.2.1 Morfologia	16
3.6.2.2 Natureza.....	16
3.6.2.3 Configuração	16
3.6.3 Fluxo de permeado.....	17
3.6.2 Modelos matemáticos	19

3.7 APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE MEMBRANAS NA CONSERVAÇÃO DA ÁGUA DE COCO	20
4 MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1 MATERIAL	23
4.1.1 Matéria-prima.....	23
4.1.2 Equipamentos.....	23
4.1.3 Membranas.....	26
4.2 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	27
4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	27
4.3.1 Higienização dos cocos	27
4.3.2 Extração da água de coco	28
4.3.3 Unidade de laboratório (UL).....	28
4.3.2 Unidade piloto (UP).....	30
4.4 DESEMPENHO DAS MEMBRANAS	31
4.4.1 Fluxo de permeado (J).....	31
4.4.2 Determinação da atividade enzimática	31
4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DOS RESULTADOS.....	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
5.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	34
5.1.1 Composição Físico-Química das frações obtidas.....	34
5.1.2 Análise de cor e turbidez	36
5.2 FLUXO DE PERMEADO.....	39
5.2.1 Unidade de Laboratório (UL)	39
5.2.2 Unidade Piloto (UP)	46
5.3 ATIVIDADE ENZIMÁTICA.....	47
5.4 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	49
6 CONCLUSÃO.....	52
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
A. APÊNDICE.....	61

A.1 CURVAS DE FLUXO DE PERMEADO (UNIDADE DE LABORATÓRIO).....	61
A.1.1 Microfiltração	61
A.1.2 Ultrafiltração	72
A.2 CURVA DE FLUXO DE PERMEADO (UNIDADE PILOTO).....	90
A.3 AJUSTE AO MODELO BASEADO NA TEORIA DE RENOVAÇÃO DE SUPERFÍCIE.....	92
A.3.1 Unidade de Laboratório	92
A.3.1.1 Microfiltração.....	92
A.3.1.2 Ultrafiltração.....	95
A.3.2 Unidade Piloto	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Reação de escurecimento enzimático a partir da polifenoloxidase (PFO). Adaptado de Walker (1995) e Sapers (1993).	9
Figura 3.2. : Mecanismo de escurecimento enzimático a partir da peroxidase (POD). Adaptado de Fatibello-Filho e Vieira (2002).	10
Figura 3.3. Esquema ilustrativo da filtração perpendicular e filtração tangencial. R_C é a resistência da torta formada na superfície da membrana, R_M é a resistência da membrana e J é o fluxo (Fonte: CHERYAN, 1998).	13
Figura 3.4. Fatores que limitam o fluxo de permeado – polarização da concentração (c), camada polarizada (b) e incrustação (a). C_G é a concentração de solutos na superfície da membrana e C_B é a concentração de solutos na alimentação.	18
Figura 3.5. Declínio do fluxo de permeado com o tempo de operação. Estágio I: Polarização da concentração. Estágio II: Formação da incrustação. Estágio III: Consolidação da incrustação. Fonte: MARSHALL; DAUFIN, 1995.	19
Figura 4.1. Unidade de laboratório	24
Figura 4.2. Esquema da unidade de laboratório.....	24
Figura 4.3. Esquema da unidade piloto.....	26
Figura 5.1. Curvas de fluxo de permeado para os processos de MF, utilizando a membrana de PES 150 kDa.....	40
Figura 5.2. Curvas de fluxo de permeado para os processos de MF, utilizando a membrana de PVDF 150 kDa.	41
Figura 5.3. Curvas de fluxo de permeado para os processos de UF, utilizando a membrana de CEL 10 kDa.....	43
Figura 5.4. Curvas de fluxo de permeado para os processos de UF, utilizando a membrana de CEL 30 kDa.....	44
Figura 5.5. Curvas de fluxo de permeado para os processos de UF, utilizando a membrana de PES 10 kDa.....	44
Figura 5.6. Curva de fluxo de permeado para o processo de UF, utilizando a membrana de CEL 30 kDa, em UP.	46
Figura A.1. Curva de fluxo acumulado de permeado para microfiltração, utilizando membrana de PES 150 a 0,5 bar.	62
Figura A.2. Curva de fluxo acumulado de permeado para microfiltração, utilizando membrana de PES 150 a 1,5 bar.....	64
Figura A.3. Curva de fluxo acumulado de permeado para microfiltração, utilizando membrana de PES 150 a 2,0 bar.....	65
Figura A.4. Curva de fluxo acumulado de permeado para microfiltração, utilizando membrana de PVDF 150 a 0,5 bar.....	67
Figura A.5. Curva de fluxo acumulado de permeado para microfiltração, utilizando membrana de PVDF 150 a 1,5 bar.....	69
Figura A.6. Curva de fluxo acumulado de permeado para microfiltração, utilizando membrana de PVDF 150 a 2,0 bar.....	71

Figura A.7. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 10 a 2 bar.	73
Figura A.8. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 10 a 4 bar.	75
Figura A.9. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 10 a 6 bar.	77
Figura A.10. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 30 a 2 bar.	79
Figura A.11. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 30 a 4 bar.	81
Figura A.12. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 30 a 6 bar.	83
Figura A.13. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de PES 10 a 2 bar.	85
Figura A.14. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de PES 10 a 4 bar.	87
Figura A.15. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de PES 10 a 6 bar.	89
Figura A.16. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 30 a 2 bar, na unidade piloto.	91
Figura A.17. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PES 150 a 0,5 bar.	92
Figura A.18. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PES 150 a 1,5 bar.	93
Figura A.19. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PES 150 a 2 bar.	93
Figura A.20. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PVDF 150 a 0,5 bar.	94
Figura A.21. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PVDF 150 a 1,5 bar.	94
Figura A.22. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PVDF 150 a 2 bar.	95
Figura A.23. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 10 a 2 bar.	95
Figura A.24. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 10 a 4 bar.	96
Figura A.25. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 10 a 6 bar.	96
Figura A.26. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 30 a 2 bar.	97
Figura A.27. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 30 a 4 bar.	97
Figura A.28. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 30 a 6 bar.	98

Figura A.29. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PES 10 a 2 bar.	98
Figura A.30. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PES 10 a 4 bar.	99
Figura A.31. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PES 10 a 6 bar.	99
Figura A.32. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 30 em unidade piloto.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Características físico-químicas da água de coco da variedade anã em diferentes estágios de maturação.	7
Tabela 3.2. Processos de separação por membranas (Fonte: HABERT et al, 2006).	14
Tabela 4.1. Características das membranas utilizadas.	26
Tabela 4.2. Condições de operação das corridas realizadas na UL.	29
Tabela 4.3. Condições de operação da corrida na UP.	30
Tabela 5.1. Composição físico-química da alimentação e frações obtidas.	35
Tabela 5.2. Resultados para análise de cor da alimentação e das frações obtidas.	37
Tabela 5.3. Porcentagem de redução da turbidez nos permeados obtidos para todas as membranas de MF e UF.	38
Tabela 5.4. Fluxo de permeado a FC igual a 2 para as membranas de MF.	39
Tabela 5.5. Fluxo de permeado a FC igual a 2 para as membranas de UF.	42
Tabela 5.6. Atividade enzimática da alimentação e dos permeados obtidos na MF e UF.	48
Tabela 5.7. Parâmetros obtidos para o modelo de renovação de superfície na UL.	50
Tabela A.1. Dados experimentais para microfiltração, utilizando a membrana PES 150 à 0,5 bar.	61
Tabela A.2. Dados experimentais para microfiltração, utilizando a membrana PES 150 à 1,5 bar.	63
Tabela A.3. Dados experimentais para microfiltração, utilizando a membrana PES 150 à 2,0 bar.	64
Tabela A.4. Dados experimentais para microfiltração, utilizando a membrana PVDF 150 à 0,5 bar.	66
Tabela A.5. Dados experimentais para microfiltração, utilizando a membrana PVDF 150 à 1,5 bar.	68
Tabela A.6. Dados experimentais para microfiltração, utilizando a membrana PVDF 150 à 2,0 bar.	70
Tabela A.7. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 10 à 2 bar.	72
Tabela A.8. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 10 à 4 bar.	74
Tabela A.9. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 10 à 6 bar.	76
Tabela A.10. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 30 à 2 bar.	78
Tabela A.11. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 30 à 4 bar.	80
Tabela A.12. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 30 à 6 bar.	82

Tabela A.13. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana PES 10 à 2 bar.	84
Tabela A.14. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana PES 10 à 4 bar.	86
Tabela A.15. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana PES 10 à 6 bar.	88
Tabela A.16. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 30 à 2 bar, na unidade piloto.	90

NOMENCLATURA

A_A = Atividade enzimática da alimentação (U/mL)

$AF_{amostra}$ = Absorbância final da amostra

AF_{branco} = Absorbância final do branco

$AI_{amostra}$ = Absorbância inicial da amostra

AI_{branco} = Absorbância inicial do branco

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

A_{perm} = Atividade enzimática do permeado (U/mL)

B = Constante

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_{alim} = Massa inicial de alimentação (g, kg)

m_P = Massa de permeado (g, kg)

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

P_e = Pressão de entrada (bar)

P_s = Pressão de saída (bar)

P_T = Pressão transmembrana (bar)

R = Retenção enzimática (%)

R^2 = Coeficiente de determinação

t = Tempo (s, min, h)

v = Velocidade (m/s)

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

RESUMO

A água de coco é uma bebida natural, cujo consumo na forma *in natura* como na processada vem crescendo nos últimos tempos devido aos seus benefícios à saúde. Os métodos de processamento empregados visam, essencialmente, inibir a ação de enzimas (polifenoloxidase e peroxidase) responsáveis pela mudança de cor da água de coco, tornando-a rosa, e garantir sua estabilidade microbiológica após a abertura do fruto, procurando manter o quanto possível suas características sensoriais originais. Os processos de separação com membranas, como por exemplo a micro e a ultrafiltração, destacam-se como uma alternativa aos processos convencionais de tratamento térmico, pois a membrana age como uma barreira permeável seletiva para separar um ou mais solutos de um fluido. No presente trabalho, o objetivo geral foi avaliar o desempenho de cinco membranas de micro (MF) e ultrafiltração (UF) quanto ao fluxo de permeado e a retenção enzimática da água de coco verde, em unidade de laboratório e piloto, e também determinar as características físico-químicas da alimentação, retentado e permeado para os ensaios em unidade de laboratório. Foram utilizadas membranas de MF de polietersulfona de 150 kDa (PES 150) e polifluoreto de vinilideno de 150 kDa (PVDF 150), e membranas de UF de celulose de 10 kDa (CEL 10), de 30 kDa (CEL 30) e de polietersulfona de 10 kDa (PES 10). Nos processos de MF a membrana PES 150 apresentou melhores resultados de fluxo (144 – 301 kg/m².h, para as pressões de 0,5; 1,5 e 2 bar) e de retenção enzimática. Nos processos de UF a membrana de CEL 30 apresentou melhores resultados de fluxo (97 – 102 kg/m².h, para as pressões de 2, 4 e 6 bar), mas quanto à retenção enzimática todas as membranas de UF apresentaram 100 % de retenção. No geral todas as curvas de fluxo apresentaram comportamento similar, caracterizado por queda do fluxo no início e posterior estabilização. Os resultados das análises físico-químicas, na maioria dos experimentos, mostraram que não houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre alimentação, retentado e permeado, quanto ao teor de sólidos totais, pH, acidez total titulável, açúcares redutores e totais. Houve redução da turbidez em todos os processos de MF e UF. A membrana CEL 30, por apresentar elevados valores de fluxo e 100 % de retenção enzimática, foi selecionada para o ensaio em unidade piloto, no qual foi encontrado fluxo mais elevado (288 kg/m².h, para pressão de 2 bar), devido ao efeito da velocidade tangencial. O modelo baseado na teoria de renovação de superfície permitiu um bom ajuste dos dados experimentais ($R^2 > 0,8$) para a maioria dos ensaios.

Palavras chave: água de coco, microfiltração, ultrafiltração, polifenoloxidase, peroxidase.

ABSTRACT

Coconut water is a natural drink. Lately, its consumption has been growing in both natural form and processed form, because of the coconut water health benefits. Processing methods are used, essentially, to inhibit the enzymes actions (polyphenoloxidase and peroxidase) that are responsible for coconut water color change to rose and ensure its microbiological stability after the overture of the fruit, trying to maintain, as long as possible, its original sensory characteristics. Membrane separation processes, such as micro and ultrafiltration, stand out as alternative to conventional thermal treatment's processes, it acts as a selective permeable barrier to separate one or more solutes from a fluid including microorganisms. The aim of this work were evaluate the performance of five micro (MF) and ultrafiltration (UF) membranes in its permeate flux and the enzyme retention of coconut water, in laboratory an pilot unit, and also determine physic-chemical characteristics of raw material, retentate and permeate to the essays in laboratory's unit. There were used Polyethersulfone 150 kDa (PES 150) and Polyvilidene fluoride 150 kDa (PVDF 150) MF membranes, Cellulose 10 kDa (CEL 10), Cellulose 30 kDa (CEL 30) and Polyethersulfone 10 kDa (PES 10) UF membranes. Process with PES 150 membranes presented better results to flux (144 – 301 kg/m².h, with pressures on 0,5; 1,5 e 2 bar) and enzyme retention. UF process CEL 30 membrane showed better results to flux (97 – 102 kg/m².h, with pressures on 2, 4 e 6 bar), but all UF membranes showed 100% of enzyme retention. All flux curves showed quite similar behavior, characterized by flux falling at the beginning and later stabilization. Physic-chemical analysis results, at most part of experimental procedures, showed an insignificant difference ($p < 0,05$) among raw material, retentate and permeate regarding to total solids content, pH, titratable total acidity, reductor and total sugar. There was suspended solids reduction in all MF and UF process. As the CEL 30 membrane presented high flux values and 100% of enzyme retention, it was selected to pilot unit essay which flux values were high (288 kg/m².h, on 2 bar) due to the tangential velocity's effect. The pattern based on surface renewal approach allows a good adjustment of experimental data ($R^2 > 0,8$) to the majority of assays.

Key words: coconut water, microfiltration, ultrafiltration, polyphenoloxidase, peroxidase.

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a saúde e a forma física tem-se apoiado também nas bebidas naturais, que visam repor as perdas de água, vitaminas e sais minerais sofridas durante grande esforço físico no trabalho, em esporte e em divertimentos. Dessa forma, existe uma atração dos consumidores por novos produtos e uma tendência por sabores exóticos, naturais, ligados à saúde, a exemplo da água de coco (CUENCA et al., 2002).

A água de coco é uma bebida natural, pouco calórica, com sabor agradável, conhecida mundialmente e muito apreciada em todo o Brasil, principalmente nas regiões litorâneas. Seu consumo vem crescendo nos últimos tempos, ganhando assim popularidade, principalmente pelos seus benefícios à saúde. Devido ao seu elevado teor de sais, composição próxima do soro glicosado isotônico e seu sabor adocicado, é muito usada com fins medicinais para repor perdas eletrolíticas (desidratação), aliviar problemas estomacais, combater verminoses, ajudar a manter o equilíbrio de líquidos e o equilíbrio sanguíneo no corpo, além de regular os mecanismos de contração dos músculos, evitando a desidratação e o desgaste físico (VAL, 1992; GONZALEZ, 1990; ARAGÃO; ISBERNER; CRUZ, 2001).

A água de coco verde pode ser consumida tanto na forma *in natura* quanto processada. Os métodos de processamento empregados visam, essencialmente, inibir a ação de enzimas, peroxidase e polifenoloxidase, que gera a cor rósea (MAGALHÃES et al., 2005) e garantir a estabilidade microbiológica da água de coco após a abertura do fruto, mantendo tanto quanto possível suas características sensoriais originais (ARAGÃO, 2002).

O uso da pasteurização, congelamento ou esterilização, viabiliza o comércio deste produto e otimiza o aproveitamento da fruta. Os processos de separação por membranas destacam-se como uma alternativa a esses processos convencionais de tratamento térmico, pois age como uma barreira permeável seletiva para separar um ou mais solutos de um fluido (ABREU; ROSA, 2000; GIRARD; FUKUMOTO, 2000; STRATHMANN, 1990).

Na separação por membranas, mais especificamente, microfiltração e ultrafiltração, a carga microbiana presente na água de coco após o seu processo de extração pode ser reduzida ou mesmo eliminada. Dependendo das características da membrana selecionada, as enzimas, também podem ser retidas. Assim pode-se obter um produto límpido, estéril e sem atividade enzimática (ARAGÃO, 2002).

Mesmo sendo um produto tipicamente tropical ainda há um número reduzido de estudos realizados quanto ao emprego da tecnologia de membrana para obtenção de um produto estéril, natural e com grande aceitação do consumidor. Ainda é pouco explorada a utilização de diversas membranas que resultem em elevado fluxo de permeado e retenção das enzimas peroxidase e polifenoloxidase, responsáveis pela cor rosa da água de coco. Portanto torna-se necessário um estudo da aplicação de diferentes materiais e diâmetros de poro na obtenção de melhores resultados para a produção de um permeado a ser envasado imediatamente após a sua obtenção sem necessidade de tratamento térmico.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o desempenho de cinco membranas de microfiltração e ultrafiltração, que diferem entre si quanto à massa molecular de corte e material, quanto ao fluxo de permeado e à retenção enzimática da água de coco verde, em unidade de laboratório e testar a membrana com melhor desempenho em unidade piloto.

2.2 Específicos

Verificar em unidade de laboratório o desempenho de duas membranas de microfiltração e três de ultrafiltração quanto ao fluxo de permeado e à retenção enzimática, operando a 25°C, pressões de acordo com a membrana utilizada e rotação aproximada de 300 rpm.

Determinar as características físico-químicas da alimentação, retentado e permeado para os ensaios em unidade de laboratório.

Selecionar a membrana que apresentou melhores resultados em unidade de laboratório e testar em unidade piloto.

Modelar os dados obtidos de fluxo de permeado durante a microfiltração e ultrafiltração da água de coco.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 COQUEIRO

O coqueiro, *Cocos nucifera L.*, é uma planta arbórea com caule ereto, sem ramificações e com folhas terminais. Pertence ao gênero *Cocos* e à família *Palmae* e é originário do sudeste asiático (BENASSI, 2009).

É uma planta considerada bastante versátil porque dela tudo pode ser aproveitado. As folhas são utilizadas como material de cobertura de construção civil e matéria-prima para tapetes e redes. Os troncos têm aplicações como combustível, material de construção civil, utensílios e ornamentos. As raízes geralmente são empregadas na produção de corantes e as flores podem ser usadas no preparo de bebidas alcoólicas que posteriormente podem levar à produção de vinagre. Todas essas aplicações estão diretamente relacionadas à cultura local de produção (WOSIACKI; DEMIATE; MELLO, 1996).

A parte mais utilizada do coqueiro é o fruto, composto de uma casca lisa, mesocarpo, endocarpo e endosperma. O mesocarpo é a camada mais fibrosa e acastanhada quando seca. Endocarpo é a camada lenhosa, muito dura e de cor escura que possui orifícios, saindo de um deles o embrião. Endosperma ou polpa é formado pelo tegumento (camada fina marrom), albúmem sólido (polpa branca) e o albúmem líquido (água de coco). A polpa branca origina-se a partir de nutrientes provenientes da água de coco e sua consistência aumenta com a idade do fruto (ARAGÃO; CRUZ; HELVÉCIO, 2003; CTENAS; CTENAS; QUAST, 2000).

3.2 VARIEDADES DE COCO PARA A EXTRAÇÃO DA ÁGUA

Atualmente, existem duas variedades de coqueiro de grande importância, do ponto de vista agrônomo, socioeconômico e agroindustrial, sendo cultivados em diferentes partes do Brasil, que são a Gigante e Anã. Os híbridos de coqueiro mais empregados são resultantes dos cruzamentos entre essas variedades. A diferença básica entre elas refere-se a sua melhor utilização em termos de

rendimento de produtos, ou seja, a água de coco e a copra (amêndoa, que corresponde ao endocarpo, tegumento e álbumem sólido) (ARAGÃO, 2002).

3.2.1 Variedade Gigante

A variedade gigante é a mais extensivamente cultivada em escala comercial em todos os países produtores do mundo. É a variedade mais importante para a obtenção de produtos da copra, por ter uma amêndoa mais firme e com maior rendimento de óleo e leite de coco, para industrialização. Entretanto, o rendimento de água de coco (aproximadamente 14,4% do peso total do coco), é menor do que o da variedade anã. Os frutos são grandes e a água de coco tem um sabor menos atrativo. Outra desvantagem para a indústria de água de coco é o seu elevado tempo de início de produção, que é de 6 a 9 anos (MEDINA et al., 1980).

3.2.2 Variedade Anã

A variedade anã apresenta um rendimento cerca de 27,5% maior em água do que a variedade gigante, possuindo uma água mais saborosa e adocicada, mesmo estando verde. Apresenta um tempo de início de produção mais curto, de aproximadamente 2 a 3 anos. Entretanto, não é uma variedade recomendada para a obtenção da copra, porque possui baixo rendimento e é pouco firme (ARAGÃO, 2002). Os tipos encontrados de coqueiro anão no Brasil são o verde, amarelo e vermelho, e o tipo predominante e comercialmente cultivado é o verde (SIQUEIRA et al. 1994; ARAGÃO, 2002).

Devido ao bom rendimento, características sensoriais, maior facilidade de manuseio e disponibilidade no mercado, o coco anão verde, com seis e sete meses de maturação, vem sendo bastante utilizado e recomendado para uso em escala comercial e para realização de pesquisas relacionadas ao aproveitamento de sua água (MEDINA et al., 1980; DAVID; FERNANDES, 1998).

3.2.3 Variedade Híbrida

Os cocos da variedade híbrida são originários do cruzamento entre a variedade gigante e a anã. O coqueiro híbrido obtido tem uma maior capacidade produtiva, de até 120 cocos/ano, e uma altura intermediária entre o anão e o gigante, bem como uma elevada resistência às doenças e uma precoce frutificação de quatro anos após o plantio. Entretanto, esta variedade também tem um rendimento intermediário, tanto em termos de copra quanto de água de coco. A ocorrência de rachaduras durante o transporte deve-se à menor resistência dos frutos desta variedade (ARAGÃO, 2002; MEDINA *et al.*, 1980).

3.3 ÁGUA DE COCO

A água de coco é denominada de endosperma líquido encontrado dentro da cavidade do coco que começa a se formar dois meses depois da abertura natural da inflorescência; corresponde a aproximadamente 25% do peso de todo o coco e atinge seu volume máximo nos frutos com idades entre seis e sete meses. É relativamente ácida com pH 5,5, pouco turva ou transparente, incolor, não viscosa e com sabor levemente adocicado, sendo constituída principalmente por minerais e açúcares, substâncias nitrogenadas e gorduras em menor quantidade, além de vitaminas e fatores de crescimento, como o hormônio auxina (MEDINA *et al.*, 1980; CAMPOS *et al.*, 1996; ARAGÃO, 2002).

As características da água de coco variam conforme o tempo de maturação. Na Tabela 3.1 estão relacionadas algumas características físico-químicas da água de coco da variedade anã de diferentes cultivares e relativas a cinco períodos de maturação (ARAGÃO, 2002).

Tabela 3.1. Características físico-químicas da água de coco da variedade anã em diferentes estágios de maturação.

Característica	5 meses	6 meses	7 meses	8 meses	10 meses
Volume (mL)	125 a 247	153 a 290	212 a 310	140 a 256	54 a 152
pH	4,7 a 4,8	4,7 a 4,8	4,7 a 4,9	4,7 a 5,7	5,4 a 5,7
Acidez ¹	1,0 a 1,5	1,0 a 1,5	0,8 a 1,2	0,6 a 1,5	0,3 a 0,5
Brix	4,5 a 5,7	3,4 a 8,9	5,2 a 8,9	5,2 a 9,2	3,1 a 7,1
Glicídios Redut. ²	3,1 a 4,5	2,2 a 3,6	1,9 a 5,5	2,2 a 6,4	0,3 a 0,7
Ferro ³	0,03 a 0,04	0,03 a 0,05	0,06 a 0,09	0,04 a 0,07	0,03 a 0,08
Cálcio ³	13 a 15	9,9 a 16	10 a 24	12 a 25	10 a 21
Potássio ³	148 a 231	102 a 192	143 a 191	189 a 248	127 a 269
Magnésio ³	6,1 a 14	8,3 a 14	3,8 a 12	3,7 a 11	3 a 15
Sódio ³	5,1 a 6,9	8,7 a 12	4,7 a 9	5,8 a 17	15 a 55
Fósforo ³	1,2 a 4,8	4,6 a 7,9	2,5 a 5,2	4,1 a 7,5	5,1 a 9,2
Vitamina C ⁴	1,7 a 3,9	19,7 a 94,3	N.E.	1,8 a 4,8	N.E.

1- mL NaOH 1N/100mL; 2- em glicose g/100mL; 3- mg/100mL; 4- mg/100g; N.E.- não encontrado. Fonte: ARAGÃO, 2002.

A água de coco é amplamente consumida não somente por ser uma bebida refrescante e pouco calórica, mas também devido às suas inúmeras qualidades terapêuticas. É empregada na reidratação oral, auxilia no tratamento de distúrbios intestinais, na redução do colesterol e em casos de cólera. Além disso, também é utilizada como fluido de hidratação intravenoso, devido à presença de aminoácidos essenciais e de sais minerais em concentrações semelhantes a do plasma sanguíneo (ARAGÃO, 2000; MACIEL; OLIVEIRA; da SILVA, 1992; PUMMER et al, 2001).

3.4 ENZIMAS

Enzimas são, em sua maioria, proteínas que catalisam com grande eficiência as reações metabólicas em determinadas condições de pH, temperatura, meio iônico, entre outros (WHITAKER, 1972).

Elas possuem finalidades específicas e vitais para o fruto in vivo, porém, em contato com o ar atmosférico, desencadeiam reações indesejáveis. Há dois grupos de enzimas responsáveis pela deterioração da água de coco, a polifenoloxidase (PFO) e a peroxidase (POD) (ARAGÃO, 2002).

A PFO e POD podem participar de um grande número de reações oxidativas e especialmente em frutas e vegetais são responsáveis pela mudança de cor, degradação da clorofila, oxidação de fenóis, do ácido indol acético, sendo que muitos desses fatores estão associados com flavor, cor, textura e qualidades nutricionais dos alimentos (VÁMOS-VIGYÁZÓ, 1981).

Na água de coco, em especial, as enzimas PFO e POD, através da oxidação de alguns componentes, são responsáveis pelo desenvolvimento de uma coloração rosada no produto (VÁMOS-VIGYÁZÓ, 1981).

3.4.1 Enzima Polifenoloxidase (PFO)

A PFO é uma enzima oxirredutase e contém cobre como grupo prostético, que oxida difenóis em presença de oxigênio molecular. O nome polifenoloxidase compreende duas enzimas distintas, cuja diferença diz respeito à especificidade aos substratos.

A primeira hidroxila monofenóis a orto-dihidroxifenóis (atividade creolase), oxidando-os a orto-quinonas (atividade catecolase), e é a enzima mais importante para o escurecimento oxidativo de frutas e hortaliças, sendo denominada de tirosinase, polifenoloxidase ou catecol oxidase. A segunda oxida orto e para difenóis às respectivas quinonas, não possuindo a capacidade de hidroxilar

monofenóis como a primeira, sendo denominada de lacase (VAMOS-VIGYÁZÓ, 1981; MAYER; HAREL, 1990; MENDONÇA; GUERRA, 2003).

Em alimentos, como a maioria dos substratos fenólicos são orto-dihidroxifenóis, a atividade da catecolase é mais evidente no seu escurecimento. A reação do escurecimento prossegue através da condensação das quinonas que reagem não enzimaticamente com outros compostos fenólicos e aminoácidos, por exemplo, para produzir pigmentos escuros de estrutura indeterminada (VAMOS-VIGYÁZÓ, 1981; MAYER; HAREL, 1990; MENDONÇA; GUERRA, 2003). As etapas deste mecanismo estão representadas, resumidamente, na Figura 3.1.

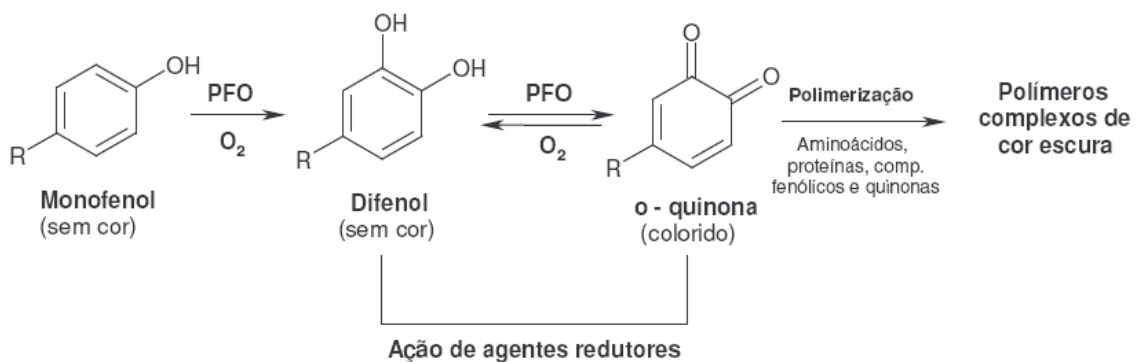


Figura 3.1. Reação de escurecimento enzimático a partir da polifenoloxidase (PFO). Adaptado de Walker (1995) e Sapers (1993).

De maneira geral, a PFO é considerada termolábil, sendo que os processos de branqueamento e pasteurização funcionam muito bem para sua inativação (SVENSSON, 1977; VAMOS-VIGYÁZÓ, 1981; MAYER; HAREL, 1990). Entretanto, Campos (1993) verificou que a PFO foi a enzima que apresentou maior resistência térmica, quando aplicados diferentes tratamentos de pasteurização na água de coco.

3.4.2 Enzima Peroxidase (POD)

São enzimas semelhantes à PFO, também membro do grupo das oxirredutases. Decompõem o peróxido de hidrogênio na presença de um doador de hidrogênio. São bastante difundidas na natureza e podem estar presentes em plantas superiores, animais e microrganismos (VAMOS-VIGYÁZÓ, 1981; ROBINSON, 1991).

A Figura 3.2 representa o mecanismo de escurecimento enzimático da POD, utilizando como doador de hidrogênio o guaiacol, bastante utilizado nos métodos de detecção da atividade dessa enzima (FATIBELLO-FILHO; VIEIRA, 2002).

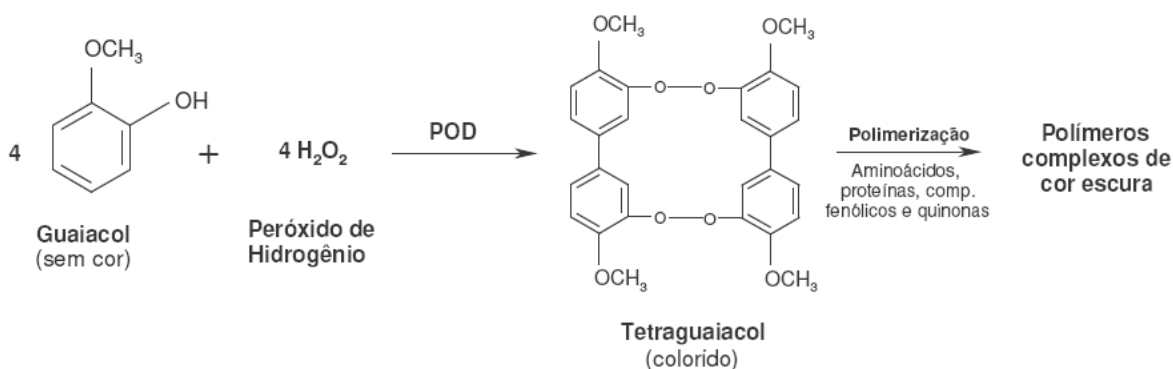


Figura 3.2. : Mecanismo de escurecimento enzimático a partir da peroxidase (POD). Adaptado de Fatibello-Filho e Vieira (2002).

A POD é uma enzima termorresistente, que pode apresentar regeneração após tratamento térmico insuficiente. Os fatores externos que governam a inativação térmica da POD, em um determinado pH, são o tempo e a temperatura de tratamento. A uma alta temperatura e por longa exposição, a sua destruição é mais efetiva enquanto que a um curto tempo, o efeito é ameno, podendo causar rápida inativação, levando a uma maior regeneração da sua atividade (ADAMS, 1978; NEBESK et al., 1950).

Normalmente, essas enzimas são inativadas pelo processo de pasteurização, que dura cerca de 60 a 90 segundos a temperaturas de 75 a 95°C (CHILAKA et al., 2002; MENDONÇA; GUERRA, 2003).

3.5 PROCESSAMENTO DA ÁGUA DE COCO

A água de coco verde pode ser consumida tanto na forma *in natura* quanto processada e sua vida de prateleira dependerá dos métodos de conservação aplicados. Em qualquer forma de conservação deve-se otimizar o tempo de processamento e minimizar a exposição ao ar atmosférico.

Independentemente do método de conservação aplicado, há etapas comuns a qualquer um deles:

- Recepção e seleção dos frutos;
- Lavagem (Pré-lavagem, sanificação e enxágüe);
- Abertura do coco e extração da água;
- Filtração prévia (retirada de sujidades grosseiras).

A água de coco pode ser conservada por refrigeração, congelamento, UHT (ultra high temperature), e tecnologia de embalagens assépticas - processo que se dá em dois estágios: a pasteurização prévia e a esterilização propriamente dita (ARAGÃO, 2002; LUVIELMO et al., 2004).

O uso de conservantes também é amplamente utilizado para prevenir o escurecimento enzimático e não-enzimático, controlar o crescimento de microrganismos, agir como agente branqueador, antioxidante ou redutor, como por exemplo, os sulfitos (dióxido de enxofre, sulfito de sódio, bissulfito e metabissulfito de sódio e potássio) e ácido ascórbico (SAPERS, 1993; VAMOS-VIGYÁZÓ, 1995).

O ácido ascórbico é recomendado para a estabilização química da água de coco, atuando como antioxidante. Contudo, há processos onde o metabissulfito de sódio, ácido sórbico e o ácido benzóico também são utilizados. Atualmente, não existe água de coco sendo comercializada que utilize somente ácido ascórbico para estabilização (ABREU, 1999; ABREU; ROSA, 2000).

3.6 TECNOLOGIA DE MEMBRANAS

Uma membrana é uma barreira seletiva que separa duas fases e que restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases (GIRARD, FUKUMOTO, 2000; MULDER, 1997). Os componentes são diferencialmente separados de acordo com suas massas molares ou tamanho de partícula. A capacidade de filtração do processo resulta da diferença de pressão aplicada à membrana, das propriedades físicas da alimentação e do tamanho dos poros da membrana. A fase que atravessa a membrana denomina-se permeado e a fase que não atravessa denomina-se retentado (CHERYAN, 1998; STRATHMANN, 1990; GEKAS; BARALLA; FLORES, 1998; OSADA; NAKAGAWA, 1992).

A seletividade da membrana está relacionada às dimensões da molécula ou partícula de interesse de separação e ao tamanho do poro, assim como à difusividade do soluto na matriz e às cargas elétricas associadas (CHERYAN, 1998; DZIEZAK, 1990).

Quando o objetivo dos processos de separação com membranas é a concentração, o retentado será o produto final principal. Porém, no caso de purificação, tanto o retentado quanto o permeado podem conter o produto desejado, dependendo das impurezas que se deseja eliminar (MULDER, 1997; OSTERGAARD, 1989).

Na sua forma mais simples, separação com membranas consiste no bombeamento da solução de alimentação sob pressão através da superfície da membrana, existindo dois tipos de configurações: o método estático (convencional), denominado filtração perpendicular, e a filtração tangencial (CHERYAN, 1998) (Figura 3.3).

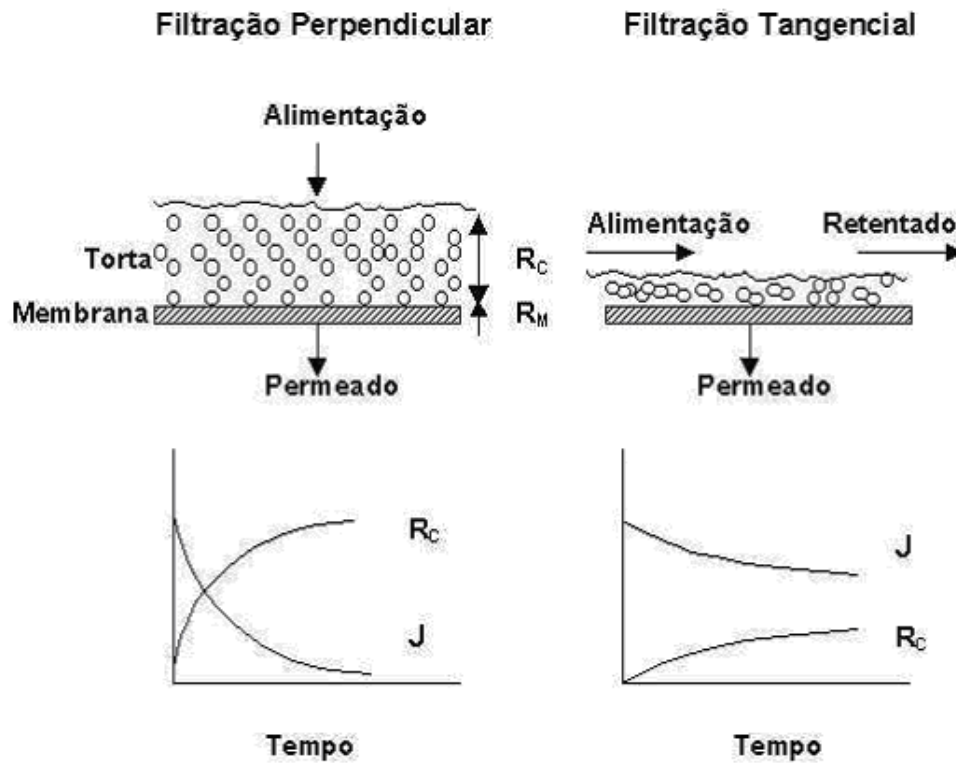


Figura 3.3. Esquema ilustrativo da filtração perpendicular e filtração tangencial. R_c é a resistência da torta formada na superfície da membrana, R_m é a resistência da membrana e J é o fluxo (Fonte: CHERYAN, 1998).

Segundo Habert et al (2006), diversas vantagens contribuíram para que os processos de separação com membranas saíssem da esfera laboratorial e se tornassem processos industriais, tais como:

- Economia de energia: separação de componentes sem que ocorram mudança de fase dos mesmos;
- Seletividade: característica própria da membrana a ser utilizada;
- Separação de compostos termolábeis: processo ocorre à temperatura ambiente ou próxima desta;
- Simplicidade de operação e escalonamento.

3.6.1 Tipos de processos

Existem diversos processos que utilizam membranas como barreira de separação, estes estão apresentados na Tabela 3.2. Dentre esses processos, podem ser citados os que utilizam o gradiente de pressão como força motriz (micro, ultra e nanofiltração e osmose reversa) e aqueles que usam outros gradientes como força motriz, que seria o caso da pervaporação (gradiente de pressão parcial dos componentes entre o lado da alimentação e do permeado), diálise (gradiente de concentração), eletrodiálise (gradiente de concentração e potencial elétrico), entre outros. Nesse trabalho será dada atenção especial para o primeiro caso, ou seja, processos que utilizam o gradiente de pressão como força motriz.

Tabela 3.2. Processos de separação por membranas (Fonte: HABERT et al, 2006).

Processo	Força motriz	Material retido	Material que permeia
Microfiltração	ΔP (0,5 – 2 atm)	Material em suspensão, bactérias. MM >500 kDa	Água e sólidos dissolvidos
Ultrafiltração	ΔP (1 – 7 atm)	Colóides, macromoléculas. MM >5000 Da	Água, sais solúveis de baixa MM
Nanofiltração	ΔP (5 – 25 atm)	Moléculas de MM média 500 < MM < 2000 Da	Água, sais e moléculas de baixa MM
Osmose reversa	ΔP (15 – 80 atm)	Todo material solúvel ou em suspensão.	Água
Diálise	ΔC	Moléculas de MM > 5000 Da.	Íons e orgânicos de baixa MM
Eletrodiálise	ΔE	Macromoléculas e compostos não iônicos	Íons
Permeação de gases	ΔP e ΔC	Gás menos permeável	Gás mais permeável
Pervaporação	Pressão de vapor	Líquido menos permeável	Líquido mais permeável

MM: Massa Molecular

ΔP : gradiente de pressão; ΔC : gradiente de concentração das espécies; ΔE : gradiente de potencial elétrico

3.6.1.1 Microfiltração (MF)

A microfiltração é o processo de separação mais próximo da filtração clássica. Utiliza membranas com poros na faixa entre 0,1 e 10 μm , sendo, portanto, indicado para retenção de materiais em suspensão e emulsões. Por serem relativamente abertas, as pressões empregadas como força motriz para o transporte são menores, dificilmente ultrapassando 3 bar (CHERYAN, 1998; HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006; MULDER, 1997).

3.6.1.2 Ultrafiltração (UF)

A ultrafiltração é utilizada quando se deseja purificar, fracionar ou concentrar soluções contendo macromoléculas e o diâmetro do poro está na faixa entre 1 a 100 nm exigindo uma força motriz maior. As diferenças de pressão através da membrana variam na faixa de 2 a 10 bar. Os fluxos de permeado em ultrafiltração estão, em geral, na faixa de 150 a 250 L/h.m^2 . Fluxos de permeados bem menores podem ser obtidos em função da polarização da concentração e da incrustação, que dependem da natureza da solução a ser tratada e das condições de operação do sistema (BAKER, 2004; HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006).

3.6.2 Características das membranas

As membranas podem ser classificadas de acordo com sua estrutura morfológica (membranas densas e porosas), natureza (membranas naturais e sintéticas), e configuração modular (tubular, quadro e placa, fibra oca ou "*hollow fiber*" e espiral) (CHERYAN, 1998).

3.6.2.1 Morfologia

As membranas são consideradas densas quando o transporte dos componentes envolve uma etapa de dissolução e difusão através do material que a constitui. São denominadas porosas quando o transporte dos permeantes ocorrem preferencialmente em uma fase contínua, preenchendo seus poros (HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006).

Tanto as membranas densas quanto as porosas podem ser classificadas de acordo com a sua estrutura interna, como simétricas (isotrópicas) ou assimétricas (anisotrópicas). As simétricas possuem poros de tamanhos uniformes na seção transversal e as assimétricas possuem poros que normalmente crescem em direção oposta à superfície filtrante (HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006; CHERYAN, 1998).

As membranas anisotrópicas podem ser de dois tipos: integral, constituída por um único material, ou composta, quando cada região da membrana é formada por um material diferente (HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006).

3.6.2.2 Natureza

As membranas biológicas (naturais) desempenham funções fisiológicas nos organismos vivos. As membranas sintéticas, por sua vez, podem ser divididas em orgânicas, em sua grande maioria polímeros (acetato de celulose, poli(sulfona), poli(éter sulfona), poli(acrilonitrila), etc), e inorgânicas, como metais e cerâmicas (BAKER, 2004; CHERYAN, 1998; HABERT, BORGES, NOBREGA, 2006, MULDER, 1997).

3.6.2.3 Configuração

Comercialmente foram desenvolvidas quatro configurações diferentes: tubular, quadro e placa, fibra oca ou “*hollow fibre*” e espiral. Cada tipo tem

vantagens e desvantagens com relação ao desempenho, custos de investimentos e de operação, volume morto, relação área/volume e consumo de energia (DZIEZAK, 1990).

3.6.3 Fluxo de permeado

O fluxo de permeado sofre um decréscimo com o tempo ao longo do processo de separação com membranas, a pressão constante, o que reduz a produtividade e altera a qualidade do produto final. Isso se deve principalmente aos fenômenos de polarização da concentração, formação da camada polarizada e incrustação (Figura 3.4) (CHERYAN, 1998).

A polarização da concentração ocorre no início do processo devido a um acúmulo de solutos próximo à superfície da membrana, por transporte convectivo, onde parte do solvente é removida do fluido, o que ocasiona uma maior concentração de solutos na superfície da membrana em relação à da solução (CHERYAN, 1998).

A camada polarizada forma-se na superfície da membrana devido a uma precipitação de macromoléculas. Tal fenômeno ocasiona um prejuízo no funcionamento hidrodinâmico do sistema, isso porque constitui uma barreira a mais para o fluxo de permeado (CHERYAN, 1998).

A incrustação é resultado da penetração de solutos presentes em soluções de macromoléculas ou de suspensões coloidais na superfície interna dos poros da membrana e também da adsorção de moléculas no material da membrana, diminuindo o fluxo de solvente e alterando as características de retenção (HABERT et al, 2006).

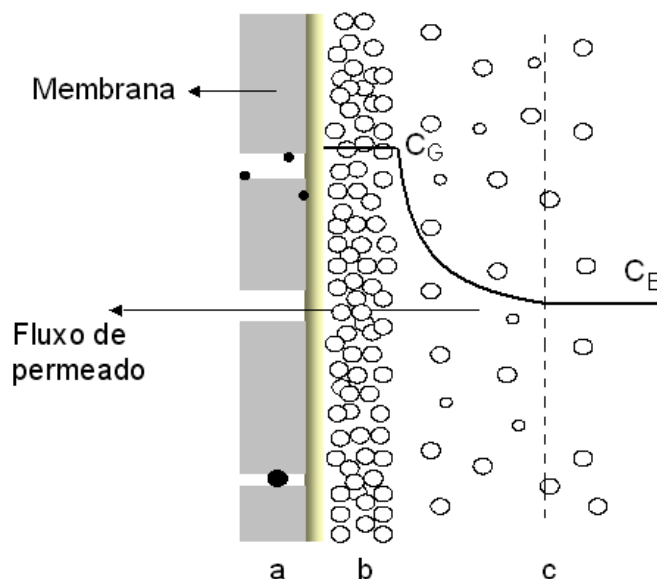


Figura 3.4. Fatores que limitam o fluxo de permeado – polarização da concentração (c), camada polarizada (b) e incrustação (a). C_G é a concentração de solutos na superfície da membrana e C_B é a concentração de solutos na alimentação.

A diferença entre a polarização da concentração e a incrustação é que na primeira as substâncias acumuladas na parede da membrana estão dissolvidas na solução e no segundo as substâncias deixaram a solução e estão depositadas na superfície ou dentro dos poros (GEKAS; BARALLA; FLORES, 1998).

Os fenômenos citados também contribuem para aumentar a resistência à transferência de massa através da membrana. O depósito de solutos aumenta com o tempo e pode mudar a seletividade da membrana, que é a causa da redução da porosidade pelo entupimento ou adsorção e responsável por mudanças na qualidade do produto (VLADISAVJEVI; VUKOSAVLJEVI; BUKVI, 2003; BRUIJN et al., 2003).

A diminuição do fluxo com o tempo ou concentração não é linear. A redução da taxa de fluxo pode ser dividida em três estágios (Figura 3.5). O primeiro estágio, logo nos minutos iniciais, é caracterizado por uma rápida redução do fluxo e deve-se basicamente à polarização da concentração. O segundo estágio, que é

uma etapa intermediária, se deve a incrustação formada. No terceiro estágio, o fluxo é praticamente constante em relação ao tempo, caracteriza-se por um declínio contínuo e lento do fluxo, e ocorre a consolidação da incrustação (MARSHALL; DAUFIN, 1995).

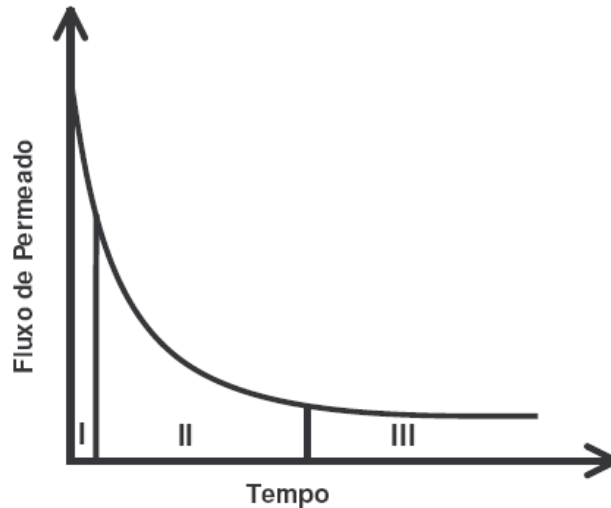


Figura 3.5. Declínio do fluxo de permeado com o tempo de operação. Estágio I: Polarização da concentração. Estágio II: Formação da incrustação. Estágio III: Consolidação da incrustação. Fonte: MARSHALL; DAUFIN, 1995.

Outros parâmetros de controle do processo que também devem ser considerados são a pressão transmembrana (média da pressão na entrada e na saída da membrana), a temperatura, a velocidade tangencial e a concentração de sólidos (CHERYAN, 1998).

3.6.2 Modelos matemáticos

Diversos modelos matemáticos foram propostos para descrever a curva do fluxo de permeado, sendo a maior parte deles semi-empíricos. Modelos exponenciais com frequência ajustam razoavelmente bem os resultados experimentais (GIRARD; FUKUMOTO, 2000).

A Equação 1 mostra um modelo proposto a partir da teoria de renovação de superfície, onde o fluxo é representado como uma função do tempo, considerando fator de concentração (FC) constante:

$$J = J_F + (J_0 - J_F)e^{(-\lambda.t)} \quad (1)$$

na qual, J_0 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.

Segundo Girard e Fukumoto (2000), quando o fator de concentração é variável com o tempo, pode-se expressar o fluxo como uma função desse fator, conforme mostra a Equação 2:

$$J = J_0 - B.\ln(FC) \quad (2)$$

na qual, J_0 é o fluxo inicial de permeado, B é uma constante que depende do sistema, condições de operação e propriedades da alimentação. FC é o fator de concentração, definido como a razão entre o volume inicial de alimentação e o volume final de retentado.

3.7 APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE MEMBRANAS NA CONSERVAÇÃO DA ÁGUA DE COCO

Magalhães et al. (2005) realizou um estudo sobre a conservação da água de coco verde por filtração com membrana. A água de coco foi extraída de cocos verdes da variedade Anã, com 7 meses de maturação. A filtração foi realizada em um sistema de micro e ultrafiltração utilizando membranas de polisulfona em um módulo do tipo quadro e placa. Para a microfiltração foram utilizadas membranas de tamanho de poro igual a $0,1\mu\text{m}$, e para a ultrafiltração membranas com massa molecular de corte igual a 100kDa, 50kDa e 20kDa, operando à temperatura de 25°C , pressão de 2 bar e vazão de circulação da alimentação constante de 480 L/h.

Com relação às análises físico-químicas, o teor de sólidos solúveis, acidez total titulável e pH não apresentaram diferenças significativas entre os

processamentos, quando comparados aos seus valores nas respectivas alimentações. Observou-se redução da turbidez, uma vez que a membrana retém os sólidos em suspensão. O teor de proteína foi interpretado como uma medida indireta da concentração enzimática, sendo verificado que, quanto menor o diâmetro do poro da membrana, menor é a concentração protéica no permeado. E com relação às análises microbiológicas, todas as amostras apresentaram condições de esterilidade comercial, ou seja, o processo eliminou os microrganismos capazes de se reproduzir no produto em condições de estocagem e distribuição não refrigerada e os microrganismos patogênicos viáveis, inclusive esporos (MAGALHÃES et al., 2005).

Sousa (2006) realizou um estudo sobre a avaliação do processo de produção de água de coco por ultrafiltração em unidade piloto. A água de coco foi extraída de cocos verdes da variedade Anã com 7 meses de maturação. Foram utilizadas membranas monotubo de cerâmica de 50 kDa, em testes preliminares, e membranas *hollow fiber* de polisulfona de 10 kDa, para os experimentos propriamente ditos, onde foi adicionado à água de coco 200 mg/L de ácido ascórbico. A eficiência do processo foi avaliada através do fluxo de permeado e da caracterização microbiológica, físico-química, bioquímica e sensorial dos produtos obtidos.

As membranas de ultrafiltração de massa molecular de corte de 10 e 50 kDa apresentaram o mesmo comportamento de fluxo de permeado com o tempo de processo. O processo de ultrafiltração não causou efeito significativo sobre o pH, teor de sólidos solúveis, acidez total titulável e os parâmetros de cor do produto. Houve redução significativa da turbidez da água de coco, o produto obtido apresentou coloração límpida. Quanto ao teor de proteína da água de coco ultrafiltrada, houve diferença significativa quando comparada à água de coco *in natura*. Com relação à retenção enzimática e de microrganismos, a membrana mais eficiente foi a de 10 ka, apresentando um fluxo de permeado de 130 k/m².h no início e reduziu-se em aproximadamente 50 % ao se estabilizar no valor médio de 60 k/m².h. A retenção enzimática foi 100% tanto para a peroxidase quanto para

a polifenoloxidase. A retenção da enzima peroxidase dependeu da formação da camada polarizada e a enzima polifenoloxidase ficou retida independente desse fenômeno (SOUSA, 2006).

Os dados obtidos de aceitabilidade e intenção de compra indicam que a água de coco ultrafiltrada seguida de envase asséptico é um produto com uma boa perspectiva de comercialização (SOUSA, 2006).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

4.1.1 Matéria-prima

A água de coco utilizada foi extraída de cocos verdes da variedade Anã, com aproximadamente 7 meses de maturação (estágio ideal para o consumo da água) adquiridos no CEASA de Campinas/SP durante o período de outubro de 2008 a março de 2009.

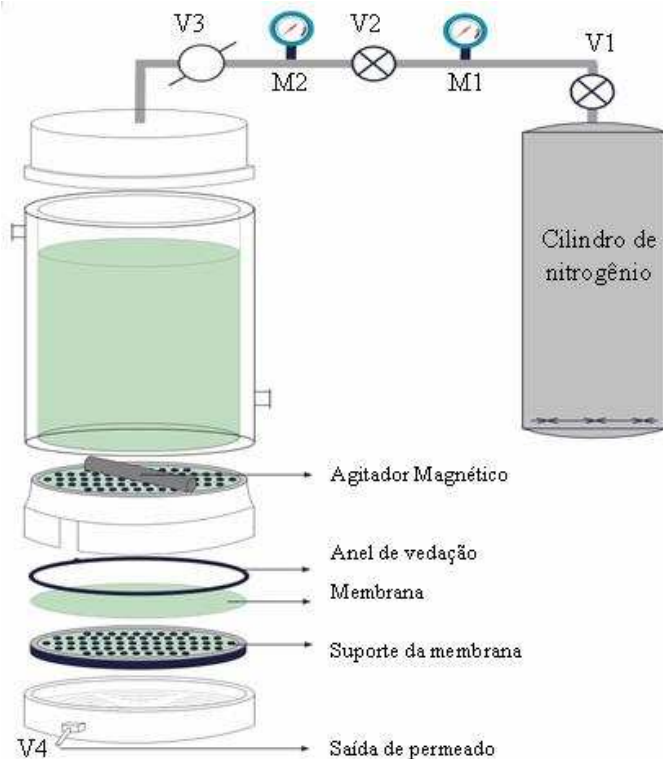
4.1.2 Equipamentos

Foram utilizadas duas unidades: de laboratório (UL) e piloto (UP) para realização dos ensaios de MF e UF.

A unidade de laboratório é construída em aço inox AISI 304 sob medida e constituída de um cilindro encamisado de diâmetro externo de 13 cm e comprimento de 27 cm, tendo capacidade de 800 mL e opera até 40 bar. 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, sobre a qual existe outro suporte para o agitador magnético que promove o efeito da velocidade tangencial na superfície da membrana, com o intuito de aumentar o fluxo de permeado, diminuindo o efeito da resistência devido à camada polarizada que se forma sobre a membrana. Anéis de vedação (padrão sanitário) impedem o vazamento entre as partes. Na parte superior, existe a entrada de gás nitrogênio utilizado para criar a pressão no interior da célula gerando a força motriz do processo. A temperatura é controlada por meio da circulação de água na camisa do equipamento, através de um banho termostático modelo NT281 (Nova Técnica, Piracicaba, SP) (Figura 4.1 e Figura 4.2). A massa de permeado foi medida utilizando uma balança semi-analítica da marca Marte, modelo AS2000.



Figura 4.1. Unidade de laboratório



- 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 e V2 fechada
- V2 – Válvula de regulação: regula a pressão no interior da célula
- M2 – Manômetro 2: fornece a leitura da pressão no interior da célula
- V3 – Válvula de 3 vias (escape)
- V4 – Válvula de saída de permeado

Figura 4.2. Esquema da unidade de laboratório.

A unidade piloto é composta por um tanque de alimentação de aço inoxidável AISI 304 encamisado com capacidade para 40 L de alimentação, uma bomba de lóbulos de deslocamento positivo em aço inoxidável AISI 316 com acionamento elétrico do variador de rotações e pressão máxima de 4 bar, marca Netzsch e modelo R47 AM 100, um rotâmetro (400 a 5000L/h) da marca Gemu, um módulo de membrana em aço inoxidável AISI 304 com 52 cm de comprimento e 7,5 cm de largura, dois manômetros (0 – 10 bar) da marca Zürich, São Paulo, SP, posicionados na entrada e na saída da membrana, um termômetro (0 – 100°C) (Zürich, São Paulo, SP), válvulas borboleta sanitárias com diâmetro de 1” e de controle tipo diafragma de aço inoxidável AISI 316 com 1 “ e conexões sanitárias em aço inoxidável AISI 304. Nesse equipamento, o ajuste das condições operacionais (pressão e vazão) é feito pelo controle simultâneo da rotação da bomba por meio de um inversor de frequência e da válvula diafragma, enquanto que a temperatura é controlada por meio da circulação de água na temperatura adequada ao processo na camisa do tanque (Figura 4.3). A massa de permeado foi medida utilizando uma balança da marca Marte, modelo LC20, de carga máxima de 20 kg.

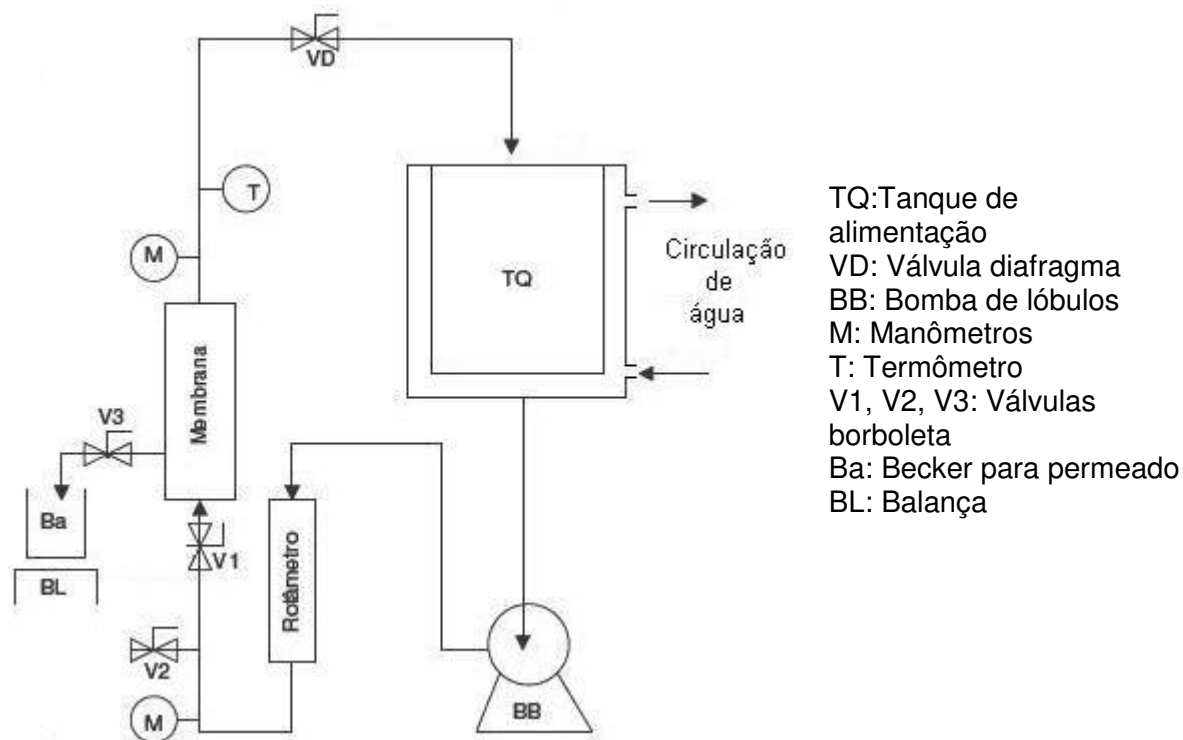


Figura 4.3. Esquema da unidade piloto.

4.1.3 Membranas

A Tabela 4.1 apresenta as características das membranas planas poliméricas de marca comercial Microdyn-Nadir (Wiesbaden, Alemanha) que foram utilizadas na UL. Na UP foi utilizada apenas a membrana de Celulose de 30 kDa.

Tabela 4.1. Características das membranas utilizadas.

	Material	Massa Molecular de corte (kDa)
MF	PES	150
	PVDF	150
UF	CEL	10
	CEL	30
	PES	10

PES = Polietersulfona, PVDF = Polifluoreto de vinilideno, CEL = Celulose

4.2 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

A seguir são apresentadas as análises físico-químicas realizadas para a alimentação, permeados e retentados. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

- **Acidez total titulável (mg/100 g expressa em ácido cítrico):** titulação com NaOH 0,01N com indicador fenolftaleína, segundo o método AOAC (1997);
- **Açúcares redutores e totais:** segundo métodos nº52.35 e nº52.36 da AOAC (1997);
- **Cinzas:** segundo método gravimétrico nº40.26 da AOAC (1997);
- **Cor e turbidez:** segundo sistema Hunter (1996), leitura em espectrofotômetro para cor ColorQuest II (Hunterlab, Reston, EUA), utilizando cubeta de quartzo de 20 mm. Utilizou-se sistema de cor CIELAB, com iluminante D65, ângulo do observador 10°, calibração do tipo TTRAN e com medida de Haze (turbidez). Para as medidas de cor, foram determinados os seguintes parâmetros:
 - L* - Luminosidade, que varia de 0 (preto) a 100 (branco);
 - a* - cromaticidade, que varia de +a* (vermelho) a -a* (verde);
 - b* - cromaticidade, que varia de +b* (amarelo) a -b* (azul).
- **pH:** medido em potenciômetro (Mettler Toledo, Schwerzenbach, Suíça), segundo método nº81-12 da AOAC (1997);
- **Sólidos solúveis:** leitura direta em refratômetro (PZO, Varsóvia, Polônia), com correção de temperatura, segundo método nº32.12 da AOAC (1997);
- **Sólidos totais:** secagem em estufa, segundo método nº20.151 da AOAC (1997);

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.3.1 Higienização dos cocos

Os frutos foram higienizados em três etapas:

- Aspersão com água potável, para retirar as sujidades grosseiras provenientes da colheita e transporte;
- Imersão em solução clorada a 200 mg/L durante 10 minutos, para eliminar os contaminantes da casca;
- Imersão em solução de hipoclorito a 5 mg/L, para retirar o excesso de sanificante (CURSINO et al., 1996).

4.3.2 Extração da água de coco

A água de coco foi extraída manualmente utilizando um “fura coco”, que consiste em um tubo de aço inox e poliestireno de alto impacto, e foi realizada uma filtração grosseira utilizando uma peneira de aço inoxidável de MESH 20 (abertura de 850 μm).

Com o objetivo de inibir a ação enzimática antes e durante o processo foram adicionados à água de coco *in natura*, imediatamente após a extração, 200 mg/L de ácido ascórbico (CAMPOS et al., 1996).

4.3.3 Unidade de laboratório (UL)

Na primeira etapa deste trabalho realizada em UL foi avaliado o desempenho das cinco membranas planas poliméricas de diferentes materiais, descritas no item 4.1.3, operando a 25 °C e pressões de acordo com cada membrana e processo, como é mostrado na Tabela 4.2, totalizando 15 experimentos. A rotação aproximada do agitador magnético é de 300 rpm, considerando o comprimento do agitador, que é 0,05 m, a velocidade média aproximada é de 0,4 m/s

Para cada experimento foram utilizados 400 mL de alimentação (água de coco *in natura* adicionada de ácido ascórbico). Assim que a alimentação atingiu a temperatura do processo, 25 °C, ainda com a válvula de saída de permeado fechada, foi feito o ajuste da pressão. Ajustada a pressão, a válvula de saída de

permeado foi então aberta e a determinados intervalos de tempo foi registrada a massa de permeado que foi coletada em béquer previamente tarado em balança semi-analítica. A alimentação foi concentrada até fator de concentração mássico (FC) igual a 2, fator esse que é definido como razão da massa inicial de alimentação (m_{alim}) pela massa de retentado ($m_{retentado}$), como é mostrado na equação 3 (CHERYAN, 1998):

$$FC = \frac{m_{alim}}{m_{retentado}} \quad (3)$$

Para cada experimento foram coletadas amostras da alimentação, retentado e permeado e realizadas análises físico-químicas, em triplicata, como descrito no item 4.2. Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente utilizando o Teste de Tukey com nível de confiança de 95% a fim de verificar se houve diferença significativa, empregando o programa SAS®, versão 9.0.0.

Tabela 4.2. Condições de operação das corridas realizadas na UL.

Processo	Material da membrana	Massa molecular de corte (kDa)	Pressão de operação (bar)
MF	Polietersulfona (PES)	150	0,5
			1,5
			2,0
	Polifluoreto de vinilideno (PVDF)	150	0,5
			1,5
			2,0
UF	Celulose (CEL)	10	2,0
			4,0
			6,0
	Celulose (CEL)	30	2,0
			4,0
			6,0
Polietersulfona (PES)	10	2,0	
		4,0	
		6,0	

4.3.2 Unidade piloto (UP)

A segunda etapa deste trabalho foi realizada na UP, onde as condições de operação são mais próximas às condições que ocorrem em um processo industrial. Utilizou-se apenas a membrana de Celulose de massa molecular de corte de 30 kDa, devido aos resultados obtidos na UL (item 5.2.1). Nessa unidade dois outros parâmetros de controle também são importantes, a pressão transmembrana (P_T), que é calculada pela média aritmética da pressão na entrada e na saída da membrana (Equação 4) (CHERYAN, 1998) e a velocidade tangencial (v).

$$P_T = \frac{P_e + P_s}{2} \quad (4)$$

Onde P_e e P_s são, respectivamente, as pressões nas correntes de entrada e saída da membrana do lado do retentado.

Na UP foi realizado um experimento, conforme as condições de operação mostradas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Condições de operação da corrida na UP.

Processo	Material da membrana	Massa molecular de corte (kDa)	P_T (bar)	v (m/s)	Temperatura (°C)
UF	Celulose (CEL)	30	2	6,8	25

Antes do experimento propriamente dito, o sistema foi operado com água filtrada com o objetivo de ajustá-lo às condições de operação. Em seguida a alimentação - 20 L de água de coco adicionada de ácido ascórbico - foi transferida para o tanque, e assim que foi atingida a temperatura de operação a bomba foi colocada em funcionamento e foram ajustadas a pressão transmembrana e a vazão. A área da seção transversal do módulo da membrana, que corresponde ao espaço de passagem da alimentação, possui as seguintes dimensões: 35 mm x 2

mm. Assim uma vazão de 1,7 m³/h corresponde a uma velocidade tangencial sobre a membrana de 6,8 m/s. A válvula de saída de permeado foi então aberta e a massa de permeado foi coletada em intervalos determinados de tempo até a alimentação atingir fator de concentração mássico (FC) igual a 2. A área de permeação da membrana foi calculada considerando as seguintes dimensões: 49,6 cm x 3,5 cm.

4.4 DESEMPENHO DAS MEMBRANAS

4.4.1 Fluxo de permeado (J)

O fluxo de permeado (J) é definido como o volume ou massa que atravessa a membrana por unidade de área e tempo, e foi calculado de acordo com a Equação 5 (HABERT et al., 2006).

$$J = \frac{m_P}{A_P \cdot t} \quad (5)$$

Onde m_P é a massa de permeado no tempo t e A_P é a área de permeação.

4.4.2 Determinação da atividade enzimática

Para a determinação da atividade das enzimas polifenoloxidase e peroxidase no permeado foi utilizado um espectrofotômetro UV-Visível, marca Beckman, modelo DU® - 70, Intralab S.A, São Paulo-SP, segundo a metodologia de Sousa (2006), baseada na de Campos et al. (1996), com adaptações sugeridas por Sato (2009).

A atividade da enzima polifenoloxidase foi determinada utilizando-se catecol como substrato fenólico. Em uma cubeta de vidro foram adicionados 1,3 mL de solução tampão fostato 0,35 M (pH 6,0), 0,7 mL de catecol 0,2 M e 2 mL de água

de coco, à temperatura ambiente (25 °C), em seguida foi realizada a leitura da absorbância em espectrofotômetro a 425 nm no tempo zero e após 10 min.

A atividade da enzima peroxidase foi determinada utilizando-se guaiacol como substrato fenólico. Em uma cubeta de vidro foram adicionados 1,3 mL de tampão fosfato 0,35 M pH (5,5), levando-se ao banho-maria até atingir 35°C. Atingida a temperatura foi adicionado 2,0 mL de água de coco, 0,2 mL de peróxido de hidrogênio 0,1% e 0,5 mL de solução alcoólica de guaiacol 0,5% em etanol. A mistura foi agitada e a leitura da absorbância feita imediatamente em espectrofotômetro a 470 nm, no tempo zero e após 10 minutos.

Para a enzima peroxidase, após a primeira leitura no tempo zero, a cubeta voltou para o banho-maria até completar o tempo de reação, e então ser realizada nova leitura no tempo de 10 minutos.

Como branco, utilizou-se uma mistura de todos os reagentes, substituindo-se a água de coco por água destilada.

A atividade foi expressa em unidades/mL. Uma unidade equivale à variação de 0,001 na absorbância por minuto por mL de amostra. Para o cálculo da atividade foi utilizada a Equação 6.

$$Atividade(U / mL) = \frac{(AF_{amostra} - AI_{amostra}) - (AF_{branco} - AI_{branco})}{0,001 \times t} \quad (6)$$

Onde $AF_{amostra}$ é a absorbância final da amostra, $AI_{amostra}$ é absorbância inicial da amostra, AF_{branco} é a absorbância final do branco, AI_{branco} é a absorbância inicial do branco e t é o tempo.

A retenção enzimática foi calculada de acordo com a Equação 7.

$$\% R = 100 \cdot (1 - A_{perm}/A_A) \quad (7)$$

Onde % R é a porcentagem de redução, A_A é a atividade enzimática da alimentação e A_{perm} é a atividade enzimática do permeado.

4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DOS RESULTADOS

Os valores experimentais de fluxo obtidos tanto na UL quanto na UP foram ajustados ao modelo matemático baseado na teoria de renovação de superfície considerando FC constante, proposto na Equação 1 (item 3.6.2). O ajuste dos dados foi realizado utilizando o programa Statistica®, versão 7.0.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

5.1.1 Composição Físico-Química das frações obtidas

A Tabela 5.1 apresenta os resultados das análises físico-químicas para as amostras de alimentação e das frações obtidas (retentado e permeado) das corridas realizadas na unidade de laboratório utilizando as membranas de PES 150, PVDF 150, CEL 10, CEL 30 e PES 10.

Nos processos de separação com membranas observa-se a formação da camada polarizada, que constitui uma barreira a mais para o transporte de espécies químicas, o que explica a menor concentração de sólidos no permeado. Para a maioria dos experimentos, porém, os valores de sólidos totais não apresentaram diferenças significativas ($p \leq 0,05$) do retentado e permeado em relação a alimentação, exceto para o de UF que utiliza a membrana de PES 10, como pode ser observado na Tabela 5.1. Verifica-se que existe diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre o permeado (4,83 g/100 g) e a alimentação (5,56 g/100 g) e também entre o retentado (5,36 g/100 g) e permeado (4,83 g/100 g), mostrando que há uma maior concentração de sólidos no retentado.

O teor de sólidos solúveis é de grande importância nos frutos, tanto para o consumo *in natura* como para o processamento industrial, isso porque quanto maior o teor desses constituintes na matéria-prima menor adição de açúcares (PINHEIRO et al., 1984). Observa-se que há diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os retentados e permeados somente para os experimentos de UF que utilizaram as membranas de CEL 10 e PES 10, isso pode ser explicado não só pelo efeito da camada polarizada, como também pelo fato de serem as duas membranas de menor diâmetro de poro, dificultando a passagem desses constituintes através da membrana.

Tabela 5.1. Composição físico-química da alimentação e frações obtidas.

		Sólidos Totais (g/100 g)	Sólidos Solúveis (°Brix)	Cinzas (g/100 g)	pH	Acidez Total Titulável*	Acúcares Redutores (g/100 g)	Açúcares Totais (g/100 g)
Alimentação		5,56 ± 0,02 ^{ab}	5,20 ± 0,00 ^b	0,37 ± 0,01 ^{ab}	4,77 ± 0,02 ^a	89,30 ± 0,20 ^{bc}	4,01 ± 0,04 ^b	4,40 ± 0,20 ^{bcd}
PES 150	R	5,50 ± 0,12 ^{ab}	5,14 ± 0,00 ^c	0,37 ± 0,00 ^{ab}	4,77 ± 0,01 ^a	88,18 ± 1,65 ^{bdc}	4,44 ± 0,02 ^{ab}	4,81 ± 0,12 ^{abc}
	P	5,29 ± 0,24 ^b	5,14 ± 0,00 ^c	0,36 ± 0,01 ^{ac}	4,74 ± 0,02 ^a	86,06 ± 0,08 ^{cd}	4,23 ± 0,14 ^{ab}	4,56 ± 0,07 ^{abcd}
PVDF 150	R	5,50 ± 0,07 ^{ab}	5,24 ± 0,00 ^a	0,33 ± 0,01 ^{cd}	4,75 ± 0,07 ^a	88,97 ± 2,51 ^{bc}	4,28 ± 0,09 ^{ab}	4,50 ± 0,16 ^{bcd}
	P	5,75 ± 0,16 ^a	5,24 ± 0,00 ^a	0,34 ± 0,00 ^{cd}	4,78 ± 0,07 ^a	89,05 ± 0,30 ^{bc}	4,01 ± 0,08 ^b	4,13 ± 0,12 ^d
CEL 10	R	5,24 ± 0,03 ^b	5,24 ± 0,00 ^a	0,38 ± 0,01 ^{ab}	4,69 ± 0,03 ^a	90,90 ± 2,55 ^b	4,37 ± 0,08 ^{ab}	4,85 ± 0,41 ^{ab}
	P	5,49 ± 0,04 ^{ab}	5,02 ± 0,03 ^d	0,31 ± 0,01 ^d	4,75 ± 0,05 ^a	83,78 ± 1,41 ^d	4,10 ± 0,09 ^{ab}	4,29 ± 0,71 ^{bcd}
CEL 30	R	5,39 ± 0,25 ^b	5,04 ± 0,00 ^d	0,40 ± 0,00 ^a	4,72 ± 0,02 ^a	89,30 ± 1,13 ^{bc}	4,08 ± 0,05 ^{ab}	4,22 ± 0,15 ^{cd}
	P	5,48 ± 0,09 ^{ab}	5,04 ± 0,00 ^d	0,39 ± 0,00 ^{ab}	4,72 ± 0,01 ^a	88,34 ± 1,77 ^{bc}	4,06 ± 0,09 ^{ab}	4,60 ± 0,18 ^{abcd}
PES 10	R	5,36 ± 0,15 ^b	5,24 ± 0,00 ^a	0,32 ± 0,01 ^d	4,68 ± 0,07 ^a	104,24 ± 1,73 ^a	4,74 ± 0,15 ^a	5,15 ± 0,16 ^a
	P	4,83 ± 0,19 ^c	4,74 ± 0,00 ^e	0,26 ± 0,01 ^e	4,70 ± 0,01 ^a	76,56 ± 0,27 ^e	4,24 ± 0,15 ^{ab}	4,74 ± 0,16 ^{abcd}

* mg de ácido cítrico/100 g.

R = retentado; P = permeado.

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

Para o pH, não houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre a alimentação, retentado e permeado para todos os experimentos, os valores determinados estão condizentes com os encontrados na literatura para água de coco com aproximadamente 7 meses de maturação, na faixa de 4,7 a 4,9 (ARAGÃO, 2002).

Com relação a acidez total titulável, observou-se diferença significativa ($p \leq 0,05$) somente para as frações obtidas na UF que utilizaram as membranas CEL 10 e PES 10. Para a CEL 10 observa-se essa diferença entre as amostras de alimentação e permeado e entre o retentado e permeado, enquanto que para a PES 10 essa diferença se dá tanto entre alimentação e as frações quanto entre retentado e permeado. Os resultados de acidez mais elevados nos retentados podem ser explicados devido à concentração de ácidos não-dissociados, porém sem alterar a concentração de íons hidrogênio, uma vez que os valores de pH foram praticamente iguais para as frações em ambas as membranas. O mesmo comportamento foi observado no processo de MF e UF do suco de pitanga (ONGARATTO, 2009) e de MF do suco de tamarindo (WATANABE, 2007).

Os teores de açúcares redutores e totais apresentaram diferença significativa ($p \leq 0,05$) somente para o processo de UF que utilizou a membrana PES 10. Essa diferença se deu entre alimentação (4,01 g/100 g - açúcares redutores, e 4,40 g/100 g – açúcares totais) e retentado (4,74 g/100 g - açúcares redutores, e 5,15 g/100 g – açúcares totais), mostrando que ocorreu uma maior concentração destes no retentado. Pode-se dizer que houve retenção parcial de açúcares, devido à formação da camada polarizada que age como uma segunda barreira, aumentando, assim, a resistência ao transporte desse componente.

5.1.2 Análise de cor e turbidez

A Tabela 5.2 apresenta os resultados da análise de cor e turbidez para as amostras de alimentação e das frações obtidas (retentado e permeado) para as corridas realizadas na unidade de laboratório utilizando as membranas de PES 150, PVDF 150, CEL 10, CEL 30 e PES 10.

Tabela 5.2. Resultados para análise de cor da alimentação e das frações obtidas.

		Parâmetro L*	Parâmetro a*	Parâmetro b*	Haze
Alimentação		94,65 ± 0,01 ^{ab}	-0,31 ± 0,01 ^c	2,34 ± 0,01 ^c	23,64 ± 0,02 ^e
PES 150	R	94,48 ± 0,30 ^{ab}	-0,33 ± 0,01 ^c	2,21 ± 0,09 ^c	23,03 ± 0,52 ^e
	P	94,80 ± 0,08 ^{ab}	-0,52 ± 0,01 ^{ef}	0,84 ± 0,03 ^f	2,48 ± 0,02 ^{gh}
PVDF 150	R	94,46 ± 0,08 ^{ab}	-0,27 ± 0,00 ^b	2,53 ± 0,01 ^b	28,44 ± 0,42 ^d
	P	94,81 ± 0,02 ^{ab}	-0,49 ± 0,00 ^e	0,88 ± 0,01 ^{ef}	3,14 ± 0,04 ^g
CEL 10	R	94,43 ± 0,11 ^b	-0,27 ± 0,01 ^b	2,60 ± 0,03 ^b	29,40 ± 0,18 ^c
	P	94,81 ± 0,01 ^{ab}	-0,52 ± 0,00 ^f	0,88 ± 0,01 ^{ef}	1,99 ± 0,13 ^h
CEL 30	R	94,58 ± 0,07 ^{ab}	-0,07 ± 0,01 ^a	3,09 ± 0,03 ^a	36,33 ± 0,13 ^a
	P	94,80 ± 0,02 ^{ab}	-0,52 ± 0,01 ^{ef}	1,00 ± 0,01 ^{de}	2,88 ± 0,01 ^g
PES 10	R	94,44 ± 0,06 ^b	-0,25 ± 0,01 ^b	2,98 ± 0,04 ^a	32,21 ± 0,14 ^b
	P	94,88 ± 0,01 ^a	-0,46 ± 0,01 ^d	1,06 ± 0,00 ^d	5,44 ± 0,01 ^f

R = retentado; P = permeado.

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

Os parâmetros (L*, a* e b*) avaliados durante a análise de cor (Tabela 5.2) apresentaram uma tendência semelhante para todas as membranas, comparando alimentação, retentado e permeado. O parâmetro L* corresponde à luminosidade que varia de 0 (preto) a 100 (branco). Observa-se que tanto para a alimentação quanto as frações obtidas em todos os experimentos de MF e UF, o valor de L* é próximo de 100 (entre 94,44 e 94,88), ou seja, tem luminosidade tendendo ao claro. No estudo realizado por Magalhães et al. (2005) também foram encontrados valores de luminosidade próximos de 100 (entre 96,1 e 100), mostrando, assim, a mesma tendência. Observa-se que os valores encontrados no presente trabalho são inferiores ao encontrados por Magalhães et al., 2005 porém é uma diferença pouco expressiva e pode ser devida às diferenças nas propriedades da matéria-prima que variam de acordo com as condições de cultivo, estágio de maturação, dentre outros.

Os parâmetros a* e b* correspondem à cromaticidade, que para o a* varia de +a* (vermelho) a -a* (verde) e para o b* de +b* (amarelo) a -b* (azul). Observa-se na Tabela 5.2 que todos os valores de a* são negativos (tendendo ao verde) e todos os valores do b* são positivos (tendendo ao amarelo), porém todos

esses valores são próximos de zero. De fato quando realizada uma análise visual, observa-se que as frações obtidas não perdem a cor característica da água de coco. Não foram encontrados valores para os parâmetros a^* e b^* em estudos envolvendo a tecnologia de membranas aplicada à água de coco.

O Haze foi obtido para a medida da turbidez, quanto maior seu valor mais turva a solução. Entre a alimentação e os permeados obtidos observa-se que houve diferença significativa ($p \leq 0,05$), ou seja, houve redução da turbidez em todos os processos de MF e UF, variando de 76 a 92 % (Tabela 5.3), podendo ser comprovada quando realizada uma análise visual, uma vez que os permeados obtidos encontram-se transparentes. A redução foi calculada considerando o valor de Haze da alimentação como 100 % de turbidez.

Tabela 5.3. Porcentagem de redução da turbidez nos permeados obtidos para todas as membranas de MF e UF.

	Haze	Redução da turbidez (%)
Alimentação	23,64 ± 0,02 ^a	-
PES 150	2,48 ± 0,02 ^b	89,51
PVDF150	3,14 ± 0,04 ^c	86,72
CEL 10	1,99 ± 0,13 ^d	91,58
CEL 30	2,88 ± 0,01 ^e	87,82
PES 10	5,44 ± 0,01 ^f	76,99

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

Magalhães et al. (2005) e Sousa (2006) que também estudaram a micro e ultrafiltração da água de coco verde, também observaram redução na turbidez, como consequência da retenção, pela membrana, de sólidos em suspensão.

No estudo da UF, utilizando a membrana de diâmetro de poro de 10 kDa, realizado por Sousa (2006), foi encontrado um valor de Haze de 36,63 para a água de coco *in natura* e de 3,84 para o permeado obtido, o que resultou numa redução percentual da turbidez de 89%.

No estudo de Magalhães et al. (2005), ainda foi observado que a diferença de porosidade das membranas de MF (0,1 μm) e UF (100 kDa, 50 kDa e 20 kDa)

utilizadas não alterou significativamente a redução percentual da turbidez, que variou de 82 a 93%. Os valores de Haze encontrados para as alimentações estão na faixa de 7,8 a 10, enquanto que no presente trabalho o valor de Haze foi superior (23,64), essa diferença pode ser devido a matérias-primas de origem vegetal apresentar propriedades que variam de acordo com uma série de fatores, como por exemplo, condições de cultivo, estágio de maturação, etc. Mas apesar disso os valores de retenção são altos e próximos.

5.2 FLUXO DE PERMEADO

5.2.1 Unidade de Laboratório (UL)

As curvas de fluxo de permeado para os processos de MF utilizando as membranas PES 150 e PVDF 150 são mostrados na Figura 5.1 e Figura 5.2, respectivamente. Os resultados de fluxo de permeado a FC igual a 2 para essas membranas são apresentados na Tabela 5.4

Tabela 5.4. Fluxo de permeado a FC igual a 2 para as membranas de MF.

Membrana	Pressão (bar)	Fluxo a FC = 2 (kg/m ² .h)	Tempo de processo (min)
PES 150	0,5	144,45	17
	1,5	123,54	19,5
	2,0	301,16	8
PVDF 150	0,5	14,62	170
	1,5	72,62	35
	2,0	118,64	20

Mesmo as membranas de PES e PVDF possuindo o mesmo diâmetro de poro observaram-se valores de fluxo de permeado a FC igual a 2 (Tabela 5.4) de ordem diferente para as mesmas pressões de operação, isso se deve ao fato de a membrana de PVDF apresentar caráter mais hidrofóbico que a membrana de PES, visto que a água de coco se apresenta como uma solução aquosa (CHERYAN, 1998). Fato esse comprovado por Riedl et al. (1998), que avaliou o

fluxo de água para as membranas de 0,2 μm de PVDF e PES, encontrando fluxos de 3,24 e 8,69 $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$, respectivamente. Além do caráter hidrofóbico, vale também considerar a distribuição do tamanho dos poros, que pode variar (CHERYAN, 1998).

Com relação aos processos MF avaliados nesse trabalho também foi possível observar uma tendência de aumento do fluxo de permeado com o aumento da pressão de operação (Figura 5.1e Figura 5.2).

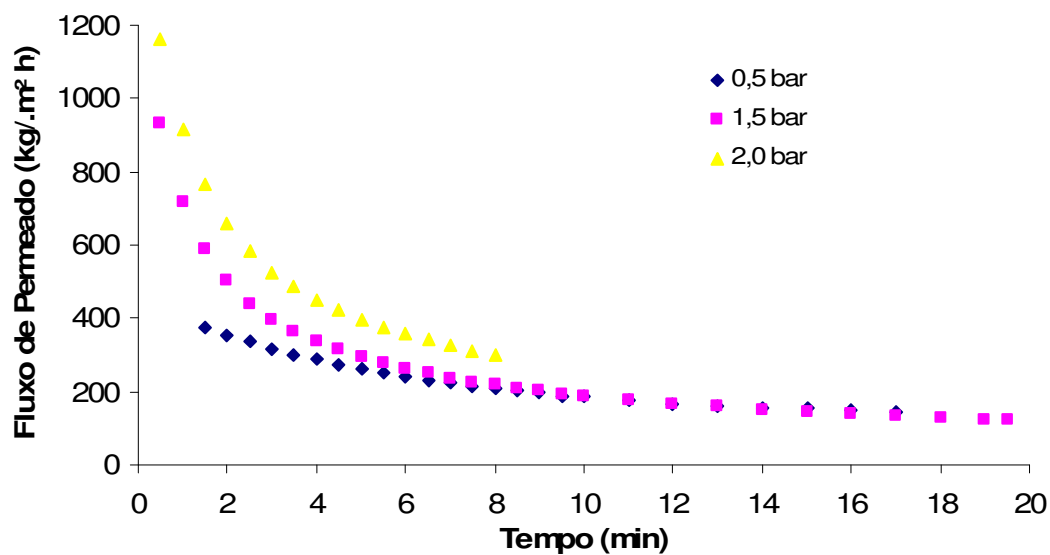


Figura 5.1. Curvas de fluxo de permeado para os processos de MF, utilizando a membrana de PES 150 kDa.

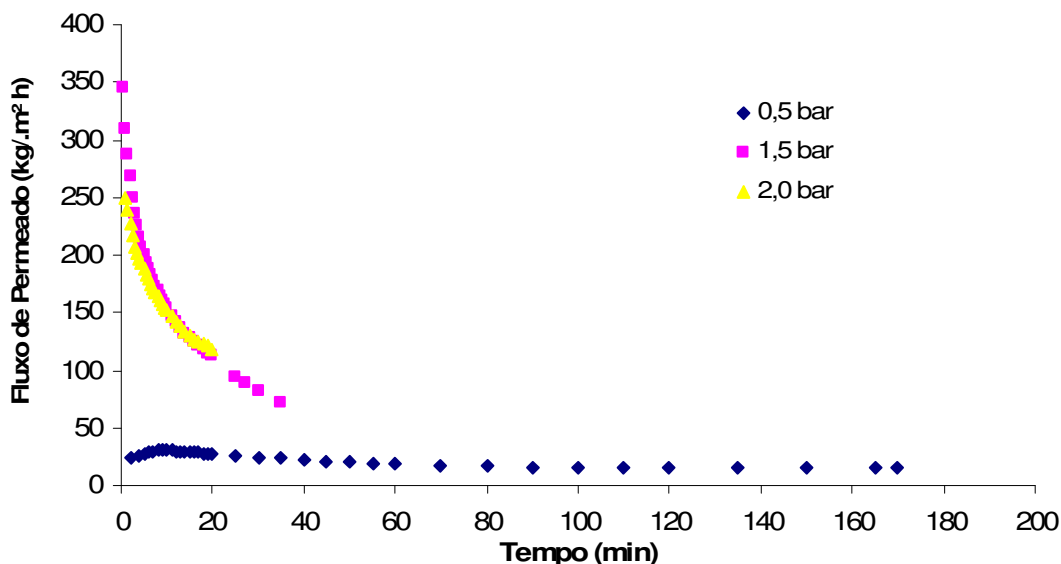


Figura 5.2. Curvas de fluxo de permeado para os processos de MF, utilizando a membrana de PVDF 150 kDa.

A partir da Figura 5.1 e Figura 5.2, é possível observar que as curvas de fluxo de permeado para ambas as membranas de MF a pressões de 1,5 e 2 bar, principalmente, ocorre queda do fluxo em função do tempo de operação apresentando curva exponencial típica de processo de MF e UF, segundo Marshall e Daufin (1995). Há redução acentuada do fluxo no início do processo, devido à existência dos fenômenos de polarização da concentração e formação da camada polarizada, e finalmente a tendência à estabilização ou queda suave do fluxo até o término do processo. Essa tendência final à estabilização não pode ser visualizada nas curvas para membrana PVDF 150 às pressões de 1,5 e 2 bar, porém isso possivelmente ocorreria, como visualiza-se nas curvas para membrana PES 150 às pressões de 0,5 e 1,5 bar.

As curvas de fluxo de permeado para os processos de UF utilizando as membranas CEL 10, CEL 30 e PES 10 são mostradas na Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5, respectivamente. Os resultados de fluxo de permeado a FC igual a 2 para essas membranas são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Fluxo de permeado a FC igual a 2 para as membranas de UF.

Membrana	Pressão (bar)	Fluxo a FC 2 (kg/m ² .h)	Tempo de processo (min)
CEL 10	2	47,03	52
	4	69,79	35
	6	105,27	23
CEL 30	2	97,89	25
	4	95,18	25
	6	102,91	24
PES 10	2	6,03	405
	4	15,54	154
	6	15,03	165

A diferença em relação ao caráter hidrofóbico entre as membranas de CEL e PES de mesmo diâmetro de poro também ocasiona diferença na ordem (entre aproximadamente 4 e 8 vezes) dos valores de fluxo de permeado para as diferentes pressões de operação, como pode ser observado na Tabela 5.5. Nesse caso, é a membrana de PES que apresenta caráter mais hidrofóbico, quando comparada com a membrana de CEL.

No processo de UF utilizando a membrana de CEL 10 observa-se, também, uma tendência de aumento do fluxo de permeado com o aumento da pressão de operação (Figura 5.3) e conseqüente diminuição do tempo de processo (Tabela 5.5). Esse fato não é observado para as membranas de CEL 30 (Figura 5.4) e PES 10 (Figura 5.5). Isso porque a pressões mais altas, que é o caso da UF, pode ocorrer um aumento da concentração de espécies retidas próximas à superfície da membrana, fenômeno denominado camada polarizada, que provoca queda no fluxo de permeado. Assim o aumento da pressão de operação, a partir de certo valor, faz com que a resistência ao transporte do solvente também aumente e o fluxo, conseqüentemente, permaneça praticamente inalterado (HABERT et al., 2006). Este fato foi observado para as membranas CEL 30 e PES 10, em que o aumento ou redução do fluxo são pouco expressivos.

Com relação ao comportamento das curvas de fluxo também é possível observar que a membrana CEL 10, mais especificamente à pressões de 2 e 6 bar (Figura 5.3), não apresentou comportamento típico dos processos de MF e UF,

como foi observado para as demais membranas. Observa-se no início do processo, ao invés de queda, a ocorrência de aumento do fluxo com posterior estabilização. Esse comportamento é denominado fluxo paradoxal, em que ocorre deposição de partículas menores na superfície da membrana, causando entupimento dos poros. Mas ao longo do processo essas partículas são arrastadas pela solução de permeado atravessando a membrana. Posteriormente ocorre a prevalência de partículas maiores na camada polarizada que acabam por favorecer o fluxo de permeado (GREEN; BELFORT, 1980).

Já para a membrana CEL 30 o comportamento das curvas, em todas as pressões de operação, apresenta comportamento típico, segundo Marshall e Daufin (1995).

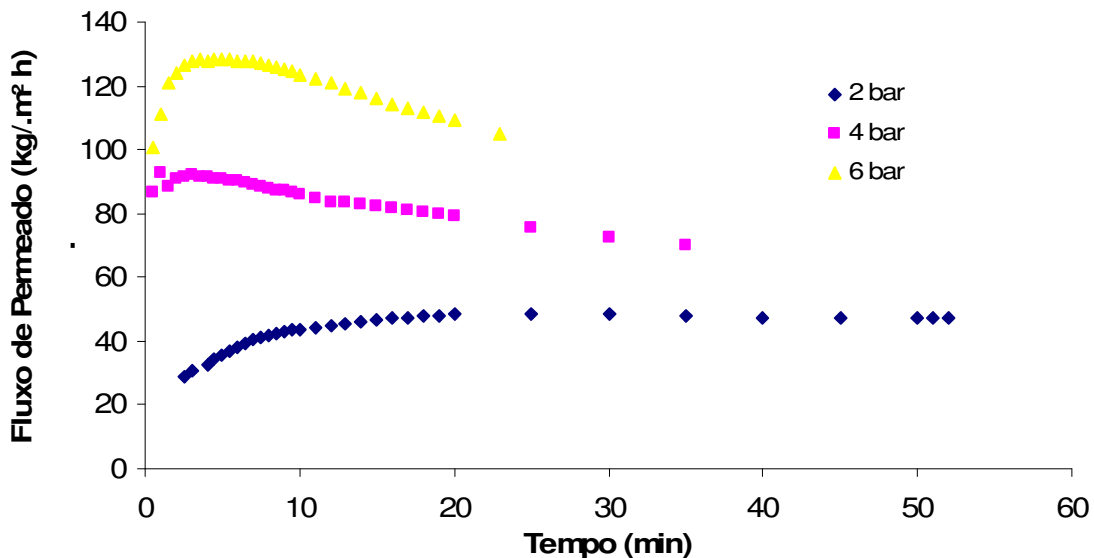


Figura 5.3. Curvas de fluxo de permeado para os processos de UF, utilizando a membrana de CEL 10 kDa.

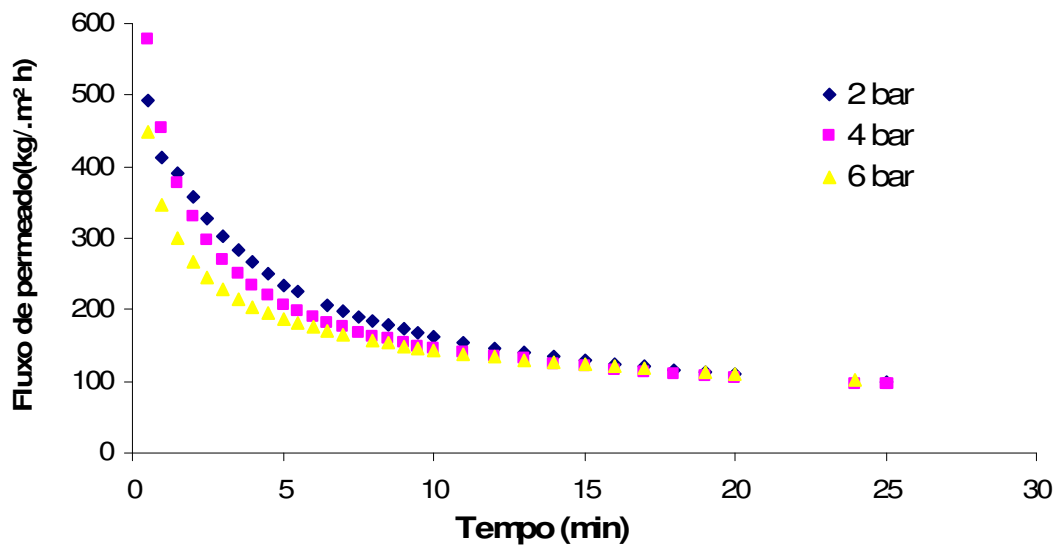


Figura 5.4. Curvas de fluxo de permeado para os processos de UF, utilizando a membrana de CEL 30 kDa.

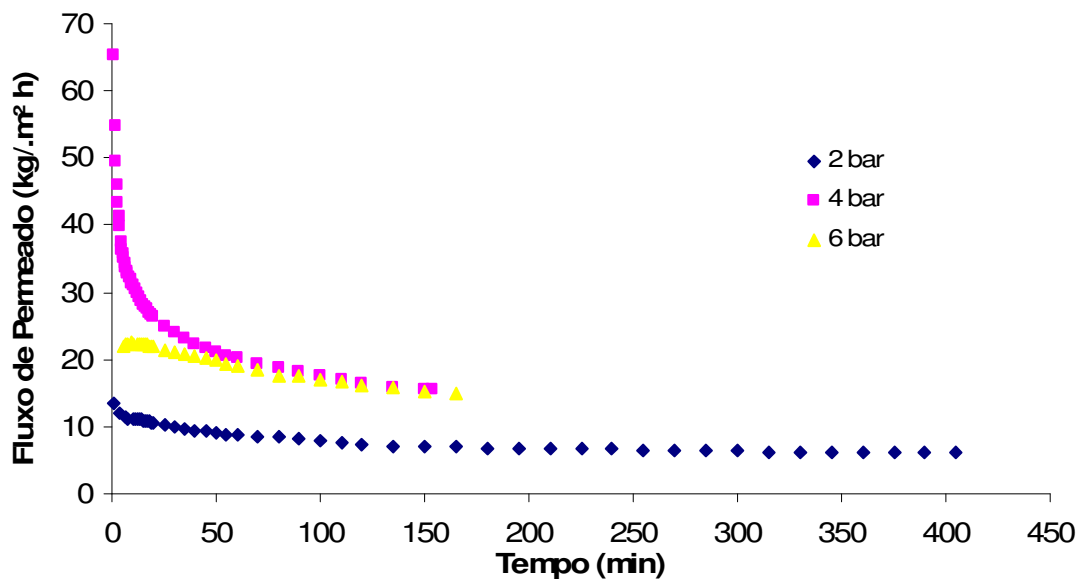


Figura 5.5. Curvas de fluxo de permeado para os processos de UF, utilizando a membrana de PES 10 kDa.

Comparando os valores de fluxo a FC igual a 2, em todos os processos de MF e UF submetidos à mesma pressão (2 bar), pode-se observar que quanto maior o diâmetro de poro maior o fluxo de permeado. Principalmente em relação à

membrana PES 150 (301, 16 kg/m².h) quando comparada com as membranas CEL 10 (47,03 kg/m².h), CEL 30 (97,89 kg/m².h) e PES 10 (6,03 kg/m².h). Chamchong e Noomhorm (1991) e por Fukumoto et. al. (1998) avaliaram o efeito do diâmetro de poro de membranas de MF e UF no fluxo de permeado e observaram o contrário. Membranas de MF e UF de menor diâmetro de poro apresentaram melhores resultados de fluxo, o que pode ser explicado devido à maior suscetibilidade das membranas de maior diâmetro de poro ao entupimento, fato este que influencia no comportamento de fluxo.

Magalhães et al. (2005) também observou esse fato em relação as membranas de MF de 0,1 µm e de UF de 100 kDa. No processo de MF o fluxo foi inferior ao obtido na UF, sendo esse comportamento explicado pela ocorrência de incrustação. As moléculas ou partículas que permeiam através dos poros da interface membrana-alimentação ficam retidas no interior dos mesmos, causando um fenômeno irreversível (entupimento ou bloqueio dos poros), diminuindo a porosidade da membrana irreversivelmente e, assim, resultando em maior queda do fluxo.

Ainda no estudo de Magalhães et al. (2005), em todos os experimentos de MF e UF observam-se que as curvas de fluxo apresentam o mesmo comportamento, também caracterizado pela queda de fluxo ao longo do processo (comportamento típico). Observou-se também pouca variação entre os comportamentos dos fluxos das membranas de 0,1 µm e 100 kDa, onde o fluxo médio foi de 12 L/m².h, e entre as membranas de 20 e 50 kDa, onde o fluxo médio foi de 3,7 L/m².h.

Sousa (2006), em seu estudo da UF da água de coco, realizou testes preliminares a fim de avaliar o desempenho das membranas de diâmetro de poro de 50 e 10 kDa. O comportamento das curvas de fluxo de permeado também foi o mesmo, queda acentuada no início do processo com posterior estabilização. O fluxo no início foi de 130 kg/m².h, mostrando uma queda de 50 % e estabilizando em 60 kg/m².h, para ambas as membranas.

5.2.2 Unidade Piloto (UP)

A membrana CEL 30 foi selecionada para a realização do ensaio na UP por apresentar elevados fluxos de permeado ($97 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ à 2 bar) na UL (item 5.2.1) e 100 % de retenção enzimática (item 5.3). O comportamento das curvas de fluxo é típico de processos de UF, observando-se ainda ótima repetibilidade do mesmo a diferentes pressões de operação utilizadas.

A curva de fluxo de permeado para o processo de UF em escala piloto utilizando a membrana de CEL 30 é mostrada na Figura 5.6. O fluxo de permeado a FC igual a 2 é de $288 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$, sendo mais elevado do que o encontrado em escala laboratorial, isso devido ao efeito da velocidade tangencial. Foi obtida uma vazão volumétrica média de $1,7 \text{ m}^3/\text{h}$, o que corresponde a uma velocidade média de $6,8 \text{ m/s}$.

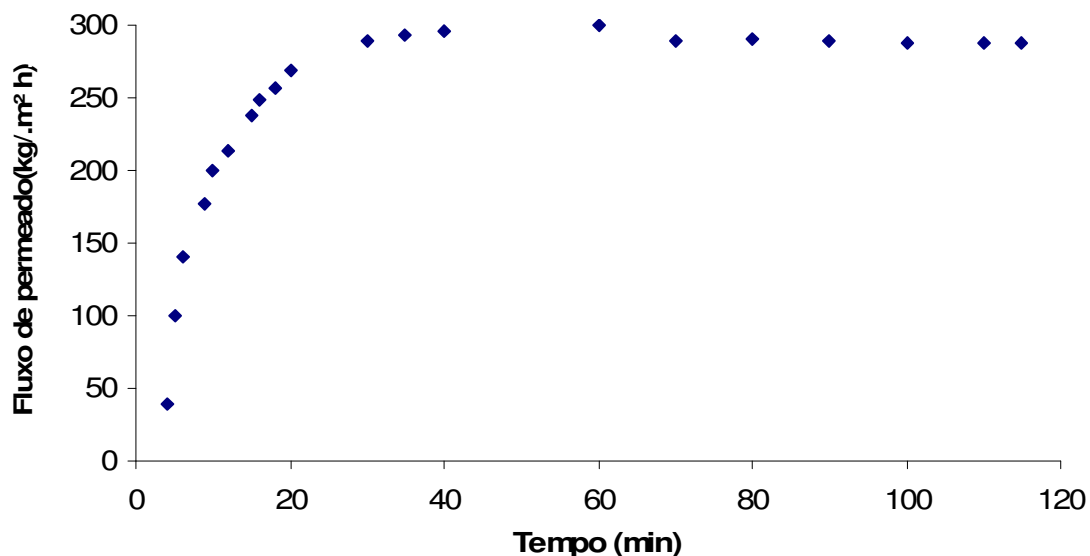


Figura 5.6. Curva de fluxo de permeado para o processo de UF, utilizando a membrana de CEL 30 kDa, em UP.

O comportamento do fluxo do processo de UF em escala piloto utilizando a membrana CEL 30 é diferente do observado na unidade de laboratório, ocorre aumento do fluxo ao invés de queda no início do processo, com posterior

estabilização. Este fenômeno de aumento do fluxo de permeado com o tempo é denominado fluxo paradoxal.

Nessa situação a alimentação apresenta em sua composição vários compostos diferentes, e alguns deles apresentam ampla distribuição de tamanho de partículas. Assim, inicialmente, ocorre a deposição de partículas menores que causam o entupimento dos poros da membrana e que ao longo do processo são arrastadas pela solução de permeado atravessando a membrana. Posteriormente ocorre prevalência de partículas maiores na camada polarizada que acabam por favorecer o fluxo de permeado, pois essa deposição formada sobre a área da membrana é bem porosa, já que as partículas são maiores, e conseqüentemente, ocorre aumento do fluxo (GREEN; BELFORT, 1980).

No estudo da microfiltração tangencial do suco de maracujá após liquefação enzimática parcial, Vaillant et al. (1999) observou, também, a ocorrência do fluxo paradoxal. Nos primeiros minutos do processo houve queda do fluxo, provavelmente devido à polarização da concentração e formação da camada polarizada, porém em seguida ocorreu aumento do fluxo.

A hipótese do fluxo paradoxal sinaliza que há mudança na composição e no arranjo da interface alimentação-membrana. Sendo assim, mudanças na estrutura conseqüentemente geram alterações na resistência à passagem facilitando ou não o fluxo de permeado.

5.3 ATIVIDADE ENZIMÁTICA

A Tabela 5.6 apresenta os resultados da atividade enzimática da alimentação e dos permeados obtidos nos processos de MF e UF, assim como a porcentagem de retenção enzimática.

Tabela 5.6. Atividade enzimática da alimentação e dos permeados obtidos na MF e UF.

		PFO		POD	
		Atividade (U/mL)	Retenção (%)	Atividade (U/mL)	Retenção (%)
MF	Alimentação	2,61 ± 0,30	-	7,22 ± 0,23	-
	PES 150	0,39 ± 0,04	85,06	1,56 ± 0,22	78,39
	PVDF 150	0,70 ± 0,43	73,18	2,07 ± 0,03	71,33
UF	CEL 10	0	100	0	100
	CEL 30	0	100	0	100
	PES 10	0	100	0	100

Comparando os resultados da atividade enzimática da água de coco antes e depois dos processos de MF e UF, é possível concluir que os processos de UF foram os mais eficientes na retenção das enzimas PFO e POD. Para os processos de MF também observou-se uma porcentagem de retenção, porém inferior a 100 %.

Na água de coco *in natura* a atividade da enzima PFO foi de 29,6 U/mL e da POD foi de 38,7 U/mL, sendo a atividade da POD mais expressiva que da PFO. Isso ainda é observado após a adição de ácido ascórbico (alimentação). Esse fato também foi observado por Campos et al. (1996), que encontrou uma atividade de 32,1 U/mL para a enzima PFO e de 114,3 U/mL para a enzima POD na água de coco *in natura*. A diferença na atividade das enzimas, considerando a água de coco *in natura*, é devida provavelmente a diferenças nas propriedades da matéria-prima que variam de acordo com o estágio de maturação, condições de cultivo, dentre outros.

Sousa (2006) avaliou o processo de produção de água de coco adicionada de ácido ascórbico por ultrafiltração utilizando uma membrana de diâmetro de poro de 10 kDa e também observou que a atividade da enzima POD (27,2 U/mL) foi mais expressiva que da enzima PFO (2,70 U/mL), e obteve também 100 % de retenção para ambas enzimas. Concluiu também que as enzimas POD e PFO foram retidas pela membrana de UF independentemente da formação da camada

polarizada, uma vez que foram coletadas amostras de permeado para análise no início do processo, tendo como resultado atividade zero.

Segundo Duarte (2000), a enzima POD da água de coco utilizada em seu estudo apresentou massa molecular de 49,2 kDa, quando analisada por cromatografia por gel filtração, e de 44,63 kDa, quando analisada por eletroforese em gel de poliacrilamida. Sendo assim é esperado que essa enzima passe pelos poros das membranas de MF, o que realmente foi observado, uma vez que os permeados obtidos nos processos MF apresentaram atividade dessa enzima.

Rodrigues et al. (2003) avaliaram o emprego da ultrafiltração do suco de banana visando sua clarificação e remoção da enzima polifenoloxidase. Para as membranas de massa molecular de corte de 10 e 30 kDa a redução dessa enzima foi de 97,5 e 96,2 %, respectivamente.

5.4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Os dados experimentais de cada corrida foram utilizados para realizar o ajuste ao modelo matemático baseado na teoria de renovação de superfície representado na equação 1. Os valores experimentais de J_0 (Fluxo de permeado inicial) e J_F (Fluxo de permeado final) e os parâmetros " λ " (taxa de declínio) e R^2 (coeficiente de determinação) para os processos de MF e UF nas unidades de laboratório e piloto são apresentados na Tabela 5.7. Os gráficos com os dados experimentais e as respectivas curvas obtidas através do modelo estão apresentados no apêndice, no item A.3.

De um modo geral, o modelo consegue representar o comportamento das curvas de fluxo de permeado obtidas experimentalmente, visto que foram obtidos coeficientes de determinação superiores a 0,8, salvo algumas exceções, que é o caso da membrana PVDF 150 submetida a pressão de 0,5 bar e da membrana CEL 10 a 6 bar.

O parâmetro " λ " está associado à taxa de declínio do fluxo de permeado, ou seja, quanto mais acentuada a queda do fluxo nos primeiros minutos do

experimento (estágio I da curva descrita por Marshall e Daufin (1995), Figura 3.5) maiores valores de “ λ ” devem ser esperados.

O modelo baseado na teoria de renovação de superfície representa o fluxo como uma função do tempo, considerando FC constante. Apesar de o FC ser variável ao longo dos processos de MF e UF do presente trabalho, observa-se que ainda assim ele consegue representar os dados experimentais.

Tabela 5.7. Parâmetros obtidos para o modelo de renovação de superfície na UL.

Unidade	Processo	Membrana	Pressão (bar)	J_0 (kg/m ² .h)	J_F (kg/m ² .h)	λ (h ⁻¹)	R ²
Laboratório	MF	PES 150	0,5	373,38	144,45	8,770	0,9219
			1,5	933,13	123,54	18,926	0,9686
			2,0	1162,97	301,16	25,375	0,9633
		PVDF 150	0,5	23,17	14,62	0,422	0,3085
			1,5	344,89	72,62	7,778	0,9562
			2,0	249,76	118,64	8,143	0,9746
	UF	CEL 10	2,0	29,11	47,03	8,352	0,8634
			4,0	86,40	69,79	7,861	0,8315
			6,0	100,60	105,27	211,74	0
		CEL 30	2,0	491,60	97,89	11,779	0,9883
			4,0	578,46	95,18	17,363	0,9588
			6,0	447,95	102,92	17,017	0,9414
		PES 10	2,0	13,51	6,03	1,173	0,9218
			4,0	65,44	15,54	7,610	0,8134
			6,0	22,03	15,03	0,574	0,8630
Piloto	UF	CEL 30	2,0	38,88	288,37	5,593	0,9128

Observa-se que para a maioria dos experimentos em que se tem alto fluxo de permeado inicial, a taxa de declínio também é alta ($\lambda > 11,77 \text{ h}^{-1}$), mostrando a ocorrência de uma queda acentuada do fluxo de permeado no início do processo.

Koltuniewicz e Field (1996), no estudo da aplicação da microfiltração para a remoção de emulsões tipo óleo em água, utilizaram o modelo baseado na teoria de renovação de superfície para ajustar os dados experimentais obtidos tanto na filtração perpendicular quanto na filtração tangencial. Foi observado que esse

modelo representou melhor aos dados obtidos na filtração tangencial, no caso dos experimentos em questão ocorreu o contrário para a UF da água de coco utilizando a membrana CEL 30, o modelo representou melhor aos dados obtidos na filtração perpendicular ($R^2 = 0,98$), que é o caso da unidade de laboratório, do que na filtração tangencial ($R^2 = 0,91$), que é o caso da unidade piloto.

Ainda comparando os processos de UF utilizando a membrana CEL 30 em unidade de laboratório e piloto, observa-se que o parâmetro “ λ ” apresenta menor valor para a unidade piloto, mostrando que o fluxo atinge um valor constante mais rapidamente, de acordo com as curvas apresentadas na Figura 5.4 e Figura 5.6.

6 CONCLUSÃO

Os permeados obtidos, enquanto água de coco clarificada, tanto nos processos de MF quanto no de UF, mostraram-se transparentes e apresentaram sabor e aroma característicos da água de coco.

A partir das análises físico-químicas pode-se concluir que na maioria dos experimentos não houve diferenças significativas entre alimentação, retentado e permeado, quanto ao teor de sólidos totais, pH, acidez total titulável, açúcares redutores e totais. Houve redução acentuada da turbidez, maior que 77%, para todos os processos de MF e UF.

Nos processos de UF na unidade de laboratório, os valores de fluxo de permeado mais elevados foram encontrados nos experimentos que utilizaram as membranas CEL 10 (47 – 105 kg/m².h) e CEL 30 (97 – 102 kg/m².h). E para os processos de MF nos experimentos que utilizaram a membrana PES 150 (144 – 301 kg/m².h).

Para todos os processos de UF a retenção enzimática foi de 100 %, visto que não foi identificada atividade enzimática na solução permeada. Já para os processos de MF a retenção enzimática foi relativamente alta, porém não satisfatória, uma vez que foi identificada atividade enzimática na solução permeada.

O resultado de fluxo de permeado em escala piloto (288,37 kg/m².h) foi mais elevado do que o obtido em unidade de laboratório (97,89 kg/m².h), utilizando mesma membrana (CEL 30) e operando a mesma pressão (2 bar), mostrando o efeito positivo da velocidade tangencial.

De um modo geral, o modelo baseado na teoria de renovação de superfície representou bem os dados experimentais obtidos tanto em unidade de laboratório ($R^2 > 0,8$) quanto em unidade piloto ($R^2 = 0,91$).

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do estudo realizado nesse trabalho, surgiram algumas sugestões para estudos futuros envolvendo a aplicação da tecnologia de membranas na produção de água de coco, tais como:

- Avaliar o efeito de diferentes condições operacionais (pressão, temperatura e velocidade) sobre o fluxo de permeado na unidade piloto;
- Avaliação sensorial do permeado obtido, enquanto água de coco clarificada;
- Estudar a possibilidade de aproveitamento do retentado obtido em processos e/ou produtos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F. A. P. de e ROSA, M. de F. **Água de coco: Métodos de Conservação**. Documentos nº 37. Fortaleza: Embrapa-CNPAT/SEBRAE/CE, 2000. 40p.

ABREU, F. A. P. Processo de conservação da água de coco por métodos combinados. **Patente** DEINPI/CE N°000129, Setembro, 1999.

ADAMS, J. B. The inactivation and regeneration of peroxidase in relation to the high temperature – short time processing of vegetables. **Journal Food Technology**, v. 13, p. 281-297, 1978.

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

ARAGÃO, W. M. (Ed.) **Coco. Pós-colheita**. Aracajú: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2002. 76p.

ARAGÃO, W. M. A importância do coqueiro anão, 2000. Disponível em: <http://www.sede.embrapa.br/noticias/artigos/2000/artigos>. Acessado em: junho de 2008.

ARAGÃO, W. M.; CRUZ, E. M. de O.; HELVÉCIO, J. S. Caracterização morfológica da noz e química da água de coco em cultivares de coqueiro anão (*Cocos nucifera* L.), 2003. Disponível em: <http://www.sbmp.org.br/cbmp2001area3/03resumo252.htm>. Acessado em junho de 2008.

ARAGÃO, W. M.; ISBERNER, I. V.; CRUZ, E. M. **Água de coco**. Aracajú: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. 32p.

BAKER, R.W. **Membrane Technology and Applications**. 2nd.ed. California: John Wiley & Sons, 2004. 538p.

BENASSI, A. C. **Características do Coco**. Disponível em: <http://www.todafruta.com.br>. Acessado em: 04 de outubro de 2009.

BRUIJN, J. P.; VENEGAS, A.; MARTÍNNEZ, J. A.; BÓRQUEZ. Ultrafiltration performance of Carbosep membranes for the clarification of apple juice. **Lebensmittel Wissenschaft and Technology**. V. 36, p. 397-406, 2003.

CAMPOS, C. F. **Desenvolvimento de processos térmico e químico para inativação enzimática e preservação do sabor da água de coco verde (*Cocos nucifera* L.)**. Belo Horizonte, 1993. 140 p. Tese (Mestrado em Ciência de Alimentos). Faculdade de Farmácia – Universidade Federal de Minas Gerais.

CAMPOS, C. F. et al. Chemical composition, enzyme activity and effect of enzyme inactivation of flavor quality of green coconut water. **Journal of Food Processing and Preservation**, n.20, p.487-500, 1996.

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 Publishing Company, 1998. 527p.

CHILAKA, F.C.; EZE, S.; ANYADIEGWU, C.; UVERE, P. O. Browning in processed yams: peroxidase or polyphenol oxidase? **Journal of Science Food Agricultural**, v. 82, p. 899-903, 2002.

CTENAS, M. L.; CTENAS, A. C.; QUAST, D. Coco. In: CTENAS, M. L.; CTENAS, A. C.; QUAST, D. **Frutas das Terras Brasileiras**. São Paulo: C2, 2000, p. 99-103.

CUENCA, M. A. G.; RESENDE, J. M.; SAGGIN JÚNIOR, O. J.; REIS, C. S. Mercado brasileiro do côco: situação atual e perspectivas. In: ARAGÃO, W. M. **Côco: pós-colheita**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2002. p. 18.

CUPERUS, F. P.; NIJHUIS, H. H. Applications of membrane technology to food processing. **Trends in Food Science & Technology**. v.4, sep, p. 277-282, 1993.

CURSINO, M. M.; SRUR, A. S.; LOURENÇO, M.; PEREIRA, W. Contribuição à industrialização da água de coco (*Cocos nucifera*) verde. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 15, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: SBCTA, 1996.

DAVID, P.R.B.S.; FERNANDES, Z.F. Conservação de água de coco por refrigeração. **Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos**, Curitiba, v.16, n.1, p.1-12, jan/jun, 1998.

DUARTE, A. C. P. **Caracterização das enzimas peroxidase e tirosinase presentes na água de coco verde**. Tese de mestrado. Escola de Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2000.

DZIEZAK, J. D. Membrane separation technology offers processors unlimited potencial. **Food Technol.** 44 (9): 108-13, 1990.

FATIBELLO-FILHO, O.; VIEIRA, I. C. Uso analítico de tecidos e de extratos brutos de vegetais como fonte enzimática. **Química Nova**, v. 25, n. 3, p. 455-464, 2002.

FUKUMOTO, L. R.; DELAQUIS. P. GIRARD, B. Microfiltration and ultrafiltration ceramic membranes for apple clarification. **Journal of Food Science**. V.63, n.5, 1998.

GEKAS, V.; BARALLA, G.; FLORES, V. Aplicaciones de la tecnología de membranas en la industria alimentaria. **Food Science and Technology International**. v.4(5), p. 311-328, 1998.

GIRARD, B.; FUKUMOTO, L. R. **Membrane Processing of Fruit Juices and Beverages: A Review**. *Critical Reviews in Biotechnology*, 20 (2): 109-175, 2000.

GONZALEZ, O. N. Coconut-based beverages. **Journal of Food Processing and Preservation**, n. 20, p. 487-500, 1990.

GREEN, G; BELFORT, G. Fouling of ultrafiltration membranes: lateral migration and particle trajetori model. **Desalination**, v. 35, p. 129–147, 1980.

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

HUNTERLAB. **Cie L*a*b* Color Scale**. Applications Note. “s.l.” Vol.8, nº, jul, 1996.

KOLTUNIEWICZ, A. B.; FIELD, R. W. Process factors during removal of oil in-water emulsions with crossflow microfiltration. **Desalination**, Amsterdam, v.105, p.79-89, 1996.

LUVIELMO, M. de M.; VASCONCELOS, M. A. M. de; MARQUES, G. R.; SILVA, R. P. G.; DAMÁSIO, M. H. Influência do processamento nas características sensoriais da água de coco. **Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos**. Curitiba, vol 22, n. 2, jul/dez 2004.

MACIEL, M. I.; OLIVEIRA, S. L.; SILVA, I. P. Effects of different storage conditions on preservartion of coconut (*Cocos nucifera*) water. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 16, p. 13-22, 1992.

MAGALHÃES, M. P. et al. Conservação de água de coco verde por filtração com membrana. **Ciência e tecnologia de Alimentos**. Campinas, 2005.

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.

MAYER A. M.; HAREL, E. Phenoloxidasas and their significance in fruit and vegetables. IN: FOX, P. F. **Food Enzymology**. New York: Elsevier Applied Science, 1991. v. 1, Chap 9, p. 373-398.

MEDINA, J. C. et al. **Coco** – da cultura ao processamento e comercialização. Série Frutas Tropicais – 5, Instituto de Tecnologia de Alimentos – ITAL, Campinas, Governo do Estado de São Paulo, 1980. 285p.

MENDONÇA, S. C.; GUERRA, N. B. Métodos físicos e químicos empregados no controle do escurecimento enzimático de vegetais. **Bol. SBCTA**, v. 37, n. 2, p. 113-118, 2003.

MULDER, M. **Basic Principles of Membrane Technology**. 2nded. [s.i.]: Kluwer Academic Publishers, 1997. 564p.

NEBESKY, E. A.; ESSELEN, W. B.; KAPLAN, A. M.; FELLERS, C. R. Thermal destruction and stability of peroxidase in acid foods, **Food Research**, n. 15, p.114, 1950.

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

OSADA, Y.; NAKAGAWA, T. **Membrane Science and Technology**. New York: Marcel Dekker, 1992. 467p.

OSTERGAARD, B. **Applications of membrane processing in the dairy industry**. Diarmuid MacCarthy. In: Concentration and Drying of Foods, Elsevier Applied Science Publishers, England, 1989, p. 133-145.

PINHEIRO, R. V. R.; MARTELETO, L. O.; SOUZA, A. C. G. de; CASALI, W. D.; CONDÉ, A. R. Produtividade e qualidade dos frutos de dez variedades de goiaba, em Visconde do Rio Branco, Minas Gerais, visando ao consumo ao natural e à industrialização. **Revista Ceres**, Viçosa, v.31, p.360-387, 1984.

PUMMER, S.; HEIL, P.; MALECK, W.; PETROIANU, G. Influence of coconut water on hemostasis. **American Journal of Emergency Medicine**, v. 19, n. 4, p. 287-289, jul. 2001.

RIEDL, K.; GIRARD, B.; LENCKI, R. W. Influence of membrane structure on fouling layer morphology during apple juice clarification. **Journal of Membrane Science**, Amsterdam, v.139, p.155-166, 1998.

ROBINSON, D. S. Peroxidases and their significance in fruits and vegetables. IN: FOX, P. F. **Food Enzymology**. New York: Elsevier Applied Science, 1991. vol. 1, Chap 9, p. 399-426.

RODRIGUES, S. L. C. et al. Avaliação de parâmetros de ultrafiltração de suco de banana. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v.23, Campinas 2003.

SAPERS, G. M. Browning of foods: control by sulfites, antioxidants and other means. **Food Technology**, p. 75-84, oct., 1993.

SATO, H. H. Professora Doutora do Departamento de Ciência dos Alimentos – Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) / UNICAMP. **Comunicação pessoal**. Campinas, Fev/Mar. 2009.

SIQUEIRA, E. R.; RIBEIRO, F. E.; ARAGÃO, W. M. Melhoramento genético do coqueiro. In: FERREIRA, J. M. S.; WARWICK, D. R. N.; SIQUEIRA, L. A. (Ed.). **Cultura do coqueiro no Brasil**. Aracaju: Embrapa- SPI, 1994. p.87-120.

SOUSA, C. R. de. **Avaliação do processo de produção de água de coco (*Cocos nucifera*) por ultra filtração e envase asséptico em garrafas de vidro**. Campinas, 2006. 138 p. Tese (Mestrado em Tecnologia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Campinas.

STRATHMANN, H. Synthetic membranes and their preparation. In: PORTER, M. C. (Ed.) **Handbook of industrial membrane technology**. New Jersey: Noyes Publications, 1990.

SVENSSON, S. Inactivation of enzymes during thermal processing. IN: HOYEN, T.; KYALE, O. **Physical, chemical and biological changes in food caused by thermal processing**. London: Applied Science Publisher, 1977. Chap. 12, p. 203-217.

TOCCHINI, R. **Água de coco**. Apostila de curso de Tecnologia de Bebidas. Frutotec. ITAL. Campinas, set.1998.

VAILLANT, F.; MILLAN, P.; O'BRIEN, G.; DORNIER, M.; DECLoux, M.; REYNES, M. Crossflow microfiltration of passion fruit juice after partial enzymatic liquefaction. **Journal of Food Engineering** v. 42 ,p. 215 –224, 1999.

VAL, A. J. **Coco: o falso baiano**. Globo Rural 6, p.49-54, 1992.

VÁMOS-VIGYÁZÓ, L. Polyphenol oxidase and peroxidase in fruits and vegetables. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 15, n. 1, p. 49-126, 1981.

VLADISAVLJEVI, G. T.; VUKOSAVLJEVI, P.; BUKVI, B. Flux and fouling resistance in ultrafiltration of depectinized apple juice using ceramic membranes. **Journal of Food Engineering**, 2003.

WALKER, J. R. L. Enzymatic browning in fruits – its biochemistry and control. In: LEE, C. Y.; WHITAKER, J. R. **Enzymatic browning and its prevention**. Washington: American Chemical Society, 1995. Chap. 2, p. 9-22.

WATANABE, A. P. **Microfiltração de suco de tamarindo (Tamarindus indica L.) por membrana polimérica: efeito do tratamento enzimático, da velocidade tangencial e da pressão transmembrana**. 2007. 95f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2007.

WHITAKER, J. R. **Principles of enzymology for the food science**. New York: Marcel Dekker, 1972, 636 p.

WOSIACKI, G; DEMIATE, I. M.; MELLO, F. Nata de coco – o estado da arte. **Boletim Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, n. 2, p. 142-155, 1996.

A. APÊNDICE

A.1 CURVAS DE FLUXO DE PERMEADO (UNIDADE DE LABORATÓRIO)

A.1.1 Microfiltração

Tabela A.1. Dados experimentais para microfiltração, utilizando a membrana PES 150 à 0,5 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
1,5	0,0481	373,38	1,13
2	0,06095	354,84	1,17
2,5	0,07215	336,04	1,21
3	0,08177	317,37	1,24
3,5	0,09085	302,24	1,28
4	0,09868	287,25	1,31
4,5	0,10561	273,27	1,34
5	0,11192	260,63	1,37
5,5	0,11821	250,26	1,39
6	0,12386	240,37	1,42
6,5	0,12918	231,41	1,45
7	0,1342	223,23	1,47
7,5	0,13904	215,86	1,50
8	0,14357	208,96	1,52
8,5	0,14784	202,52	1,55
9	0,15185	196,46	1,57
9,5	0,155	189,98	1,59
10	0,15975	186,01	1,62
11	0,16685	176,61	1,67
12	0,1737	168,54	1,71
13	0,18156	162,62	1,77
14	0,18988	157,92	1,83
15	0,19726	153,12	1,89
16	0,2042	148,60	1,96
17	0,2109	144,45	2,02

* os primeiros pontos foram desconsiderados no ajuste ao modelo matemático devido a variações no início do experimento, onde o sistema ainda está se ajustando às condições do processo.

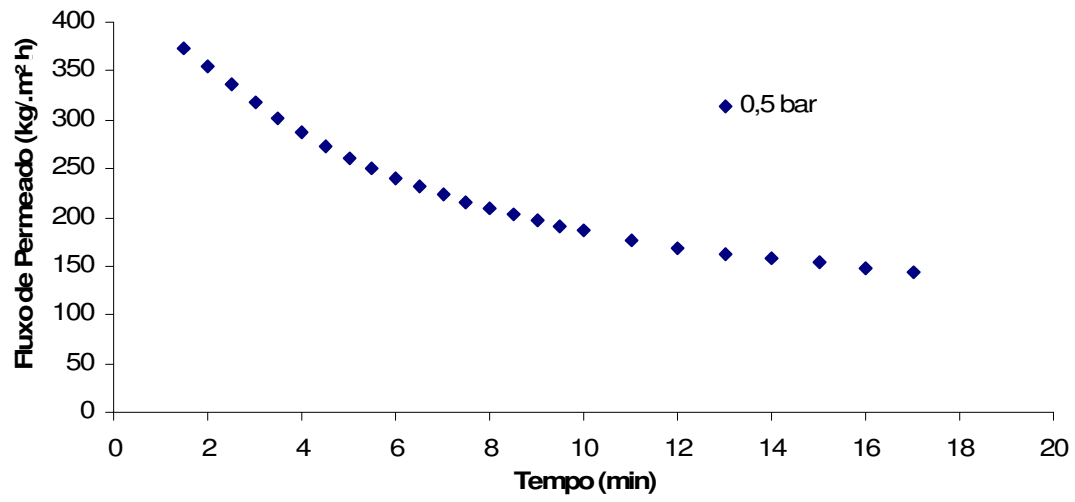


Figura A.1. Curva de fluxo acumulado de permeado para microfiltração, utilizando membrana de PES 150 a 0,5 bar.

Tabela A.2. Dados experimentais para microfiltração, utilizando a membrana PES 150 à 1,5 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
0,5	0,04007	933,13	1,11
1	0,06183	719,93	1,18
1,5	0,07587	588,94	1,23
2	0,08637	502,83	1,27
2,5	0,09475	441,30	1,30
3	0,10259	398,18	1,33
3,5	0,10975	365,11	1,37
4	0,1159	337,38	1,39
4,5	0,12148	314,33	1,42
5	0,12647	294,52	1,45
5,5	0,13099	277,31	1,47
6	0,13522	262,41	1,49
6,5	0,13916	249,28	1,51
7	0,14278	237,50	1,54
7,5	0,14623	227,02	1,56
8	0,14961	217,75	1,58
8,5	0,15275	209,24	1,59
9	0,15577	201,53	1,61
9,5	0,15871	194,52	1,63
10	0,16155	188,10	1,65
11	0,16693	176,70	1,69
12	0,17211	167,00	1,72
13	0,1769	158,44	1,76
14	0,18163	151,06	1,80
15	0,18662	144,86	1,84
16	0,19142	139,30	1,88
17	0,19584	134,14	1,92
18	0,20026	129,54	1,96
19	0,20468	125,43	2,00
19,5	0,20689	123,54	2,02

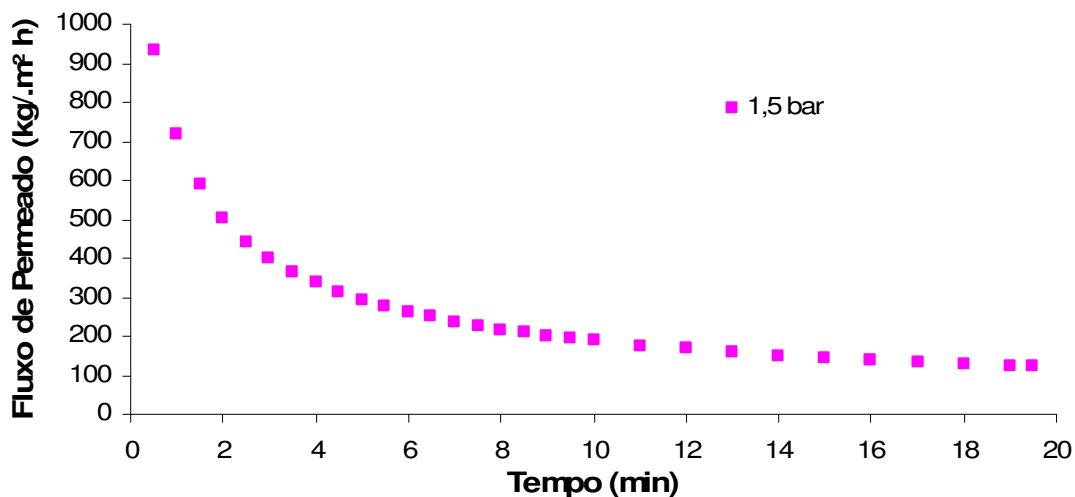


Figura A.2. Curva de fluxo acumulado de permeado para microfiltração, utilizando membrana de PES 150 a 1,5 bar.

Tabela A.3. Dados experimentais para microfiltração, utilizando a membrana PES 150 à 2,0 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
0,5	0,04994	1162,97	1,14
1	0,0785	914,03	1,24
1,5	0,09845	764,22	1,32
2	0,11327	659,44	1,38
2,5	0,12546	584,33	1,44
3	0,13573	526,80	1,49
3,5	0,14581	485,08	1,55
4	0,15512	451,54	1,61
4,5	0,16335	422,67	1,66
5	0,17086	397,89	1,71
5,5	0,17768	376,16	1,76
6	0,18411	357,29	1,82
6,5	0,19026	340,82	1,87
7	0,19606	326,12	1,92
7,5	0,20161	313,00	1,97
8	0,20692	301,16	2,02

* os primeiros pontos foram desconsiderados no ajuste ao modelo matemático devido a variações no início do experimento, onde o sistema ainda está se ajustando às condições do processo.

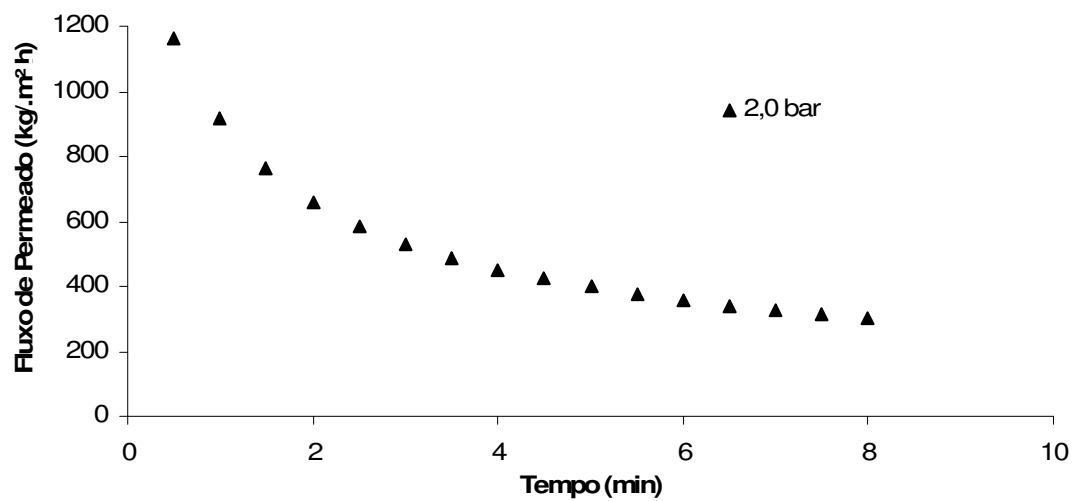


Figura A.3. Curva de fluxo acumulado de permeado para microfiltração, utilizando membrana de PES 150 a 2,0 bar.

Tabela A.4. Dados experimentais para microfiltração, utilizando a membrana PVDF 150 à 0,5 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
2	0,00398	23,17	1,01
4	0,00886	25,79	1,02
5	0,01199	27,92	1,03
6	0,01505	29,21	1,04
7	0,0179	29,77	1,04
8	0,02061	30,00	1,05
9	0,02326	30,09	1,06
10	0,02576	29,99	1,07
11	0,02827	29,92	1,07
12	0,03061	29,70	1,08
13	0,03288	29,45	1,09
14	0,03512	29,21	1,09
15	0,03725	28,92	1,10
16	0,0394	28,67	1,10
17	0,04144	28,38	1,11
18	0,04339	28,07	1,12
19	0,04533	27,78	1,12
20	0,04718	27,47	1,13
25	0,05587	26,02	1,15
30	0,06332	24,58	1,18
35	0,06987	23,24	1,20
40	0,07577	22,06	1,22
45	0,08101	20,96	1,24
50	0,08563	19,94	1,26
55	0,09003	19,06	1,27
60	0,0947	18,38	1,29
70	0,1062	17,67	1,34
80	0,11607	16,89	1,38
90	0,12466	16,13	1,43
100	0,13537	15,76	1,48
110	0,14967	15,84	1,56
120	0,16337	15,85	1,64
135	0,18057	15,57	1,76
150	0,19468	15,11	1,87
165	0,20879	14,73	2,00
170	0,2134933	14,62	2,05

* os primeiros pontos foram desconsiderados no ajuste ao modelo matemático devido a variações no início do experimento, onde o sistema ainda está se ajustando às condições do processo.

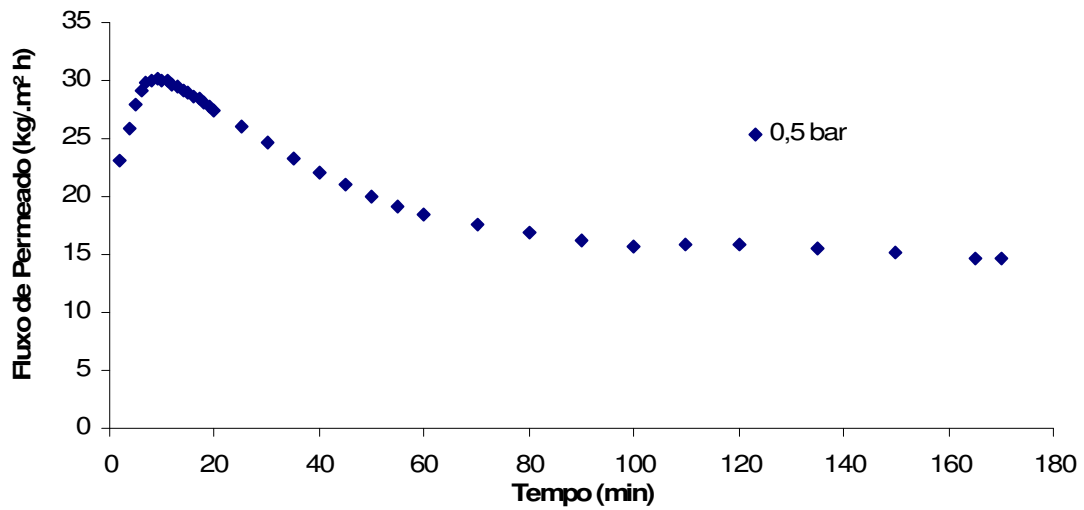


Figura A.4. Curva de fluxo acumulado de permeado para microfiltração, utilizando membrana de PVDF 150 a 0,5 bar.

Tabela A.5. Dados experimentais para microfiltração, utilizando a membrana PVDF 150 à 1,5 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
0,5	0,01481	344,89	1,04
1	0,02653	308,91	1,07
1,5	0,03692	286,59	1,10
2	0,04596	267,57	1,13
2,5	0,05357	249,50	1,15
3	0,06094	236,52	1,17
3,5	0,06762	224,96	1,20
4	0,07402	215,47	1,22
4,5	0,07973	206,30	1,24
5	0,08555	199,22	1,26
5,5	0,0913	193,29	1,29
6	0,09671	187,68	1,31
6,5	0,10198	182,68	1,33
7	0,1069	177,82	1,35
7,5	0,11152	173,13	1,37
8	0,11602	168,86	1,40
8,5	0,1204	164,93	1,42
9	0,12444	160,99	1,44
9,5	0,12847	157,46	1,46
10	0,13236	154,12	1,48
11	0,13967	147,84	1,52
12	0,1465	142,15	1,56
13	0,15304	137,07	1,60
14	0,15915	132,36	1,64
15	0,16499	128,07	1,67
16	0,17059	124,14	1,71
17	0,1767	121,03	1,76
18	0,18246	118,03	1,80
19	0,18806	115,25	1,85
20	0,19349	112,65	1,90
25	0,20176	93,97	1,97
27	0,20507	88,44	2,00
30	0,21003	81,52	2,05
35	0,2183	72,62	2,14

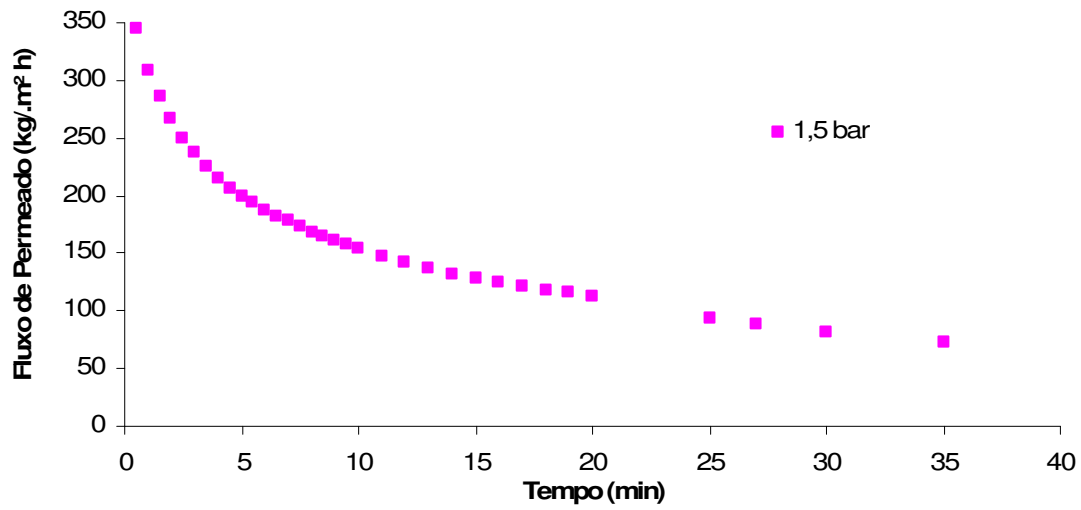


Figura A.5. Curva de fluxo acumulado de permeado para microfiltração, utilizando membrana de PVDF 150 a 1,5 bar.

Tabela A.6. Dados experimentais para microfiltração, utilizando a membrana PVDF 150 à 2,0 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
1	0,02145	249,76	1,06
1,5	0,03079	239,01	1,08
2	0,03912	227,75	1,11
2,5	0,04666	217,32	1,13
3	0,05348	207,57	1,15
3,5	0,06058	201,54	1,18
4	0,06757	196,69	1,20
4,5	0,07443	192,59	1,23
5	0,08042	187,28	1,25
5,5	0,08638	182,87	1,27
6	0,0921	178,73	1,29
6,5	0,09749	174,64	1,32
7	0,10266	170,76	1,34
7,5	0,10764	167,11	1,36
8	0,11245	163,67	1,38
8,5	0,11711	160,42	1,41
9	0,12153	157,23	1,43
9,5	0,12593	154,35	1,45
10	0,13011	151,50	1,47
11	0,13816	146,25	1,52
12	0,14584	141,51	1,56
13	0,15389	137,83	1,61
14	0,16081	133,74	1,66
15	0,16701	129,64	1,70
16	0,17433	126,87	1,76
17	0,18214	124,75	1,82
18	0,18955	122,61	1,88
19	0,19674	120,57	1,94
20	0,20378	118,64	2,01

* o primeiro ponto foi desconsiderado no ajuste ao modelo matemático devido a variações no início do experimento, onde o sistema ainda está se ajustando às condições do processo.

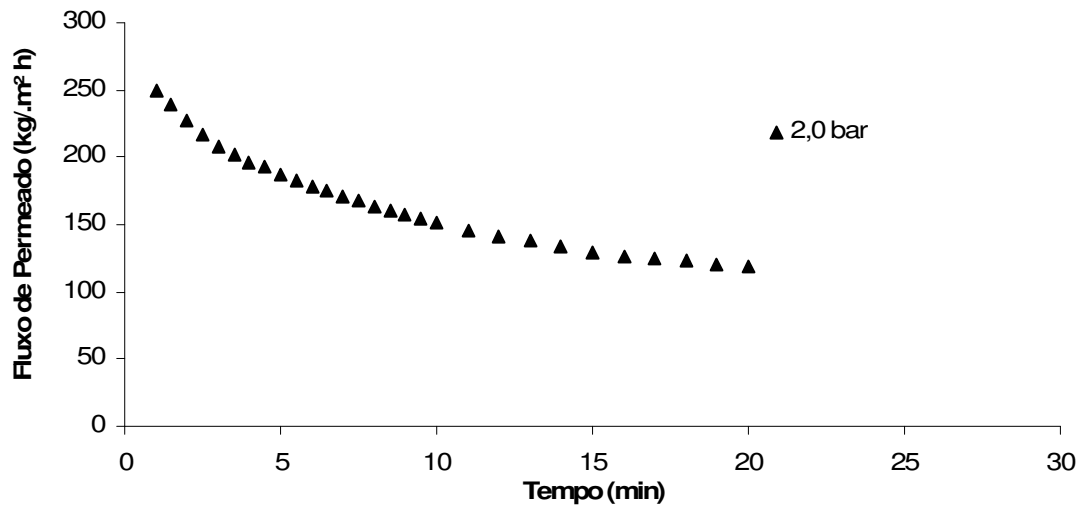


Figura A.6. Curva de fluxo acumulado de permeado para microfiltração, utilizando membrana de PVDF 150 a 2,0 bar.

A.1.2 Ultrafiltração

Tabela A.7. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 10 à 2 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
2,5	0,00625	29,11	1,02
3	0,00792	30,74	1,02
4	0,01125	32,75	1,03
4,5	0,01324	34,26	1,03
5	0,01527	35,56	1,04
5,5	0,01747	36,98	1,04
6	0,01974	38,31	1,05
6,5	0,02198	39,37	1,06
7	0,02421	40,27	1,06
7,5	0,02647	41,09	1,07
8	0,02878	41,89	1,07
8,5	0,03096	42,41	1,08
9	0,03318	42,93	1,09
9,5	0,03539	43,38	1,09
10	0,03751	43,68	1,10
11	0,04187	44,32	1,11
12	0,04612	44,75	1,12
13	0,05085	45,54	1,14
14	0,05554	46,19	1,15
15	0,06028	46,79	1,17
16	0,06488	47,22	1,18
17	0,06945	47,57	1,20
18	0,07397	47,85	1,22
19	0,07847	48,09	1,23
20	0,08286	48,24	1,25
25	0,10425	48,55	1,33
30	0,12455	48,34	1,42
35	0,14378	47,83	1,52
40	0,16217	47,21	1,63
45	0,18251	47,22	1,78
50	0,20217	47,08	1,94
51	0,2061	47,05	1,97
52	0,21003	47,03	2,01

* os primeiros pontos foram desconsiderados no ajuste ao modelo matemático devido a variações no início do experimento, onde o sistema ainda está se ajustando às condições do processo.

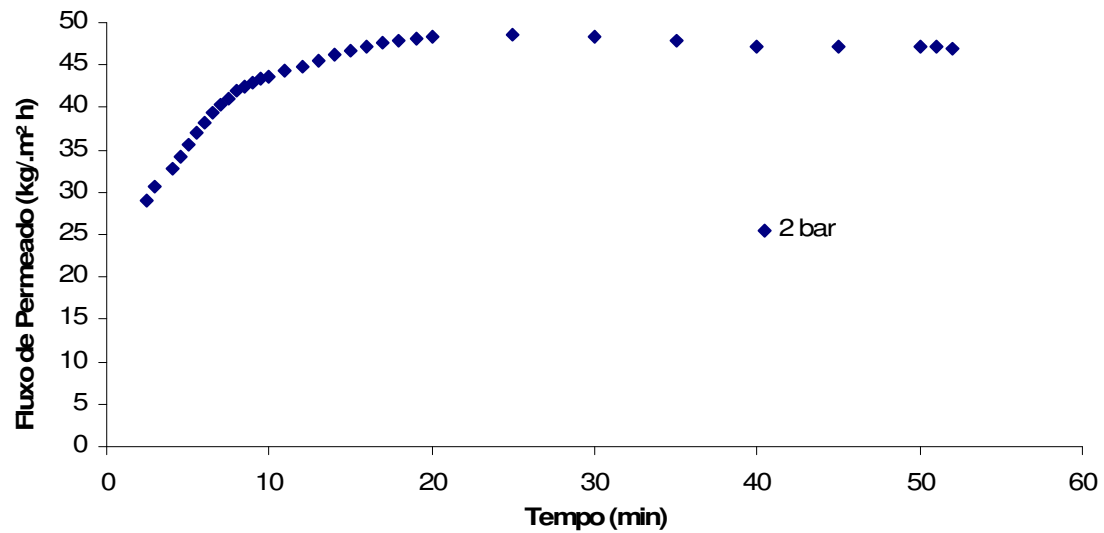


Figura A.7. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 10 a 2 bar.

Tabela A.8. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 10 à 4 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
0,5	0,00371	86,40	1,01
1	0,00797	92,80	1,02
1,5	0,01143	88,73	1,03
2	0,01558	90,70	1,04
2,5	0,01963	91,43	1,05
3	0,02368	91,91	1,06
3,5	0,02758	91,75	1,07
4	0,03138	91,34	1,08
4,5	0,03524	91,18	1,09
5	0,03898	90,77	1,11
5,5	0,04275	90,50	1,12
6	0,04636	89,97	1,13
6,5	0,04997	89,51	1,14
7	0,05352	89,02	1,15
7,5	0,05691	88,35	1,16
8	0,06041	87,92	1,17
8,5	0,06384	87,45	1,18
9	0,06716	86,89	1,20
9,5	0,07047	86,37	1,21
10	0,07374	85,86	1,22
11	0,08012	84,81	1,24
12	0,08624	83,68	1,27
13	0,09315	83,43	1,29
14	0,09983	83,03	1,32
15	0,10617	82,41	1,35
16	0,11246	81,84	1,38
17	0,11849	81,16	1,41
18	0,12436	80,45	1,44
19	0,13005	79,70	1,47
20	0,13579	79,06	1,50
25	0,1626	75,73	1,66
30	0,18662	72,43	1,84
35	0,20978	69,79	2,05

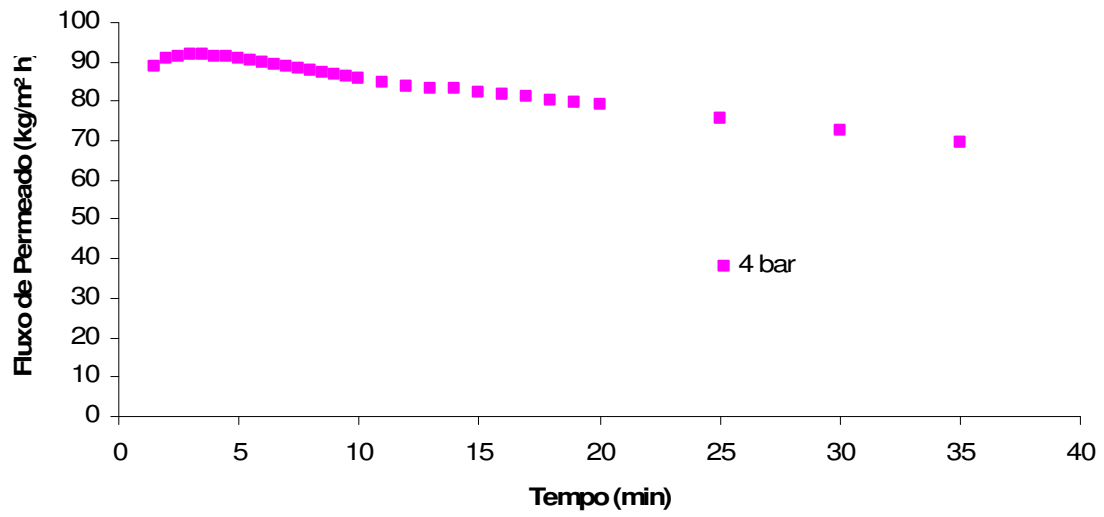


Figura A.8. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 10 a 4 bar.

Tabela A.9. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 10 à 6 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
0,5	0,00432	100,60	1,01
1	0,00952	110,85	1,02
1,5	0,01555	120,71	1,04
2	0,02133	124,18	1,05
2,5	0,02719	126,64	1,07
3	0,03291	127,73	1,09
3,5	0,03851	128,11	1,10
4	0,04394	127,91	1,12
4,5	0,04961	128,37	1,14
5	0,05519	128,52	1,16
5,5	0,06059	128,27	1,17
6	0,06593	127,95	1,19
6,5	0,07122	127,58	1,21
7	0,0766	127,42	1,23
7,5	0,08172	126,87	1,25
8	0,08681	126,35	1,27
8,5	0,09185	125,82	1,29
9	0,09668	125,08	1,31
9,5	0,10149	124,39	1,33
10	0,10622	123,68	1,35
11	0,11549	122,25	1,39
12	0,12444	120,75	1,44
13	0,13313	119,24	1,48
14	0,14141	117,61	1,53
15	0,14947	116,03	1,57
16	0,15728	114,46	1,62
17	0,16515	113,12	1,67
18	0,17279	111,77	1,73
19	0,18015	110,40	1,78
20	0,1873	109,04	1,84
23	0,20794	105,27	2,03

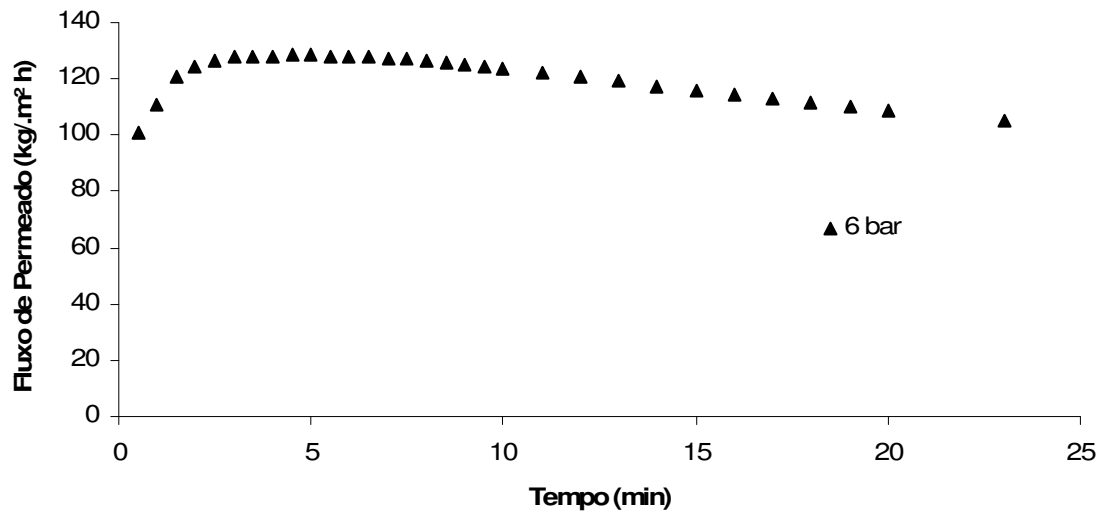


Figura A.9. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 10 a 6 bar.

Tabela A.10. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 30 à 2 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
0,5	0,02111	491,60	1,05
1	0,03543	412,54	1,09
1,5	0,05048	391,85	1,14
2	0,0613	356,88	1,17
2,5	0,07032	327,51	1,20
3	0,07828	303,82	1,23
3,5	0,08512	283,18	1,26
4	0,09129	265,74	1,28
4,5	0,09693	250,81	1,30
5	0,101	235,20	1,32
5,5	0,10668	225,85	1,34
6,5	0,1153	206,54	1,38
7	0,1192	198,28	1,40
7,5	0,12296	190,89	1,42
8	0,12654	184,17	1,43
8,5	0,12996	178,03	1,45
9	0,13322	172,35	1,47
9,5	0,13645	167,24	1,49
10	0,13955	162,49	1,50
11	0,14546	153,97	1,53
12	0,15106	146,58	1,57
13	0,1563	139,99	1,60
14	0,16144	134,27	1,63
15	0,16634	129,12	1,66
16	0,17103	124,46	1,69
17	0,17564	120,30	1,73
18	0,18015	116,53	1,76
19	0,18444	113,03	1,79
20	0,18873	109,88	1,82
25	0,21018	97,89	2,01

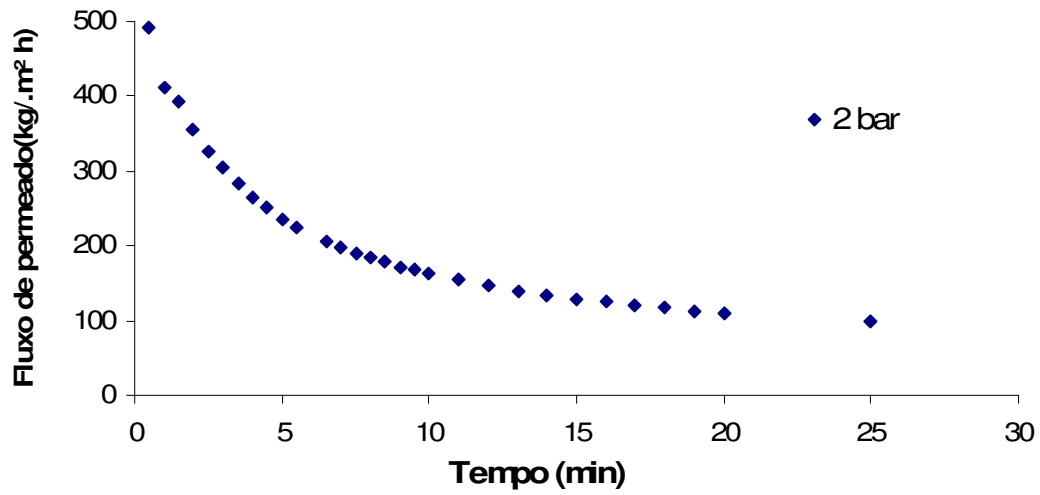


Figura A.10. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 30 a 2 bar.

Tabela A.11. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 30 à 4 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
0,5	0,02484	578,46	1,06
1	0,03897	453,76	1,11
1,5	0,04873	378,27	1,14
2	0,05671	330,16	1,16
2,5	0,06357	296,08	1,18
3	0,06958	270,06	1,20
3,5	0,07505	249,67	1,22
4	0,08005	233,02	1,24
4,5	0,08463	218,98	1,26
5	0,08915	207,61	1,28
5,5	0,09327	197,46	1,29
6	0,09735	188,92	1,31
6,5	0,10128	181,43	1,33
7	0,1051	174,82	1,35
7,5	0,10877	168,86	1,36
8	0,11227	163,41	1,38
8,5	0,11572	158,52	1,39
9	0,11912	154,11	1,41
9,5	0,12234	149,95	1,43
10	0,12558	146,22	1,44
11	0,13177	139,48	1,47
12	0,13773	133,64	1,51
13	0,14686	131,54	1,56
14	0,14912	124,02	1,57
15	0,15452	119,95	1,61
16	0,15981	116,30	1,64
17	0,16502	113,03	1,67
18	0,17004	109,99	1,71
19	0,17495	107,21	1,75
20	0,17976	104,65	1,78
24	0,19969	96,88	1,95
25	0,20467	95,32	2,00
25,1	0,20517	95,18	2,00

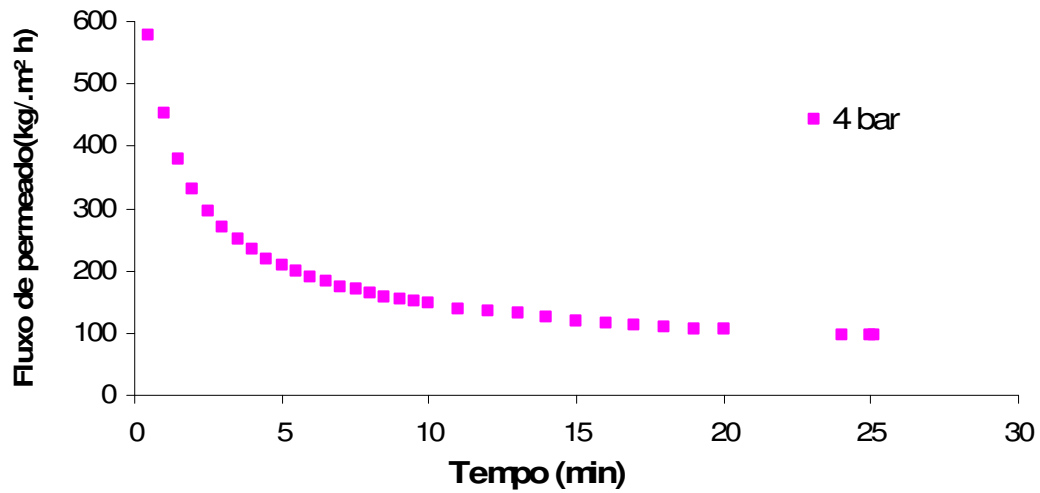


Figura A.11. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 30 a 4 bar.

Tabela A.12. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 30 à 6 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m².h)	FC
0,5	0,01921	447,35	1,05
1	0,02987	347,80	1,08
1,5	0,03848	298,70	1,10
2	0,04608	268,27	1,13
2,5	0,05273	245,59	1,15
3	0,05895	228,80	1,17
3,5	0,06478	215,51	1,19
4	0,07004	203,88	1,21
4,5	0,07555	195,49	1,23
5	0,08063	187,77	1,24
5,5	0,08555	181,11	1,26
6	0,09022	175,08	1,28
6,5	0,09484	169,89	1,30
7	0,09926	165,11	1,32
8	0,10767	156,71	1,36
8,5	0,11167	152,97	1,37
9	0,11555	149,49	1,39
9,5	0,11957	146,55	1,41
10	0,1238	144,15	1,43
11	0,13059	138,23	1,47
12	0,13786	133,77	1,51
13	0,14483	129,72	1,55
14	0,15162	126,10	1,59
15	0,15819	122,79	1,63
16	0,16457	119,76	1,67
17	0,17104	117,15	1,72
19	0,18322	112,28	1,81
20	0,18918	110,14	1,86
24	0,21213	102,92	2,07

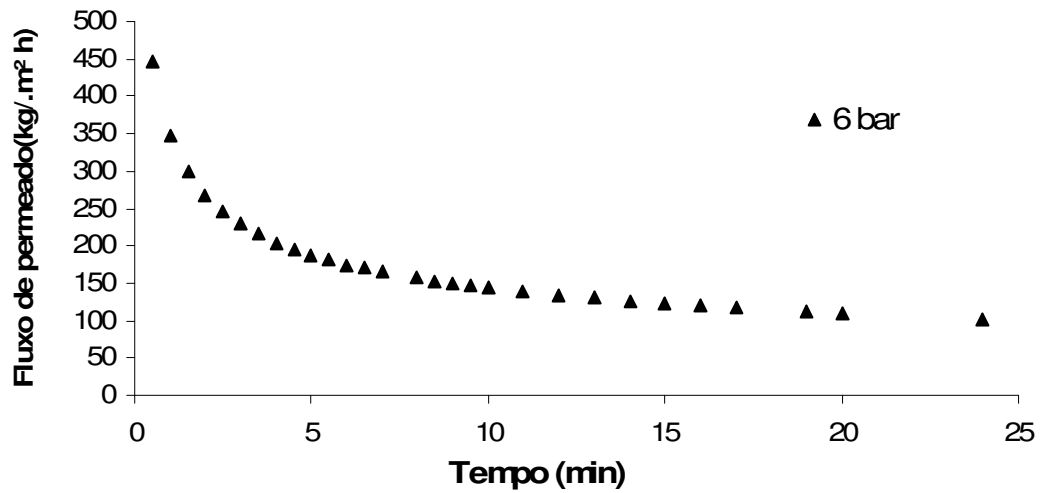


Figura A.12. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 30 a 6 bar.

Tabela A.13. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana PES 10 à 2 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
1	0,00116	13,51	1,00
4	0,00416	12,11	1,01
7	0,00679	11,29	1,02
8	0,00774	11,27	1,02
10	0,00965	11,24	1,02
11	0,01055	11,17	1,03
12	0,01147	11,13	1,03
13	0,01237	11,08	1,03
14	0,01324	11,01	1,03
15	0,01408	10,93	1,03
16	0,01496	10,89	1,04
17	0,01574	10,78	1,04
18	0,01655	10,71	1,04
19	0,01736	10,64	1,04
20	0,01811	10,54	1,05
25	0,02204	10,27	1,06
30	0,02567	9,96	1,07
35	0,02923	9,72	1,08
40	0,03258	9,48	1,08
50	0,03908	9,10	1,10
60	0,04525	8,78	1,12
70	0,05125	8,52	1,14
80	0,05768	8,40	1,16
90	0,06314	8,17	1,18
100	0,06755	7,87	1,19
120	0,07489	7,27	1,22
135	0,08236	7,10	1,25
150	0,09039	7,02	1,28
165	0,09877	6,97	1,31
180	0,10637	6,88	1,34
195	0,11388	6,80	1,37
210	0,12165	6,75	1,41
225	0,12888	6,67	1,45
240	0,13588	6,59	1,48
255	0,14227	6,50	1,52
270	0,14988	6,46	1,56
285	0,15696	6,41	1,60
300	0,16355	6,35	1,64
315	0,17014	6,29	1,69
330	0,17673	6,24	1,73
345	0,18332	6,19	1,78
360	0,18991	6,14	1,83
375	0,1965	6,10	1,89
390	0,20309	6,06	1,95
405	0,20968	6,03	2,01

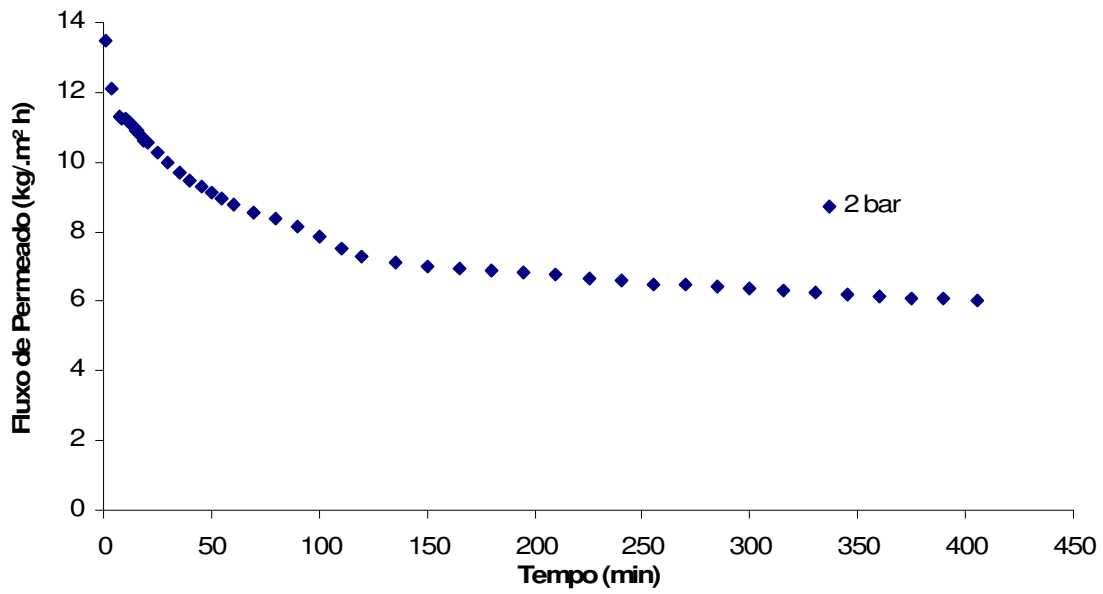


Figura A.13. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de PES 10 a 2 bar.

Tabela A.14. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana PES 10 à 4 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
1	0,00562	65,44	1,01
1,5	0,00706	54,80	1,02
2	0,00852	49,60	1,02
2,5	0,0099	46,11	1,02
3	0,01114	43,24	1,03
3,5	0,01242	41,32	1,03
4	0,01373	39,97	1,03
4,5	0,01444	37,36	1,04
5	0,01564	36,42	1,04
5,5	0,01683	35,63	1,04
6	0,01805	35,03	1,05
6,5	0,01914	34,29	1,05
7	0,02028	33,73	1,05
7,5	0,0214	33,22	1,06
8	0,02251	32,76	1,06
8,5	0,02355	32,26	1,06
9	0,02465	31,89	1,06
9,5	0,02568	31,47	1,07
10	0,0267	31,09	1,07
11	0,0287	30,38	1,08
12	0,03074	29,83	1,08
13	0,03261	29,21	1,09
14	0,0345	28,69	1,09
15	0,03641	28,26	1,10
16	0,03817	27,78	1,10
17	0,04002	27,41	1,11
18	0,04174	27,00	1,11
19	0,04349	26,65	1,12
20	0,0452	26,31	1,12
25	0,05363	24,98	1,15
30	0,06158	23,90	1,18
35	0,06921	23,02	1,20
40	0,07646	22,26	1,23
45	0,0838	21,68	1,26
50	0,09076	21,14	1,28
55	0,09753	20,65	1,31
60	0,1037	20,12	1,34
70	0,11617	19,32	1,40
80	0,12789	18,61	1,45
90	0,13983	18,09	1,52
100	0,15049	17,52	1,58
110	0,16141	17,09	1,65
120	0,17011	16,51	1,71
150	0,20117	15,62	1,97
154	0,20551	15,54	2,01

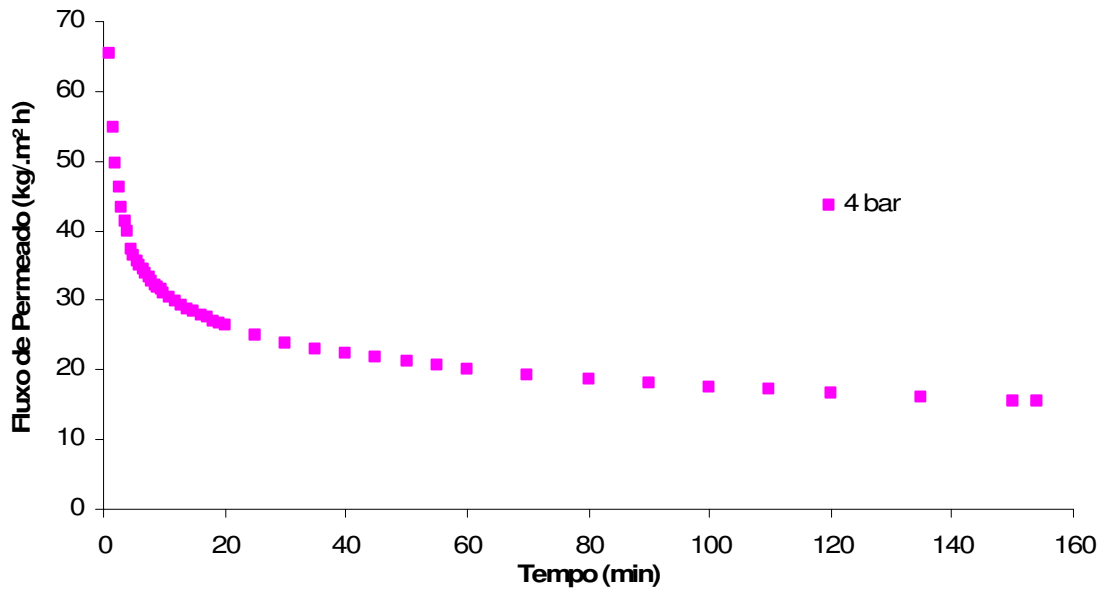


Figura A.14. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de PES 10 a 4 bar.

Tabela A.15. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana PES 10 à 6 bar.

Tempo (min)	Massa permeado (kg)	Fluxo de permeado (kg/m ² .h)	FC
6	0,01135	22,03	1,03
7	0,01336	22,22	1,03
8	0,01534	22,33	1,04
9	0,01734	22,43	1,04
10	0,01923	22,39	1,05
12	0,023	22,32	1,06
13	0,0249	22,30	1,06
14	0,02679	22,28	1,07
15	0,02869	22,27	1,08
16	0,0305	22,20	1,08
17	0,03232	22,14	1,09
18	0,03406	22,03	1,09
19	0,03583	21,96	1,10
20	0,03765	21,92	1,10
25	0,04595	21,40	1,13
30	0,05434	21,09	1,15
35	0,06208	20,65	1,18
40	0,07012	20,41	1,21
45	0,07807	20,20	1,24
50	0,08535	19,88	1,26
55	0,09199	19,47	1,29
60	0,09855	19,12	1,32
70	0,11045	18,37	1,37
80	0,12156	17,69	1,42
90	0,13538	17,51	1,49
100	0,14641	17,05	1,56
110	0,15741	16,66	1,62
120	0,16699	16,20	1,69
135	0,18403	15,87	1,81
150	0,19763	15,34	1,93
165	0,21299	15,03	2,08

* os primeiros pontos foram desconsiderados no ajuste ao modelo matemático devido a variações no início do experimento, onde o sistema ainda está se ajustando às condições do processo.

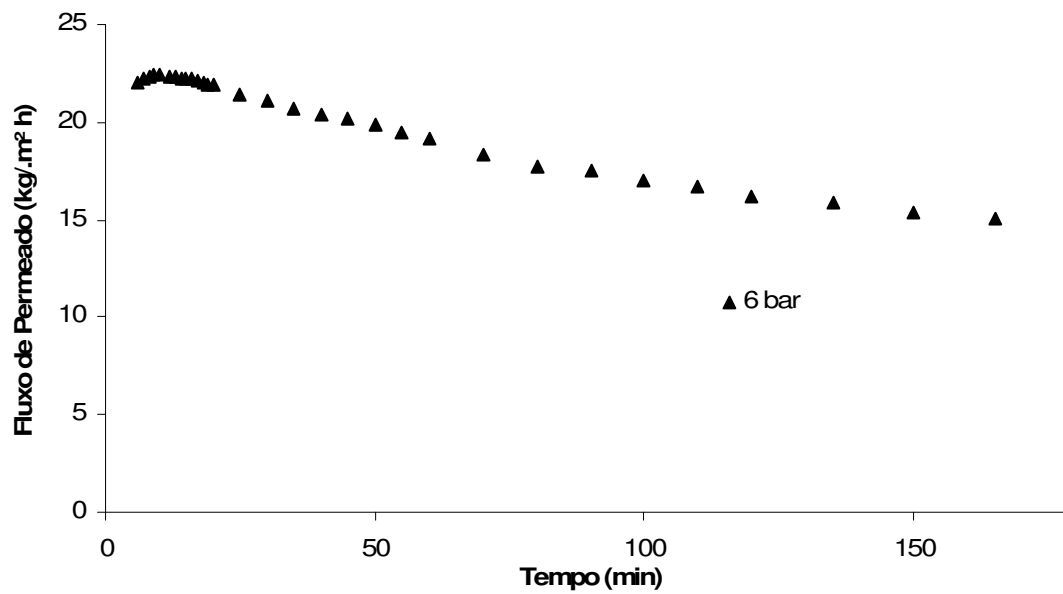


Figura A.15. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de PES 10 a 6 bar.

A.2 CURVA DE FLUXO DE PERMEADO (UNIDADE PILOTO)

Tabela A.16. Dados experimentais para ultrafiltração, utilizando a membrana CEL 30 à 2 bar, na unidade piloto.

Tempo (min)	M permeado (kg)	P _e (bar)	P _s (bar)	P _T (bar)	Vazão (m ³ /h)	Velocidade (m/s)	T (°C)	F (Hz)	Fluxo de Permeado (kg/m ² .h)	FC
4,00	0,05	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	22,00	56,00	38,88	1,00
5,00	0,15	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	24,00	56,00	100,23	1,01
6,00	0,25	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	24,00	56,00	141,13	1,01
9,00	0,46	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	25,00	56,00	176,65	1,02
10,00	0,58	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	25,00	56,00	200,46	1,03
12,00	0,74	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	27,00	56,00	213,13	1,04
15,00	1,04	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	28,00	56,00	238,48	1,06
16,00	1,15	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	28,00	56,00	248,42	1,06
18,00	1,34	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	29,00	56,00	257,30	1,08
20,00	1,56	3,00	1,10	2,05	1,70	6,75	29,00	56,00	269,59	1,09
30,00	2,51	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	25,00	56,00	288,59	1,15
35,00	2,97	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	26,00	56,00	293,29	1,18
40,00	3,42	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	26,00	56,00	295,51	1,22
60,00	5,21	3,00	1,00	2,00	1,70	6,75	25,00	56,00	299,83	1,37
70,00	5,86	2,90	0,80	1,85	1,70	6,75	27,00	55,10	289,09	1,44
80,00	6,74	2,70	0,00	1,35	1,80	7,14	29,00	55,10	290,97	1,54
90,00	7,55	2,70	0,30	1,50	1,80	7,14	30,00	55,10	289,75	1,65
100,00	8,32	2,80	0,40	1,60	1,80	7,14	29,00	55,10	287,38	1,77
110,00	9,17	2,80	0,50	1,65	1,80	7,14	25,00	55,10	287,97	1,92
115,00	9,60	2,80	0,50	1,65	1,80	7,14	27,00	55,10	288,37	2,00

P_e: pressão da corrente na entrada da membrana, P_s: pressão da corrente na saída da membrana, P_T: pressão transmembrana,

F: frequência.

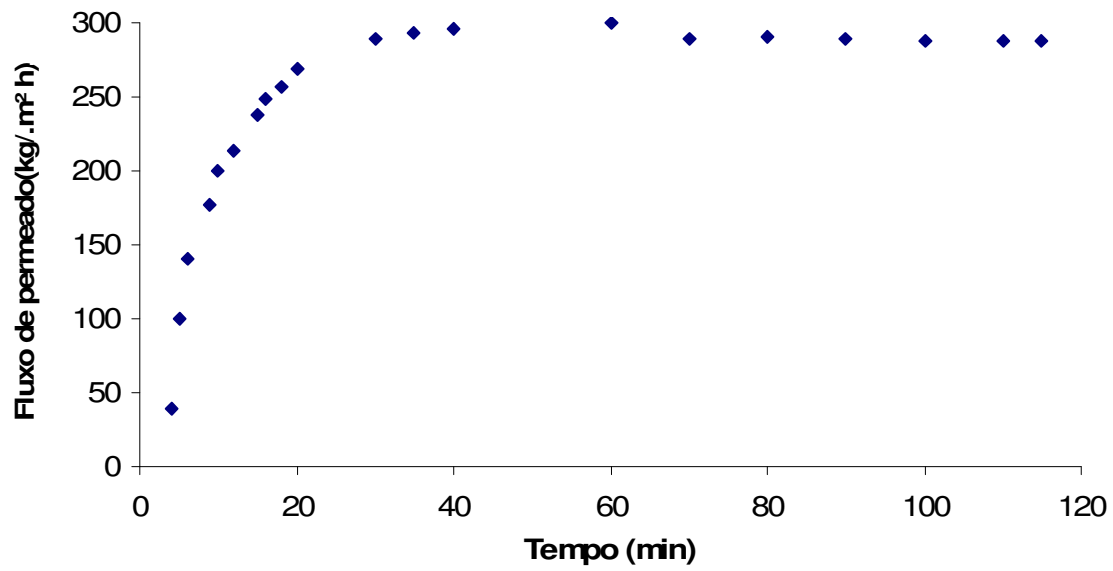


Figura A.16. Curva de fluxo acumulado de permeado para ultrafiltração, utilizando membrana de CEL 30 à 2 bar, na unidade piloto.

A.3 AJUSTE AO MODELO BASEADO NA TEORIA DE RENOVAÇÃO DE SUPERFÍCIE

A.3.1 Unidade de Laboratório

A.3.1.1 Microfiltração

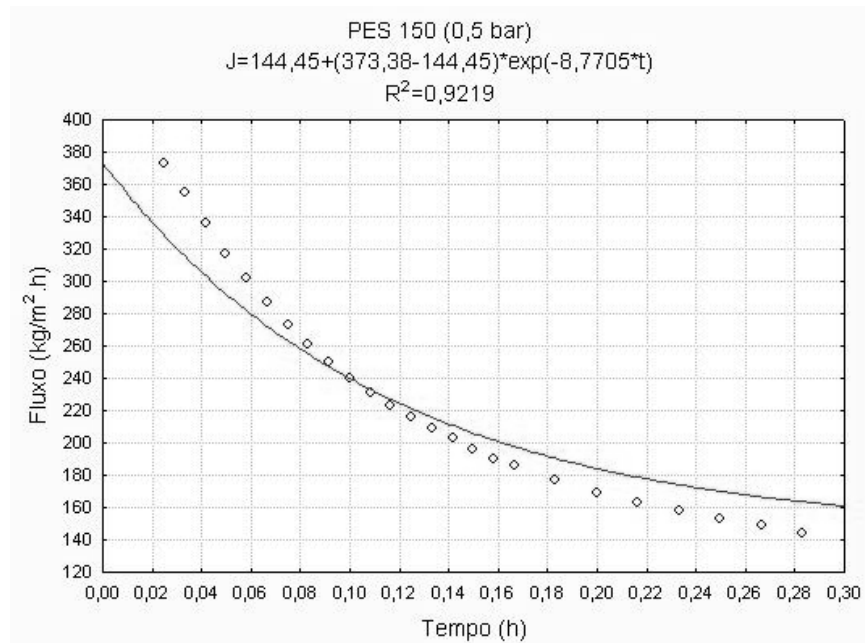


Figura A.17. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PES 150 a 0,5 bar.

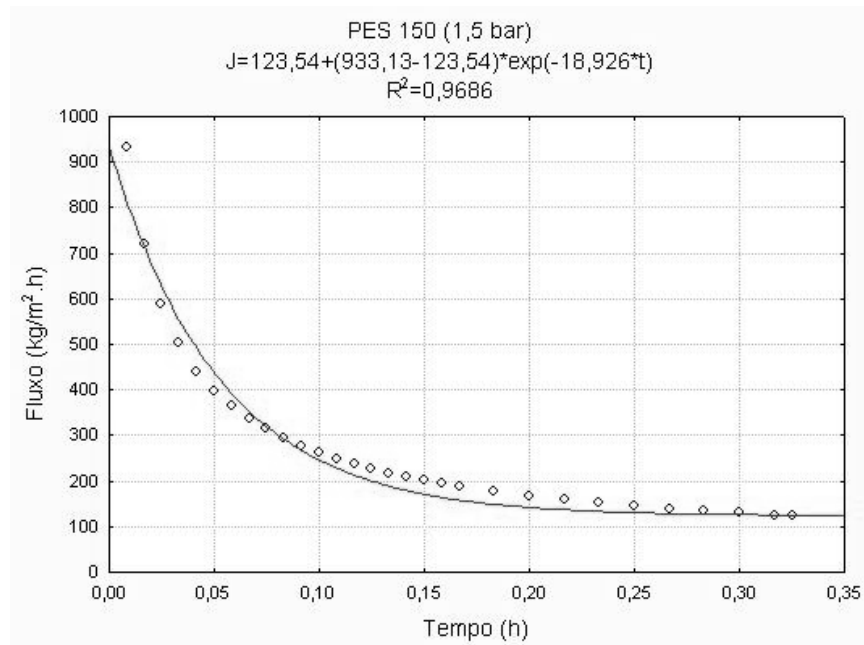


Figura A.18. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PES 150 a 1,5 bar.

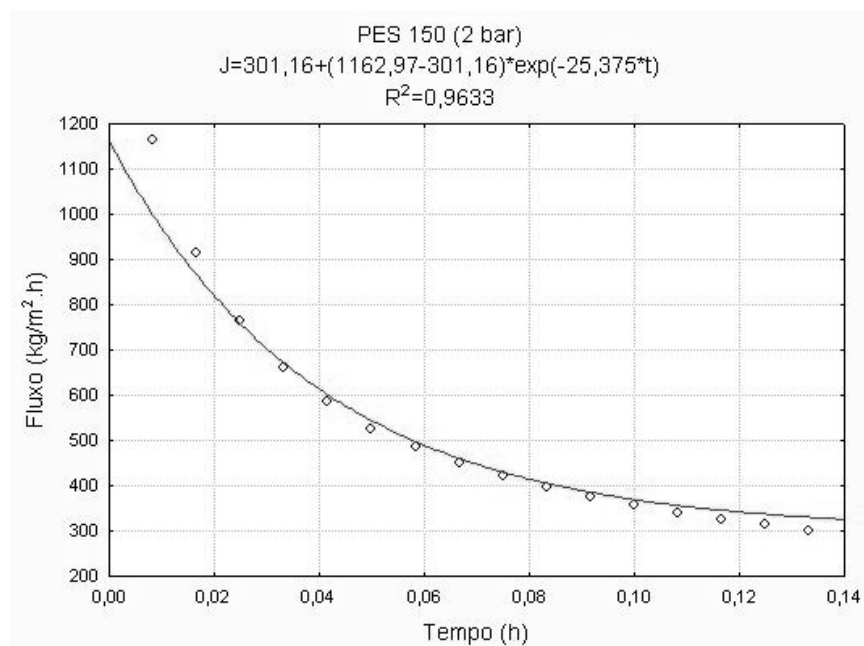


Figura A.19. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PES 150 a 2 bar.

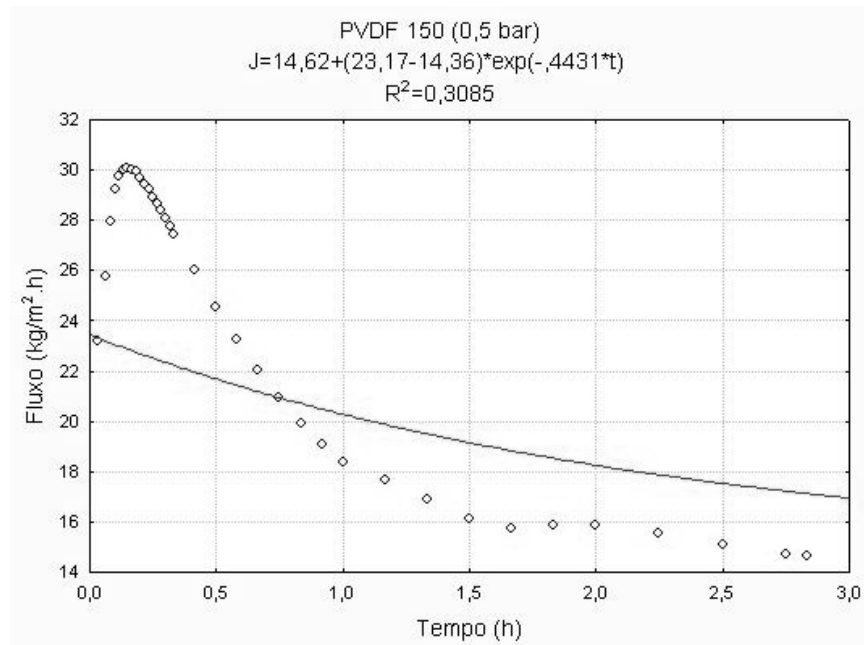


Figura A.20. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PVDF 150 a 0,5 bar.

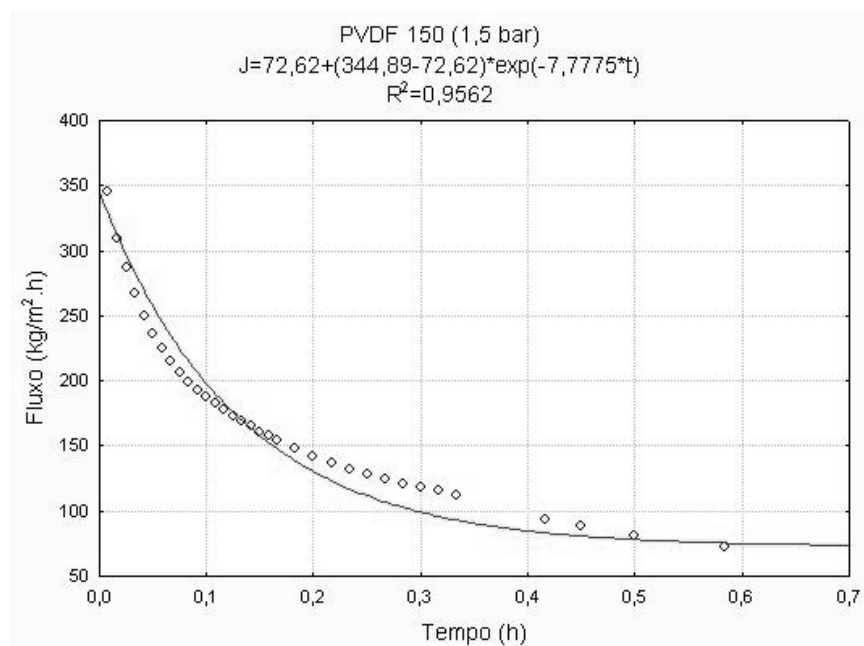


Figura A.21. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PVDF 150 a 1,5 bar.

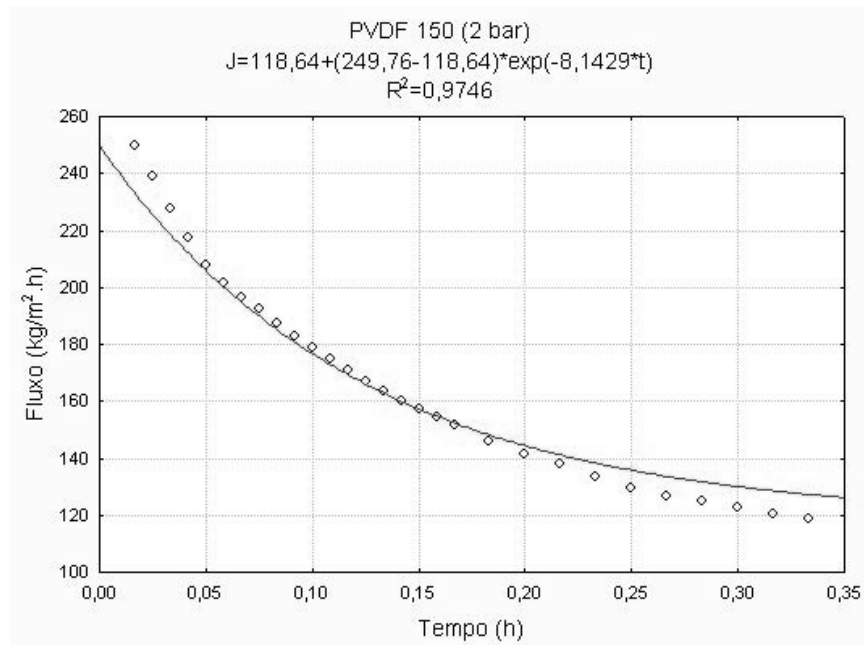


Figura A.22. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PVDF 150 a 2 bar.

A.3.1.2 Ultrafiltração

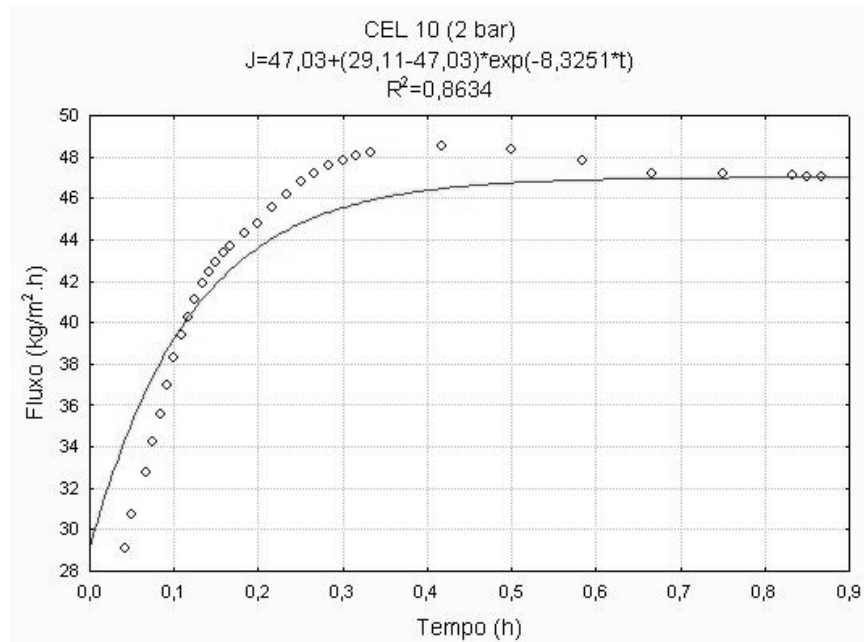


Figura A.23. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 10 a 2 bar.

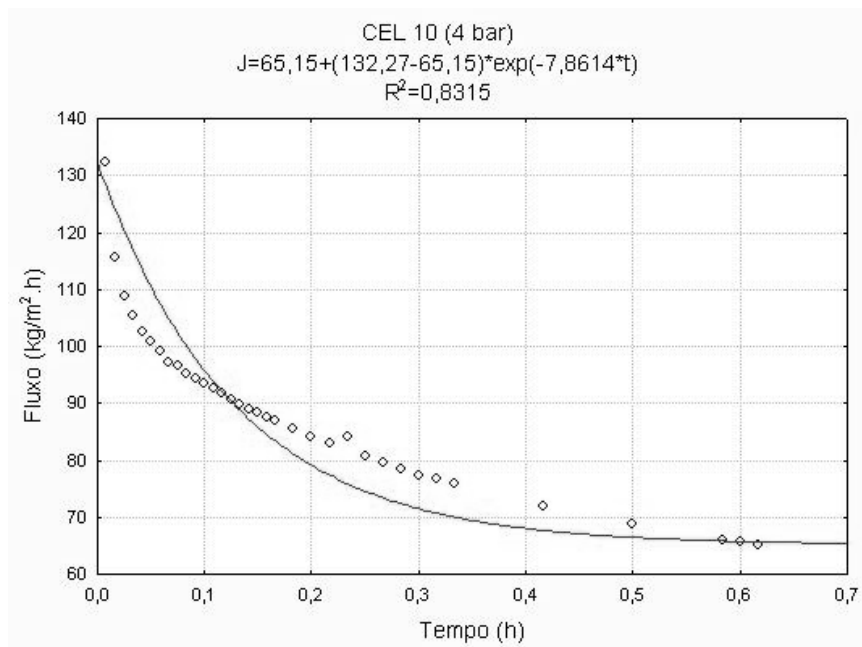


Figura A.24. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 10 a 4 bar

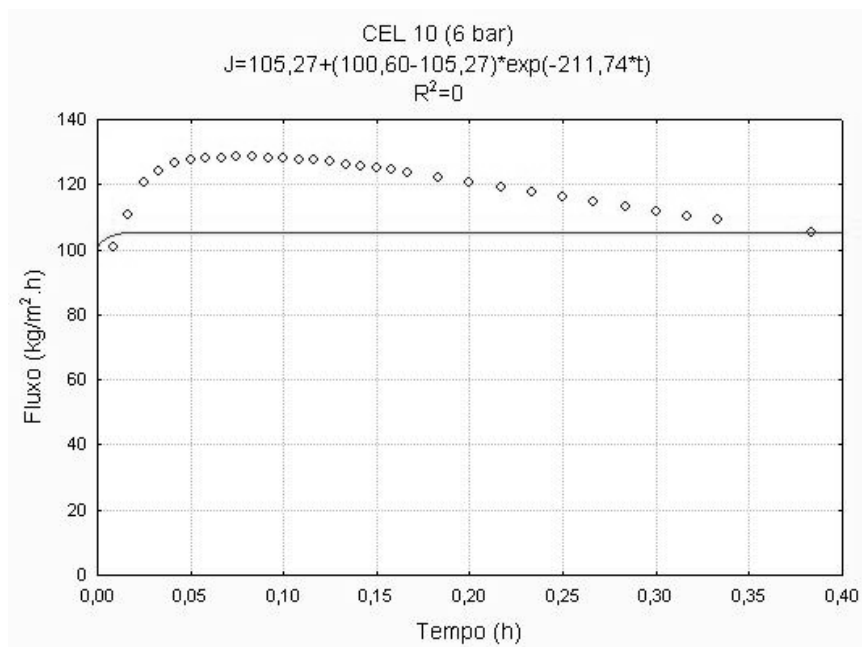


Figura A.25. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 10 a 6 bar.

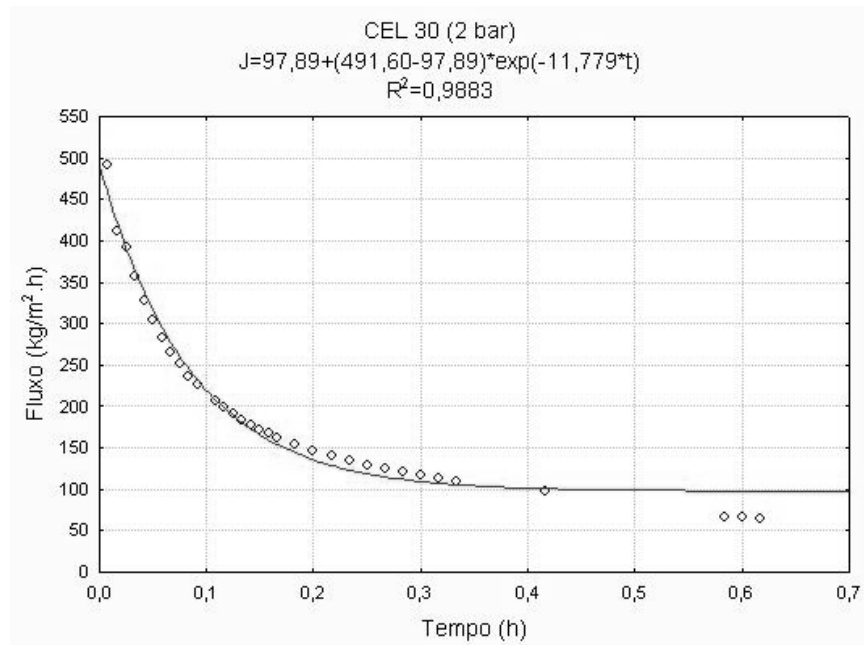


Figura A.26. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 30 a 2 bar.

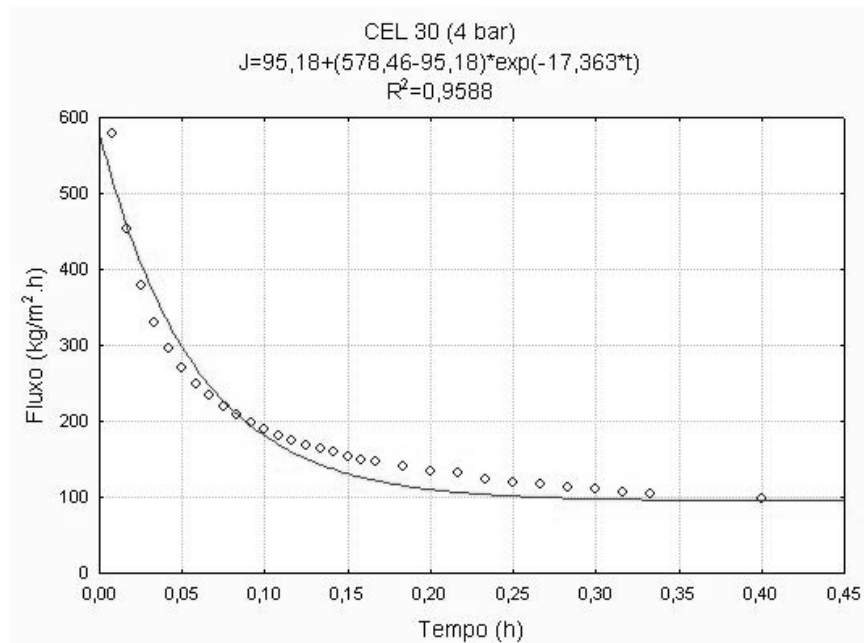


Figura A.27. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 30 a 4 bar.

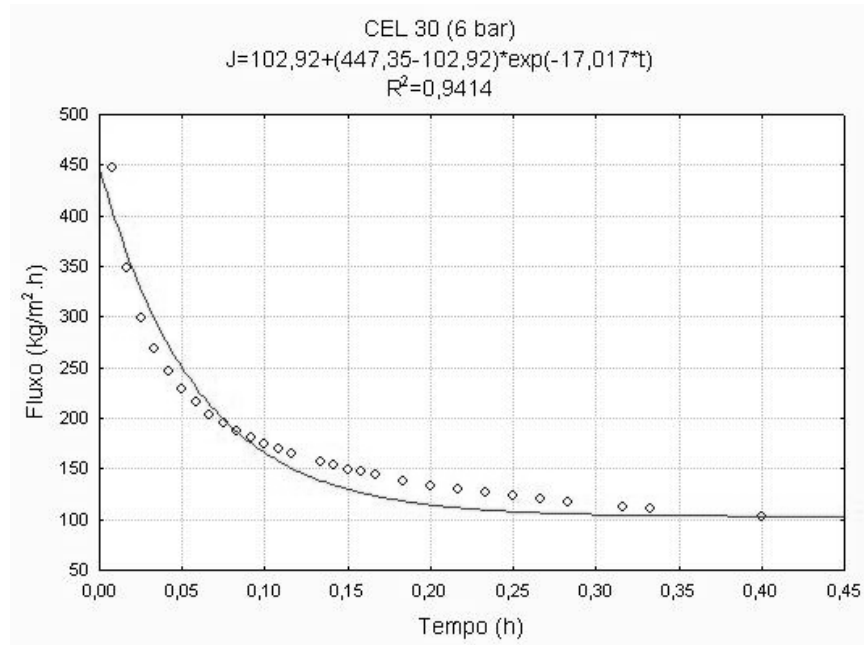


Figura A.28. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 30 a 6 bar.

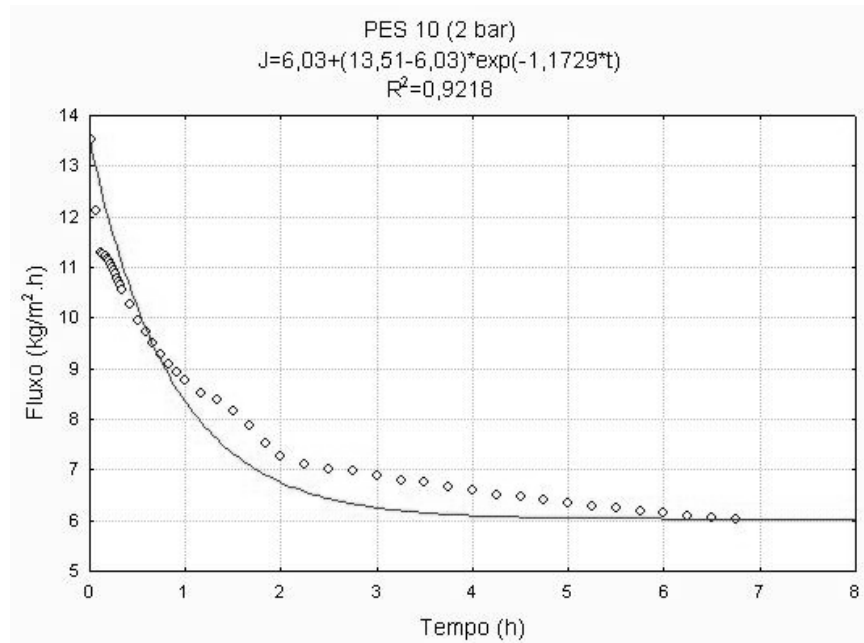


Figura A.29. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PES 10 a 2 bar.

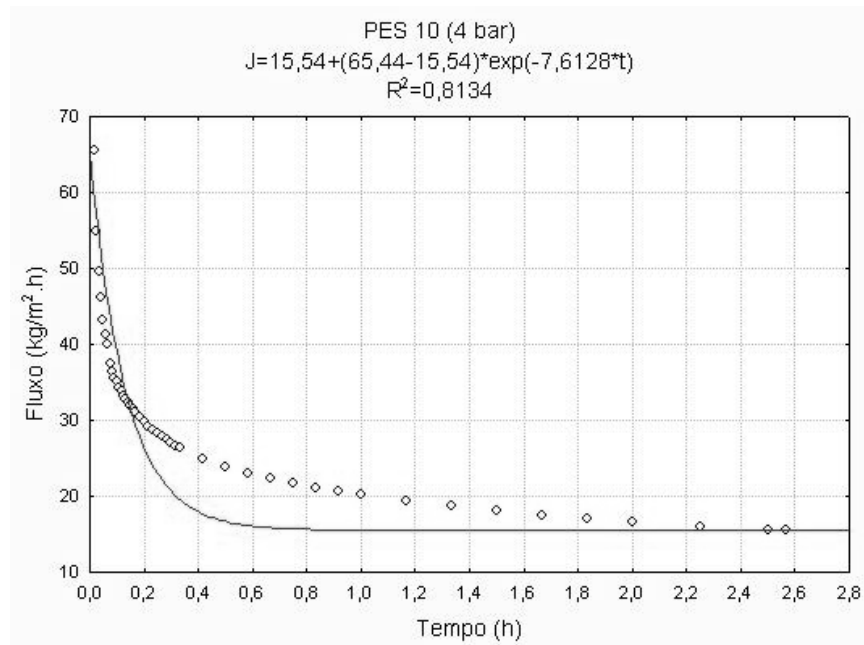


Figura A.30. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PES 10 a 4 bar.

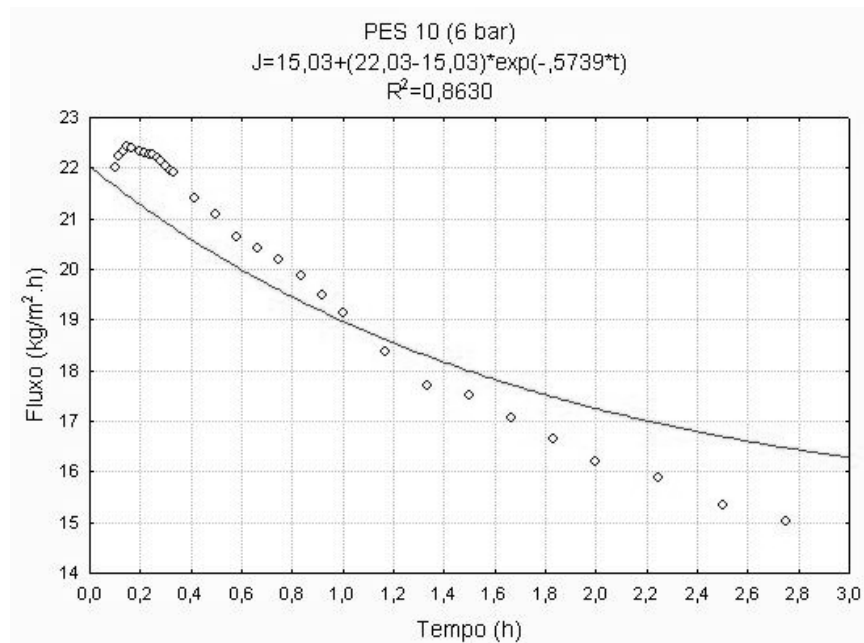


Figura A.31. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana PES 10 a 6 bar.

A.3.2 Unidade Piloto

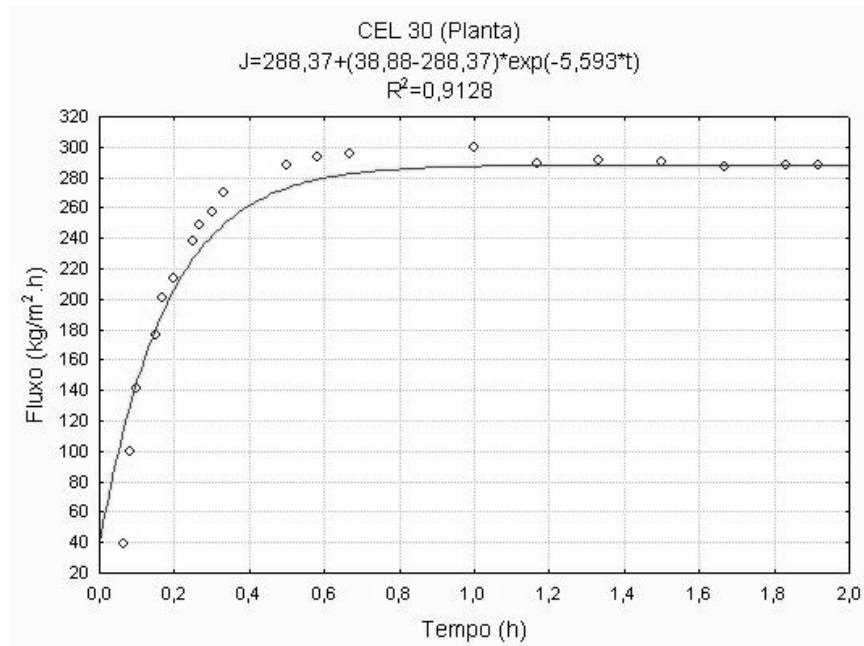


Figura A.32. Ajuste dos dados experimentais ao modelo de renovação de superfície para a membrana CEL 30 em unidade piloto.