



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA



Hortência Luma Fernandes Magalhães

**ESTUDO DA TERMOFLUIDODINÂMICA DO TRATAMENTO DE EFLUENTES
USANDO MEMBRANAS CERÂMICAS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Dissertação

CAMPINA GRANDE

2017

Hortência Luma Fernandes Magalhães

**ESTUDO DA TERMOFLUIDODINÂMICA DO TRATAMENTO DE EFLUENTES
USANDO MEMBRANAS CERÂMICAS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadores: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande - PB

27/04/2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- M188e Magalhães, Hortência Luma Fernandes.
Estudo da termofluidodinâmica do tratamento de efluentes usando membranas cerâmicas : modelagem e simulação / Hortência Luma Fernandes Magalhães. – Campina Grande, 2017.
102 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.
"Orientação: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto, Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".
- Referências.
1. Membrana Cerâmica. 2. Separação Água/óleo. 3. Fluidodinâmica. Computacional. I. Farias Neto, Severino Rodrigues de. II. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. III. Título.

CDU 666.3-187(043)

“ESTUDO DA TERMOFLUIDODINÂMICA DO TRATAMENTO DE EFLUENTES
USANDO MEMBRANAS CERÂMICAS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO”.

HORTÊNCIA LUMA FERNANDES MAGALHÃES

Dissertação Aprovada em 27/04/2017 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:



Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

Orientador

PPGEM/UAEO/CCT/UFCG



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG

Daniela Passos Simões de Almeida Tavares

Dra. Daniela Passos Simões de Almeida Tavares

Examinadora Externa

FACULDADE MAURÍCIO DE NASSAU



Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias

Examinadora Externa

UATEC/CDSA/UFCG

Dedico este trabalho a minha família e a todos que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente para a sua construção.

AGRADECIMENTOS

Á Deus.

Aos meus pais: Maria de Cássia Fernandes Nunes e Antônio Magalhaes de Oliveira por todo amor, apoio, compreensão e inúmeras palavras de incentivo, por acreditarem sempre em mim e fazerem parte de minha vida.

Aos meus orientadores, Prof Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto e Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, por toda a paciência, assistência e dedicação durante todo o tempo que trabalhamos juntos, pelos conhecimentos adquiridos e incentivos.

A minha irmã Helena Luma Fernandes Magalhães pelas alegrias, sorrisos, e pelo imenso carinho, fazendo-se sempre presente e iluminando os meus dias.

A Leandro Nunes Franca, pelo companheirismo, amizade e cumplicidade, por todos os seus conselhos, palavras de apoio e enorme carinho.

A CAPES, UFCG e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

Aos meus companheiros de laboratório, por todos os ensinamentos e companheirismo, pela troca de experiência e disponibilidades em todos os momentos, em especial a Enivaldo Santos Barbosa.

Aos meus amigos Nathalya Janne, Daniele Vieira, Priscila Santos e Jéssica Ferreira, pelo apoio e amizade.

A todos que, de alguma forma, colaboraram com a elaboração deste trabalho.

MAGALHÃES, Hortência Luma Fernandes. **Estudo da termofluidodinâmica do tratamento de efluentes usando membranas cerâmicas: Modelagem e simulação**, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2017. 102p. Dissertação (Mestrado).

RESUMO

A crescente preocupação com o meio ambiente, em especial ao descarte adequado de efluentes industriais, vem despertando a atenção de pesquisadores e engenheiros que visam minimizar essa problemática e atender as exigências dos órgãos de controle ambiental. Os processos de separação utilizando membranas cerâmicas têm se destacado neste cenário como uma importante ferramenta de tratamento de águas contaminadas, devido ao seu custo-benefício, longa vida útil e baixo consumo de energia. Neste sentido, avaliou-se empregando a fluidodinâmica computacional (CFD), o efeito térmico no processo de separação água/óleo via membrana cerâmica. Adotou-se o modelo de resistências em série em conjunto com as equações de conservação de massa, momento linear e energia, que foram resolvidas usando o ANSYS CFX[®] 15. Os resultados numéricos mostram que o modelo matemático utilizado é capaz de prever a formação e crescimento da camada limite de concentração ao longo da membrana tubular, como também a permeação do soluto (óleo) na membrana.

Palavras-chave: Separação água/óleo, Fluidodinâmica computacional, Membrana cerâmica.

MAGALHÃES, Hortência Luma Fernandes. **Study of thermofluidynamics of effluent treatment using ceramic membranes: Modeling and simulation**, Campina Grande: Post-Graduation in Mechanical Engineering, Federal University of Campina Grande, 2017. 102p. Master's Dissertation.

ABSTRACT

The growing concern with the environment, especially the adequate disposal of industrial effluents, has been attracting the attention of researchers and engineers that aim to minimize this problem and meet the requirements of environmental control agencies. The separation processes using ceramic membranes have stood out in this scenario as an important tool of treatment of contaminated water, due to their cost-benefit, long life and low energy consumption. In this sense, it was evaluated using the computational fluid dynamics (CFD), the thermal effect in the water / oil separation process via ceramic membrane. The series resistance model was adopted in conjunction with the conservation equations of mass, linear momentum and energy, which were solved using ANSYS CFX[®] 15. The numerical results show that the mathematical model used is able to predict the formation and growth of the boundary layer of concentration along the tubular membrane, as well as the permeation of the solute (oil) in the membrane.

Keywords: Water/oil separation, Computational Fluidodynamics, Ceramic membrane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Módulo de separação via membrana cerâmica.	21
Figura 2 - Esquema de um sistema de flotação.	25
Figura 3 - Representação geométrica de um hidrociclone.	25
Figura 4 Esquema dos tipos de filtração de acordo com o grau de retenção de partículas.	27
Figura 5 - Princípio da polarização por concentração.	33
Figura 6 - Processo de fabricação de Janus CNTs@PAN _{EN}	35
Figura 7 - Estágios do processo de incrustações.	37
Figura 8 – Esquema de adição de nanopartículas de CaCO ₃	38
Figura 9 - Esquema do processo de separação por membrana de fluxo cruzado.	39
Figura 10 - Coalescência das gotículas de óleo durante a permeação.	40
Figura 11 - Representação geométrica: membrana tubular e plano transversal 2D.	49
Figura 12 - Malha bidimensional da seção transversal da membrana tubular.....	49
Figura 13 - Representação das fronteiras da membrana.	49
Figura 14 - Representação geométrica do módulo de separação.....	59
Figura 15 - Malha tridimensional do módulo casco/membrana tubular.....	60
Figura 16 - Perfil de concentração ao longo do eixo z, para as posições: 0,25L; 0,50L; 0,75L e 1L (Caso 1).	64
Figura 17 - Efeito do número de Reynolds sob o perfil de concentração (z = 0,50L), comparado com: a) Damak <i>et al.</i> (2004a) e b) Cunha (2014), (Casos: 1, 2 e 3).....	64
Figura 18 - Perfil da espessura da camada limite de concentração em função da variável adimensional z/d, para Reynolds iguais a: 300 (Caso 3), 600 (Caso 2) e 1000 (Caso 1).	65
Figura 19 - Perfil da espessura da camada limite de concentração em função da variável adimensional z/R, para Reynolds iguais 1000 (Caso 1).....	66
Figura 20 - Perfil de concentração ao longo do eixo z, para z = 1L (Casos: 1, 7 e 8).....	67
Figura 21 - Velocidade de permeação em função do comprimento da membrana (Casos: 1, 7 e 8).....	67
Figura 22 - Perfil de concentração para diferentes valores do índice de retenção, para z = L (Casos: 1, 4, 5 e 6).	68
Figura 23 - Perfil de concentração para diferentes valores do índice de retenção, para z = L (Casos: 5, 9 e 10).	68
Figura 24 - Campo de concentração de óleo, para o índice de retenção de soluto pela membrana, R _r igual a 0,97 (Caso 4).	69

Figura 25 - Campo de concentração de óleo, para o índice de retenção de soluto pela membrana, R_r igual a 0,98 (Caso 5).	70
Figura 26 - Campo de concentração de óleo, para o índice de retenção de soluto pela membrana, R_r igual a 0,99 (Caso 6).	70
Figura 27 - Campo de pressão total para o índice de retenção de soluto pela membrana, R_r igual a 0,97 (Caso 4).	71
Figura 28 - Campo de pressão total para o índice de retenção de soluto pela membrana, R_r igual a 0,98 (Caso 5).	71
Figura 29 - Campo de pressão total para o índice de retenção de soluto pela membrana, R_r igual a 0,99 (Caso 6).	72
Figura 30 - Velocidade axial em função da posição radial, para $z = 0,50L$ (Casos: 4, 5 e 6).	73
Figura 31 - Velocidade de permeação em função do comprimento da membrana (Casos: 4, 5 e 6).	73
Figura 32 - Velocidade de permeação em função do comprimento da membrana (Casos: 5 e 9 e 10).	74
Figura 33 - Perfil de concentração ao longo do eixo z , para $y = 0,0075$ m (Casos: 11, 12, 13, 14 e 15).	75
Figura 34 - Campo de pressão na região inicial da membrana, para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C respectivamente (Casos 12, 13, 14 e 15).	76
Figura 35 - Campo de pressão na região central da membrana, para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C respectivamente (Casos 12, 13, 14 e 15).	77
Figura 36 - Campo de pressão na região final da membrana, para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C respectivamente (Casos 12, 13, 14 e 15).	78
Figura 37 - Campo de velocidade para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C respectivamente (Casos 12, 13, 14 e 15).	79
Figura 38 - Velocidade de permeação em função do comprimento da membrana (Casos: 12,13,14 e 15).	80
Figura 39 - Campo de temperatura no interior da membrana tubular 2D, para T_0 igual a 35°C (Caso 12).	81
Figura 40 - Campo de temperatura no interior da membrana tubular 2D, para T_0 igual a 55°C (Caso 13).	81
Figura 41 - Campo de temperatura no interior da membrana tubular 2D, para T_0 igual 75°C (Caso 14).	82

Figura 42 - Campo de temperatura no interior da membrana tubular 2D, para T_0 igual 95°C (Caso 15).	82
Figura 43 - Perfil de concentração ao longo do eixo z, para $y = 0,0225$ m (Casos: 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19).	83
Figura 44 - Perfil de concentração no interior do módulo de separação, nas posições (a) 0° e 180°, (b) 90° e 270° (Casos: 16 e 19).	84
Figura 45 - Campo de velocidade, para as temperaturas de (a) 35°C, (b) 55°C, (c) 75°C e (d) 95°C (Casos: 16, 17, 18 e 19).	85
Figura 46 - Velocidade de permeação em função do comprimento da membrana (Casos: 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19).	86
Figura 47 - Campo de temperatura no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual a 35°C (Caso 16).	87
Figura 48 - Campo de temperatura no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual a 55°C (Caso 17).	87
Figura 49 - Campo de temperatura no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual 75°C (Caso 18).	88
Figura 50 - Campo de temperatura no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual 95°C (Caso 19).	88
Figura 51 - Campo de concentração no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual a 35°C (Caso 16).	89
Figura 52 - Campo de concentração no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual a 55°C (Caso 17).	89
Figura 53 - Campo de concentração no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual 75°C (Caso 18).	90
Figura 54 - Campo de concentração no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual 95°C (Caso 19).	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do processo de separação por membrana de microfiltração.	28
Tabela 2 - Valores dos Parâmetros dos modelos RNG k- ϵ	47
Tabela 3 - Parâmetros físico-químicos do fluido e da membrana cerâmica.....	56
Tabela 4 - Coeficientes de regressão para o calor específico da água.....	56
Tabela 5 - Coeficientes de regressão para a viscosidade da água.	57
Tabela 6 - Coeficientes de regressão para a densidade da água.	57
Tabela 7 – Parâmetros considerados constantes nas simulações.....	58
Tabela 8 - Condições utilizadas na simulação bidimensional via membrana tubular.	58
Tabela 9 - Dimensões geométricas do módulo de separação.	59
Tabela 10 – Parâmetros considerados constantes nas simulações.....	62
Tabela 11 - Condições utilizadas nas simulações tridimensionais via módulo casco/membrana tubular.....	62

NOMENCLATURA

Letras latinas

A	Coeficiente de regressão	[-]
B	Coeficiente de regressão	[-]
C	Coeficiente de regressão	[-]
$C_{\varepsilon 1RNG}$	Constantes do modelo <i>RNG</i> $k-\varepsilon$	[-]
$C_{\varepsilon 2RNG}$	Constantes do modelo <i>RNG</i> $k-\varepsilon$	[-]
C_{ε}, C_{μ}	Constantes do modelo <i>RNG</i> $k-\varepsilon$	[-]
C	Concentração de soluto	[kg m ⁻³]
C_a	Concentração na alimentação	[kg m ⁻³]
C_m	Concentração na superfície da membrana	[kg m ⁻³]
C_p	Concentração no permeado	[kg m ⁻³]
c_p	Calor específico do fluido	[m ² s ⁻² K ⁻¹]
C_{μ}	Constante de calibração experimental	[-]
d_i	Diâmetro interno	[m]
D	Coeficiente de regressão	[-]
D_{AB}	Difusividade cinemática	[m ² s ⁻¹]
D_{eq}	Diâmetro equivalente	[m]
d_p	Diâmetro médio da partícula de soluto	[μ m]
D_p	Diâmetro médio das partículas que compõe o meio poroso	[m]
e	Espessura da membrana	[m]
g	Vetor aceleração da gravidade	[m.s ⁻¹]
Gr	Número de Grashof,	[-]
H	Entalpia	[m ² s ⁻²]
\bar{h}_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção	[W.m ⁻² K ⁻¹]
J	Fluxo volumétrico	[Kg m ⁻² s ⁻¹]
k	Energia cinética turbulenta	[m ³ . s ⁻¹]
K	Permeabilidade de Darcy	[m ²]
k'	Constante adimensional dependente da estrutura dos poros	[-]
k	Condutividade térmica	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]
L	Comprimento do tubo ou do canal	[m]

L_c	Comprimento característico	[m]
Nu	Número de Nusselt	[-]
N	Coefficiente de regressão	[-]
n	Número de capilares por unidade de área	[m ⁻²]
P	Pressão	[Pa]
P_{ex}	Pressão externa	[Pa]
P_k	Termo de produção pelo efeito de cisalhamento	[kg.m ⁻¹ .s ⁻³]
\bar{P}_p	Pressão média de permeado	[Pa]
P_{kb}	Termo de produção de flutuação	[kg.m ⁻¹ .s ⁻³]
Pr	Números de Prandtl	[-]
q	Fluxo de calor convectivo	[W.m ⁻²]
r	Raio do capilar	[m]
R	Raio interno da membrana	[m]
Ra	Números de Rayleigh	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
R_e	Raio externo do tubo	[m]
Re_w	Número de Reynolds de permeação	[-]
r_i	Raio interno do tubo	[m]
R_m	Resistencia da membrana	[m ⁻¹]
R_p	Resistencia da camada polarizada	[m ⁻¹]
r_p	Resistencia específica do material depositado	[m ⁻¹]
R_r	Índice de retenção do soluto pela membrana	[-]
S	Área	[m ²]
Sc	Número de Schmidt	[-]
S^H	Termo fonte de calor	[kg. s ⁻³]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura	[°C]
T_c	Temperatura crítica	[K]
T_0	Temperatura de alimentação	[°C]
T_s	Temperatura na superfície da membrana	[°C]
T_∞	Temperatura do ar	[°C]

U_w	Velocidade de permeação	[m s ⁻¹]
U_z	Velocidade axial	[m s ⁻¹]
\vec{U}	Vetor velocidade	[m s ⁻¹]
\bar{U}_z	Velocidade média axial	[m s ⁻¹]
U_y	Velocidade radial	[m s ⁻¹]
V_J	Volume	[m ³]
y	Coordenada radial	[m]
z	Coordenada axial	[m]

Letras gregas

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Constantes empíricas	[-]
δ	Distância	[m]
ρ	Densidade	[kg m ⁻³]
β	Constantes do modelo <i>RNG k-ε</i>	[-]
β_d	Coefficiente de dilatação térmica	[K ⁻¹]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² s ⁻¹]
η	Parâmetro do modelo de turbulência	[-]
δ_p	Espessura da camada de polarização por concentração	[m]
σ_ρ	Número de Prandtl turbulento	[-]
ε_p	Porosidade da camada de polarização por concentração	[%]
ΔP	Pressão transmembrânica	[Pa]
ε	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta	[m ² .s ⁻³]
φ	Porosidade da membrana	[-]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
μ_t	Viscosidade turbulenta	[Pa.s]
Γ_e	Difusividade térmica efetiva	[kg m ⁻¹ s ⁻¹]

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	19
1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. Justificativa.....	21
1.2. Objetivo geral	22
1.2.1. Objetivos específicos.....	22
CAPÍTULO II.....	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. Águas produzidas e seus principais processos de tratamento.....	23
2.2. Membranas	26
2.2.1 Tipos de membranas.....	27
2.2.1.1. Membranas de nanofiltração	27
2.2.1.2. Membranas de ultrafiltração.....	28
2.2.1.3. Membranas de microfiltração.....	28
2.2.1.4. Membranas Cerâmicas e Poliméricas.....	30
2.2.2. Polarização por concentração	32
2.2.3. Incrustações	33
2.3. Processo de separação água/óleo via membrana: estado da arte	34
2.4. Mecanismo de escoamento.....	41
2.4.1. Lei de Darcy	41
2.4.2. Equação de Kozeny-Carman	43
2.4.3. Modelo de capilaridade (Equação de Hagen-Poiseuille).....	43
2.5. Escoamento laminar	44
2.6. Escoamento turbulento	45
2.6.1. Modelo de turbulência: RNG k-ε	46
CAPÍTULO III	48
3. METODOLOGIA.....	48

3.1. Estudo bidimensional do processo de separação água/óleo via membrana cerâmica tubular.....	48
3.1.1. Descrição do problema	48
3.1.2. Geração do domínio computacional 2D	49
3.1.3. Modelagem matemática.....	50
3.1.3.1. Condições de contorno	51
3.1.3.2. Propriedades físicas do fluido utilizadas no estudo do escoamento não isotérmico	56
3.1.4. Casos estudados	58
3.2. Estudo tridimensional do processo de separação água/óleo via módulo de separação munido de membrana cerâmica tubular.....	59
3.2.1. Descrição do problema	59
3.2.2. Geração do domínio computacional 3D	60
3.2.3. Modelagem matemática.....	60
3.2.4. Casos estudados	62
CAPÍTULO IV.....	63
4. RESULTADOS	63
4.1. Análise isotérmica de uma membrana cerâmica tubular bidimensional	63
4.1.1. Perfis de concentração	63
4.1.2. Espessura da camada limite de concentração	65
4.1.3. A Influência do diâmetro da partícula de soluto.....	66
4.1.4. Índice de retenção do soluto pela membrana.....	67
4.2. Análise não isotérmica de uma membrana cerâmica tubular bidimensional.....	74
4.2.1. Perfil de concentração	74
4.2.2. Campo de pressão	75
4.2.3. Campo de velocidade.....	78
4.2.4. Velocidade de permeação	80
4.2.5. Campo de temperatura.....	80
4.3. Análise não isotérmica de um módulo casco/membrana tubular tridimensional	83
4.3.1 Perfil de concentração	83
4.3.2. Campo de velocidade.....	85
4.3.3. Velocidade de permeação	86

4.3.4. Campo de temperatura.....	86
4.3.5. Campo de concentração.....	89
CAPÍTULO V	91
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
5.1. Conclusões.....	91
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	92
CAPÍTULO VI.....	93
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

CAPÍTULO I

Apresenta os principais temas a serem abordados, justificando e ressaltando a importância da realização deste trabalho, juntamente com os objetivos propostos para a realização desta pesquisa.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o meio ambiente vem incentivando o desenvolvimento de mecanismos de tratamentos de um dos seus fundamentais recursos, a água. Sujeito a contaminantes sólidos e líquidos, os corpos hídricos são os mais afetados (SOUZA, 2014).

O descarte de águas contaminadas com óleo oriundas das atividades de exploração e produção de óleo e gás é uma problemática crescente na indústria de petróleo, onde essas águas produzidas precisam ser tratadas antes de sua devolução ao meio ambiente. Segundo as especificações regulamentadas pelo órgão de controle ambiental, o teor de óleos e graxas em efluentes não podem exceder 20mg/l (CONAMA N°20/Art.21, 1986).

A água produzida pode ser definida como qualquer água presente em um reservatório. Durante a fase de produção a água escoia juntamente com o petróleo bruto ou gás natural para a superfície. Essa água é, geralmente, composta por uma mistura de hidrocarbonetos gasosos ou líquidos, sólidos dissolvidos (carbonatos, sulfatos, cloreto de sódio, cloreto de potássio, cloreto de cálcio e cloreto de magnésio) e de sólidos em suspensão (areia, lama, argila, gesso, etc.). Óleo disperso pode ser considerado como um poluente importante, por causa dos seus efeitos tóxicos, impactando a vizinhança da área de descarte. A concentração deste contaminante depende de diferentes fatores, tais como: a densidade do óleo, tensão interfacial entre as fases óleos/água, o tipo e a eficiência do tratamento químico, e do tipo, tamanho, e eficiência do equipamento de separação física (FARIAS *et al.*, 2011).

A principal contribuição da água no processo de extração consiste do mecanismo artificial de produção de petróleo, utilizados quando o reservatório está perdendo a sua energia

interna e não consegue mais produzir. Para tanto são utilizadas injeção de água ou vapor de água para aumentar a pressão no reservatório e proporcionando o deslocamento dos fluidos em direção ao poço produtor. A água associada ao petróleo provoca vários problemas nas etapas de produção, transporte e refino (SILVA, 2013).

Os métodos utilizados atualmente no tratamento de águas oleosas empregam métodos físico-químicos e têm se mostrado onerosos e, em muitas situações, de baixo desempenho em situações complexas e heterogêneas. Dentre essas técnicas podem ser destacadas a decantação, separação centrífuga, flotação, filtração, entre outros.

Os processos que envolvem a filtração, em especial os que utilizam membranas como meio filtrante, têm se destacado devido às várias características que as levam a ter melhor relação custo/benefício, simplicidade de operação, baixo custo energético, vida útil longa e uniformidade da qualidade do permeado durante todo o processo.

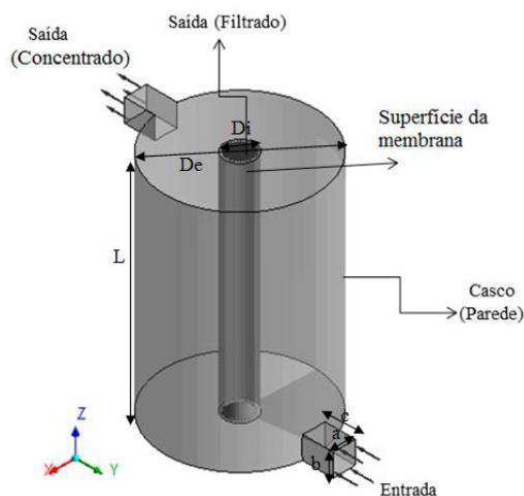
Por volta da década de 70, em união com os processos clássicos de separação, surge uma nova classe de processos que utilizam membranas sintéticas com barreira seletiva; tais membranas surgem em uma tentativa de imitar as membranas naturais já existentes, visando suas características únicas de seletividade e permeabilidade (HABERT *et al.*, 2006).

Liu *et al.* (2009) mencionam que o desempenho da maioria dos sistemas de membrana que utilizam a pressão como força motriz é severamente prejudicada pela polarização por concentração e entupimento da membrana, o que restringe a produtividade por redução do fluxo de permeado. Para atenuar estes efeitos adversos, promotores de turbulência são amplamente utilizados para melhorar as condições hidrodinâmicas sobre a superfície da membrana e melhorar o desempenho dos módulos munidos de membranas.

Alguns trabalhos teóricos têm sido reportados na literatura empregando a fluidodinâmica computacional como uma ferramenta no estudo dos processos de separação por membranas, dos quais podem ser destacados os trabalhos de Darcovich *et al.* (1997) e Geraldés *et al.* (2000) utilizando membranas do tipo placa plana; Serra *et al.* (1999) e Serra e Wiesner (2000) usando membranas circulares; Bellhouse *et al.* (2001) e Souza (2014) utilizaram membranas tubulares.

No caso de membranas tubulares, Souza (2014) por exemplo, utilizou um módulo de separação munida de membrana cerâmica tubular, onde a água contaminada é introduzida no dispositivo por uma entrada retangular na base do módulo e perpendicular a membrana. A vazão foi controlada de forma que fosse assegurado o regime de escoamento laminar no interior do módulo de separação, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 - Módulo de separação via membrana cerâmica.



Fonte - Souza (2014)

O filtrado deixa o dispositivo pela face interna da membrana tubular e o concentrado pela saída retangular superior (Figura 1). Souza (2014) concluiu que a espessura do espaço anular, formado entre a parede externa da membrana cerâmica e a parede do módulo, afeta o coeficiente de rejeição de soluto, aumentando significativamente com a redução do espaço anular.

1.1. Justificativa

Tem sido reportado na literatura trabalhos teóricos visando estudar o fenômeno da polarização por concentração, sendo na maioria das situações adotado um domínio bidimensional e assumido um perfil de velocidade de escoamento laminar completamente desenvolvido no interior da tubulação para, assim, resolver a equação de conservação de matéria. Dentre os trabalhos reportados que empregam esta metodologia podem ser destacados os trabalhos de Paris *et al.* (2002), Damak *et al.* (2004a, b e c), Pak *et al.* (2008) e Minnikanti e Dasgupta, (1999). De uma maneira geral, os principais objetivos desses trabalhos foram a determinação da queda de pressão através membrana e a espessura da camada limite de concentração formada. Entretanto, na literatura o caráter não isotérmico de um processo de separação e sua influência sobre o fenômeno de polarização por concentração é pouco abordado.

De acordo com Cheng e Yeh (2008) a análise da redução de fluxo de permeado a partir da redução efetiva da pressão transmembranica que ocorre à medida que a pressão osmótica do

fluido de retenção aumenta é extremamente difícil, pois as variações das concentrações de ambos os lados da superfície da membrana devem ser conhecidas *a priori*. No modelo de resistência em série, o fluxo de permeado diminui em consequência das resistências provocadas pela incrustação ou adsorção de soluto e a camada de polarização por concentração/gel.

A contribuição desta pesquisa é, portanto, tentar responder alguns questionamentos via simulação numérica não isotérmica empregando o modelo de resistência em série em um domínio bidimensional e tridimensional representativo do módulo de separação com uma membrana cerâmica tubular, assumindo um regime de escoamento laminar e turbulento, com o intuito de compreender fisicamente os fenômenos envolvidos no tratamento de águas produzidas, empregando membranas cerâmicas.

1.2. Objetivo geral

Estudar a termofluidodinâmica do tratamento de efluentes com membrana cerâmica microporosa.

1.2.1. Objetivos específicos

- Definir um modelo matemático para descrever o comportamento do processo de separação via membrana cerâmica com base nas equações de conservação de massa, momento linear e energia;
- Avaliar a influência do aspecto geométrico sobre a termofluidodinâmica do escoamento e formação da camada limite de concentração sobre a membrana;
- Estudar o efeito dos parâmetros operacionais, tais como: vazão de alimentação, concentração e temperatura do efluente sobre a distribuição de pressão, velocidade, temperatura e concentração dos componentes no processo de separação;
- Comparar os resultados das simulações numéricas com soluções numéricas ou analíticas disponibilizadas na literatura.

CAPÍTULO II

Apresenta a revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento da pesquisa, responsável por nortear e esclarecer conceitos e definições acerca dos processos de tratamento água/óleo e a problemática do escoamento via membrana tubular, objetivando verificar a relevância desses temas na literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Águas produzidas e seus principais processos de tratamento

Nos reservatórios de petróleo é comum encontrar frações de água, decorrente da sua presença natural ou oriunda do processo de injeção com o intuito de aumentar o seu fator de recuperação, denominada águas produzidas.

O descarte de águas provenientes da exploração é conhecido por causar sérios danos ambientais. A fim de reduzir o impacto negativo provocado é necessário realizar um tratamento da água antes da sua eliminação no meio ambiente. Em plataformas *offshore*, a água produzida pode ser descartada diretamente no oceano, desde que a concentração da fase dispersa de óleos e graxas esteja abaixo do valor especificado pelos órgãos ambientais (SOUZA *et al.*, 2012).

A água produzida possui normalmente alta salinidade, partículas de óleo em suspensão, produtos químicos adicionados nos diversos processos de produção, metais pesados e por vezes alguma radioatividade. Portanto, um poluente de difícil descarte, sendo uma problemática não só por suas características como também pelo expressivo volume produzido diariamente (SILVA, 2000).

Santos *et al.* (2005) mencionam acerca do tratamento eletroquímico, que pela ação dos próprios elétrons, as substâncias tóxicas e nocivas encontradas nas águas produzidas são removidas ou transformadas por reações de óxido-redução em substâncias menos tóxicas.

Souza *et al.* (2010) relatam que o processo de separação água/óleo via hidrociclone apresentam um bom desempenho no tratamento de águas oleosas com concentrações de até 2000 ppm, sendo bastantes comuns em unidades *offshore*.

Em alguns processos de separação água/óleo com águas produzidas não é possível atender às especificações exigidas pelos órgãos de controle ambiental utilizando apenas um mecanismo de separação, sendo necessário a aplicação de uma sequência de técnicas. A escolha dos melhores mecanismos a serem utilizados baseia-se na relação custo-benefício, nas propriedades físico-químicas das águas contaminadas e, principalmente, no destino final almejado.

Dentre os processos de separação água/óleo comumente utilizados é possível citar a coagulação, filtração, centrifugação, flotação, decantação dentre outros.

A coagulação é um processo de tratamento utilizado industrialmente, que consiste na alteração das propriedades físico-químicas de coloides e partículas suspensas, objetivando a aglomeração destes em flocos suficientemente densos que possibilita a remoção por filtração ou sedimentação. As partículas desestabilizadas pela ação do coagulante pode ser afetada pela temperatura, alcalinidade, carbono orgânico total, pH, parâmetros operacionais e dosagem do agente coagulante (MACEDO, 2009). De acordo com Silva (2010) os coagulantes mais utilizados no tratamento de águas são, em sua maioria, os que apresentam na sua constituição sais de ferro ou alumínio.

Outro processo que pode ser mencionado é a flotação, responsável pela separação de sólidos de baixa densidade ou partículas sólidas de uma fase líquida. Realizada a partir da injeção de um gás (normalmente ar) na fase líquida, na forma de microbolhas. Para tanto, é necessário submeter a fase líquida a um processo de pressurização para alcançar uma pressão de funcionamento entre 2 e 4 atm, suficiente para a saturação da água em ar e posteriormente, a uma despressurização utilizando uma válvula redutora de pressão, assim, formando pequenas bolhas de ar que se desprendem da solução. Ocasionalmente a flotação dos sólidos em suspensão ou partículas líquidas, elevando-os à superfície onde podem ser separados por sistemas mecânicos (SANTANA, 2009).

A flotação proveniente de efluentes oleosos emulsionados deve ser empregada após o processo de coagulação; sua remoção pode ser realizada por decantadores ou por raspagem superficial (Figura 2), sendo reportado na literatura como um dos processos de separação água/óleo mais utilizado pela indústria de petróleo juntamente com o hidrociclone (SILVA, 2010).

Figura 2 - Esquema de um sistema de flotação.

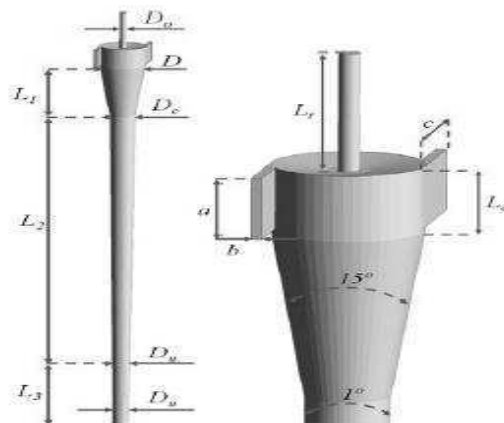


Fonte - www.quimica.com.br.

Já a decantação/sedimentação realizada pelos decantadores utilizam da diferença de densidade das fases, para a remoção de partículas sólidas em suspensão, apresentando-se como um dos mais comuns processos de separação sólido/líquido, pouco oneroso, podendo ser operado tanto em batelada como contínuo. Contudo, não consegue obter a remoção de óleo emulsionado, sendo utilizado normalmente na etapa preliminar dos sistemas de tratamento (SIMÕES, 2005).

Após o pré-tratamento, o hidrociclone (Figura 3) é bastante utilizado no processo de separação água/óleo, seu mecanismo consiste em introduzir tangencialmente a água oleosa no trecho de maior diâmetro do equipamento, utilizando da força centrífuga para forçar os componentes mais densos contra a parede, ocasionando um fluxo axial reverso no centro contendo a fração menos densa, rejeito de óleo, retirado na saída superior do equipamento (FERNANDES, 2006).

Figura 3 - Representação geométrica de um hidrociclone.



Fonte - Barbosa (2011)

Ao utilizar apenas os hidrociclones como mecanismo de tratamento de águas produzidas não é possível atingir uma eficiência de 100%, sendo necessário recorrer a outros tipos de tratamentos, como a filtração.

Para obter um efluente, a *priori* contaminado com óleo, dentro das especificações exigidas pelos órgãos de controle ambiental, um dos principais mecanismos utilizados na etapa final do processo é a filtração. Atuando na separação de sólidos que se encontram em suspensão em líquido, utilizando para tanto de um meio poroso para retenção, onde o diâmetro médio das partículas não deve exceder e/ou igualar ao tamanho dos poros, para que não ocorra a obstrução dos mesmos, e aumento da resistência do meio.

Segundo Svarovsky (2000) para obtenção de um fluido através do meio filtrante, uma queda de pressão tem de ser aplicado através do meio, sendo indiferente a partir do ponto de vista fundamental como esta queda de pressão será alcançada, existindo quatro tipos de força motrizes: a gravidade, a vácuo, de pressão e centrífugas.

Entre as propriedades mais relevantes do meio filtrante, destaca-se a permeabilidade, porosidade, espessura e seletividade que afetam o desempenho da filtração.

2.2. Membranas

As membranas são barreiras semipermeáveis e seletivas, orgânicas ou inorgânicas, que têm como função separar as fases, restringindo, total ou parcialmente, o transporte de uma ou mais espécies presentes na solução.

Os processos de separação utilizando membranas são movidos por duas forças: pela concentração, ocorrendo quando existe um gradiente de concentração existente entre duas fases de uma membrana semipermeável, ou movido pela pressão a exemplo dos processos de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa (TIMOTEO, 2007).

Park *et al.* (2007) relatam que a eficiência de separação e viabilidade econômica, em processos que utilizam membranas no tratamento de águas residuais, dependem do custo, da energia de operação, do fluxo de permeado e da vida útil da membrana. O tempo de vida útil de uma membrana está diretamente relacionado com as incrustações, ocasionadas pelo efeito de polarização por concentração, formação de uma camada de gel na superfície da mesma, adsorção e bloqueio dos poros.

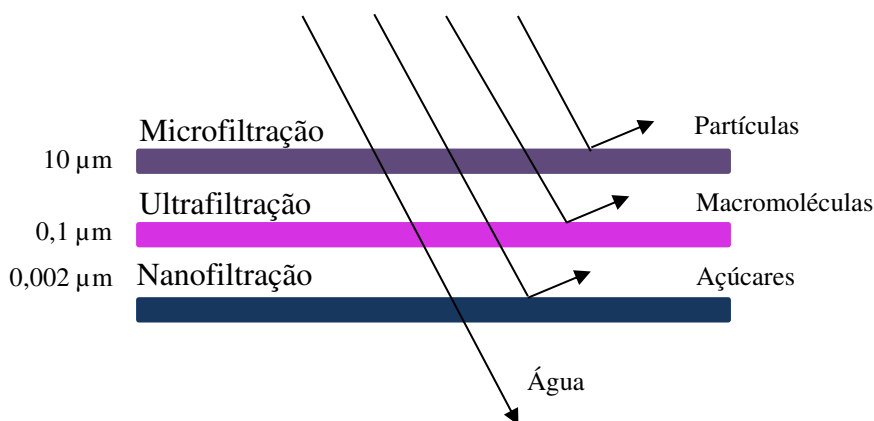
O desempenho de sistemas com membranas é afetado por diversos fatores, principalmente pelo entupimento e polarização da sua superfície. Para melhorar as condições

hidrodinâmicas sobre a superfície da membrana empregam-se promotores de turbulência, a exemplo de defletores e chicanas, atenuando assim seus efeitos adversos. Ahmad *et al.* (2005) relatam que esses promotores de turbulência são ferramentas úteis para melhorar as tensões de cisalhamento locais na superfície da membrana e aumentar, assim, a transferência de massa reduzindo incrustações.

2.2.1 Tipos de membranas

As membranas podem ser classificadas em diversas categorias, podendo assumir várias configurações e módulos, dependendo das características das substâncias a serem utilizadas no processo. Para cada categoria de membrana existe um diâmetro médio de poros pré-estabelecido (Figura 4). Na microfiltração esse diâmetro encontra-se entre 0,1 e 10 μm ; para ultrafiltração deve apresentar diâmetro médio entre 0,001 e 0,1 μm ; já para membranas de nanofiltração esse valor está compreendido entre 0,0005 e 0,002 μm ; sendo uma função da morfologia e tamanho das partículas (TAKETA *et al.*, 2009).

Figura 4 Esquema dos tipos de filtração de acordo com o grau de retenção de partículas.



Fonte - Autoria própria.

2.2.1.1. Membranas de nanofiltração

A nanofiltração consiste de um processo de separação por membrana indicado para separações de moléculas de uma extensa faixa de pesos moleculares, sendo empregada em diversas áreas, desde a indústria de química fina (separação de moléculas orgânicas) a recuperação de moléculas de alto valor agregado (fármacos, enzimas e biocatalizadores) (CARVALHO *et al.*, 2001). Considerado como um processo relativamente novo possui

características que podem ser ressaltadas, como sua capacidade de fracionamento de ânions de baixa massa molar com tamanhos e valências diferentes através da exclusão iônica e o fracionamento de diferentes componentes orgânicos em solução aquosa (LOPES, 2006).

2.2.1.2. Membranas de ultrafiltração

A ultrafiltração é indicada para tamanho de partícula do soluto 10 vezes maior que o tamanho de partícula da molécula do solvente, sendo destinada à concentração ou fracionamento de macromoléculas (TIMOTEO, 2007). No tratamento de água para abastecimento, onde a preocupação com contaminantes orgânicos é a maior preocupação, o processo de ultrafiltração é considerado adequado, apresentando menor consumo de energia, maior eficiência para remoção de poluentes orgânicos e matéria orgânica natural em função da massa molar (MIERZWA *et al.*, 2008).

2.2.1.3. Membranas de microfiltração

A microfiltração pode ser definida como um processo de separação que emprega como barreira uma membrana microporosa permeável para separação de fases. Sendo um processo aplicável a diversos ramos industriais, que utiliza principalmente como material para a sua confecção a cerâmica, devido a sua estabilidade química, alta durabilidade e resistência à alta temperatura e pressão (ROSA *et al.*, 2006). Apresentando, todavia, algumas vantagens e desvantagens (Tabela 1), que devem ser ponderadas de acordo com a partícula/processo que se deseja trabalhar.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do processo de separação por membrana de microfiltração.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baixo custo; ✓ Baixo consumo de energia; ✓ Pode ser integrada a outros processos de tratamento; ✓ Capaz de remoção seletiva de metais. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Não apresenta bom desempenho para substâncias iônicas e gases, que permeiam o meio facilmente; ✓ Estão sujeitas a ataques químicos; ✓ O efluente deve apresentar baixa concentração de contaminantes.

Fonte – Adaptado de Cunha (2014).

Makabe *et al.* (2017) mencionam sobre a utilização de membranas de microfiltração em sistemas de classificação de partículas, onde as partículas menores que os poros da membrana são recolhidas no permeado e as maiores no retido. O tamanho do corte é, assim, determinado pelo tamanho dos poros da membrana, apresentando-se, pois, como um método potencial de classificação de partículas.

Yang *et al.* (2017) relatam a respeito do processo de purificação do caldo da fermentação de celulase empregando membranas cerâmicas de microfiltração de baixo custo com uma camada de separação de nanofibras atapulgita, baseando-se no modelo de resistências em série, na influência da microestrutura da membrana e nas condições operacionais, os autores investigaram o fluxo de permeado, verificando que a membrana representa um pré-tratamento viável para o caldo da fermentação e que, em condições de baixa pressão e alta velocidade, essas membranas contaminadas podem ser regeneradas satisfatoriamente usando uma lavagem de água e limpeza química.

Wang *et al.* (2017) dissertam acerca do desenvolvimento de um novo biorreator de membrana anaeróbica que emprega simultaneamente membranas de microfiltração e de osmose frontal para o tratamento de águas residuais de baixa intensidade, verificando que essa tecnologia é promissora e sustentável devido à recuperação simultânea de energia (na forma de biogás) e reutilização de água (a partir das membranas de microfiltração e de osmose frontal).

Suresh e Pugazhenthii (2016b) estudaram sobre a microfiltração de fluxo cruzado de emulsões óleo/água em suporte de membrana cerâmica de base argilosa e membrana cerâmica compósita de TiO₂. Ao investigarem o efeito das condições de filtração sobre o tratamento de águas residuais oleosas, comprovaram que a membrana cerâmica de TiO₂ apresenta melhor desempenho, especialmente em termos de fluxo, eficiência de remoção de partículas oleosas e taxa de declínio do fluxo de permeação, devido a sua superfície altamente hidrofóbica.

Suresh *et al.* (2016a) ao estudar a fabricação de membrana cerâmica de microfiltração à base de cinzas volantes para o tratamento de emulsão água/óleo, relatam que esse tipo de membrana apresenta maior fluxo de permeado e exigência de baixas pressões de operação se comparadas com as membranas de nanofiltração, ultrafiltração e osmose reversa. Visto que as membranas de nanofiltração e ultrafiltração produziram comumente baixo fluxo de permeado e as de osmose reversa exigem alta pressão quando aplicadas ao tratamento de águas residuais oleosas, apresentando problemas elevados de incrustações com redução da permeabilidade.

Portanto, é perceptível a aplicação de membranas de microfiltração nos mais variados processos e ramos industriais, onde a escolha do tipo de membrana e do material utilizado na confecção irá depender das características das substâncias a serem tratadas.

2.2.1.4. Membranas Cerâmicas e Poliméricas

As membranas são desenvolvidas principalmente a partir de duas classes distintas de materiais: os orgânicos, na sua maioria polímeros; e os inorgânicos, como metais e cerâmicos.

- **Membranas poliméricas**

As membranas poliméricas são caracterizadas por sua versatilidade em se obter diferentes morfologias e de apresentarem baixo custo de produção. Apresentando inúmeras aplicações baseadas nas características do material utilizado para sua fabricação. Contudo, existem poucos polímeros comerciais que podem ser aplicados na confecção de membranas, surgindo a necessidade, em diversos casos, de modificação ou combinação de polímeros para obtenção de material adequado, para confecção de uma membrana (BECKER, 2007).

Leite *et al.* (2009) relatam uma crescente utilização das membranas de segunda geração, produzidas a partir de polímeros sintéticos (como por polieterimida), por apresentarem resistência química e térmica elevada, possuindo também resistência a compostos clorados. Em contrapartida apresenta baixa resistência à compactação mecânica.

Perles (2008) destaca a utilização de membranas poliméricas em células de combustão, que são mecanismos responsáveis por converter a variação de energia livre de Gibbs de uma reação redox em energia elétrica, utilizando dos eletrólitos de membranas poliméricas como ferramenta. Contudo, para que as membranas poliméricas possam ser empregadas, as mesmas devem possuir propriedades especiais, onde a relação entre a estrutura molecular e morfológica do polímero deve ser devidamente conhecida para o bom desenvolvimento reacional da membrana.

De forma geral, as membranas poliméricas, mesmo possuindo algumas desvantagens em relação às membranas cerâmicas apresentam inúmeras aplicações.

- **Membranas cerâmicas**

Podem ser definidas como um tipo de filtro ou uma barreira cerâmica que separa duas fases delimitando, total ou parcialmente, o transporte de uma ou várias espécies químicas existentes na solução, onde a capacidade de separação das membranas irão depender da porosidade e da seletividade (SILVA *et al.*, 2003).

As membranas cerâmicas apresentam vantagens em relação às poliméricas, no que se refere à sua inércia química, estabilidade biológica e resistência a altas temperaturas e pressões. Demonstrando também vantagens sobre outros métodos tradicionais de separação a exemplo da destilação e centrifugação, por apresentarem baixo consumo de energia, longa vida útil, ocupação de pouco espaço físico e facilidade de limpeza (SILVA e LIRA 2006).

Zhu *et al.* (2016) também ressaltam algumas vantagens da utilização de membranas cerâmicas no processo de tratamento de águas oleosas, ao estudar sobre membranas compósitas de microfiltração de baixo custo. Os autores relatam que as membranas cerâmicas se sobressaem no tratamento de emulsões com diâmetros de partículas inferiores a $20\mu\text{m}$, se comparadas com outras técnicas de tratamento, tais como sedimentação por gravidade, adsorção e flotação. Apresentam diversos benefícios também, frente as membranas poliméricas, devido ao seu desempenho mecânico e regeneração facilitada.

Maia (2006) menciona sobre a permeabilidade das membranas e sua responsabilidade sobre a restrição ao movimento de um componente através do meio poroso. A forma, tamanho e distribuição dos poros são parâmetros que influenciam a permeabilidade, sendo a fragilidade a principal desvantagem da membrana cerâmica, que pode ser contornada com a utilização de um suporte.

Chen *et al.* (2017) ao estudarem membranas cerâmicas tubulares de nanofiltração, relatam que embora sejam particularmente importantes para os processos que envolvem separação molecular sob condições adversas. As mesmas são normalmente confeccionadas pelo processo sol-gel que apresenta frequentemente problemas de baixa eficiência e um insatisfatório controle das propriedades da membrana, apresentando então uma estratégia para confecção, com base na deposição de camada atômica e calcinação, contornando assim esse problema.

As membranas cerâmicas de microfiltração, comumente utilizadas nos processos de tratamento de águas oleosas possui normalmente tamanhos de poros que variam de $0,2 - 0,8\mu\text{m}$ podendo ser preparadas por qualquer método de sintetização de partículas ou processo sol-gel, bastante difundido na literatura e tem como vantagem a flexibilidade na síntese, uniformidade no tamanho dos poros e ótima reprodutividade. Os métodos de síntese de partículas, menos difundidos, se iniciam com o revestimento de uma fina camada de partículas para posteriormente realizar um tratamento a alta temperatura ($1000 - 1600^\circ\text{C}$) para sintetizar parcialmente as partículas e criar uma camada de separação porosa (CUI *et al.*, 2008).

Em síntese, as membranas cerâmicas possuem alta aplicabilidade e na literatura são comumente utilizadas nos processos de separação água/óleo, com obtenção de bons resultados.

2.2.2. Polarização por concentração

O efeito de polarização por concentração é pertinente a qualquer processo de separação por membranas, sendo um fenômeno considerado reversível. Esse efeito ocorre toda vez que uma solução permeia uma membrana seletiva, ocorrendo o aumento da concentração do soluto na interface da membrana, acarretando no aumento da pressão osmótica da solução nas proximidades da membrana e diminuindo a força motriz de separação (LOPES, 2006).

Segundo Damak *et al.* (2004a), em um processo de filtração de fluxo cruzado por membranas, as partículas contidas na corrente de alimentação são convectivamente transportadas para a superfície da membrana, ocasionando seu acúmulo, até que o equilíbrio entre os fluxos convectivos e difusivos seja atingido, formando uma camada polarizada por concentração. Isso se torna o maior problema durante a filtração por causar o declínio do fluxo de permeado.

Para exemplificar esquematicamente o surgimento da camada de polarização por concentração (Figura 5), Mulder (1996) admite um fluxo de alimentação a uma determinada distância, δ , da superfície da membrana, com uma concentração, C_a . Assumindo que, nas proximidades da membrana ocorre a formação de uma camada limite que atinge seu valor máximo de concentração, C_m , sendo $J \cdot C$ o fluxo convectivo de soluto em direção a membrana. Se o soluto não é completamente retido pela membrana, haverá um retorno de fluxo por difusão $D_{AB} \frac{dC}{dx}$, onde as condições de estado estacionário só serão atingidas quando o transporte convectivo for igual a soma do fluxo de permeado ao transporte difusivo.

O balanço de massa em condições permanentes pode ser escrito como:

$$J \cdot C + D_{AB} \frac{dC}{dx} = J \cdot C_p \quad (1)$$

onde $J \cdot C_p$ é o fluxo de soluto através da membrana.

Integrando a equação diferencial nas seguintes condições contorno, obtém-se:

$$x = 0 \Rightarrow C = C_m \quad (2a)$$

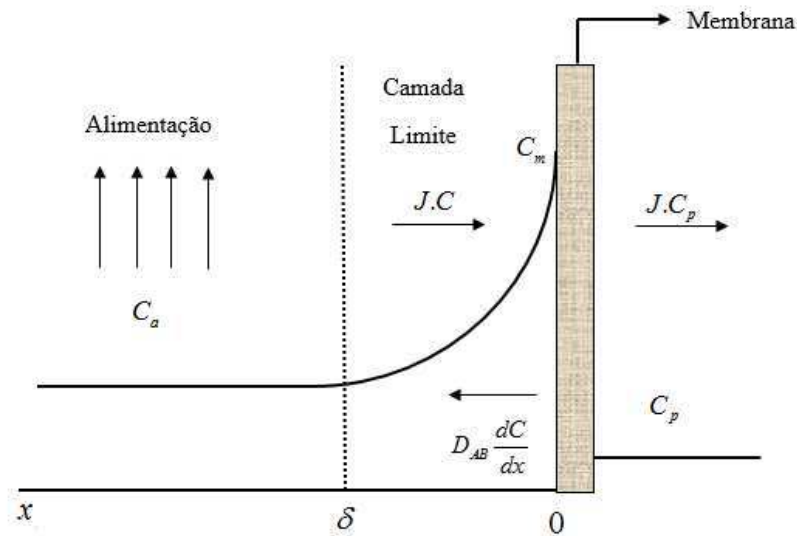
$$x = \delta \Rightarrow C = C_a$$

$$\frac{C_m - C_p}{C_a - C_p} = \exp\left(\frac{J\phi}{D_{AB}}\right) \quad (2b)$$

onde J é o fluxo volumétrico e ϕ a espessura da membrana.

Esse fenômeno de formação da camada polarizada depende principalmente da hidrodinâmica do sistema, da natureza e do tamanho das moléculas do soluto e da porosidade e permeabilidade da membrana, o que limita o transporte difusivo do soluto, podendo causar efeitos negativos irreversíveis como: incrustações por deposição, precipitação e bioincrustações.

Figura 5 - Princípio da polarização por concentração.



Fonte – Adaptado de Mulder (2006).

Adams e Barbano (2016) ao estudar sobre membrana cerâmica de microfiltração mencionam que a polarização por concentração pode ser atenuada pelo aumento da turbulência.

2.2.3. Incrustações

As operações com membranas têm sido bastante empregadas na atualidade; contudo, sua utilização em grande escala e de forma contínua em sistemas de filtragem vem sofrendo algumas limitações, dentre elas, a principal, é o entupimento da membrana, que provoca a redução do fluxo de filtrado e o decaimento no rendimento do processo, como também o aumento do custo devido ao consumo de energia e materiais para o processo de limpeza e retrolavagem.

Existem três tipos de incrustações: por deposição, precipitação e bioincrustação. Quando ocorre por deposição de sólidos suspensos, tais como: colóides, orgânicos, produtos de

corrosão, hidróxido de ferro, algas e materiais particulados finos causa entupimento do canal de alimentação dos módulos de membranas, muitas vezes sendo de difícil remoção, acarretando na perda do desempenho. A precipitação é um tipo de incrustação que ocorre por precipitação dos compostos solúveis presentes na alimentação, quando o seu limite de solubilidade é alcançado. Devido à polarização de concentração, este efeito se intensifica próximo à superfície da membrana, podendo atingir o limite de solubilidade dos sais presentes causando a precipitação, sendo os sais mais comuns na precipitação o carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, complexos de sílica, sulfato de bário, sulfato de estrôncio e fosfato de cálcio. As bioincrustações ocorrem devido ao acúmulo de material orgânico na superfície da membrana, incluindo fragmentos celulares, substância polimérica extracelular e microrganismos, que resulta na formação de biofilmes, sendo igualmente prejudicial para a vida útil da membrana (OLIVEIRA, 2007).

Durante a filtração com membranas, a formação da camada polarizada e incrustações resultam no declínio do desempenho da membrana em relação a qualidade e o fluxo, reduzindo sua confiabilidade, visto que em aplicações com membranas é essencial o controle de incrustações (AHMED *et al.*, 2012).

2.3. Processo de separação água/óleo via membrana: estado da arte

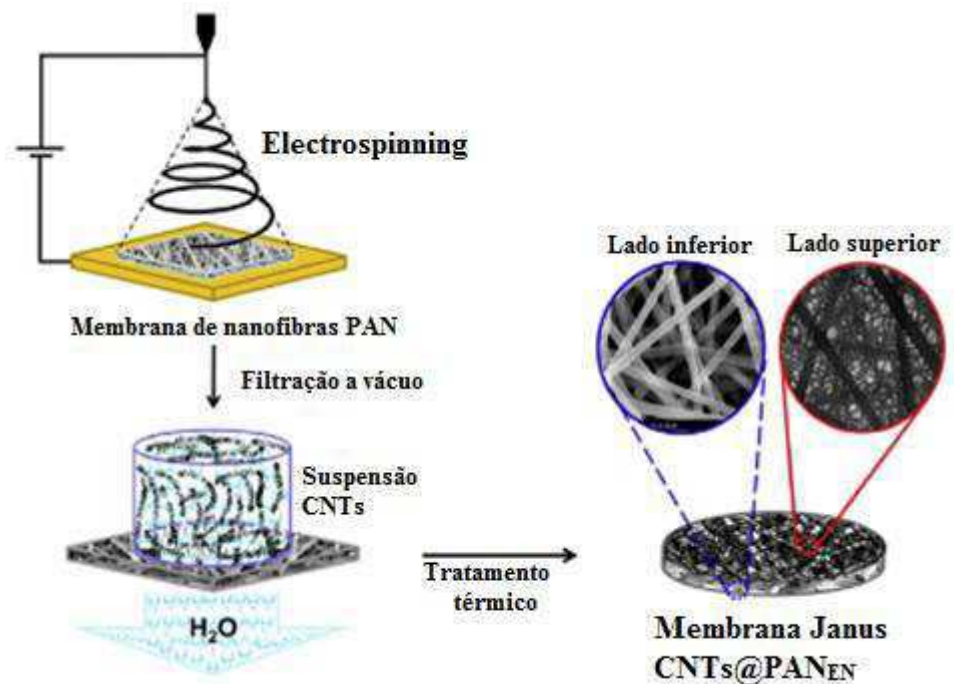
Os processos de separação com membranas são bastante utilizados nos mais diversos campos industriais, e têm se destacado como uma ferramenta importante nos processos de tratamento de águas produzidas, ou seja, águas contaminadas com óleo provenientes da exploração de petróleo.

Ma *et al.* (2017) mencionam sobre a necessidade de desenvolver tecnologias eficientes para o tratamento de águas oleosas, apontando as membranas fibrosas de núcleo de poliimida como uma opção viável para a separação água/óleo. Ao avaliar a estabilidade química e térmica, resistência mecânica e o potencial de separação água/óleo das membranas fibrosas desenvolvidas, os autores obtiveram membranas super-hidrofóbicas com um ângulo de contato de água de 162° , e um ângulo de contato do óleo próximo de 0° , capazes de separar eficazmente várias misturas óleo-água com uma eficiência superior a 99%, reafirmando, assim, o potencial da utilização de membranas nesse tipo de processo.

Jiang *et al.* (2017) comentam sobre a utilização de nanofibras Janus no processo de confecção de membranas para separação água/óleo (Figura 6), construídas através de uma

membrana hidrofílica de nanofibras de electrospun de poliacrilonitrilo (PAN_{EN}) com um revestimento de de nanotubos de carbono hidrofóbicos de um lado (CNT_s). Obteve-se um bom desempenho de separação de emulsões óleo em água (com o lado PAN_{EN}) como também para emulsões água em óleo (com o lado CNT_s) devido à sua natureza altamente porosa, mencionando que a incorporação de CNT_s promoveu o desprendimento da água da superfície da membrana facilitando a permeação.

Figura 6 - Processo de fabricação de Janus $\text{CNT}_s@ \text{PAN}_{\text{EN}}$.



Fonte – Adaptado de Jiang *et al.* (2017).

Cheng *et al.* (2017) estudaram sobre membranas super-hidrofílicas fabricadas a partir de nanocristais fibrosos de celulose de túnica para separação água/óleo. Com o objetivo de reutilizar recursos marinhos renováveis, os nanocristais fibrosos de celulose de tunicados (TCNCs) foram preparados utilizando hidrólise ácida, construindo as membranas pela filtração assistida por vácuo de suspensões de TCNCs. Os resultados experimentais apresentaram alta eficiência de separação água/óleo, sendo aplicável tanto a nanoemulsões como a microemulsões oleosas. Além disso, verificaram que a dosagem de TCNCs pode controlar a espessura, tamanho do poro, fluxo de água e rejeição de óleo, além de exibir excelente estabilidade ao pH e à temperatura, bom desempenho em ciclos e resistência elevada.

Saadati e Pakizeh (2017) relatam sobre o processo de separação água/óleo utilizando uma nova membrana de nanocompósito de PSf/pebax/F-MWCNT, onde o suporte PSf é

preparado e posteriormente sobre ele é adicionado uma camada fina de pebax (camada seletiva). Foi analisado o efeito da adição em peso de nanotubos de carbono multifilares funcionalizados (F-MWCNTs) de 0,5, 1 e 2 % em peso, constatando que, ao aumentar a quantidade de F-MWCNT para 2% em peso, ocorre o aumento da estabilidade térmica, da hidrofobicidade e resistência à tração, entretanto, o fluxo de permeado mais elevado foi observado para uma carga de F-MWCNT de 0,5% em peso, e demonstrou melhor índice de rejeição de óleo para a amostra contendo 2% em peso de F-MWCNT.

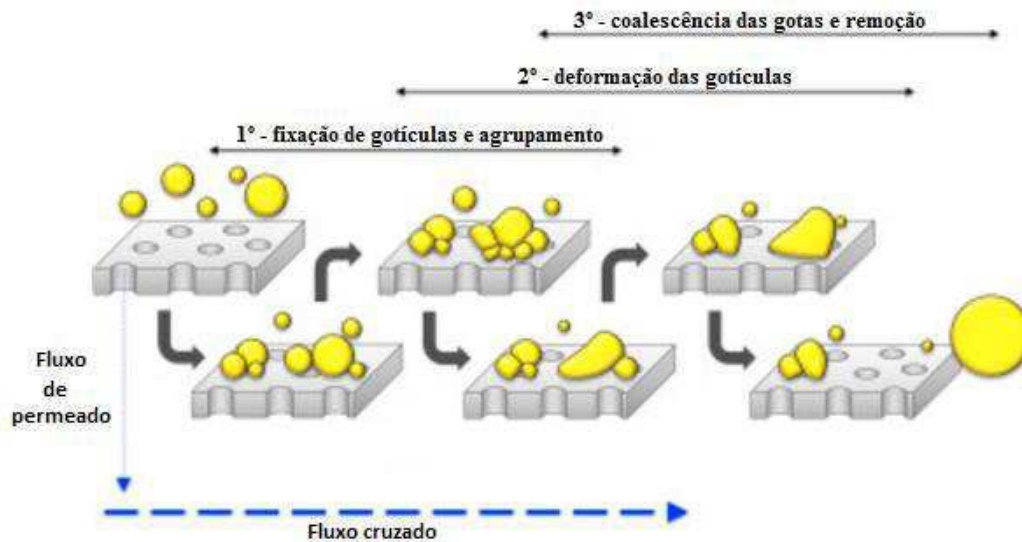
Matos *et al.* (2016) estudaram sobre surfactantes e seus efeitos sobre emulsões óleo em água via membranas cerâmicas de ultrafiltração. Foram desenvolvidos dois modelos, sendo o primeiro (modelo A) de ultrafiltração estabilizada com surfactante não-iônico com base no modelo de pressão osmótica e na transferência de massa (teoria de filmes), e um segundo (modelo B) que passa a considerar a difusão e a convecção dentro dos poros da membrana, observando-se que o modelo A refletia o comportamento experimental de permeado. No entanto, alguns desvios de concentração no permeado ainda eram constatados, sendo necessária a implementação de três novos parâmetros de ajustes ao modelo B para explicar os fenômenos de difusão e convecção. Os autores mencionaram também que, quando a superfície da membrana e a emulsão têm o mesmo sinal de carga, a repulsão eletrostática impede a adsorção de surfactante (e gotículas de óleo carregadas) sobre a membrana e a sua fuga através dela, diminuindo a polarização por concentração.

Zhu *et al.* (2017) relatam sobre o processo de tratamento de águas residuais oleosas contendo emulsões de óleo bem estabilizadas através de membranas, afirmando que esse mecanismo garante alta qualidade de permeado, porém são muito propensos a incrustações. Os autores estudaram sobre a utilização de surfactantes aniônicos, catiônicos e não iônicos em um sistema de filtração de fluxo cruzado objetivando a redução das incrustações; investigando o impacto desses surfactantes na superfície da membrana e sobre as propriedades das emulsões, concluíram em experimentos que as emulsões estabilizadas com o tensoativo catiônico, em ultrafiltração, sujaram a membrana rapidamente, enquanto que as emulsões estabilizadas com tensoativo aniônico e não iônicos ocasionaram menos incrustações.

Tummons *et al.* (2016) analisaram o comportamento de gotas de óleo, proveniente de emulsões óleo/água, na superfície da membrana de microfiltração de fluxo cruzado, observando através dos experimentos os três estágios característicos do processo de incrustações (Figura 7), sendo o primeiro o de fixação de gotículas e agrupamento, o segundo a deformação das gotículas e por fim o terceiro, de coalescência das gotas. Verificou-se através dos ensaios de filtração em fluxo cruzado à pressão constante, rejeição de óleo média de aproximadamente

98%, enquanto que o fluxo de permeado tendeu a diminuir para um pseudo-estado estacionário. Além disso, observou-se que a obstrução da membrana pelo óleo é controlada pela coalescência das gotas e cisalhamento ocasionado pelo fluxo cruzado.

Figura 7 - Estágios do processo de incrustações.



Fonte – Adaptado de Tummons *et al.* (2016).

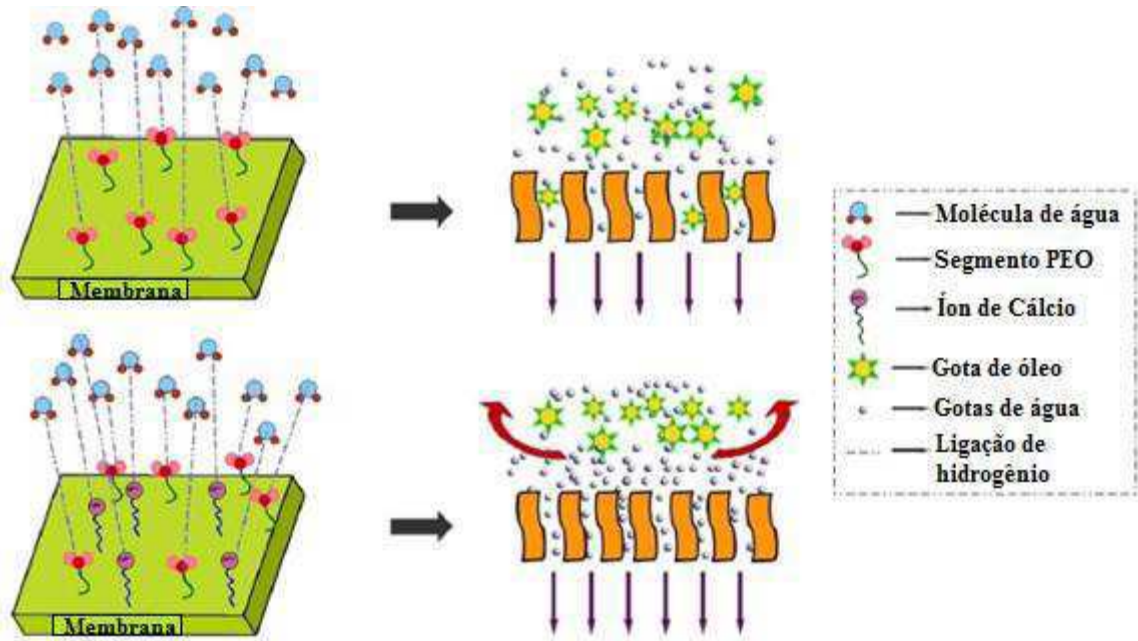
Outros autores, a exemplo de Melbiah *et al.* (2017) e Zhang *et al.* (2017), ao estudarem processos de tratamento de águas oleosas via membrana, propuseram modificações superficiais das membranas para minimizar o problema de surgimento de incrustações, comuns nesse tipo de processo.

Zhang *et al.* (2017) modificou superficialmente membranas de osmose frontal, compostas por filmes finos com poli(arileno éter sulfona) sulfonado para obter características anti-incrustações, obtendo, após experiências com múltiplos ciclos, um desempenho ótimo para membranas modificada com 10kg/mol de poli(arileno éter sulfona) sulfonado, onde mesmo sem nenhuma limpeza da membrana, manteve-se um fluxo de recuperação de água de 69,8% do seu valor inicial de 80%.

Já Melbiah *et al.* (2017) utilizaram nanopartículas de copolímero anfifílico Pluronic F127 e carbonato de cálcio inorgânico (CaCO_3) para fabricar uma membrana de ultrafiltração por processo de inversão de fase induzida. Demonstrando que as propriedades da membrana, tais como permeabilidade, resistência mecânica, estabilidade térmica e eficiência de separação aumentaram com a adição de 0,75% em peso de nanopartícula de CaCO_3 , obtendo uma elevação

da recuperação do fluxo após lavagem hidráulica de 63% para 90%. Portanto, a modificação da membrana por adição de nanopartículas de CaCO_3 (Figura 8) torna a membrana menos suscetível a incrustações, como desejado.

Figura 8 – Esquema de adição de nanopartículas de CaCO_3 .



Fonte – Adaptado de Melbiah *et al.* (2017).

Liu *et al.* (2016) pesquisaram modificações de membranas PVDF (Membrana de fluoreto de polivinilideno) com aderência de óleo *ultralow*, sendo as membranas fabricadas para serem super hidrofílicas e oleofóbicas, através do revestimento da membrana por fluoreto de polivinilideno com nanopartículas de sílica/quitosana usando glutaraldeído. Apresentando, portanto, na fase experimental todas as características desejadas, como a aderência do óleo *ultralow* e uma capacidade de separação de 99% de emulsões óleo/água.

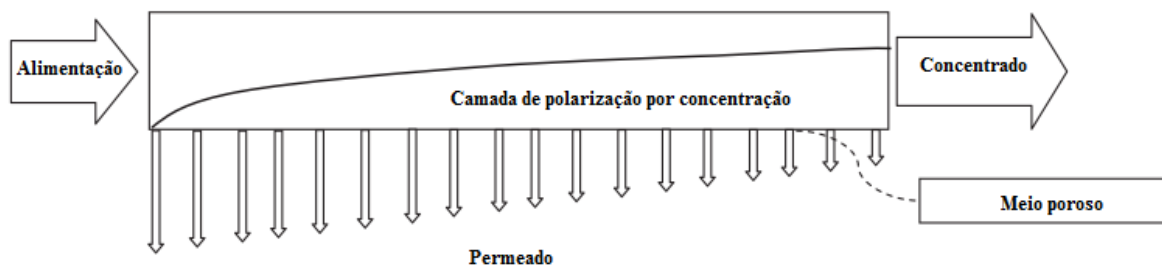
Otitoju *et al.* (2016) relatam justamente sobre as membranas de fluoreto de polivinilideno (PVDF) como ferramenta para o tratamento de águas residuais oleosas, apontando a PVDF como uma membrana amplamente utilizada devido às suas excelentes propriedades frente as inúmeras membranas poliméricas existentes. É mencionado também que o grande desafio da atualidade é desenvolver membranas com propriedades anti-incrustações, resistência química e mecânica elevada, alto fluxo, alta eficiência e principalmente estabilidade a longo prazo durante o tratamento de águas oleosas, e aponta as incrustações como o principal

problema responsável por restringir a migração das membranas de PVDF dos laboratórios para a indústria.

Dentre as abordagens utilizadas para estudar processos de separação via membranas e os fenômenos que englobam essa ferramenta, pode-se mencionar as experimentais, já relatadas anteriormente, e as numéricas.

Tashvigh *et al.* (2015) empregou a fluidodinâmica computacional (CFD) conduzida pelo método das diferenças finitas, desenvolvendo uma modelagem bidimensional para prever o comportamento da polarização por concentração em um processo de microfiltração de fluxo cruzado (Figura 9) de emulsão óleo/água usando difusão induzida por cisalhamento. Ao avaliar a modelagem pela comparação com dados experimentais observaram concordância em quase todas as condições operacionais, estudando o efeito da concentração de óleo, pressão transmembrana e velocidade de fluxo cruzado sob o crescimento da camada polarizada, concluindo que a espessura da camada cresce com o aumento da taxa de alimentação, e se mantém constante após ultrapassar aproximadamente 40% do comprimento da membrana.

Figura 9 - Esquema do processo de separação por membrana de fluxo cruzado.



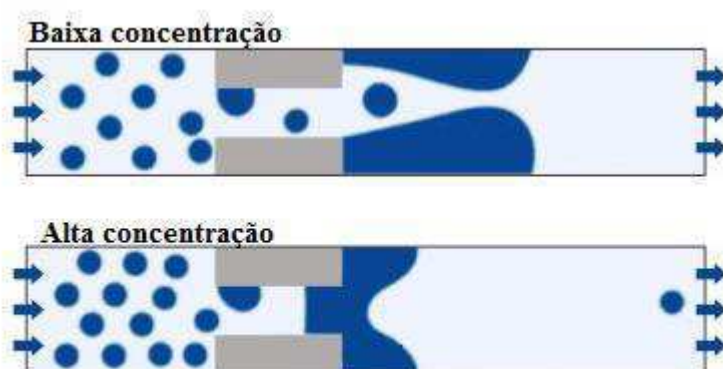
Fonte - Adaptado de Tashvigh *et al.* (2015).

Alves *et al.* (2016) ao investigarem o fluxo através de uma membrana via simulação numéricas 3D, mencionam sobre a relevância, no cenário atual, das membranas como ferramenta no tratamento de águas oleosas oriundas da produção de petróleo, especialmente as cerâmicas devido a seu custo-benefício e simplicidade de operação. Pesquisando sobre o processo separação água/óleo em um módulo do tipo duplo tubo, munido de membrana cerâmica e equipado com entrada tangencial, considerando o modelo de partículas para fase aquosa (fase contínua) e óleo (fase dispersa), concluíram que o modelo matemático proposto foi capaz de prever os fenômenos envolvidos no processo, como também que a redução da porosidade aumenta a área da membrana suscetível a zonas de recirculação aumentando, assim, a eficiência de separação.

Motin *et al.* (2015) realizaram uma investigação numérica sobre o desempenho e hidrodinâmica de uma membrana tubular rotativa para a separação água/óleo, operando um regime de fluxo cruzado e fluxo disperso. Analisou-se os efeitos dos números de Reynolds e Swirl sobre os campos de velocidade e pressão, o esforço de cisalhamento, o tamanho de corte das gotas e a eficiência de separação. Foi observado que, para aumentar a eficiência de separação, é necessário aumentar as formas cisalhantes na superfície da membrana através da velocidade angular e do fluxo cruzado, para diminuir o acúmulo de gotículas. Verificando também que a eficiência de separação depende em menor grau do número de Reynolds, enquanto que ao aumentar o número de Swirl foi possível remover gotículas mais finas, evitando, assim, as incrustações.

Mino *et al.* (2016) estudaram o fenômeno de coalescência de emulsões (Figura 10), óleo em água, que permeiam poros reticulares de uma membrana, utilizando simulação numérica. Nas simulações, a permeação da emulsão através da membrana ocorre em um único poro reto; utiliza-se de um quadro numérico baseado no conjunto de níveis acoplados e no método dos volumes de fluido (CLDVOF). Obteve-se, assim, um modelo simplificado de uma membrana, capaz de representar a dinâmica fundamental da coalescência de gotículas de óleo. Os autores verificaram que para uma fração volumétrica mais elevada de óleo, maiores gotículas e poros da membrana menores, ocorre o bloqueio dos poros da membrana, produzindo, assim, gotículas de óleo pequenas.

Figura 10 - Coalescência das gotículas de óleo durante a permeação.



Fonte - Adaptado de Mino *et al.* (2016).

Cunha *et al.* (2016) relatam sobre a investigação numérica do processo de separação água/óleo utilizando um módulo de membrana cerâmica tubular concêntrico, sendo o módulo munido de uma entrada de efluente e uma saída de concentrado tangenciais. Desenvolvido em

um domínio 3D por meio do *software* ANSYS CFX 12. Os autores apresentaram uma análise geométrica do módulo de separação e a influência na dispersão da polarização por concentração; demonstrando, assim, a importância dos aspectos geométricos, e posicionamento das membranas sob o fluxo hidrodinâmico e formação da camada polarizada.

De acordo com a literatura, existe uma gama de aplicações que envolvem membranas, e um arcabouço considerável de pesquisas nessa área de conhecimento, que partem desde confecção e modificação das membranas ao estudo numérico desses fenômenos visando a minimização dos custos experimentais no processo investigativo. Contudo, ainda existe um vasto campo a ser explorado, como a influência dos aspectos geométricos de módulos de separação munidos de membrana, índice de retenção do soluto pela membrana e termofluidodinâmica do processo de permeação.

2.4. Mecanismo de escoamento

Ao mencionar mecanismos de escoamento em membranas com fluxo laminar, a teoria hidrodinâmica é considerada simples. Entretanto, encontra-se na literatura vários modelos que levam em consideração parâmetros distintos, tais como: diâmetro médio dos poros, comprimento médio capilar, tortuosidade, distribuição do tamanho dos poros, diâmetro da partícula, porosidade, entre outros. Logo, uma discussão fenomenológica do fluxo hidrodinâmico é necessária (HWANG e KAMMERMEYER, 1975).

2.4.1. Lei de Darcy

Considerada como a lei que descreve o escoamento ao longo de um meio poroso, a Lei de Darcy demonstra que a taxa de fluxo é diretamente proporcional ao gradiente de pressão.

$$\frac{V_J}{S \cdot t} = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{e} \quad (3)$$

onde V_J é o volume, S área, t tempo, μ viscosidade, ΔP a diferença de pressão e e a espessura da membrana e K a permeabilidade de Darcy.

Hwang e Kammermeyer (1975) mencionam que a lei de Darcy denota que a resistência ao fluxo é devida ao arrasto viscoso, e que o parâmetro permeabilidade, K , contém todas as

propriedades do meio poroso. Define-se a viscosidade de um fluido como sendo a medida de atrito interno entre lâminas fluidas que fluem a velocidades diferentes, onde para um fluido em fluxo laminar, esse atrito produz forças de cisalhamento. Quando um fluxo fluido entra em contato com uma superfície sólida, o mesmo adere à superfície, resultando em uma velocidade nula, e como consequência da viscosidade e da propriedade de aderência do fluido, a superfície sólida experimenta uma força de arrasto, sendo a resistência viscosa uma força contrária a este arrasto.

Damak *et al.* (2004a), Damak *et al.* (2004b), Cunha (2014), PAK *et al.* (2008), Souza (2014), dentre outros, utilizaram em suas pesquisas modelos matemáticos cujas soluções numéricas das equações de Navier-Stokes são acopladas a lei de Darcy, e descritas como um modelo de resistências em série.

Logo, a velocidade de permeação é expressa como uma função do gradiente de pressão, viscosidade e resistências ao escoamento.

$$U_w = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_p)} \quad (4)$$

onde R_m é a resistência da membrana, função da espessura da membrana e de sua permeabilidade.

R_p é a resistência devido à polarização por concentração definida pela Equação 5:

$$R_p = r_p \delta_p \quad (5)$$

onde δ_p é a espessura da camada de concentração e r_p é a resistência para camadas de concentração homogêneas, determinada com auxílio da equação Carmen-Kozeny (Equação 6).

$$r_p = 180 \frac{(1 - \varepsilon_p)^2}{d_p^2 \varepsilon_p^3} \quad (6)$$

onde d_p é o diâmetro médio das partículas de soluto, ε_p é a porosidade da camada de polarização por concentração.

2.4.2. Equação de Kozeny-Carman

Desenvolvida para uma membrana porosa constituída por um feixe capilar com secção transversal não circular, assumindo que o caminho do fluxo de fluido seria tortuoso, e utilizando o conceito de raio hidráulico, a Equação 3 (Lei de Darcy) foi derivada:

$$\frac{V_J}{S \cdot t} = \frac{\varepsilon_p^3}{k' (1 - \varepsilon_p)^2 S_0^2 \mu} \frac{\Delta P}{e} \quad (7)$$

onde S_0 é a superfície por unidade de volume da partícula, k' é uma constante adimensional dependente da estrutura dos poros. Ao comparar as Equações 3 e 7, a permeabilidade K de Darcy, torna-se:

$$K = \frac{\varepsilon_p^3}{k' (1 - \varepsilon_p)^2 S_0^2} \quad (8)$$

Segundo Hwang e Kammermeyer (1975) são numerosas as modificações na teoria original de Kozeny, sendo bastante utilizada a equação de Kozeny-Carman para fluxo laminar em escala macroscópica, especialmente em problemas de filtração.

2.4.3. Modelo de capilaridade (Equação de Hagen-Poiseuille)

Quando uma membrana porosa é constituída por capilares cilíndricos retos de igual tamanho, a equação de *Hagen-Poiseuille* pode ser aplicada diretamente para descrever a taxa de fluxo. Sendo definido da seguinte forma:

$$\frac{V_J}{t} = \frac{n S \pi r^4}{8 \mu} \frac{\Delta P}{e} \quad (9)$$

onde n é o número de capilares por unidade de área e r é o raio do capilar.

- **Escoamento laminar totalmente desenvolvido em um tubo**

White (2011) menciona que G. Hagen em 1839 e J. L. Poiseuille em 1840 foram os precursores nos estudos experimentais sobre o escoamento laminar em um duto, e relata que, para descrever um escoamento laminar totalmente desenvolvido, deve-se considerar que a região de estudo se encontra distante o bastante da região de alimentação, de modo que o escoamento seja unicamente axial, desprezando a gravidade e assumindo a condição de simetria axial. Isso possibilita reduzir a equação da continuidade, em coordenadas cilíndricas (Equação 10), da seguinte forma (Equação 11):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(v_z) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(v_z) = 0 \quad (11)$$

O escoamento continua pelo tubo sem movimento radial, ocorrendo a simplificação das equações, em coordenadas cilíndricas, da quantidade de movimento em r e em z.

A Equação 12 é a solução final para o escoamento totalmente desenvolvido (*Hagen-Poiseuille*).

$$v_z = \left(-\frac{dp}{dz} \right) \frac{1}{4\mu} (R_e^2 - r_i^2) \quad (12)$$

2.5. Escoamento laminar

Ocorrendo quando o fluido se move em uma trajetória bem definida, o fluxo em regime laminar exhibe camadas que preservam individualmente as características do meio, sendo a viscosidade responsável por amortecer a tendência ao surgimento de turbulências.

Damak *et al.* (2004a) ao estudar um processo de separação utilizando membrana tubular em regime laminar, mencionou que a camada de polarização por concentração pode ser quantificada pela correlação empírica para a espessura da camada limite de concentração, δ_p , (Equação 13), válida para o número de Reynolds variando entre, $300 < Re < 1000$ e o número de Schmidt entre $600 < Sc < 3200$. Sendo a mesma escrita em função do diâmetro, d , número

de Reynolds, Re , número de Reynolds de permeação, Re_w , coordenada axial, z , e número de Schmidt, Sc , e por fim o número de Reynolds de permeação (Equação 14) dado por:

$$\frac{\delta_p}{d_i} = 2 \left(\frac{z}{d_i} \right)^{0,33} (\text{ReSc})^{-0,33} \text{Re}_w^{-0,3} \left[\left(1 - 0,4377 (Sc^{-0,0018} \text{Re}_w^{-0,1551}) \right) \right] \quad (13)$$

$$\text{Re}_w = \frac{\rho U_w D_{eq}}{\mu} \quad 0,02 < \text{Re}_w < 0,3 \quad (14)$$

onde o diâmetro equivalente pode ser dado por:

$$D_{eq} = \left(\frac{\varphi}{1 - \varphi} \right) d_p \quad (15)$$

onde φ é a porosidade da membrana, d_p o diâmetro médios das partículas que compõem o meio poroso, considerando as partículas esféricas, e U_w é velocidade de permeação.

A correlação de determinação da espessura da camada limite demonstra que o aumento do número de Reynolds leva a uma redução da espessura da camada limite de concentração e aumento do fluxo de permeado e que o aumento do número de Reynolds de permeação e do número de Schmidt ocasionam o aumento da polarização por concentração (CUNHA, 2014).

2.6. Escoamento turbulento

Diferente do regime de escoamento laminar o escoamento turbulento ocorre quando o fluido não se move por uma trajetória bem definida, produzindo transferência de quantidade de movimento.

Devido a existência de escoamentos turbulentos as equações de conservação de massa e momento linear não conseguem prever adequadamente as oscilações oriundas deste fenômeno. Portanto torna-se necessário a adição de outros termos ao equacionamento que preveja esse comportamento. Existem diversos modelos para prever o escoamento turbulento, a exemplo do RNG k- ϵ .

2.6.1. Modelo de turbulência: RNG k-ε

O modelo RNG (*Renormalization Group Theory*) surgiu como uma alternativa do modelo k-ε padrão para fluxos com alto número de Reynolds, já que, muitos autores defendem a ideia de que o modelo turbulento k-ε é inadequado para prever situações em que há fluxo rotacional, pois, este modelo superestima a dissipação da energia cinética do fluxo, resultando em uma região central de recirculação, menor que a observada experimentalmente. Logo, as expressões de cinética turbulenta (Equação 16) e de dissipação (Equação 17), são definidas por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \bar{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{kRNG}} \right) \nabla k \right] + \rho_k - \rho_\varepsilon \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} \rho_k - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon) \quad (17)$$

onde k é a energia cinética turbulenta, ε é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, μ é a viscosidade dinâmica, ρ é a densidade e μ_T é a viscosidade turbulenta (Equação 18), dada por:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (18)$$

sendo C_μ uma constante de calibração experimental.

O coeficiente C_{ε1RNG} (Equação 19) é dado por:

$$C_{\varepsilon 1 RNG} = 1,42 - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4,38} \right)}{(1 + \eta^3 \beta_{RNG})} \quad (19)$$

onde

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho \varepsilon C_{\mu RNG}}} \quad (20)$$

onde P_k é o termo de produção pelo efeito de cisalhamento (Equação 21) dado por:

$$P_k = \mu_T \nabla \bar{U} \cdot (\nabla \bar{U} + \nabla \bar{U}^T) + P_{kb} \quad (21)$$

onde P_{kb} é o termo de produção de flutuação (Equação 22) é dado por:

$$P_{kb} = -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_\rho} g \cdot \nabla \rho \quad (22)$$

onde g é o vetor aceleração gravidade, ρ a massa específica do fluido, μ_t é a viscosidade turbulenta e σ_μ é o número de Prandtl turbulento.

Os valores das constantes do modelo, $C_{\epsilon 2RNG}$, $C_{\mu RNG}$, β_{RNG} , são especificados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores dos Parâmetros dos modelos RNG k- ϵ .

Parâmetros	C_ϵ	C_μ	β	σ_k	σ_ϵ
RNG $k - \epsilon$	1,9200	0,0850	0,0120	0,7179	0,7179

Fonte – ANSYS CFX 15.

CAPÍTULO III

Apresenta a descrição do modelo matemático implementado para as abordagens bidimensional e tridimensional, desenvolvidas com o objetivo de validar a modelagem do problema físico do escoamento tanto em uma membrana tubular cerâmica 2D como em um módulo de separação casco/membrana tubular 3D.

3. METODOLOGIA

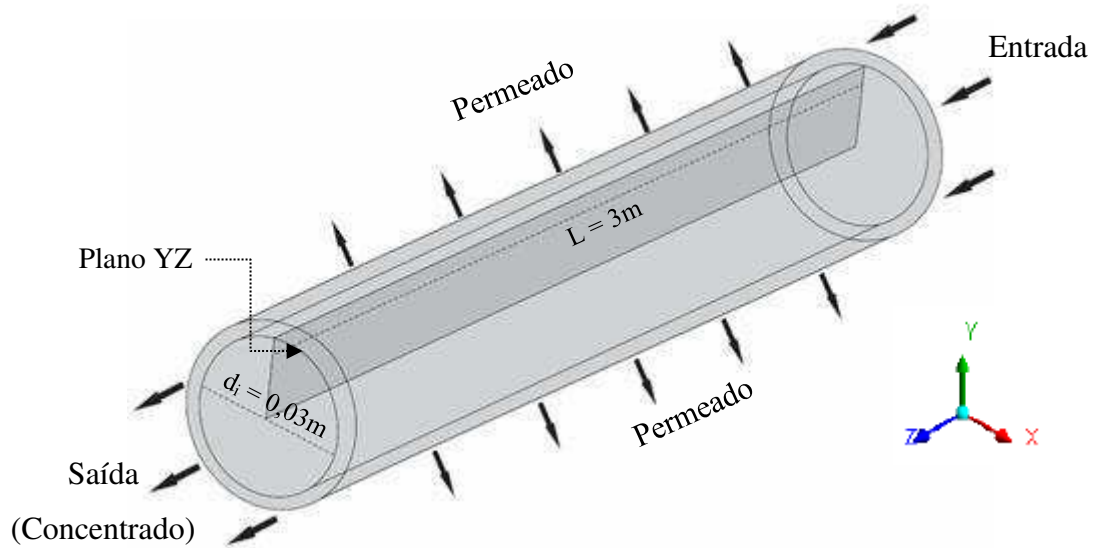
3.1. Estudo bidimensional do processo de separação água/óleo via membrana cerâmica tubular

Na literatura encontram-se comumente trabalhos numéricos que avaliam o escoamento apenas em uma seção 2D da membrana (MINNIKANTI e DASGUPTA, 1999; PARIS *et al.*, 2002; DAMAK *et al.*, 2004(a e b); PAK *et al.*, 2008). Portanto, para validar o modelo matemático proposto no presente trabalho optou-se por utilizar inicialmente uma problemática simplificada baseada nos trabalhos de Damak *et al.* 2004 (a e b) e Minnikanti e Dasgupta 1999, para posteriormente investigações 3D.

3.1.1. Descrição do problema

A membrana tubular cerâmica é constituída por um tubo de diâmetro de 0,03 m, e 3 m de comprimento, de acordo com as dimensões utilizadas no trabalho de Damak *et al.* (2004c), sendo, portanto, submetida a um escoamento tangencial de águas oleosas (Figura 11). Como a membrana possui simetria angular, foi utilizada apenas uma seção transversal no plano YZ, conforme Figura 11.

Figura 11 - Representação geométrica: membrana tubular e plano transversal 2D.

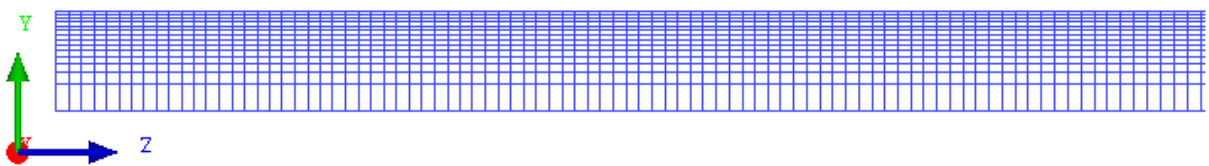


Fonte – Autoria própria.

3.1.2. Geração do domínio computacional 2D

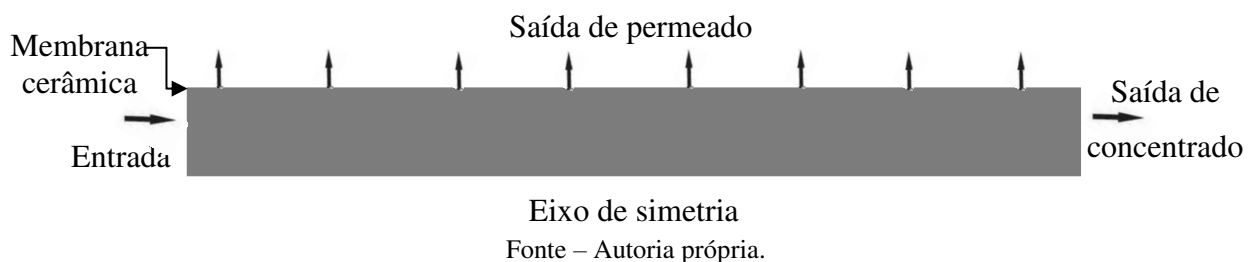
Para a realização da simulação numérica foi gerada uma malha utilizando o *software* ICEM CFD, conforme ilustrada na Figura 12, possuindo um total de 205056 elementos e 180000 nós, com concentração dos elementos próximo à superfície da membrana. Na Figura 13 estão representadas as fronteiras utilizadas na modelagem: entrada, saída de concentrado e saída de permeado.

Figura 12 - Malha bidimensional da seção transversal da membrana tubular.



Fonte – Autoria própria.

Figura 13 - Representação das fronteiras da membrana.



Fonte – Autoria própria.

3.1.3. Modelagem matemática

Para o estudo do processo de separação água/óleo usando uma seção da membrana tubular, foram definidas as seguintes considerações:

- Viscosidade e densidade dos fluidos constantes e iguais às do solvente puro;
 - O coeficiente de difusão do soluto é considerado constante;
 - Escoamento em regime laminar e permanente, incompressível e meio poroso isotrópico;
 - A velocidade de permeação local é determinada de acordo com a teoria de resistências em série;
 - A camada de concentração é assumida como sendo homogênea e a equação Carmen-Kozeny é válida;
 - Efeito gravitacional desprezível;
 - Perfil de velocidade axial parabólico e laminar totalmente desenvolvido na seção transversal de entrada da membrana tubular;
 - Simetria em relação à coordenada angular;
 - A obstrução do meio poroso pelo soluto é desconsiderada;
 - A adsorção do soluto na superfície de contato da membrana, juntamente com possíveis reações são desconsideradas;
 - A resistência proveniente da polarização por concentração, ou seja, da camada de concentração que se forma na interface fluido-membrana foi considerada;
 - A rugosidade local foi desprezada.
- Equação de conservação de massa

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (23)$$

onde ρ e \vec{U} são, respectivamente a densidade e o vetor velocidade.

- Equação de momento linear

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) - \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \vec{U})^T) \quad (24)$$

onde p é a pressão e μ é a viscosidade da solução.

- Equação da conservação de energia

$$\nabla \bullet (\rho UH) - \nabla \bullet (\Gamma_e \nabla T) = 0 \quad (25)$$

onde Γ_e é a difusividade térmica efetiva e H é a entalpia. Sendo o primeiro termo da Equação 25 responsável pelo acúmulo de energia, o segundo pela transferência de calor por convecção e o terceiro pela transferência de calor por difusão.

- Equação de transporte de massa

$$\vec{U} \bullet \nabla C = D_{AB} \nabla^2 C \quad (26)$$

onde C , corresponde a concentração do soluto (óleo), D_{AB} é a difusividade de massa soluto considerada constante para cada número de Schmidt (Sc).

$$D_{AB} = \frac{\mu}{Sc \rho} \quad (27)$$

3.1.3.1. Condições de contorno

- **Condição de entrada ($z = 0$)**

Admite-se um escoamento totalmente estabelecido na seção de entrada da membrana tubular, velocidade axial (Equação 28), componente radial de velocidade nula e temperatura de entrada (Equação 31).

$$U_z(0, y) = 2\bar{U}_z \left(1 - \left(\frac{y}{R} \right)^2 \right) \quad (28)$$

onde y corresponde a coordenada radial, R corresponde ao raio interno da membrana tubular e \bar{U}_z a velocidade média, determinada por:

$$\bar{U}_z = \frac{Re \mu}{\rho R} \quad (29)$$

onde Re é o número de Reynolds.

A concentração inicial de óleo na mistura C_0 , é dada por:

$$C = C_0 \quad (30)$$

A temperatura de entrada do fluido, expressa por:

$$T = T_0 \quad (31)$$

- **Condição de saída (Concentrado, $z = L$)**

Admitiu-se uma condição de pressão igual à atmosférica (1atm), $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$, $\frac{\partial U_z}{\partial y} = 0$ e

$\nabla T = 0$.

- **Condição no eixo de simetria ($y = 0$)**

Assumiu-se as seguintes condições de simetria no eixo do tubo:

$$\frac{\partial U_z}{\partial y} = 0, \frac{\partial C}{\partial y} = 0, U_y = 0 \text{ e } \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (32)$$

- **Condição nos planos transversais**

Devido à condição de simetria apresentada pela membrana admitiu-se para os planos transversais as seguintes condições:

$$\frac{\partial U_z}{\partial x} = 0, \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (33)$$

- **Condição na parede porosa do tubo ($y = R$)**

Na parede porosa assumiu-se velocidade axial nula, ou seja, uma condição de não deslizamento e um gradiente nulo de temperatura para as simulações isotérmicas, como segue:

$$U_z = 0 \quad (34)$$

$$\nabla T = 0 \quad (35)$$

Nas simulações não-isotérmicas, foi introduzida uma equação responsável pelo transporte convectivo de calor (Equação 36), como um termo fonte.

$$q = \bar{h}_c (T_s - T_\infty) \quad (36)$$

onde T_s é a temperatura na superfície da membrana, T_∞ representa a temperatura do fluido (ar) e \bar{h}_c o coeficiente de transferência de calor por convecção em $W/m^2 K$.

O coeficiente de transferência de calor por convecção foi determinado utilizando a Equação 37.

$$\bar{h}_c = \frac{Nu \cdot k}{L_c} \quad (37)$$

onde Nu é o número de Nusselt, k a condutividade térmica, L_c é o comprimento característico.

Para escoamentos sobre cilindros horizontais, o comprimento característico é definido como sendo o diâmetro da tubulação (Equação 38):

$$L_c = d_i \quad (38)$$

O cálculo do número Nusselt para convecção natural sobre um cilindro horizontal, foi realizado pela Equação 39 (INCROPERA *et al.*, 2007).

$$Nu = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (39)$$

onde Pr , Ra e Gr são os números de Prandtl, Rayleigh e Grashof, respectivamente.

Os números de Rayleigh e Grashof são calculados pelas Equações 40 e 41.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (40)$$

$$Gr = \frac{\rho^2 g \beta_d \Delta T L_c^3}{\nu^2} \quad (41)$$

onde β é o coeficiente de dilatação térmica e ν é a viscosidade cinemática.

Através da parede porosa, a velocidade radial U_y é igual à velocidade de permeação U_w , como segue:

$$U_y = U_w = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_p)} \quad (42)$$

onde R_m e R_p são, respectivamente, a resistência da membrana e a resistência devido a polarização por concentração.

A equação responsável pelo transporte de matéria (Equação 43) (MINNIKANTI e DASGUPTA, 1999) foi adicionada à modelagem como um termo fonte.

$$U_w C R_r = D_{AB} \frac{\partial C}{\partial y} \quad (43)$$

onde R_r é a retenção intrínseca do soluto pela membrana que pode ser assumida como constante para um sistema membrana-soluto.

A resistência da membrana, R_m , é definida pela Equação 44:

$$R_m = \frac{e}{K} \quad (44)$$

onde K , é a permeabilidade e, e , representa a espessura da membrana igual 1 cm.

Na equação 42, ΔP é a pressão transmembrânica (Equação 45) definida como sendo a diferença entre a pressão média de permeado, (\bar{P}_p), e a pressão externa a membrana P_{ex} .

$$\Delta P = \bar{P}_p - P_{ex} \quad (45)$$

O parâmetro R_p é a resistência devido à polarização por concentração definida pela Equação 46:

$$R_p = r_p \delta_p \quad (46)$$

onde δ_p é a espessura da camada de concentração e r_p é a resistência determinada quando a camada de concentração é considerada homogênea, determinada com auxílio da equação Carmen-Kozeny:

$$r_p = 180 \frac{(1 - \varepsilon_p)^2}{d_p^2 \varepsilon_p^3} \quad (47)$$

onde d_p é o diâmetro médio das partículas de soluto, ε_p é a porosidade da camada de polarização por concentração igual a 0,35. A Equação 47 é válida para partículas esféricas dispersas, não deformáveis com porosidade variando no intervalo $0,35 \leq \varepsilon_p \leq 0,75$.

Damak *et al.* (2004b) utilizaram a Equação 48 para determinar a variação local da espessura da camada limite de concentração por polarização, δ_p , de modo que o equilíbrio entre os fluxos convectivo e difusivo fosse atingido quando $(C - C_o / C_o) < 0,001$.

$$\frac{\delta_p}{d_i} = 2 \left(\frac{z}{d_i} \right)^{0,33} (\text{ReSc})^{-0,33} \text{Re}_w^{-0,3} \left[\left(1 - 0,4377 (\text{Sc}^{-0,0018} \text{Re}_w^{-0,1551}) \right) \right] \quad (48)$$

onde d_i é o diâmetro interno, z representa a coordenada axial ao longo da membrana, Re é o número de Reynolds axial, Re_w é o número de Reynolds do permeado na parede e Sc é o número de Schmidt. Segundo Damak *et al.* (2004b), os parâmetros Re , Sc , Re_w e z/d_i da

Equação (48) correspondem a um sistema de separação por membranas para a ultrafiltração de líquido, baixa concentração de partículas e fluxo laminar na parede do tubo poroso.

Outros parâmetros importantes utilizados no estudo do escoamento 2D isotérmico correspondem às propriedades físico-químicas do fluido e da membrana. Os valores destes parâmetros termofísicos são dados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros físico-químicos do fluido e da membrana cerâmica.

Parâmetros		
Fluido	Densidade, ρ (kg/m ³)	997
	Viscosidade, μ (cP)	50
	Massa molar, MM (kg/m ³)	18,02
Membrana	Porosidade (ε_p)	0,3
	Permeabilidade (m ²)	3,33x10 ⁻¹¹

Fonte - Adaptado de Cunha (2014).

3.1.3.2. Propriedades físicas do fluido utilizadas no estudo do escoamento não isotérmico

A definição das propriedades físicas do fluido, utilizado no estudo não isotérmico, é de fundamental importância para se obter resultados condizentes com a realidade. O calor específico, condutividade térmica, viscosidade e densidade da água foram determinadas por expressões em função da temperatura disponibilizadas na literatura.

- Calor específico (c_p)

O calor específico da água foi determinado pela Equação 43, disponibilizada em Coker (2010).

$$c_p = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad (43)$$

onde A , B , C e D são os coeficientes de regressão (Tabela 4) e T a temperatura em Kelvin.

Tabela 4 - Coeficientes de regressão para o calor específico da água.

A (m ² s ⁻² K ⁻¹)	B (K ⁻¹)	C (K ⁻²)	D (K ⁻³)
92,053	-3,9953x10 ⁻²	-2,1103x10 ⁻⁴	5,3469x10 ⁻⁷

Fonte - Adaptado de Coker (2010).

- Condutividade térmica (k)

A condutividade térmica da água foi determinada pela Equação 44, disponibilizada em Ramires *et al.* (1977).

$$k = 0,6065 \left[-1,48445 + 4,12292 \left(\frac{T}{298,15} \right) - 1,63866 \left(\frac{T}{298,15} \right)^2 \right] \quad (44)$$

Sendo T dado em Kelvin.

- Viscosidade (μ)

A viscosidade da água foi determinada pela Equação 45, disponibilizada em Coker (2010).

$$\mu = 10^{\left(A + \frac{B}{T} + CT + DT^2 \right)} \quad (45)$$

onde A , B , C e D são os coeficientes de regressão, representados na Tabela 5, sendo T dado em Kelvin.

Tabela 5 - Coeficientes de regressão para a viscosidade da água.

A (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	B (K)	C (K ⁻¹)	D (K ⁻²)
-10,2158	1,7925x10 ³	1,7730x10 ⁻²	-1,2631x10 ⁻⁵

Fonte - Adaptado de Coker (2010).

- Densidade (ρ)

A densidade da água foi determinada pela Equação 46, disponibilizada em Coker (2010).

$$\rho = AB^{-(1-T/T_c)^N} \quad (46)$$

onde A , B , N são os coeficientes de regressão e T_c a temperatura crítica, representados na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficientes de regressão para a densidade da água.

A (kg)	B (m ⁻³)	n (-)	T _c [K]
0,34710	0,27400	0,28571	647,13

Fonte - Adaptado de Coker (2010).

3.1.4. Casos estudados

Nas simulações efetuadas, foram mantidos constantes o número de Reynolds de permeação, número de Schmidt, concentração inicial e permeabilidade, conforme Tabela 7, e variando-se o número de Reynolds axial, Re , o diâmetro médio da gota de óleo, d_p , a retenção intrínseca do soluto pela membrana, R_r e a temperatura, T , representados na Tabela 8.

As simulações foram realizadas utilizando o *software* computacional ANSYS CFX 15 em um computador Intel Core i3-3250 de 3.50GHz com 4G de memória RAM disponibilizado no laboratório LCTF (Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande.

Tabela 7 – Parâmetros considerados constantes nas simulações.

Número de Reynolds de permeação	Re_w	0,1
Concentração inicial (kg.m^{-3})	C_0	1
Número de Schmidt	Sc	1000
Permeabilidade (m^2)	K	$3,33 \times 10^{-11}$

Tabela 8 - Condições utilizadas na simulação bidimensional via membrana tubular.

Casos	Re (-)	d_p (μm)	R_r (-)	T_0 ($^{\circ}\text{C}$)
Isotérmicos				
01	1000	51	1	25
02	600	51	1	25
03	300	51	1	25
04	1000	51	0,97	25
05	1000	51	0,98	25
06	1000	51	0,99	25
07	1000	47	1	25
08	1000	55	1	25
09	1000	51	0,78	25
10	1000	51	0,58	25
Não isotérmicos				
11	1000	51	1	25
12	1000	51	1	35
13	1000	51	1	55
14	1000	51	1	75
15	1000	51	1	95

3.2. Estudo tridimensional do processo de separação água/óleo via módulo de separação munido de membrana cerâmica tubular

3.2.1. Descrição do problema

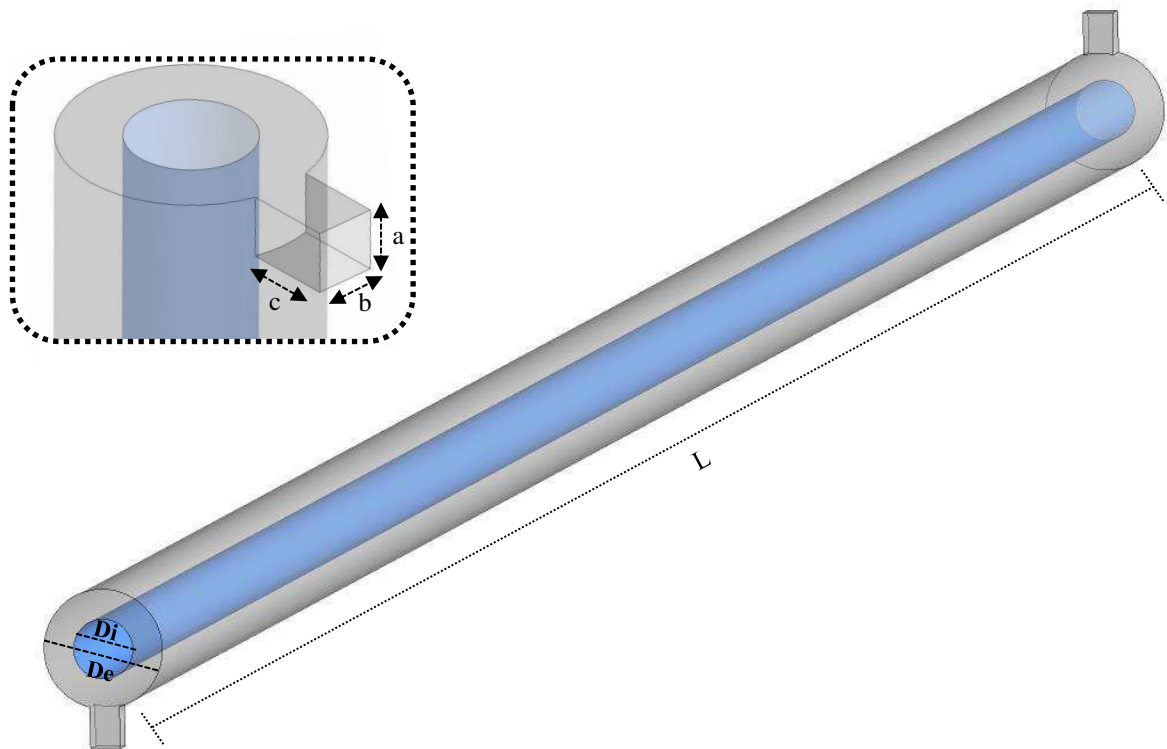
O módulo de separação água/óleo via microfiltração (Figura 14) é constituído de um tubo de diâmetro, D_e , envolvendo uma membrana tubular de diâmetro D_i . O módulo dispõe de uma entrada e uma saída retangular, cujas dimensões estão representadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Dimensões geométricas do módulo de separação.

	Dimensões do módulo (mm)
Comprimento, L	3000
Diâmetro interno, D_i	30
Diâmetro externo, D_e	60
a=b	15
c	20

Fonte – Adaptado de Cunha (2014).

Figura 14 - Representação geométrica do módulo de separação.

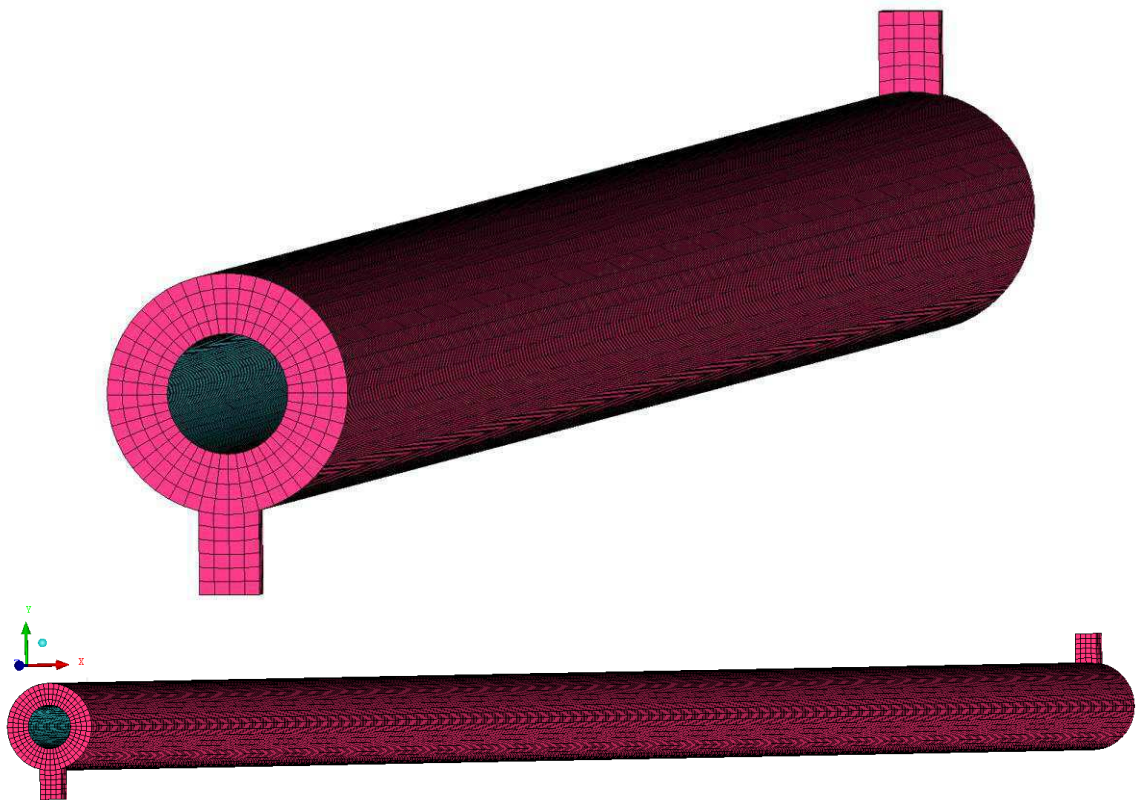


Fonte – Autoria própria.

3.2.2. Geração do domínio computacional 3D

Para a realização da simulação numérica foi gerada uma malha utilizando o *software* ICEM CFD, conforme ilustrada na Figura 15, utilizando a estratégia de blocagem, com a criação de elementos hexaédricos no interior do domínio, facilitando assim, o refinamento. A malha final resultante apresenta um total de 217.352 elementos e 180.780 nós.

Figura 15 - Malha tridimensional do módulo casco/membrana tubular.



Fonte – Autoria própria.

3.2.3. Modelagem matemática

Para o estudo do processo de separação via microfiltração usando o módulo de separação casco/membrana tubular foram assumidas as seguintes considerações:

- Viscosidade e densidade dos fluidos constantes e iguais às do solvente puro;
- O coeficiente de difusão do soluto é considerado constante;
- Escoamento incompressível e em regime permanente;

- A velocidade de permeação local é determinada de acordo com a teoria de resistências em série;
- A camada de concentração é assumida como sendo homogênea e a equação Carmen-Kozeny é válida.
- Diâmetro médio das partículas igual a 51 μm .

Com estas considerações a equação de conservação da massa (Equação 47) e de momento linear (Equação 48) podem ser escritas como sendo:

- Equação de conservação de massa

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (47)$$

- Equação de momento linear

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu_{ef} \left(\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T \right) \quad (48)$$

onde μ_{ef} é a viscosidade efetiva do fluido (Equação 49) definida por:

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_t \quad (49)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica e μ_t é a viscosidade turbulenta (Equação 50) definida por:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (50)$$

onde C_μ é uma constante de calibração experimental, k a energia cinética turbulenta e ε a taxa de dissipação de turbulência determinada pelo modelo de turbulência RNG k - ε .

- Equação da conservação de energia

$$\nabla \cdot (\rho UH) - \nabla \cdot (\Gamma_e \nabla T) = 0 \quad (51)$$

- Equação de transporte de massa

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U} C) = \nabla \cdot (\rho D_{AB} \nabla C) \quad (52)$$

3.2.4. Casos estudados

Nas simulações efetuadas, foram mantidos constantes o número de Reynolds de permeação, número de Schmidt, concentração inicial, permeabilidade, número de Reynolds axial, Re , o diâmetro médio da gota de óleo, d_p , e a retenção intrínseca do soluto pela membrana, R_r , conforme Tabela 10, variando-se a temperatura, T , e a localização da membrana (Tabela 11).

Tabela 10 – Parâmetros considerados constantes nas simulações.

Número de Reynolds de permeação	Re_w	0,1
Concentração inicial ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	C_0	1
Número de Schmidt	Sc	1000
Número de Reynolds axial	Re	1000
Diâmetro médio da gota de óleo (μm)	d_p	0,51
Retenção intrínseca do soluto pela membrana	R_r	1
Permeabilidade (m^2)	K	$3,33 \times 10^{-11}$

Tabela 11 - Condições utilizadas nas simulações tridimensionais via módulo casco/membrana tubular.

Casos	T_0 (°C)	Localização da membrana
16	35	Tubo interno
17	55	Tubo interno
18	75	Tubo interno
19	95	Tubo interno
20	55	Tubo externo

CAPÍTULO IV

Apresenta a discussão dos resultados referentes às simulações numéricas realizadas para uma membrana tubular 2D e para o módulo de separação 3D, validando a modelagem matemática pela comparação dos resultados numéricos com trabalhos encontrados na literatura compatíveis com o problema físico.

4. RESULTADOS

4.1. Análise isotérmica de uma membrana cerâmica tubular bidimensional

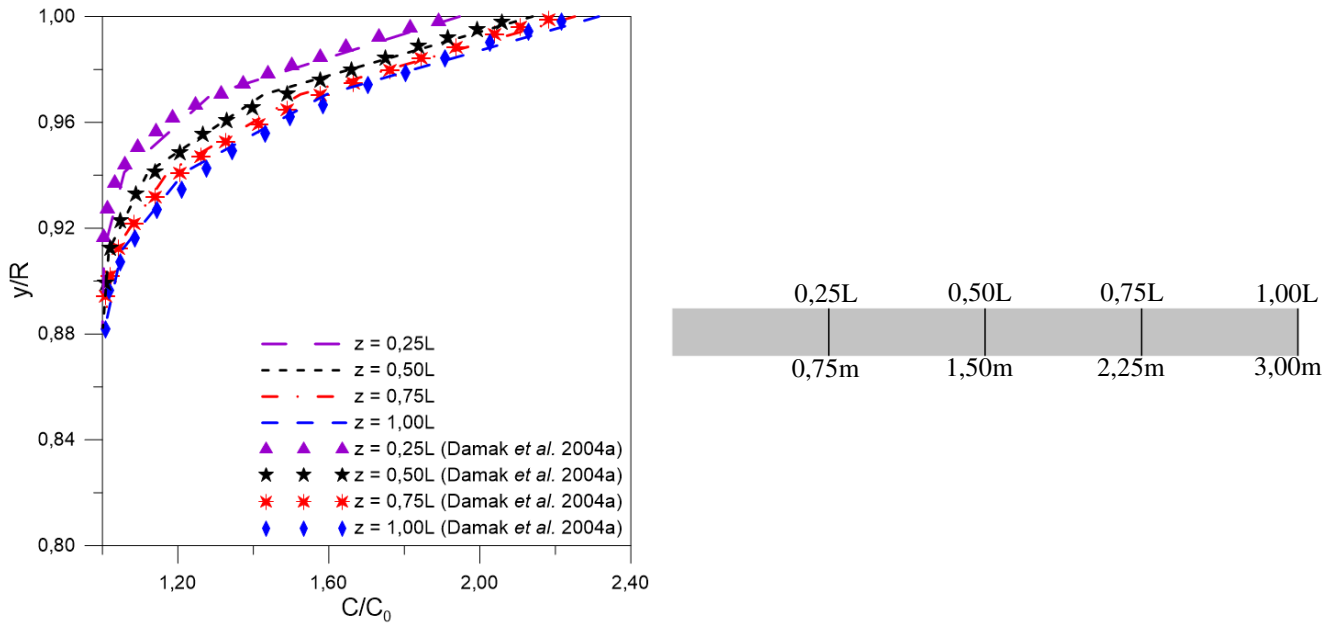
4.1.1. Perfis de concentração

Na Figura 16 estão representados os perfis de concentração em diferentes posições axiais, z/L (0,25, 0,50, 0,75 e 1,00), onde $L=100d$ (comprimento da membrana tubular). Verifica-se que a concentração aumenta com a posição axial e que o comportamento obtido nas simulações é semelhante ao obtido por Damak *et al.* (2004a). Entretanto, observa-se uma pequena discrepância nos valores mais elevados de y/R , próximo a superfície da membrana (posições de 0,75L e 1L) e próximo a $y/R = 0,96$. Esse comportamento, está relacionado a simplificação nas equações de momento e massa adotadas por Damak *et al.* (2004a).

Na Figura 17 estão ilustrados os perfis de concentração na posição axiais $z=0,50L$ para diferentes números de Reynolds. Constata-se na Figura 17a resultados divergentes dos obtidos por Damak *et al.* (2004a), que obtiveram um comportamento contrário dos perfis de concentração de soluto dos resultados das simulações numéricas do presente trabalho. Provavelmente, essa discordância está associada ao fato que Damak *et al.* (2004a) utilizaram um perfil de velocidade para todo o domínio e desconsiderou a queda de pressão radial, como também, em sua modelagem, empregou equações de transporte desacopladas, ou seja, resolveu

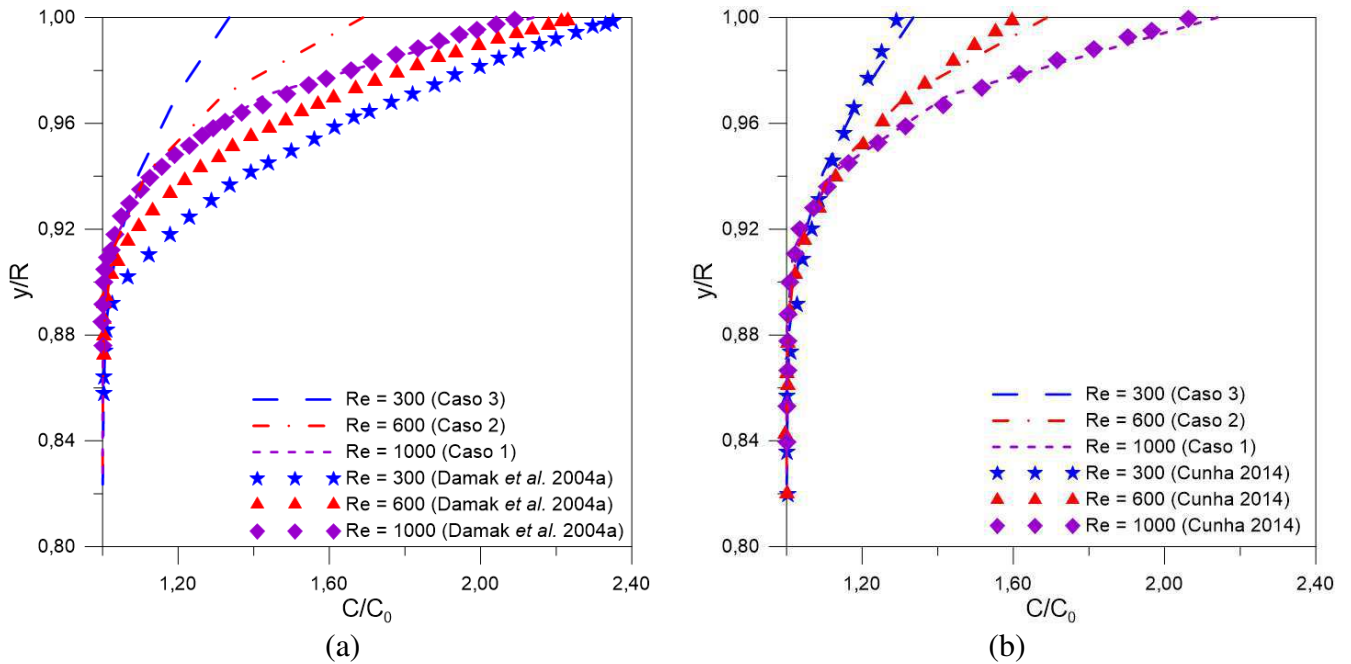
as equações de movimento e transporte de matéria separadas. Cunha (2014) obteve resultados semelhantes ao desta pesquisa, como pode ser observado na Figura 17b.

Figura 16 - Perfil de concentração ao longo do eixo z, para as posições: 0,25L; 0,50L; 0,75L e 1L (Caso 1).



Fonte – Autoria própria.

Figura 17 - Efeito do número de Reynolds sob o perfil de concentração ($z = 0,50L$), comparado com: a) Damak *et al.* (2004a) e b) Cunha (2014), (Casos: 1, 2 e 3).



Fonte – Autoria própria.

4.1.2. Espessura da camada limite de concentração

A Figura 18 apresenta a variação local da espessura da camada limite de concentração em função da distância adimensional z/d , para os números de Reynolds de 300, 600 e 1000, casos 3, 2 e 1, respectivamente. Observa-se que a camada limite cresce com o aumento da distância adimensional z/d , e que sua espessura diminui com o aumento do número de Reynolds, ocasionando o aumento da pressão transmembrana, e com isso o transporte por convecção de um número maior de partículas para próximo da superfície da membrana, como observado por Damak *et al.* (2004a), sendo a espessura da camada limite adimensional δ_p/d reduzida em 0,035. Comportamento semelhante foi observado na Figura 19, ao comparar os resultados obtidos numericamente com os alcançados por Pak *et al.* (2008), ao apresentarem a espessura da camada limite, δ_p/R , em função da variável adimensional z/R .

Figura 18 - Perfil da espessura da camada limite de concentração em função da variável adimensional z/d , para Reynolds iguais a: 300 (Caso 3), 600 (Caso 2) e 1000 (Caso 1).

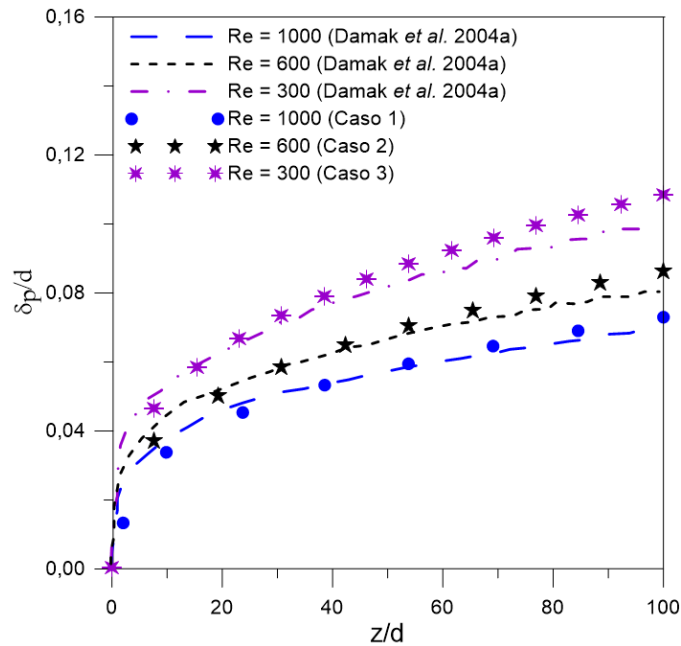
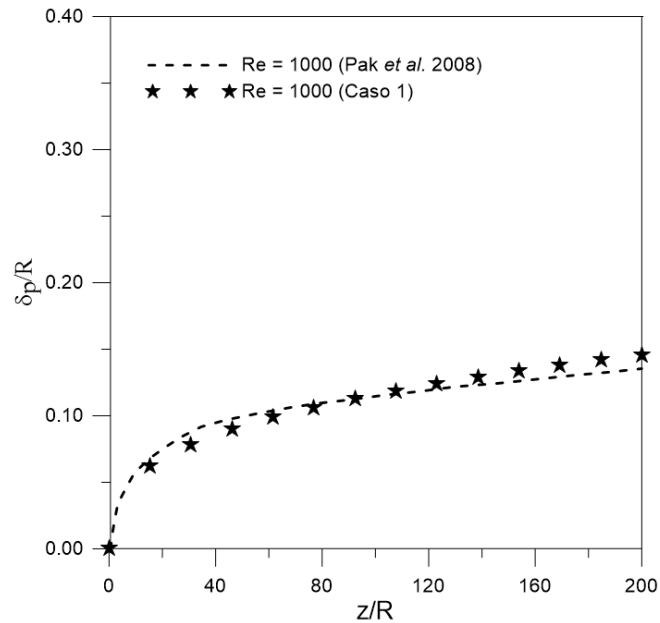


Figura 19 - Perfil da espessura da camada limite de concentração em função da variável adimensional z/R , para Reynolds iguais 1000 (Caso 1).



Fonte – Autoria própria.

4.1.3. A Influência do diâmetro da partícula de soluto

Na Figura 20 estão representados os perfis de concentração adimensional ao longo do eixo z para diferentes valores de diâmetro da partícula de soluto ($47\ \mu\text{m}$, $51\ \mu\text{m}$ e $55\ \mu\text{m}$), casos 7, 1 e 8 respectivamente. Observa-se que a variação do diâmetro da gota de óleo, d_p , influencia no perfil de concentração de soluto, como também pode-se verificar um aumento na concentração adimensional de óleo na superfície da membrana, de 2,11 para 2,53, com a variação do diâmetro de $47\ \mu\text{m}$ para $55\ \mu\text{m}$.

A Figura 21 apresenta a velocidade de permeação em função do comprimento da membrana para diferentes valores de diâmetro da partícula de soluto ($47\ \mu\text{m}$, $51\ \mu\text{m}$ e $55\ \mu\text{m}$). Pode-se observar que a velocidade de permeação aumenta com a variação do diâmetro da partícula de óleo de $47\ \mu\text{m}$ para $55\ \mu\text{m}$, isso ocorre porque o aumento do tamanho da partícula de óleo proporciona a redução da resistência específica da camada de polarização, r_p , tornando a camada de polarização mais permeável, e assim, aumentando o fluxo de permeado. Comportamento semelhante foi observado por Cunha (2014).

Figura 20 - Perfil de concentração ao longo do eixo z, para $z = 1L$ (Casos: 1, 7 e 8).

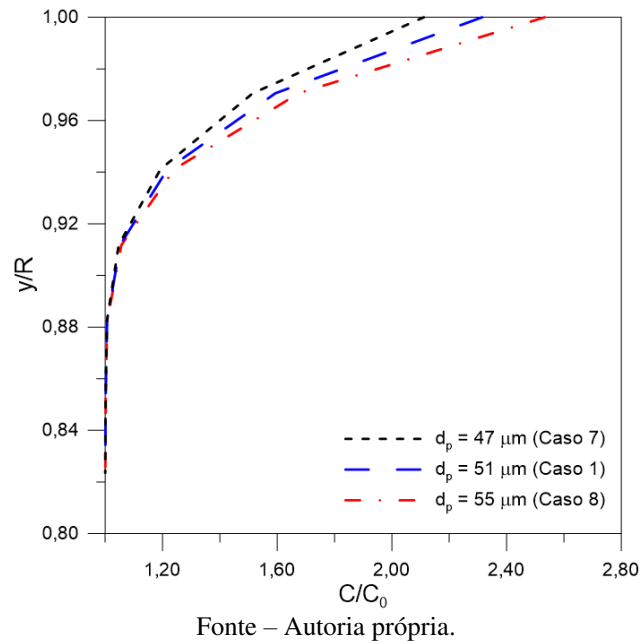
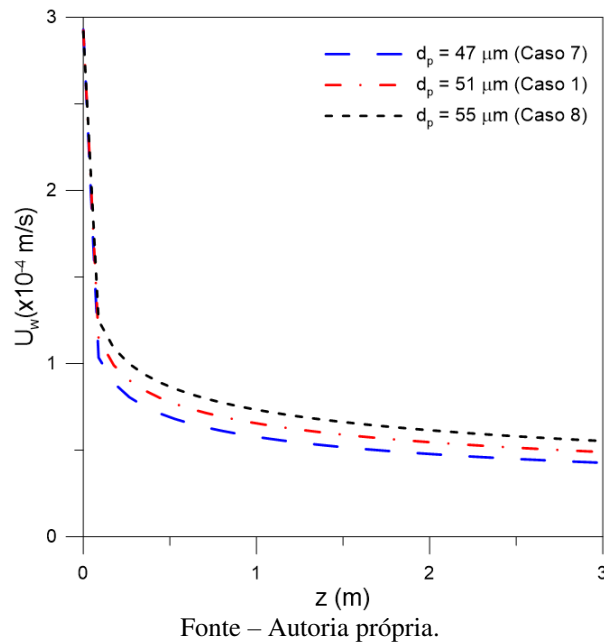


Figura 21 - Velocidade de permeação em função do comprimento da membrana (Casos: 1, 7 e 8).



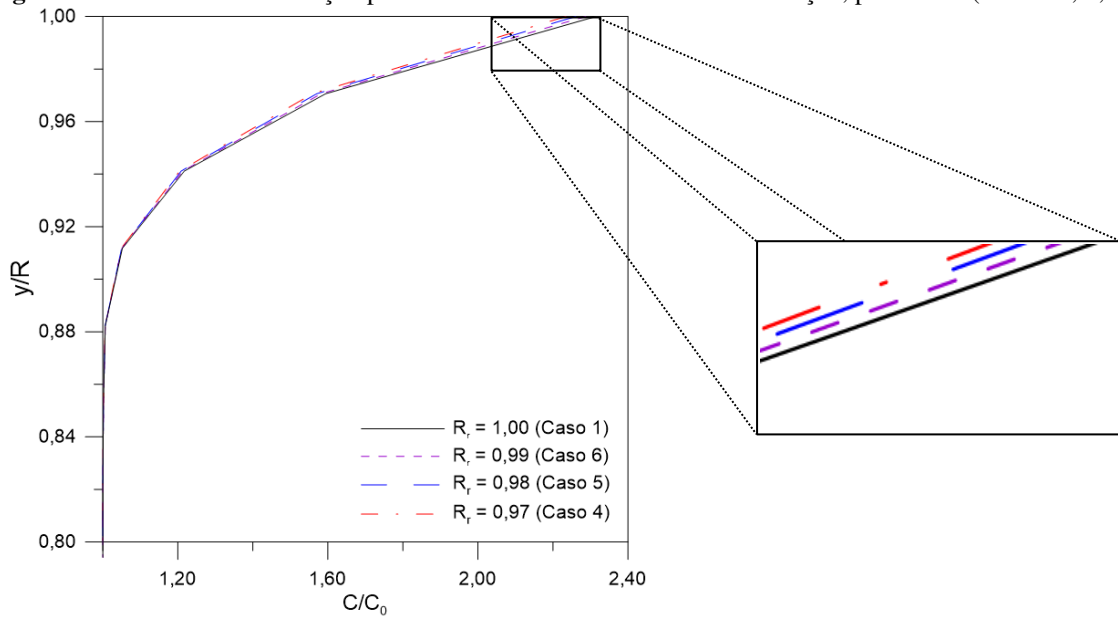
4.1.4. Índice de retenção do soluto pela membrana

Damak *et al.* (2004), em sua modelagem, consideram que o soluto é 100% rejeitado pela membrana. Entretanto, na prática esse comportamento não é verificado, sendo regularmente encontrado na literatura índices de rejeição variáveis, dependendo da membrana.

Nas Figuras 22 e 23 encontram-se ilustrados os perfis de concentração na posição radial, em $z = L$, para diferentes valores de retenção do soluto pela membrana, R_r . Verifica-se na Figura

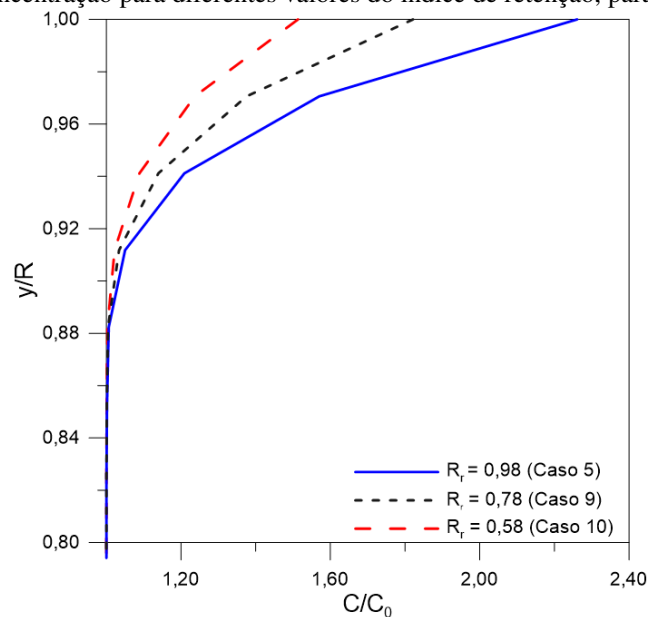
22 um comportamento semelhante entre os perfis de concentração, com valores mais elevados, como esperado, para $R_r = 1$, apresentando uma variação sutil, induzida justamente pela permeação, de parte do soluto. Na faixa de 0,58 a 0,98 do índice de retenção (Figura 23), verifica-se que a concentração aumenta com R_r , já que a membrana passa a reter maior quantidade de soluto (óleo), e que o modelo é capaz de prever o comportamento do índice de retenção mesmo para valores menores ($R_r = 0,58$ e $0,78$), característico em membranas de baixa eficiência.

Figura 22 - Perfil de concentração para diferentes valores do índice de retenção, para $z = L$ (Casos: 1, 4, 5 e 6).



Fonte – Autoria própria.

Figura 23 - Perfil de concentração para diferentes valores do índice de retenção, para $z = L$ (Casos: 5, 9 e 10).

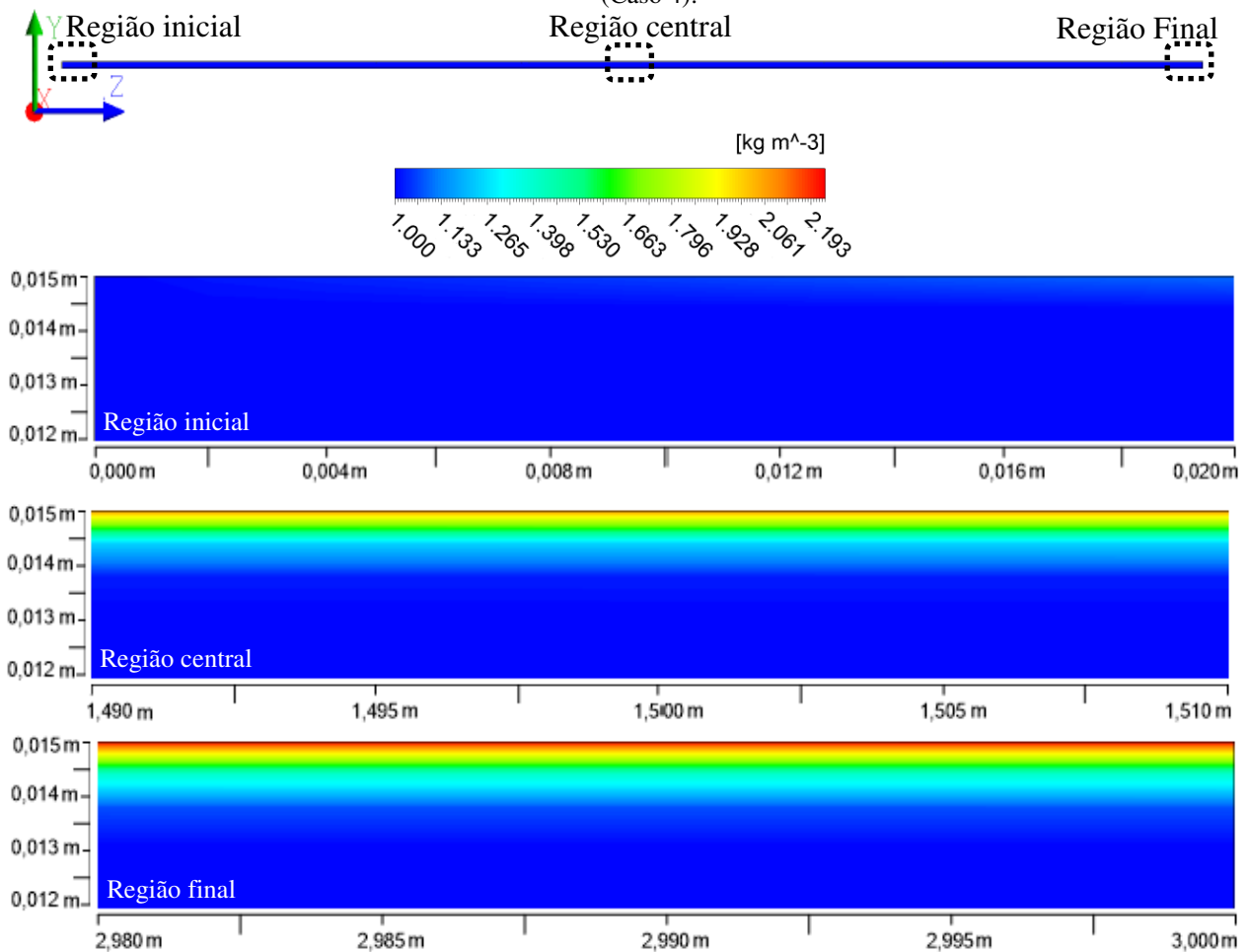


Fonte – Autoria própria.

Nas Figuras 24, 25 e 26 estão apresentados os campos de concentração para o índice de retenção de soluto pela membrana de 0,97, 0,98 e 0,99; casos 4, 5 e 6, respectivamente. Observa-se que o comportamento da concentração de óleo para os diferentes valores de R_r , não apresenta uma variação significativa, com a variação do índice de retenção do soluto pela membrana. Entretanto, é expressiva a variação de concentração de óleo ao longo da membrana, apresentando maiores concentração na região próxima a saída de concentrado devido ao transporte de soluto para as proximidades da superfície da membrana, pelas forças cisalhantes.

Nas Figuras 27, 28 e 29 estão apresentados os campos de pressão para os índices de retenção de soluto pela membrana de 0,97; 0,98 e 0,99, casos 4, 5 e 6, respectivamente. Observa-se que o aumento do índice de retenção de soluto pela membrana não ocasiona variação na distribuição de pressão total; apresentando gradientes de concentração maiores na entrada, ocasionada por maiores velocidades nessa região, e na zona inferior da seção 2D analisada.

Figura 24 - Campo de concentração de óleo, para o índice de retenção de soluto pela membrana, R_r igual a 0,97 (Caso 4).



Fonte – Autoria própria.

Figura 25 - Campo de concentração de óleo, para o índice de retenção de soluto pela membrana, R_r igual a 0,98 (Caso 5).

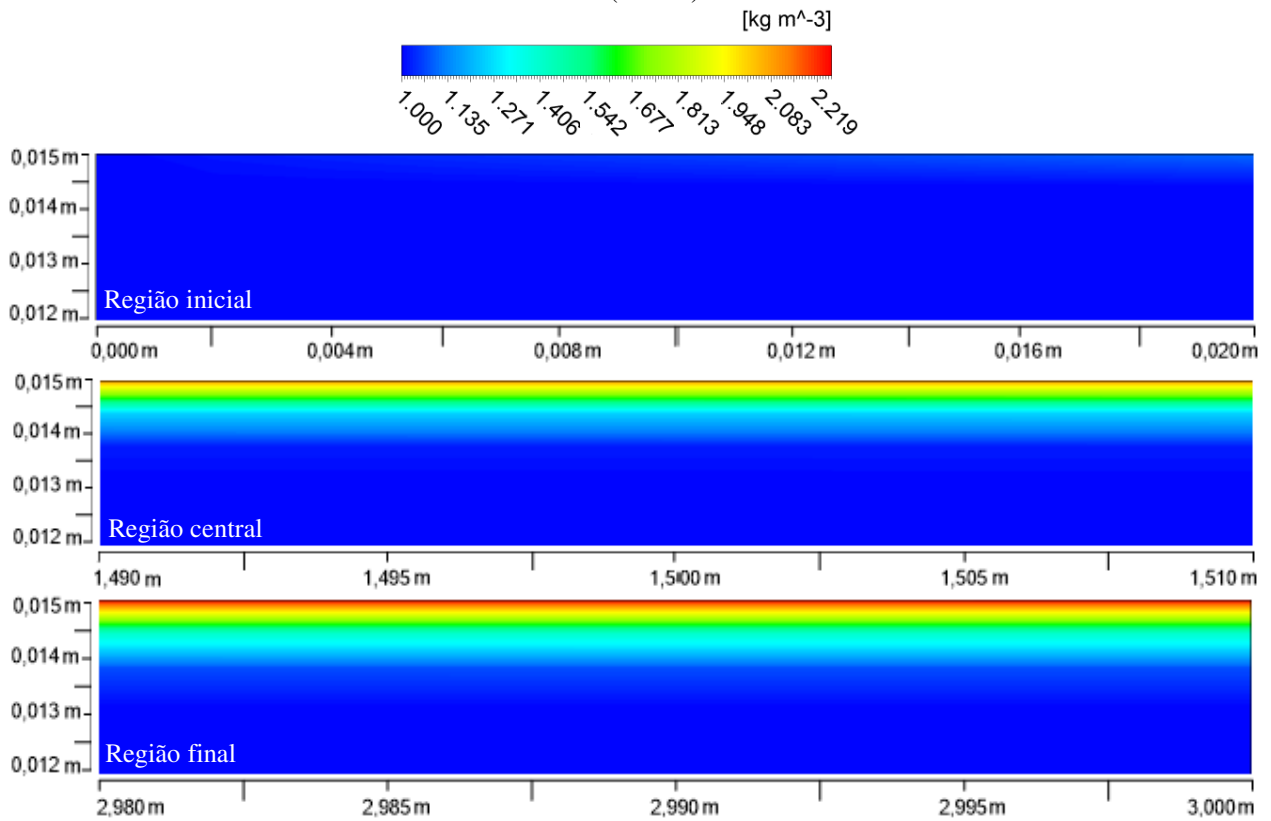


Figura 26 - Campo de concentração de óleo, para o índice de retenção de soluto pela membrana, R_r igual a 0,99 (Caso 6).

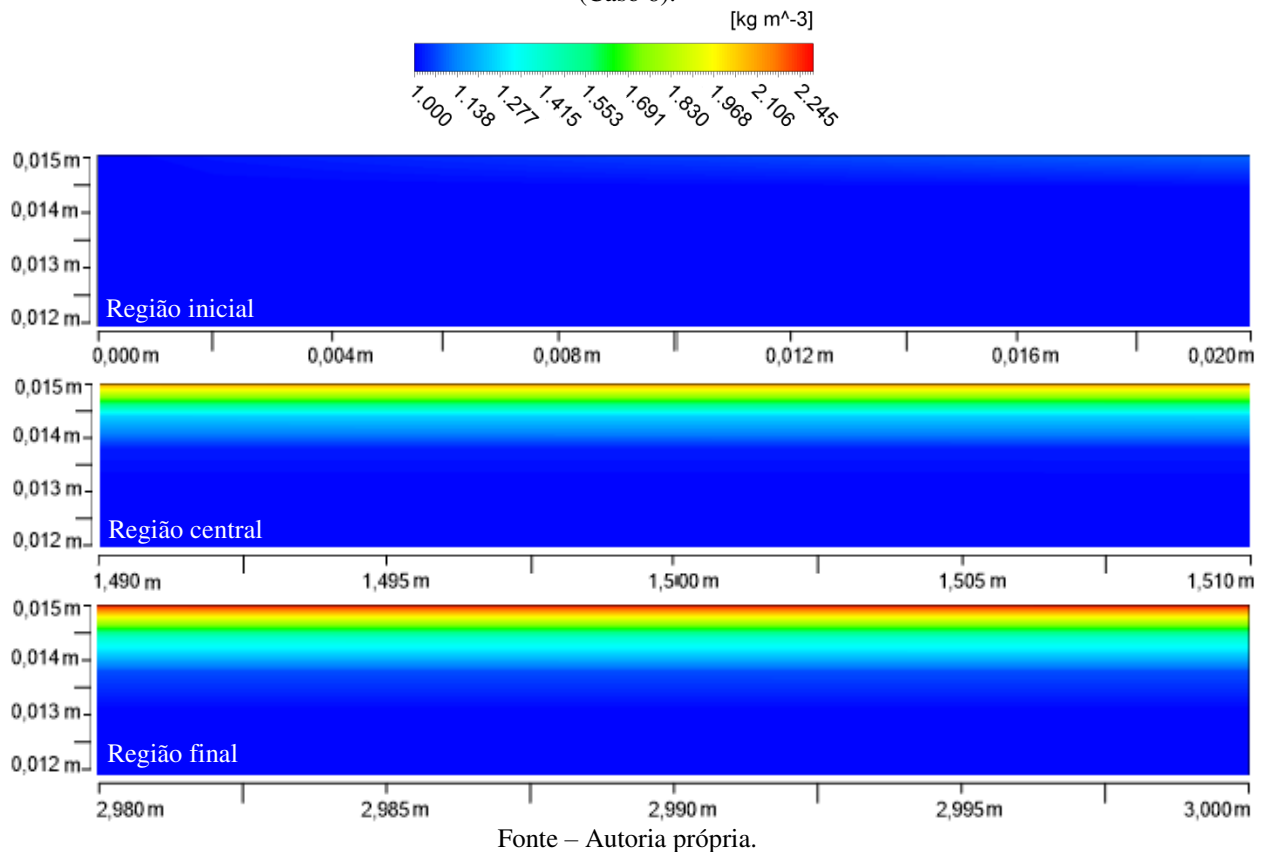
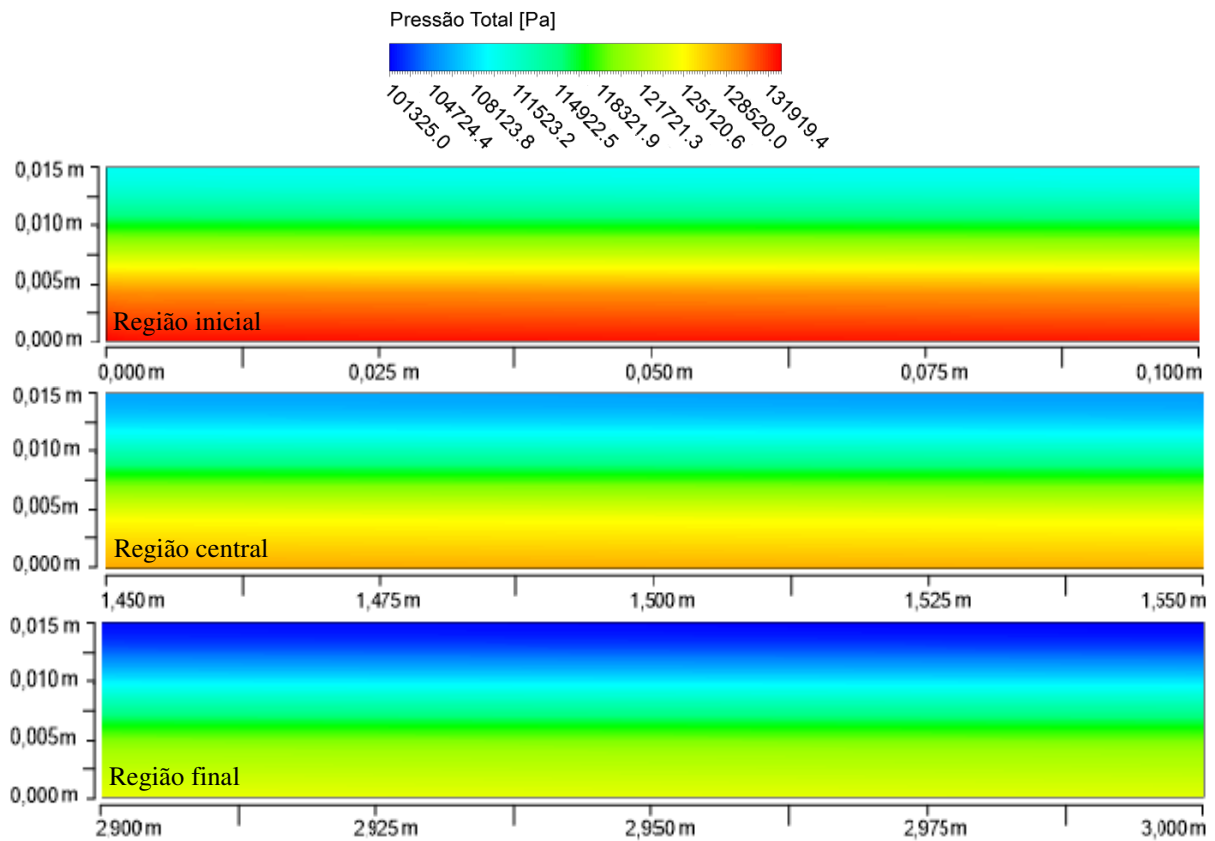
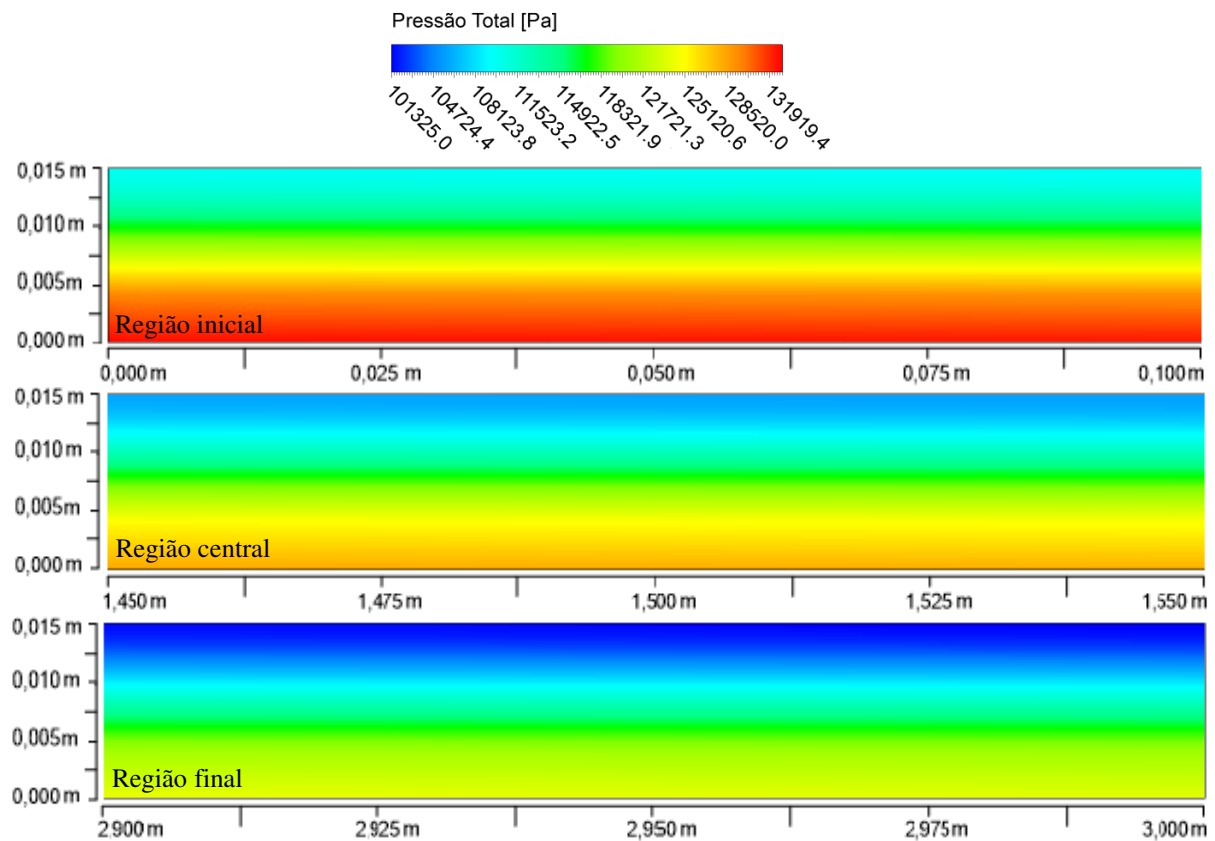


Figura 27 - Campo de pressão total para o índice de retenção de soluto pela membrana, R_r igual a 0,97 (Caso 4).



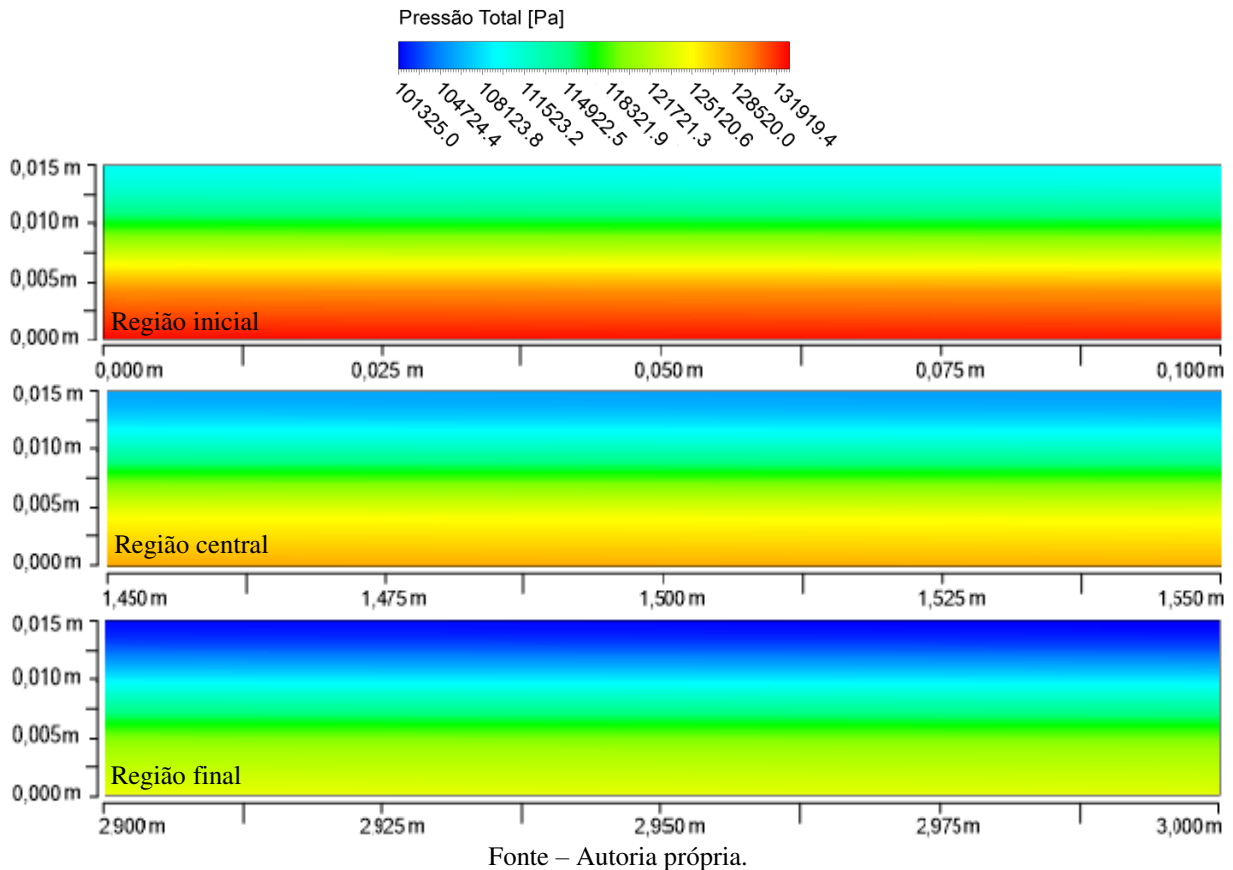
Fonte – Autoria própria.

Figura 28 - Campo de pressão total para o índice de retenção de soluto pela membrana, R_r igual a 0,98 (Caso 5).



Fonte – Autoria própria.

Figura 29 - Campo de pressão total para o índice de retenção de soluto pela membrana, R_r igual a 0,99 (Caso 6).



A Figura 30 ilustra o perfil de velocidade axial em função da posição radial para z igual a $0,50L$. Verifica-se que a variação do índice de retenção de soluto pela membrana não afeta o perfil de velocidade axial. A velocidade axial é reduzida com o aumento da posição radial. Isso ocorre devido à formação da camada limite de concentração, nas proximidades da superfície da membrana, que dificulta o escoamento.

A Figura 31 apresenta o perfil de velocidade de permeação em função do comprimento da membrana. Verifica-se que a variação do índice de retenção de soluto pela membrana tem uma pequena influência sobre a velocidade de permeação, obtendo valores mais expressivos, como esperado (para R_r igual a 0,99). A velocidade decresce com o aumento da posição axial, atingindo uma velocidade de permeação de $0,48 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ nas proximidades da saída de concentrado. Isso ocorre devido ao acúmulo de partículas que são transportadas por convecção para as proximidades da superfície da membrana, formando a camada de polarização por concentração, que tem sua espessura aumentada com a posição axial, dificultando assim, a permeação.

Figura 30 - Velocidade axial em função da posição radial, para $z = 0,50L$ (Casos: 4, 5 e 6).

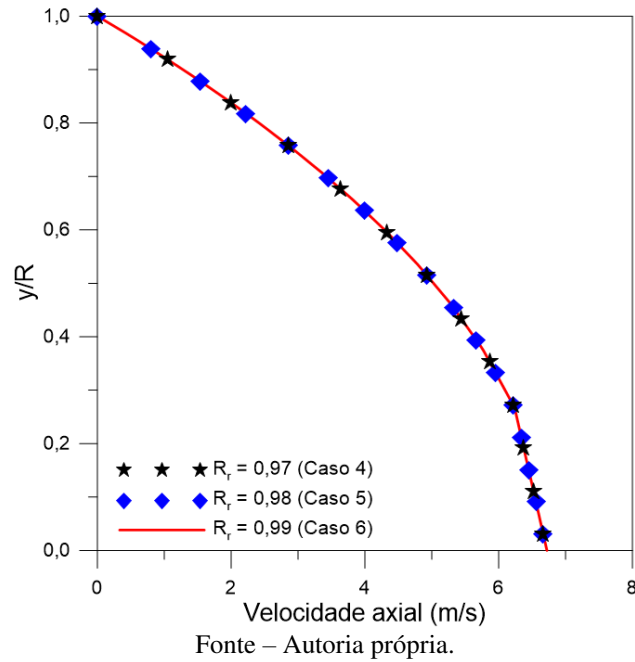
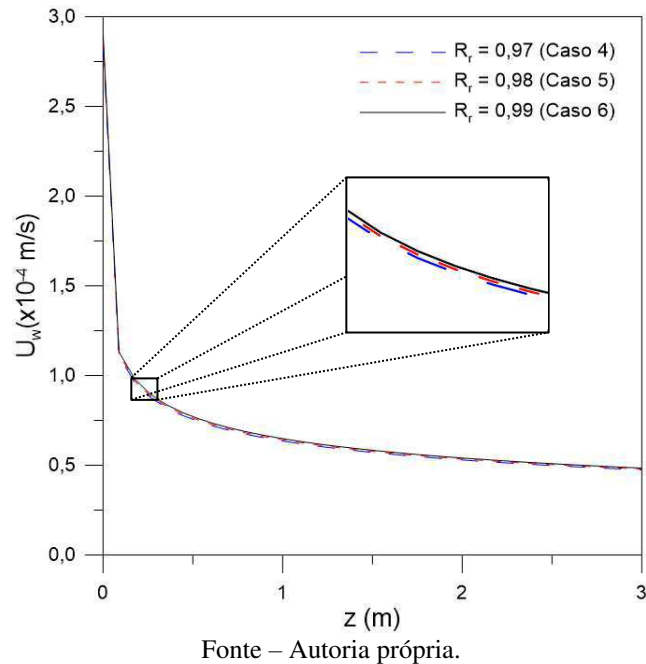


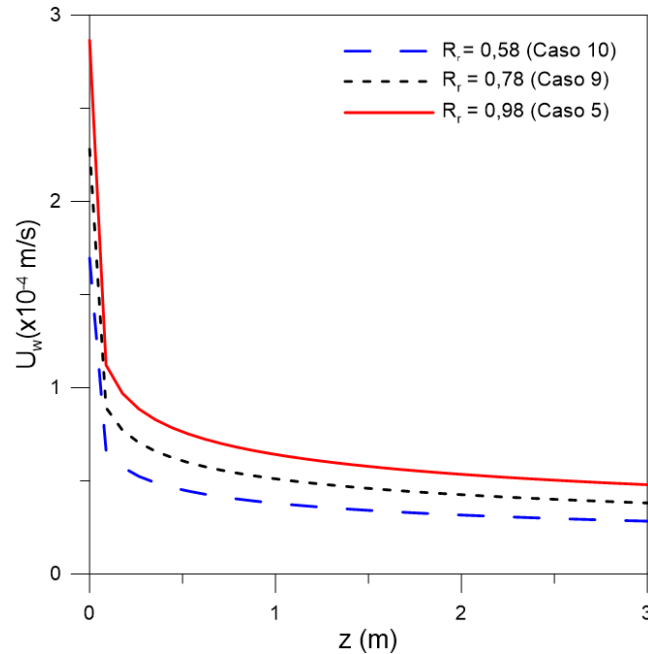
Figura 31 - Velocidade de permeação em função do comprimento da membrana (Casos: 4, 5 e 6).



A Figura 32 apresenta o perfil de velocidade de permeação em função do comprimento da membrana, para o índice de retenção do soluto de 0,58, 0,78 e 0,98, casos 10, 9 e 5, respectivamente. Verifica-se que, na faixa de 0,57 a 0,98, o índice de retenção do soluto pela membrana afeta significativamente a velocidade de permeação; o aumento do R_r proporciona maior velocidade de permeação do solvente, visto que membranas com menor índice de

retenção permitem a passagem de maiores quantidades de soluto (óleo) através da membrana, reduzindo, assim, a velocidade de permeação do solvente (água).

Figura 32 - Velocidade de permeação em função do comprimento da membrana (Casos: 5 e 9 e 10).

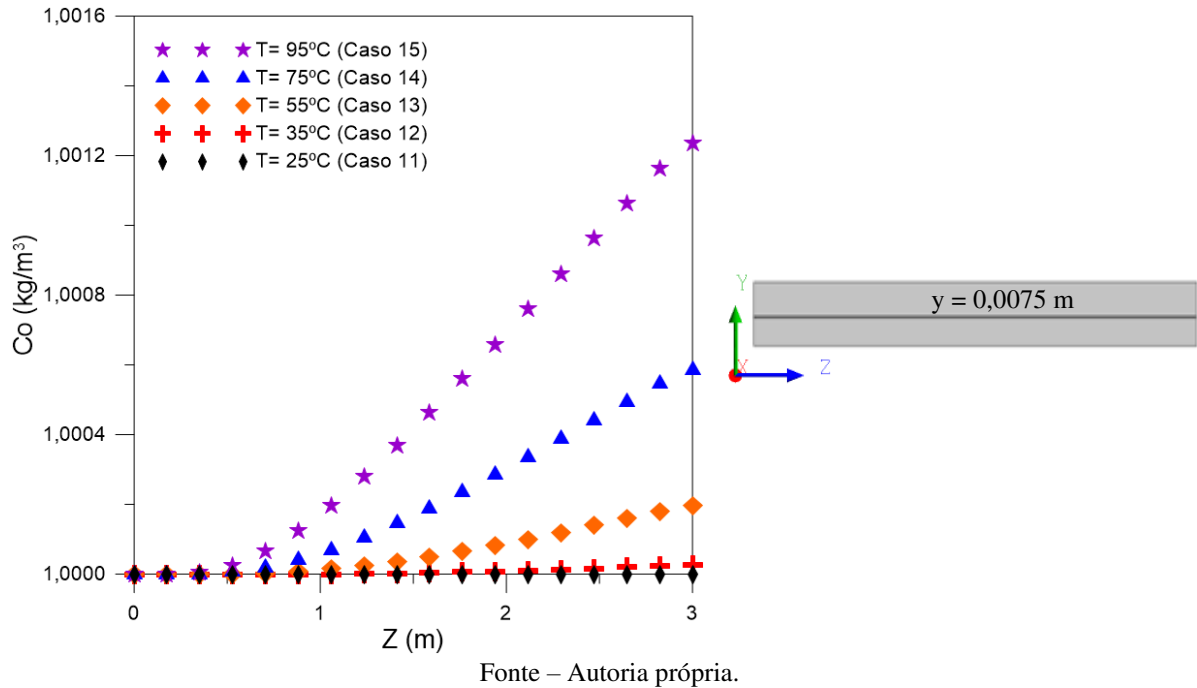


4.2. Análise não isotérmica de uma membrana cerâmica tubular bidimensional

4.2.1. Perfil de concentração

Na Figura 33 estão representados os perfis de concentração ao longo da coordenada z (para $y = 0,0075$ m) para as temperaturas de 25°C, 35°C, 55°C, 75°C e 95°C, casos 11, 12, 13, 14, e 15, respectivamente. Observa-se que a concentração de soluto ao longo da posição radial aumenta com o incremento da temperatura. Esse comportamento está relacionado com a redução da densidade do soluto causada pelo aumento da temperatura, mantendo-se constante o índice de retenção do soluto pela membrana (R_r igual a 1), tornando a camada de polarização mais dispersa.

Figura 33 - Perfil de concentração ao longo do eixo z, para $y = 0,0075$ m (Casos: 11, 12, 13, 14 e 15).

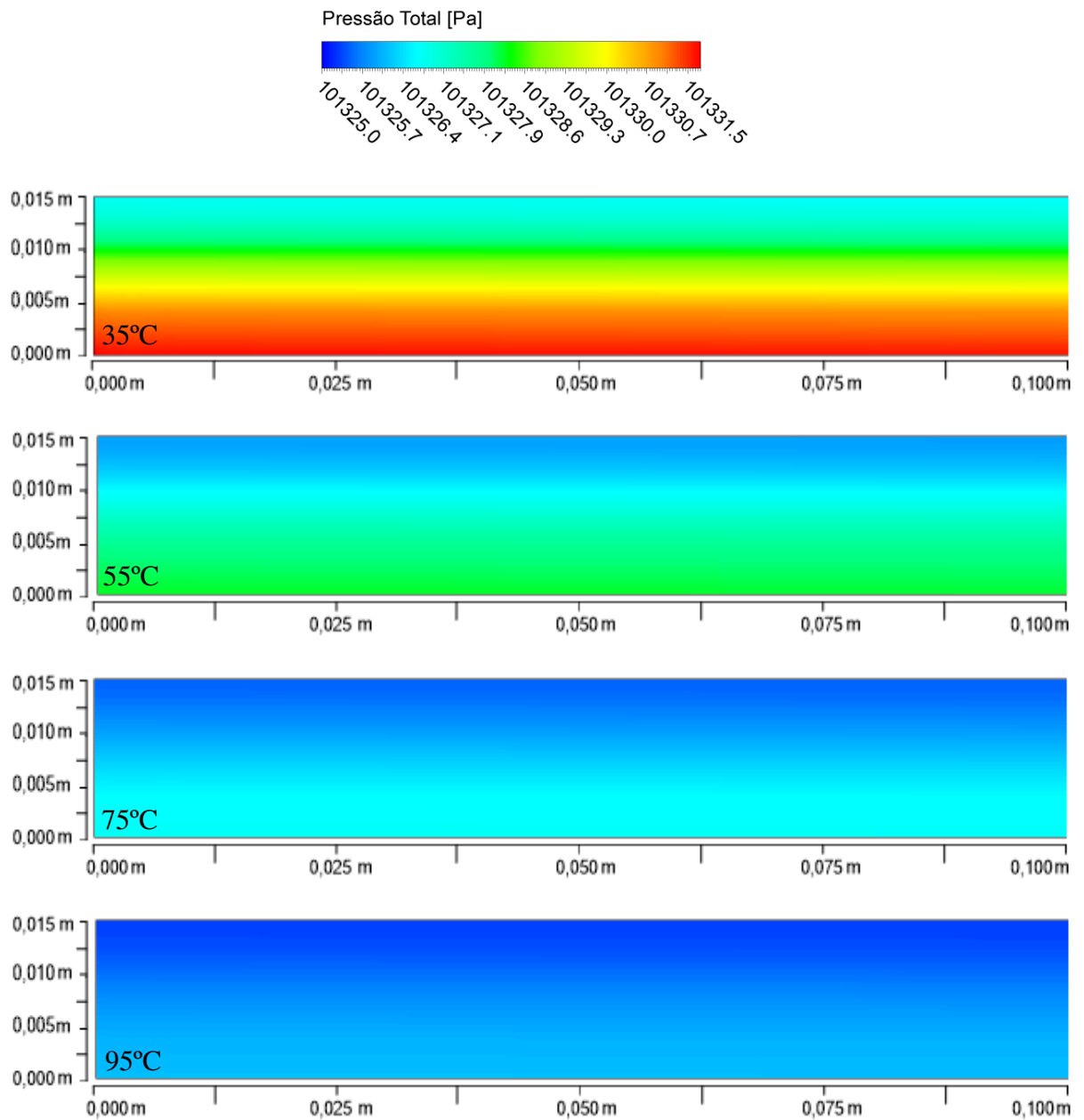


4.2.2. Campo de pressão

Nas Figuras 34, 35 e 36 estão apresentados os campos de pressão para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C, nas regiões inicial, central e final da membrana tubular bidimensional, casos 12, 13, 14 e 15, respectivamente. Observa-se que o aumento da temperatura ocasiona redução da pressão total do sistema; esse comportamento está associado com a redução das propriedades de densidade e viscosidade do fluido ao ser aquecido, ocasionando, assim, uma redução da velocidade de alimentação, e conseqüentemente reduzindo a pressão exercida pelo fluido ao longo do escoamento. Além disso, constata-se maiores gradientes de pressão, na região de alimentação (Região inicial) da membrana e na zona inferior da seção 2D, devido às maiores velocidades na alimentação.

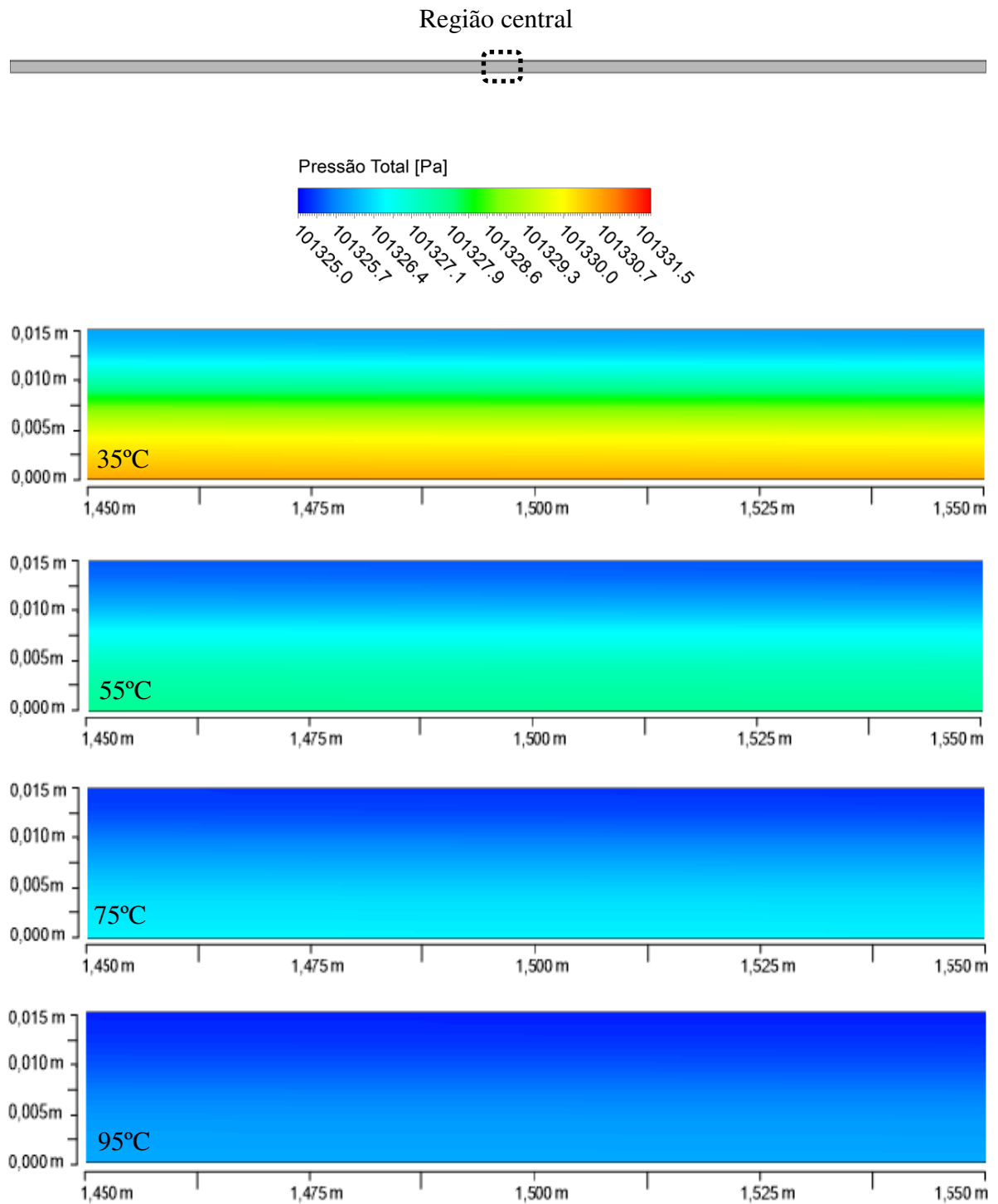
Figura 34 - Campo de pressão na região inicial da membrana, para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C respectivamente (Casos 12, 13, 14 e 15).

Região inicial



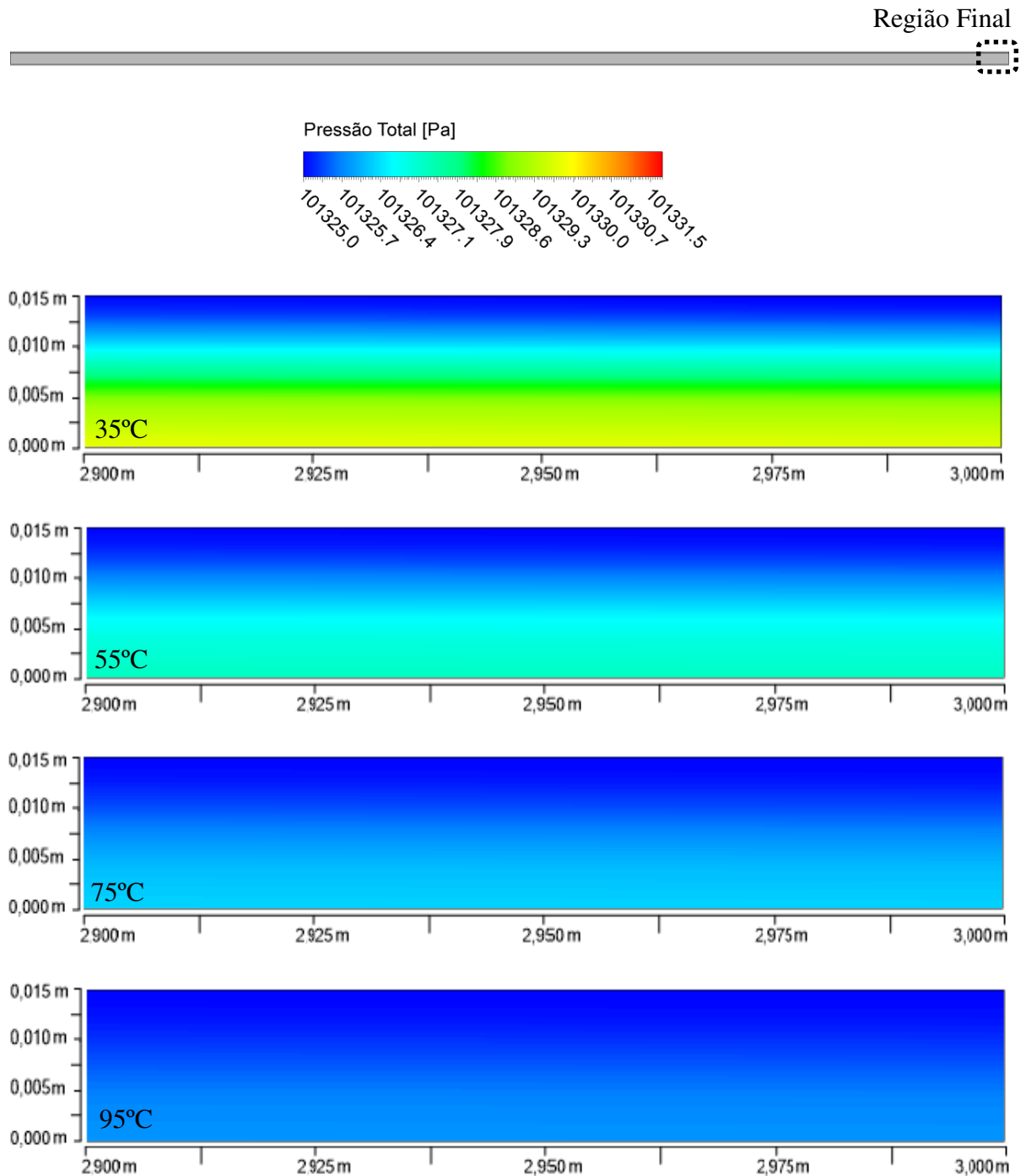
Fonte – Autoria própria.

Figura 35 - Campo de pressão na região central da membrana, para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C respectivamente (Casos 12, 13, 14 e 15).



Fonte – Autoria própria.

Figura 36 - Campo de pressão na região final da membrana, para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C respectivamente (Casos 12, 13, 14 e 15).



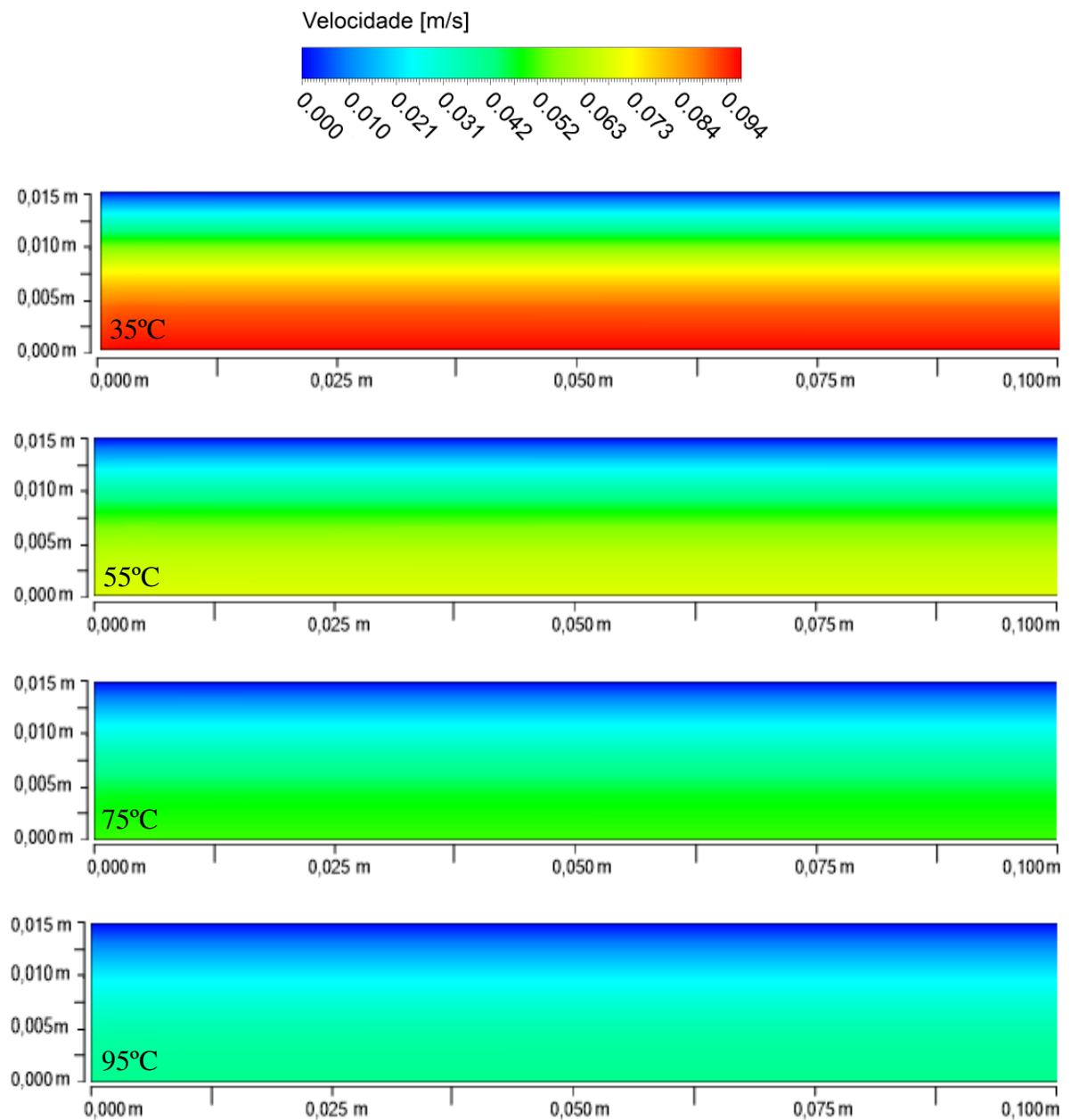
Fonte – Autoria própria.

4.2.3. Campo de velocidade

Na Figura 37 estão representados os campos de velocidade para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C, casos 12, 13, 14 e 15, respectivamente. Analogamente ao

comportamento verificado nos campos de pressão, observa-se que o aumento da temperatura influencia a relação μ/ρ utilizada na modelagem da condição de contorno de entrada. Isto promove uma redução da velocidade com a temperatura, e menores gradientes de velocidade na região próxima à superfície da membrana, devido a formação da camada de polarização que dificulta o escoamento.

Figura 37 - Campo de velocidade para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C respectivamente (Casos 12, 13, 14 e 15).

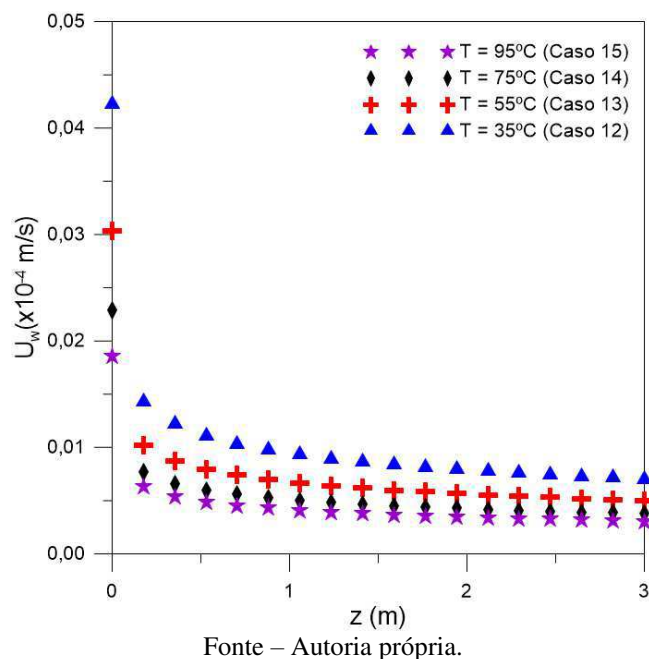


Fonte – Autoria própria.

4.2.4. Velocidade de permeação

A Figura 38 apresenta o perfil de velocidade de permeação em função do comprimento da membrana, para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C, casos 12, 13, 14 e 15, respectivamente. Verifica-se que, ao se aumentar a temperatura, a velocidade de permeação é reduzida. Esse comportamento é justificado pela alteração das propriedades do fluido que são diretamente influenciadas pela variação térmica.

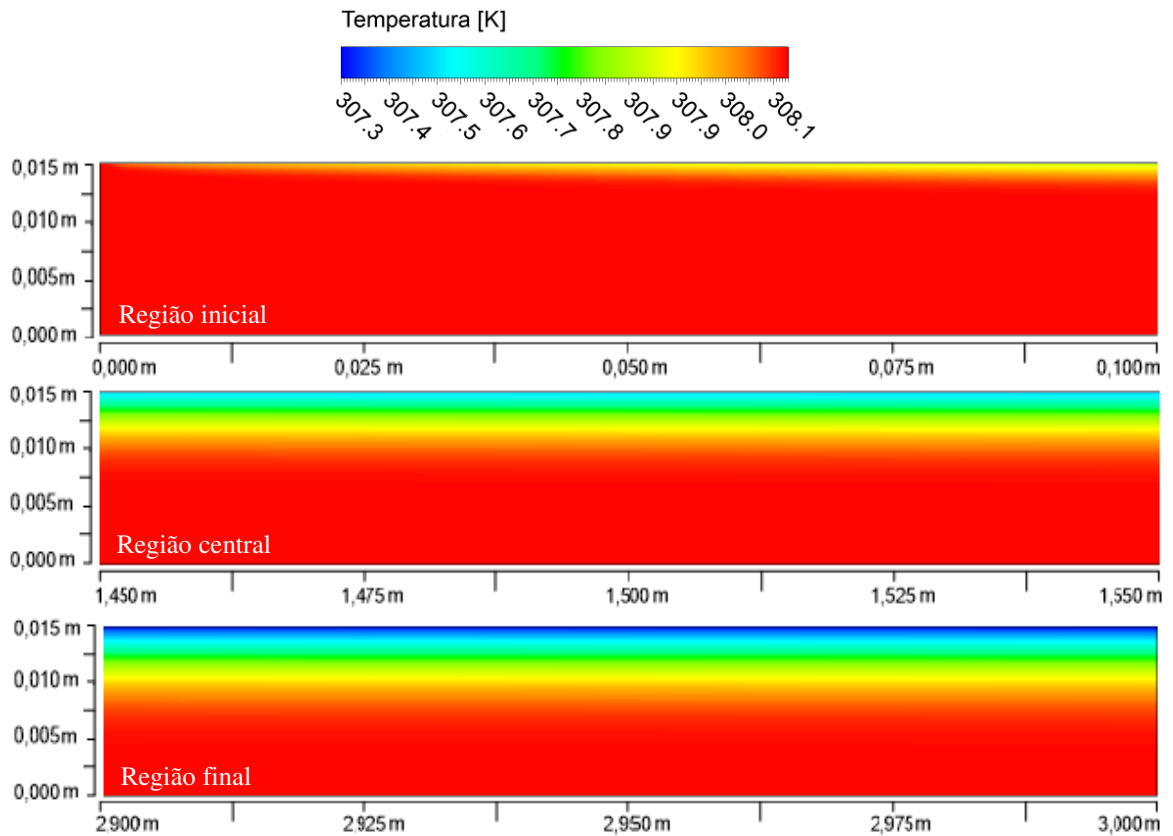
Figura 38 - Velocidade de permeação em função do comprimento da membrana (Casos: 12,13,14 e 15).



4.2.5. Campo de temperatura

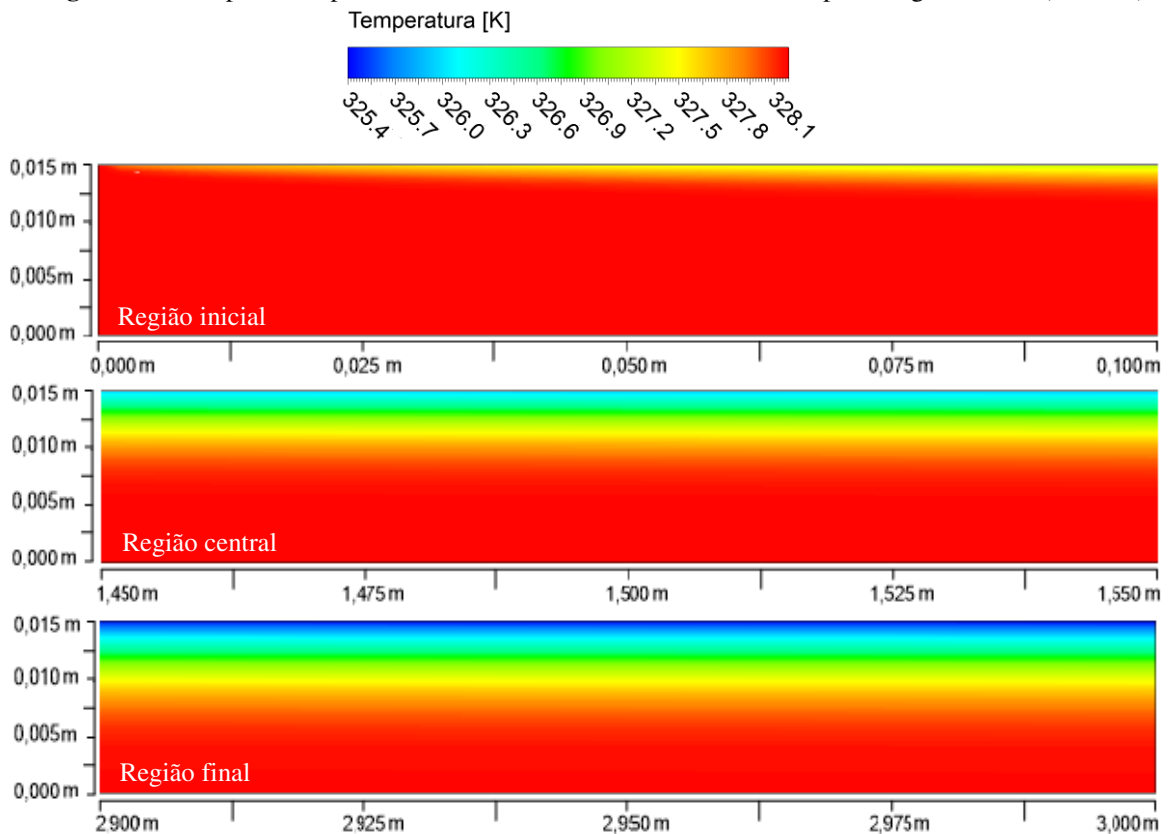
Nas Figuras 39, 40, 41 e 42 encontram-se ilustrados os campos de temperatura, para 35°C, 55°C, 75°C e 95°C, casos 12, 13, 14 e 15, respectivamente. Observa-se a formação de um gradiente de temperatura nas proximidades da membrana, promovido pelas trocas térmicas ocasionadas pela convecção natural sob a superfície externa da membrana. Além disso, verifica-se a formação de maiores gradientes de temperatura nas regiões centrais e finais da membrana, causado pelas perdas por transferência de calor ao longo do escoamento para o ambiente, resfriando o fluido próximo a membrana em 0,83°C (Caso 12), 2,77 °C (Caso 13), 5,06 °C (Caso 14) e 7,64 °C (Caso 15).

Figura 39 - Campo de temperatura no interior da membrana tubular 2D, para T_0 igual a 35°C (Caso 12).



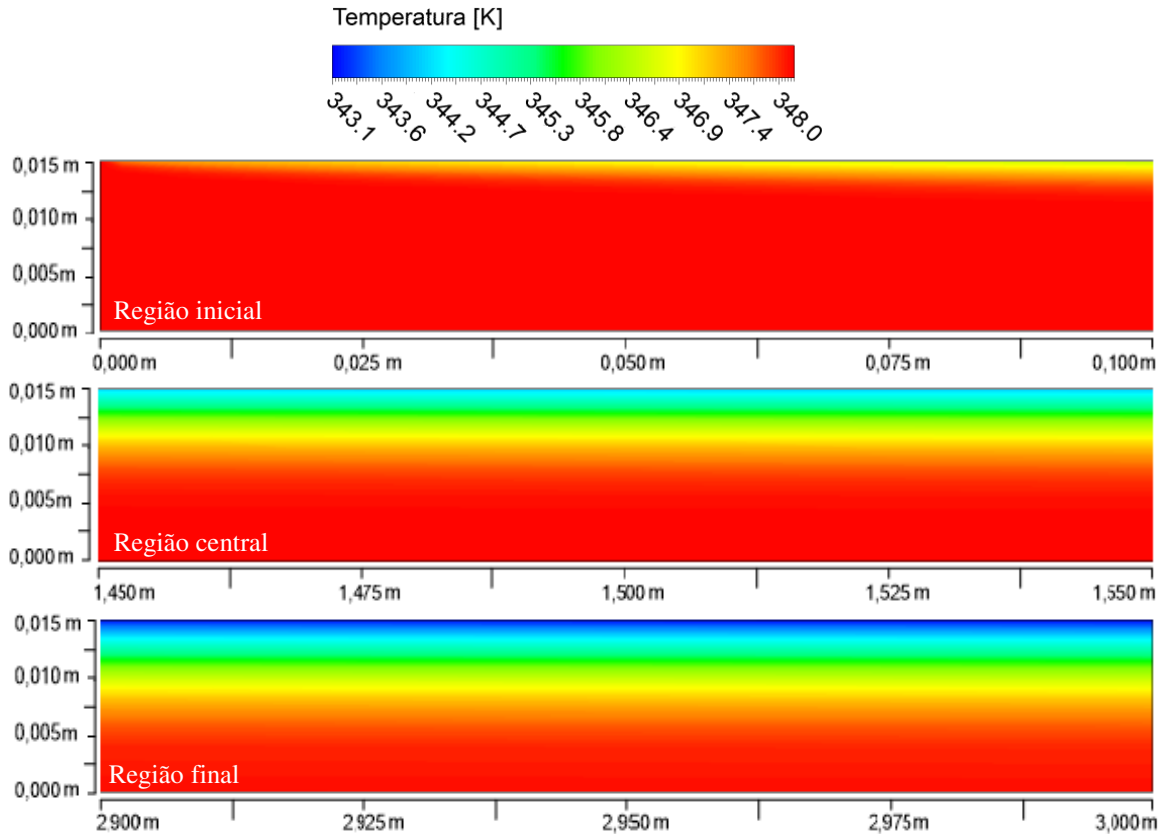
Fonte – Autoria própria.

Figura 40 - Campo de temperatura no interior da membrana tubular 2D, para T_0 igual a 55°C (Caso 13).



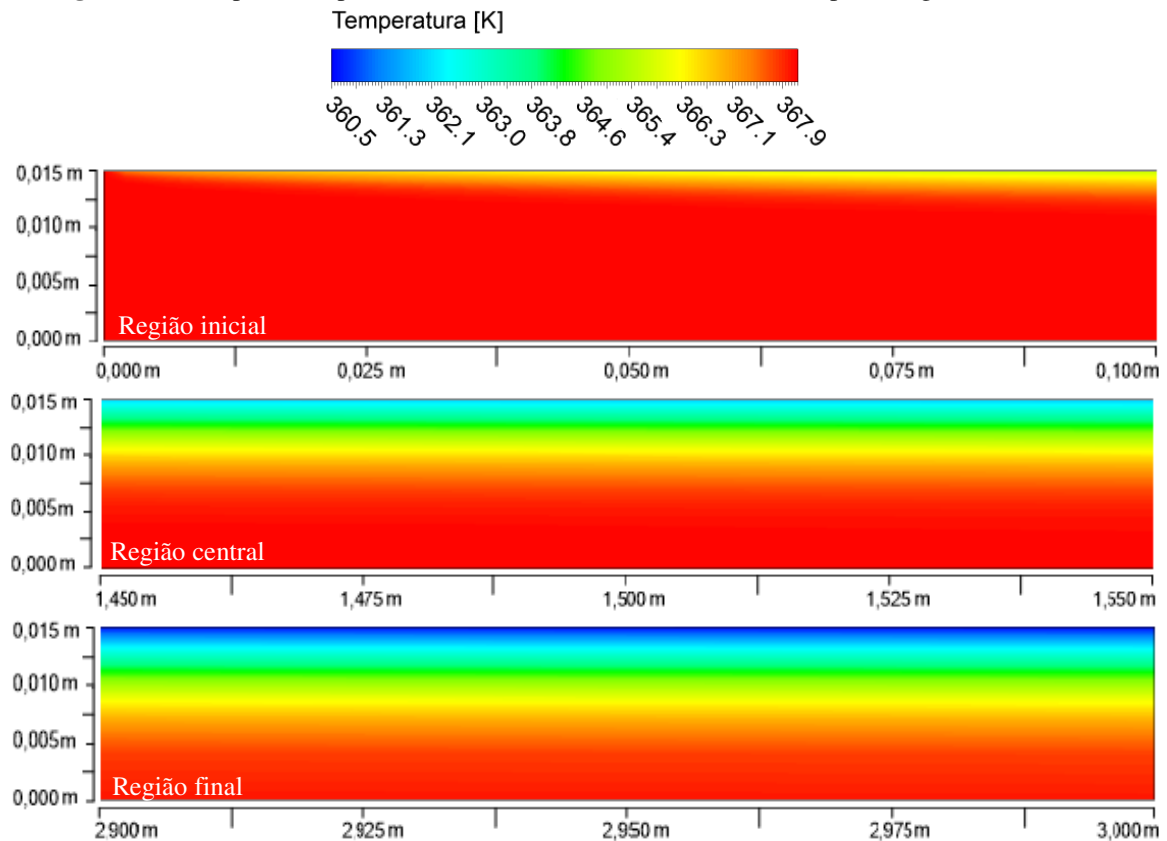
Fonte – Autoria própria.

Figura 41 - Campo de temperatura no interior da membrana tubular 2D, para T_0 igual 75°C (Caso 14).



Fonte – Autoria própria.

Figura 42 - Campo de temperatura no interior da membrana tubular 2D, para T_0 igual 95°C (Caso 15).



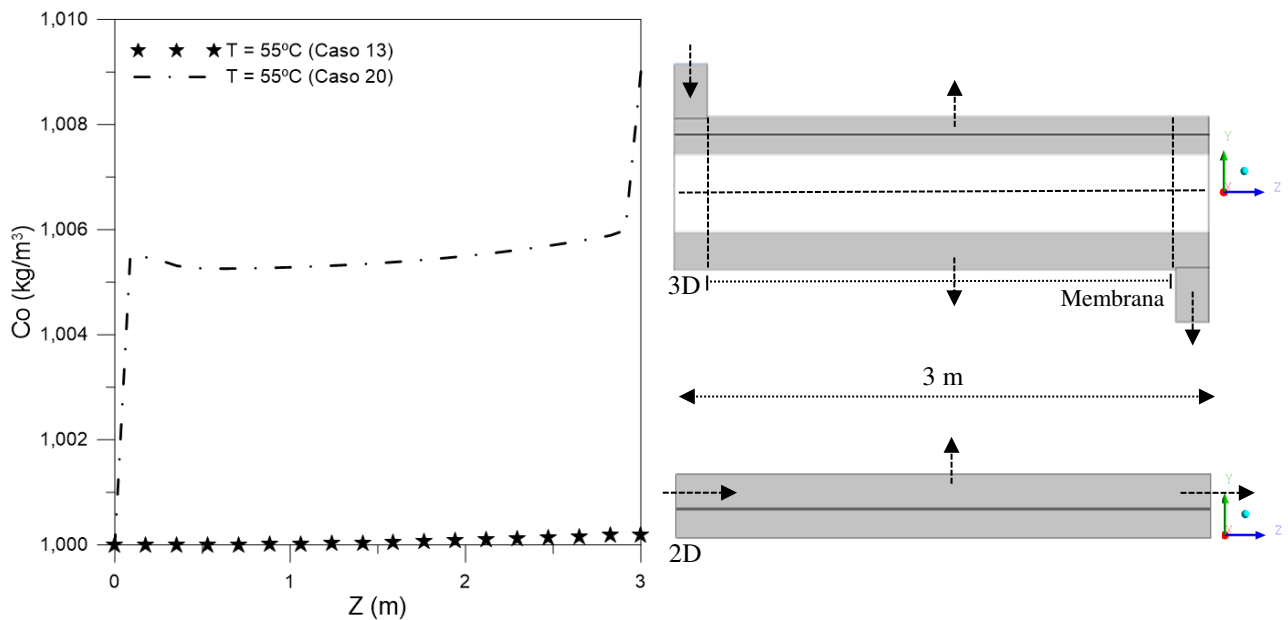
Fonte – Autoria própria.

4.3. Análise não isotérmica de um módulo casco/membrana tubular tridimensional

4.3.1 Perfil de concentração

Na Figura 43 estão representados os perfis de concentração ao longo da coordenada z (para $y = 0,0225$ m) para a temperatura de 55°C , casos 13 e 20 (bidimensional e tridimensional), respectivamente. Observa-se que a concentração de soluto ao longo da posição axial aumenta ao longo do escoamento, devido ao acúmulo de partículas próximo a superfície da membrana. Além disso, é perceptível a influência do aspecto geométrico sobre o perfil de concentração. Ao comparar o resultado bidimensional com o obtido em uma abordagem tridimensional, onde a permeação ocorre na superfície do tubo externo do módulo de separação casco/membrana tubular, verifica-se que a geometria 3D apresenta maiores concentrações com fortes variações próximas da posição axial, em 0 m e 3 m, comportamento induzido pela entrada do efluente e saída de concentrado, o que não é observado para a geometria 2D.

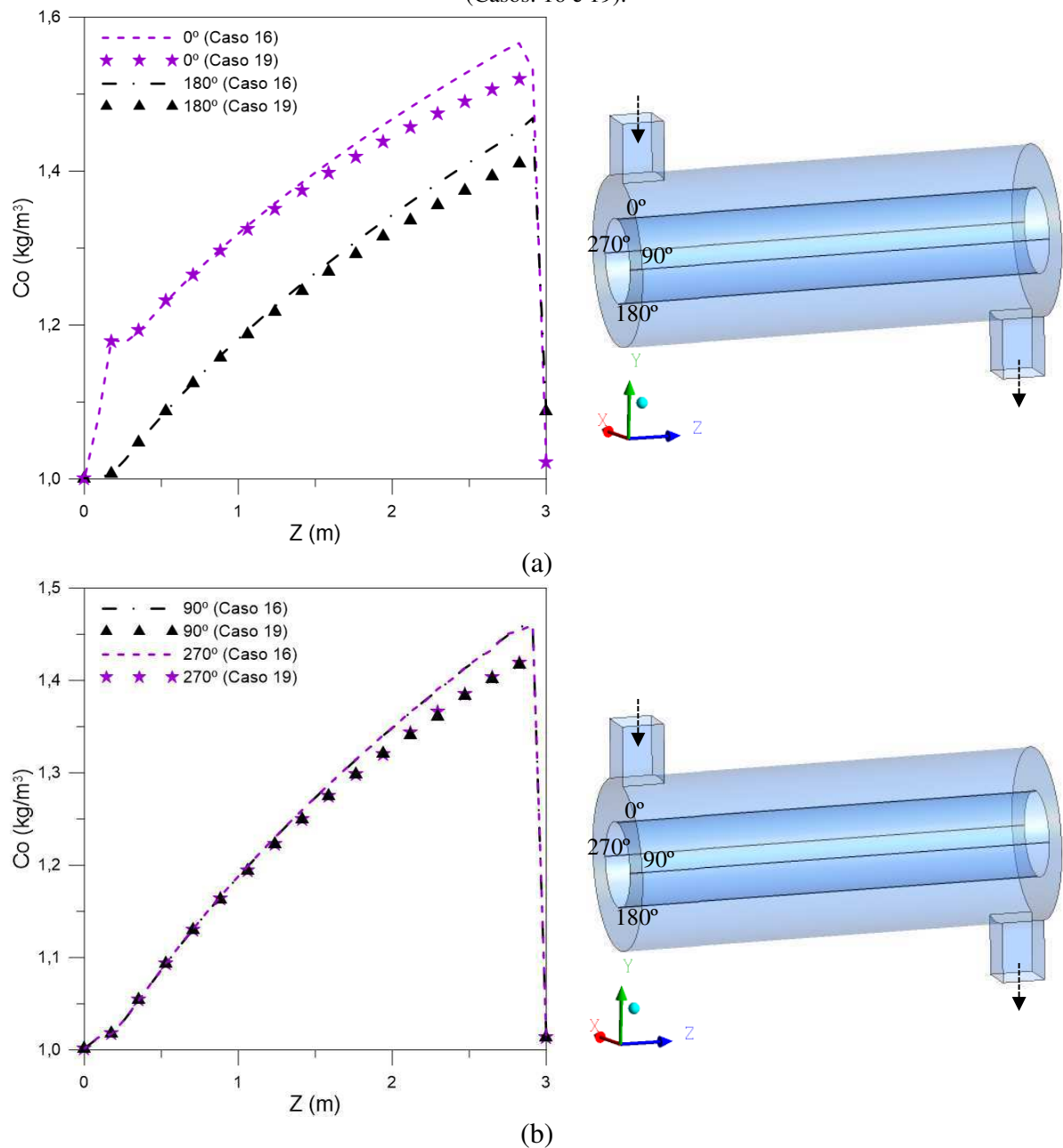
Figura 43 - Perfil de concentração ao longo do eixo z , para $y = 0,0225$ m (Casos: 13, e 20).



Na Figura 44 está representado o comportamento da concentração de óleo em função da posição longitudinal sobre quatro posições angulares (0° , 90° , 180° e 270°) na superfície da membrana do módulo, para as temperaturas de 35°C e 95°C , casos 16 e 19, respectivamente. A distribuição dos componentes de concentração, nas quatro posições angulares, é nitidamente afetada pela variação da temperatura. Na Figura 44a pode-se notar que o perfil de concentração,

nas posições 0° e 180° , apresentam maiores concentrações de óleo, se comparado com o comportamento observado na Figura 44b, posições de 90° e 270° , devido o escoamento em volta do objeto (membrana) favorecer esse comportamento. Obteve-se maiores concentrações, como esperado, na região de impacto do fluido com a membrana propiciada pela posição perpendicular da entrada de alimentação.

Figura 44 - Perfil de concentração no interior do módulo de separação, nas posições (a) 0° e 180° , (b) 90° e 270° (Casos: 16 e 19).

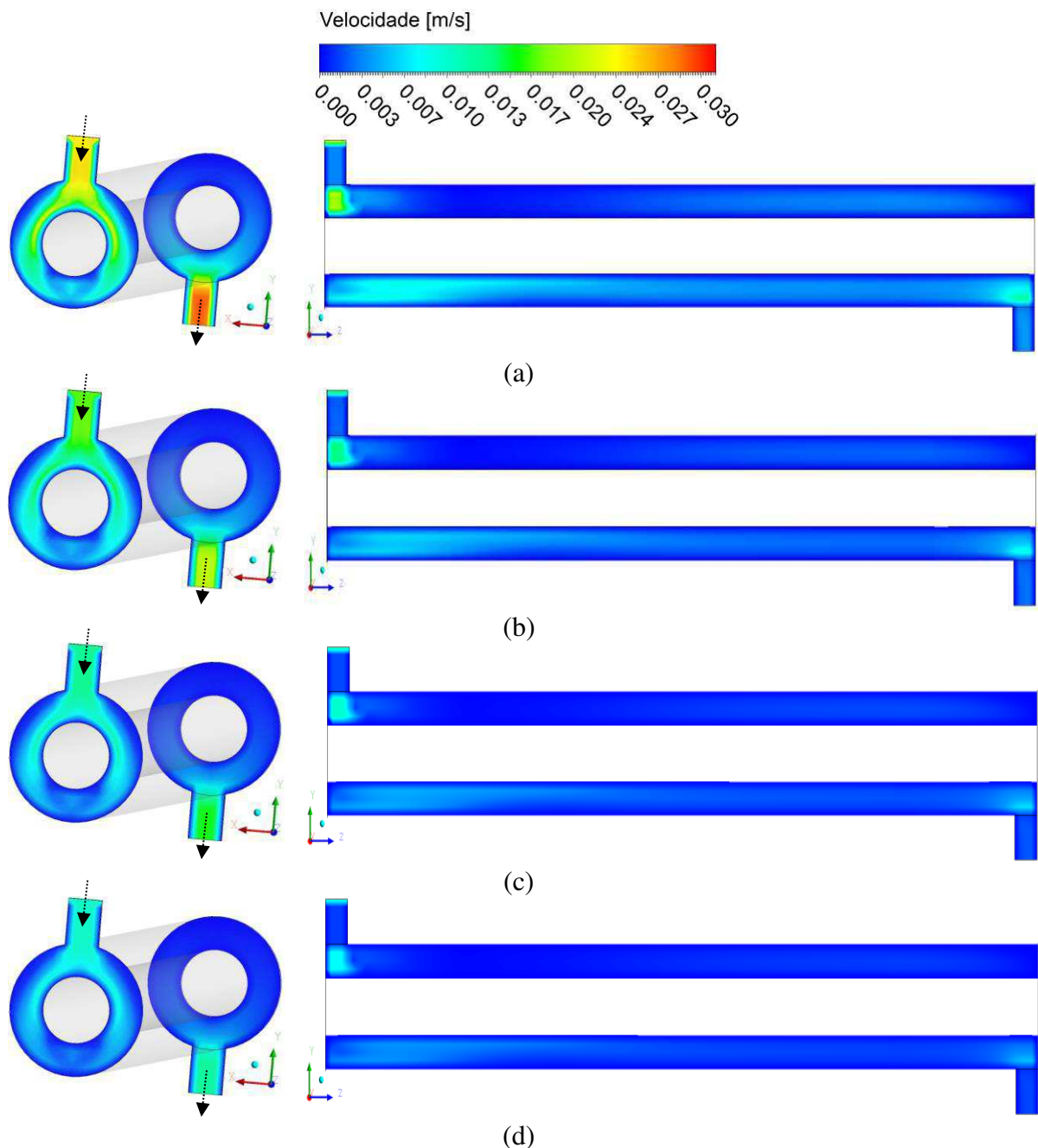


Fonte – Autoria própria.

4.3.2. Campo de velocidade

Na Figura 45 encontra-se ilustrado o campo de velocidade sobre o plano longitudinal yz do módulo de separação, para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C, casos 16, 17, 18 e 19, respectivamente. Observa-se que a temperatura influencia o comportamento dos campos de velocidade, apresentando maiores gradientes para T_0 igual a 35°C (Figura 45a). Além disso, verifica-se maiores variações na velocidade nas regiões de entrada e saída do efluente.

Figura 45 - Campo de velocidade, para as temperaturas de (a) 35°C, (b) 55°C, (c) 75°C e (d) 95°C (Casos: 16, 17, 18 e 19).

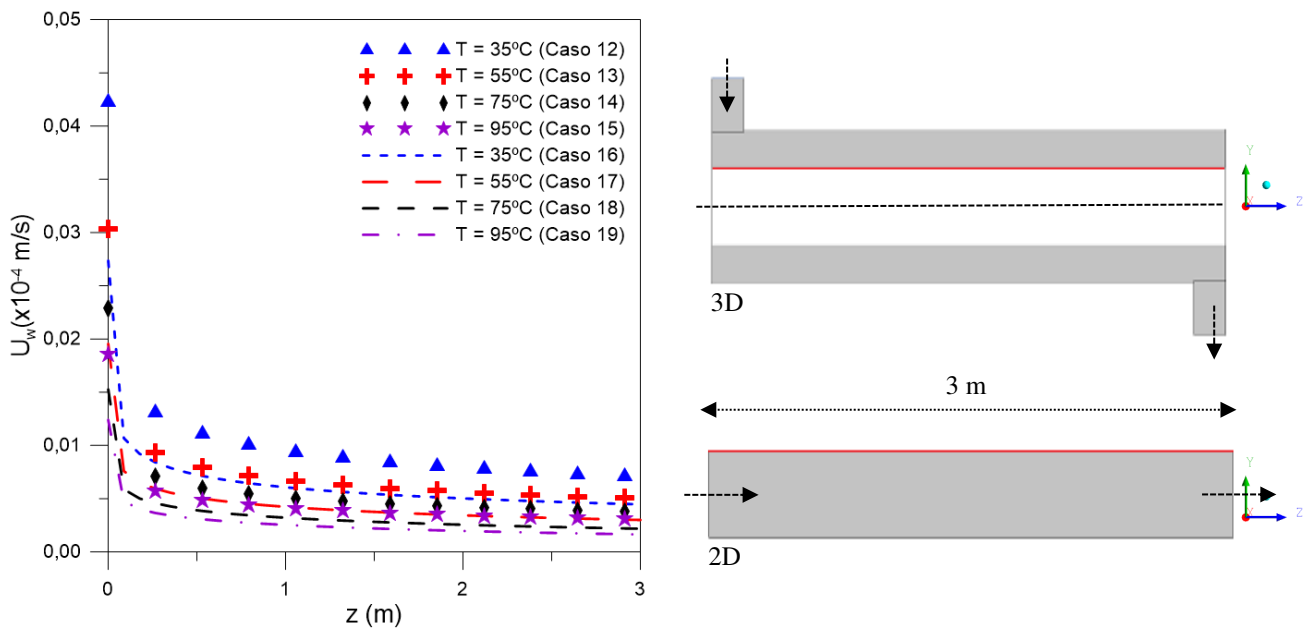


Fonte – Autoria própria.

4.3.3. Velocidade de permeação

A Figura 46 ilustra o perfil de velocidade de permeação em função do comprimento da membrana, para as temperaturas de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C, para os casos bidimensionais, 12, 13, 14, e 15, e tridimensionais, 15, 16, 17, 18 e 19, respectivamente. Analogamente ao observado na Figura 38, verifica-se que ao se aumentar a temperatura, a velocidade de permeação é reduzida. Além disso, constata-se que o aspecto geométrico possui influência sobre a velocidade de permeação; as curvas características dos casos tridimensionais apresentam velocidade menores que as curvas bidimensionais. Esse comportamento está associado a ampliação da área de escoamento sob as mesmas condições operacionais impostas na análise 2D.

Figura 46 - Velocidade de permeação em função do comprimento da membrana (Casos: 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19).



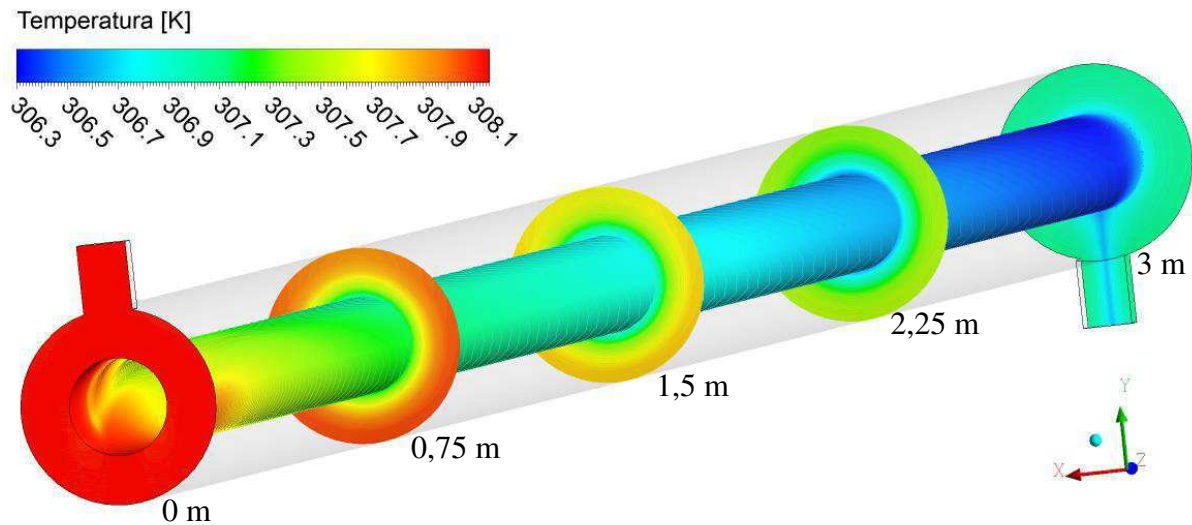
Fonte – Autoria própria.

4.3.4. Campo de temperatura

Nas Figuras 47, 48, 49 e 50 encontram-se ilustrados os campos de temperatura no interior do módulo de separação, para as temperaturas de alimentação de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C, casos 16, 17, 18 e 19, respectivamente. Observa-se mais claramente, através da visualização tridimensional, a distribuição de temperatura ao longo do módulo de separação, com formação de um gradiente de temperatura no espaço anular entre a casco do módulo e a

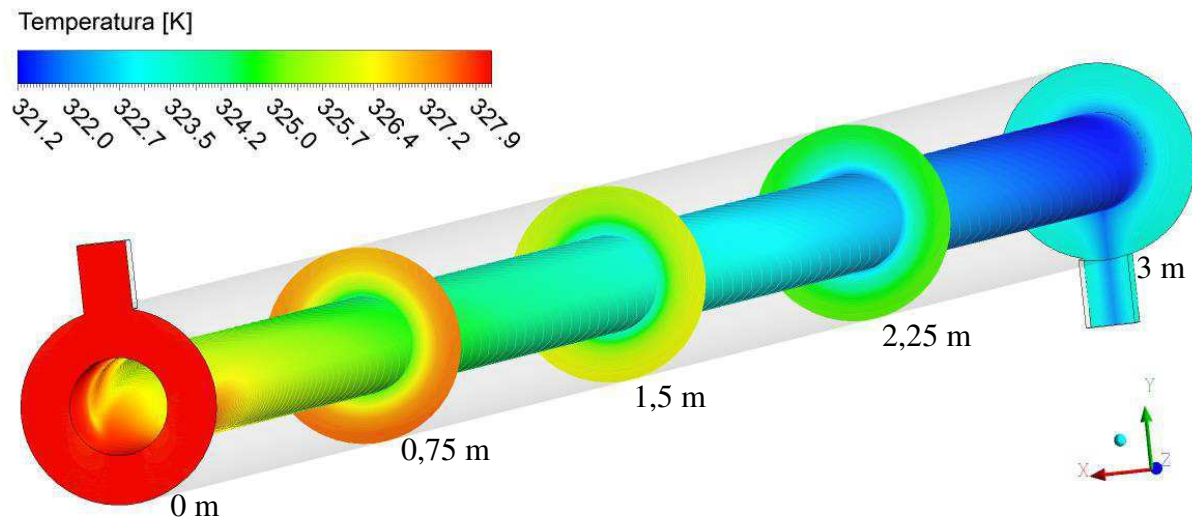
membrana cerâmica, ocasionado pelas trocas térmicas entre a superfície aquecida da membrana e o ar atmosférico, por convecção natural, resfriando assim, o fluido nas proximidades da membrana. Além disso, verifica-se maiores gradientes de temperatura para valores de z iguais a 2,25 m e 3 m, devido as perdas gradativas por transferência de calor ao longo do escoamento para o ambiente.

Figura 47 - Campo de temperatura no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual a 35°C (Caso 16).



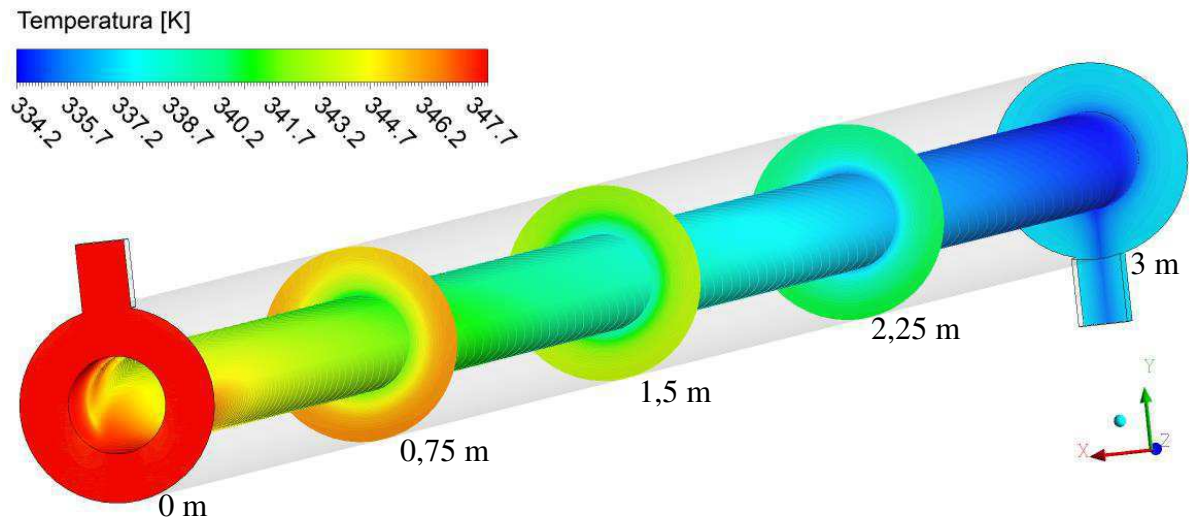
Fonte – Autoria própria.

Figura 48 - Campo de temperatura no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual a 55°C (Caso 17).



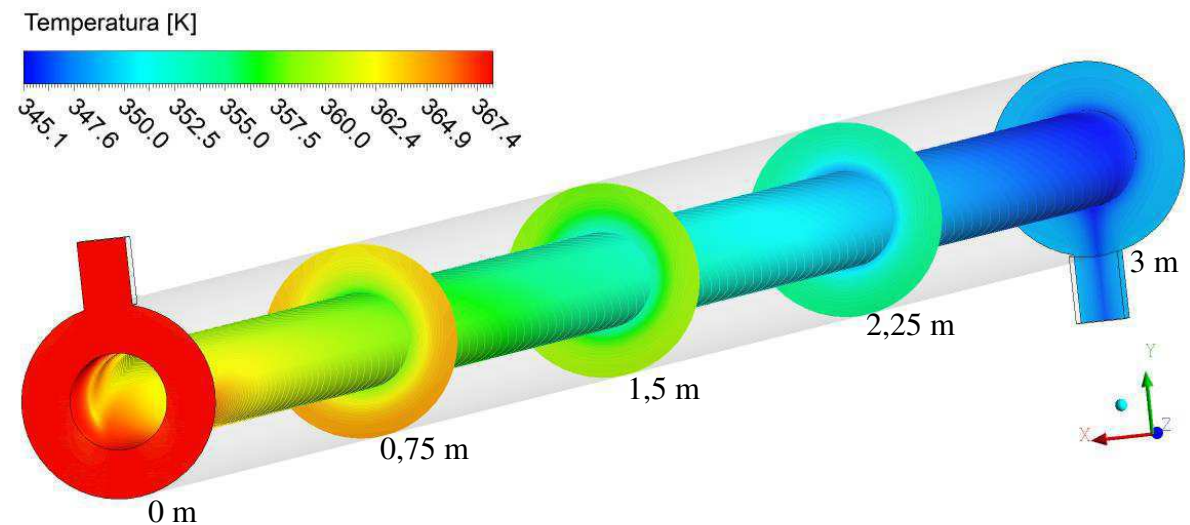
Fonte – Autoria própria.

Figura 49 - Campo de temperatura no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual 75°C (Caso 18).



Fonte – Autoria própria.

Figura 50 - Campo de temperatura no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual 95°C (Caso 19).



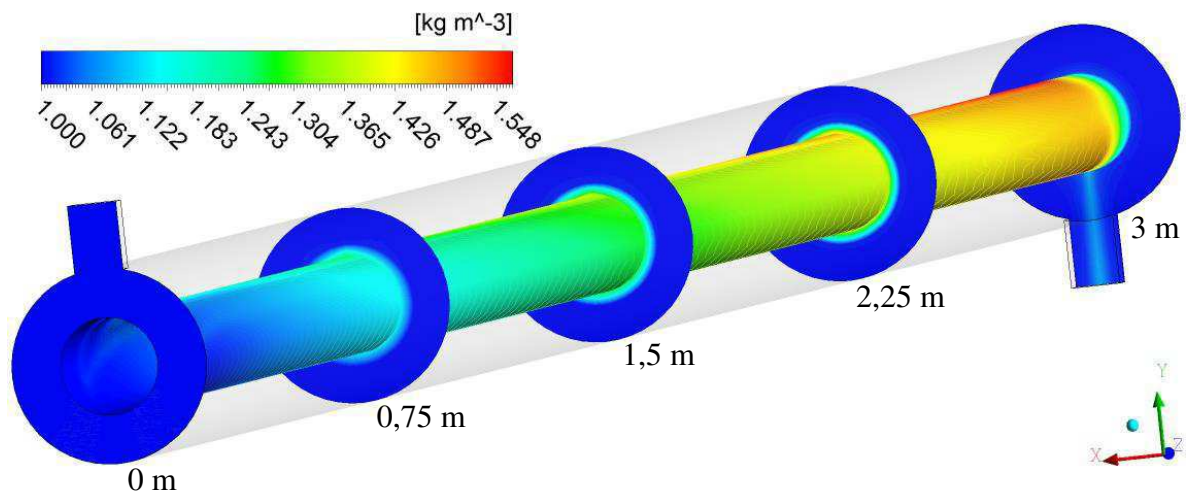
Fonte – Autoria própria.

Ao correlacionar as Figuras 47, 48, 49 e 50, que ilustram os campos de temperatura no interior do módulo de separação, com as Figuras 43 e 46, que representam os perfis de concentração e velocidade de permeação ao longo do eixo z, respectivamente, observa-se que o aumento da variação de temperatura no interior do módulo, $\Delta T \approx 2^\circ C$ (Caso 16), $\Delta T \approx 7^\circ C$ (Caso 17), $\Delta T \approx 13^\circ C$ (Caso 18) e $\Delta T \approx 22^\circ C$ (Caso 19), ocasiona o deslocamento de uma maior quantidade de partículas de soluto para as proximidades da superfície da membrana, aumentando a resistência específica da camada de polarização, r_p , reduzindo, assim, a velocidade de permeação.

4.3.5. Campo de concentração

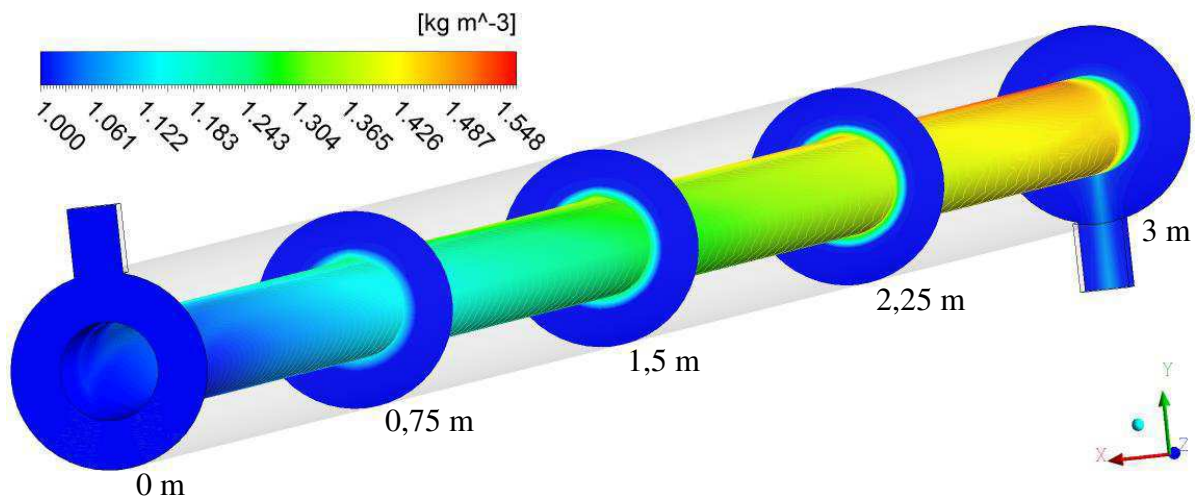
Nas Figuras 51, 52, 53 e 54 encontram-se representados os campos de concentração no interior do módulo de separação, para as temperaturas de alimentação de 35°C, 55°C, 75°C e 95°C, casos 16, 17, 18 e 19, respectivamente. Observa-se que a concentração do soluto aumenta ao longo da posição axial, sendo reduzida em $0,05 \text{ kg/m}^3$ com a elevação da temperatura de 35°C para 95°C. Além disso, verifica-se maiores gradientes de concentração próximo a região de saída do concentrado. Esse comportamento está associado ao transporte de soluto para as proximidades da superfície da membrana pelas forças cisalhantes, que é atenuado pelo aumentar a temperatura, devido a diminuição da viscosidade e densidade do fluido, reduzindo, assim, o acúmulo de partículas ao longo do escoamento.

Figura 51 - Campo de concentração no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual a 35°C (Caso 16).



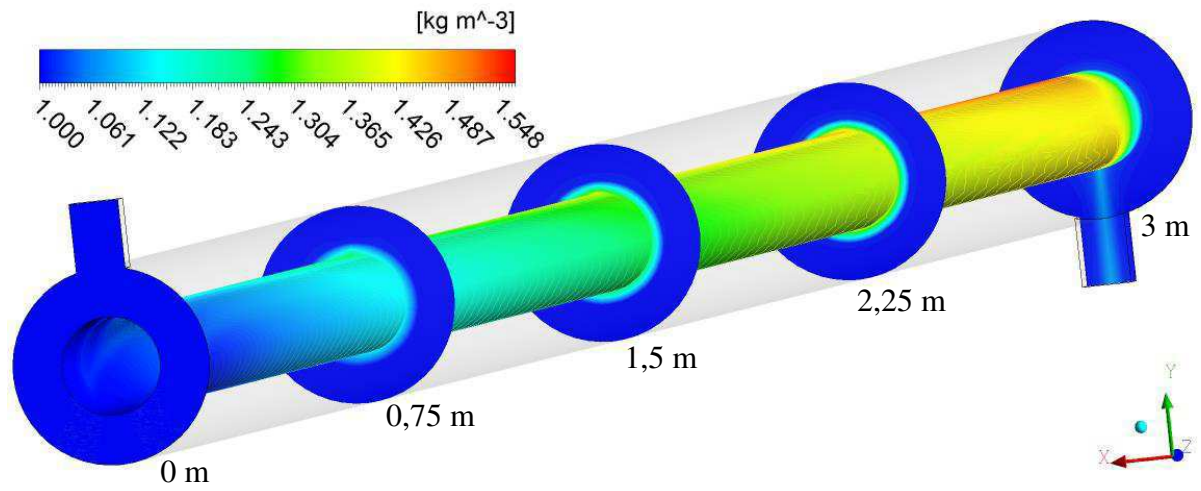
Fonte – Autoria própria.

Figura 52 - Campo de concentração no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual a 55°C (Caso 17).



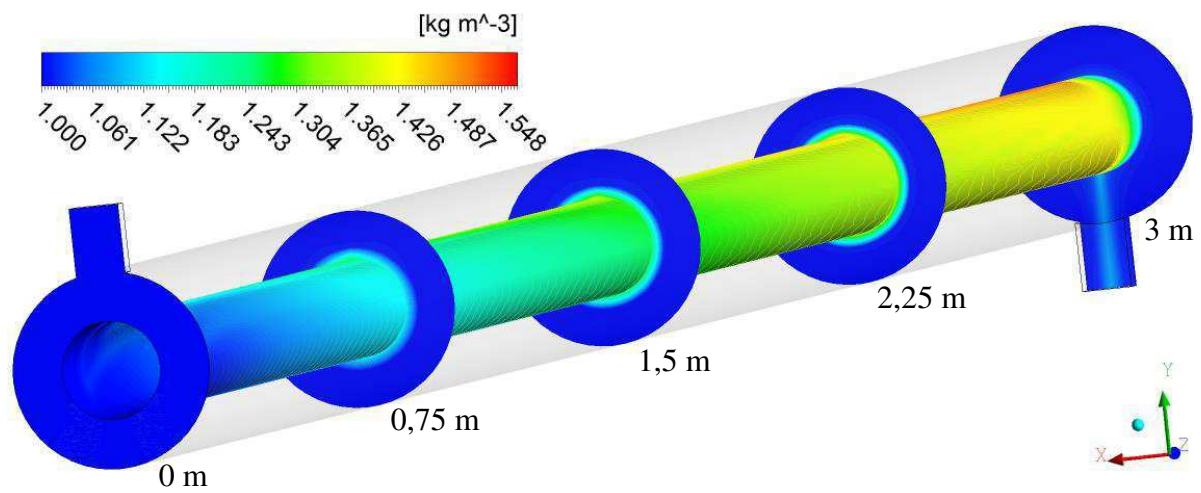
Fonte – Autoria própria.

Figura 53 - Campo de concentração no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual 75°C (Caso 18).



Fonte – Autoria própria.

Figura 54 - Campo de concentração no interior módulo casco/membrana tubular, para T_0 igual 95°C (Caso 19).



Fonte – Autoria própria.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Baseado nos resultados obtidos nas simulações numéricas do processo de separação água/óleo via membrana tubular pode-se concluir que:

- ✓ O modelo matemático conseguiu prever o comportamento do fluido no processo de separação água/óleo via membrana tubular com exatidão, proporcionando um bom entendimento da termofluidodinâmica do escoamento;
- ✓ Os resultados numéricos demonstram que aumento do número de Reynolds axial conduz a uma redução da espessura da camada limite de concentração;
- ✓ O aumento do diâmetro da partícula de óleo (soluto) influencia na formação da camada de polarização por concentração tornando-a mais permeável;
- ✓ O índice de retenção do soluto pela membrana usado na modelagem matemática, analisado na faixa de 0,57 a 0,98, influencia o comportamento hidrodinâmico e de transferência de matéria, sendo capaz de prever o comportamento da permeação do óleo (soluto);
- ✓ O aumento da temperatura propicia alteração nas propriedades do fluido reduzindo a velocidade de alimentação e, conseqüentemente, altera as distribuições de concentração, pressão e velocidade, tanto na membrana tubular bidimensional como no módulo de separação casco/membrana tubular tridimensional;

- ✓ O aspecto geométrico influencia o comportamento do processo de separação água/óleo, apresentando diminuição da velocidade de permeação na abordagem tridimensional se comparado com a abordagem bidimensional, devido ao aumento da concentração;
- ✓ O aumento da variação de temperatura no interior do equipamento tanto na abordagem bidimensional como na tridimensional, ocasiona o acúmulo de uma maior concentração de partículas de soluto (óleo) nas proximidades da membrana, causando a redução da velocidade permeação.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se citar:

- ✓ Analisar o módulo de separação operando sob regime de escoamento turbulento;
- ✓ Estudar a influência dos diferentes modelos de turbulência sobre o processo de separação água/óleo em um módulo casco/membrana tubular;
- ✓ Investigar o comportamento do fluxo de permeado em regime transiente;
- ✓ Incorporar ao modelo matemático uma expressão representativa do índice de retenção do soluto pela membrana em função da temperatura.

CAPÍTULO VI

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, M. C.; BARBANO, D. M., **Effect of ceramic membrane channel diameter on limiting retentate protein concentration during skim milk microfiltration**, Journal of Dairy Science, v. 99, n.1, p.167-182, 2016.

AHMAD, A. L.; LAU, K. K.; BAKAR, M. Z. A.; SHUKOR, S. R. A., **Integrated CFD simulation of concentration polarization in narrow membrane channel**. Computers & Chemical Engineering, v. 29, n. 10, p. 2087–2095, Sep. 2005.

AHMED, S.; SERAJI, M. T.; JAHEDI, J.; HASHIB, M. A., **Application of CFD for simulation of a baffled tubular membrane**. Chemical Engineering Research and Design, v. 90, n. 5, p. 600–608, May. 2012. Institution of Chemical Engineers.

ALVES, H. G.; MAGALHÃES, H. L. F.; ARAÚJO, M. V.; SANTOS, W. R. G.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B., **Water/oil separation process via ceramic membranes: Modeling and Simulation**. International Journal of Modeling and Simulation for the Petroleum Industry (Online), v. 9, n. 2, p. 23-32, 2016.

ANSYS CFX 15, Solver Theory Guide, 2015.

BARBOSA, E. S., **Aspectos geométricos e hidrodinâmicos de um hidrociclone no processo de separação de sistemas multifásicos: aplicação à indústria do petróleo**, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, 221p, 2011.

BECKER, C. M., **Obtenção e caracterização de polieletrólitos sulfonados à base de copolímeros estirênicos para membranas poliméricas**, Dissertação (Mestrado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul), 96p, 2007.

BELLHOUSE, B.J.; COSTIGAN, G.; ABHINAVA, K.; MERRY, A., **The performance of helical screw-thread inserts in tubular membranes**, Separation and Purification Technology v.22–23, p.89–113, 2001.

CARVALHO, R. B. DE; CRISTIANO, P. B.; NOBREGA, R., **Formação de membranas planas celulósicas por espalhamento duplo para os processos de nanofiltração e osmose inversa**, Polímeros, v. 11, n. 2, p. 65-75, 2001.

CHEN, H., JIA, X.; WEI, M., WANG, Y., **Ceramic tubular nanofiltration membranes with tunable performances by atomic layer deposition and calcination**, Journal of Membrane Science, v.528, p. 95-102, 2017.

CHENG, Q.; YE, D.; CHANG, C.; ZHANG, L., **Facile fabrication of superhydrophilic membranes consisted of fibrous tunicate cellulose nanocrystals for highly efficient oil/water separation**, Journal of Membrane Science, v.525, p.1-8, 2017.

CHENG, T,W; YEH, H.M., **Complete momentum-balance analysis of permeate flux for ultrafiltration in hollow-fiber modules**, Tamkang Journal of Science and Engineering, v. 11, n. 3, p. 239-246, 2008.

CONAMA N°20/ART.21, RE. Resolução CONAMA n°20, de 18 de junho de 1986.

COKER, A. K., **Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants**. 4ª edição. Estados Unidos: Gulf Professional Publishing, , v. 2. 2010.

CUI, J.; ZHANG, X.; LIU, H.; LIU, S.; YEUNG, K. L., **Preparation and application of zeolite/ceramic microfiltration membranes for treatment of oil contaminated water**, Journal of Membrane Science, v.325, n. 1, p.420-426, 2008.

CUNHA, A. L., **Tratamento de efluentes da indústria de petróleo via membranas cerâmicas – Modelagem e simulação**, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, 201p, 2014.

CUNHA, A. L.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B.; BARBOSA, E. S.; SANTOS, J. P. L.; SILVA, G. F., **Water-oil separation process using a concentric tubular ceramic membrane module: A numerical investigation**. Brazilian Journal of Petroleum and Gas, v. 10, n. 4, p. 205-219, 2016.

DARCOVICH, K.; DAL-CIN, M.M.; BALLEVRE, S.; WAVELET, J.P., **CFD assisted thin channel membrane characterization module**. Journal of Membrane Science, v.124, n. 2, p. 181-193, 1997.

DAMAK, K.; AYADI, A.; SCHMITZ, P.; ZEGHMATI, B., **Modeling of cross-flow membrane separation processes under laminar flow conditions in tubular membrane**, Desalination, v.168, p. 231-239 , 2004a.

DAMAK, K.; AYADI, A.; ZEGHMATI, B.; SCHMITZ, P., **Concentration polarisation in tubular membranes - a numerical approach**, Desalination, v.171, n. 2, p. 139-153, 2004b.

DAMAK, K.; AYADI, A.; ZEGHMATI, B.; SCHMITZ, P., **New Navier-Stokes and Darcy's law combined model for fluid flow in cross-flow filtration tubular membranes**, Desalination, v.161, n. 1, p. 67-77, 2004c.

FARIAS, F.P.M.; SOUZA, J.S.; LIMA, W.C.P.B.; MACÊDO, A.C.; FARIAS NETO, S.R.; LIMA, A.G.B., **Influence of Geometric Parameters of the Hydrocyclone and Sand Concentration on the Water/Sand/Heavy-Oil Separation Process: Modeling and Simulation**. The International Journal of Multiphysics, v. 5, n. 3, p. 202, 2011.

FERNANDES, W. E., **Projeto e operação em escala semi-industrial de um equipamento para tratamento de águas produzidas na indústria do petróleo utilizando nova tecnologia: misturador-decantador à inversão de fases (MDIF)**, Tese (Doutorado pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Natal, 216p, 2006.

GERALDES, V.; SEMIÃO, V.; PINHO, M.N., **Numerical modeling of mass transfer in slits with semi-permeable membrane walls**. Engineering Computations, v. 17, n. 3, p. 192-217, 2000.

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

HWANG, S. T.; KAMMERMEYER, K., **Membranes in separation**, Canada, John Wiley & Sons Ltd, 1975.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A.S., **Fundamentals of heat and mass transfer**, 7th Ed., Acid-free paper, United States of America, 2007.

JIANG, Y.; HOU, J.; XU, J.; SHAN, B., **Switchable oil/water separation with efficient and robust Janus nanofiber membranes**, Carbon, v.115, p.477-485, 2017.

LEITE, A. M. D.; ITO, E. N.; ARAÚJO, E. M.; LIRA, H. DE L.; BARBOSA, R., **Obtenção de Membranas Microporosas a partir de Nanocompósitos de Poliamida 6 / Argila Nacional . Parte 1 : Influência da Presença da Argila na Morfologia das Membranas**, Polímeros, v. 19, n. 4, p. 271–277, 2009.

LIU, Y.; HE, G.; LIU, X.; XIAO, G.; LI, B., **CFD simulations of turbulent flow in baffle-filled membrane tubes**. Separation and Purification Technology, v. 67, n. 1, p. 14–20, 2009.

LIU, J.; LI, P.; CHEN, L.; FENG, Y.; HE, W.; LV, X., **Modified superhydrophilic and underwater superoleophobic PVDF membrane with ultralow oil-adhesion for highly efficient oil/water emulsion separation**, Materials Letters, v. 185, p.169-172, 2016.

LOPES, A. C., **Estudo de degradação de membranas poliméricas de nanofiltração comercial por hipoclorito de sódio**, Dissertação (Mestrado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro), p.92, 2006.

MA, W.; GUO, Z.; ZHAO, J.; YU, Q.; WANG, F.; HAN, J.; PAN, H.; YAO, J.; ZHANG, Q.; SAMAL, S. K.; SMEDT, S. C. DE.; HUANG, C., **Polyimide/cellulose acetate core/shell electrospun fibrous membranes for oil-water separation**, Separation and Purification Technology, v.177, p.71-85, 2017.

MAKABE, R.; AKAMATSU, K.; NAKAO, S., **Classification and diafiltration of polydispersed particles using cross-flow microfiltration under high flow rate**, Journal of Membrane Science, v.523, p. 8-14, 2017.

MATOS, M.; GUTIÉRREZ, G.; LOBO, A.; COCA, J.; PAZOS, C.; BENITO, J. M., **Surfactant effect on the ultrafiltration of oil-in-water emulsions using ceramic membranes**, Journal of Membrane Science, v.520, p.749-759,2016.

MACEDO, V. A. P., **Tratamento de água de produção de petróleo através de membranas e processos oxidativos avançados**. Dissertação (Mestrado pela Universidade de São Paulo), 98p, 2009.

MAIA, D. F., **Desenvolvimento de membranas cerâmicas para separação de óleo / água**, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, 111p, 2006.

MELBIAH, J. S. B.; NITHYA, D.; MOHAN, D., **Surface modification of polyacrylonitrile ultrafiltration membranes using amphiphilic Pluronic F127/CaCO₃ nanoparticles for oil/water emulsion separation**, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v.516, p.147-160, 2017.

MINNIKANTI, V. S.; DASGUPTA S.; DE S., **Prediction of mass transfer coefficient with suction for turbulent flow in cross flow ultrafiltration**, Journal of Membrane Science, v. 154, n. 2, p. 227-239, 1999.

MIERZWA, J. C.; SILVA, M. C. C. DA; RODRIGUES, L. D. B.; HESPANHOL, I., **Tratamento de água para abastecimento público por ultrafiltração: Avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas**

convencional e convencional com carvão ativado, Engenharia Sanitaria e Ambiental, v.13, n. 1, p. 78–87, 2008.

MINO, Y.; KAGAWA, Y.; ISHIGAMI, T.; MATSUYAM, H., **Numerical simulation of coalescence phenomena of oil-in-water emulsions permeating through straight membrane pore**, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v.491, p.70-77, 2016.

MOTIN, A.; TARABARA, V. V.; BÉNARD, A., **Numerical investigation of the performance and hydrodynamics of a rotating tubular membrane used for liquid–liquid separation**, Journal of Membrane Science, v.473, p. 245-255, 2015.

MULDER, M., **Basic principles of membrane technology**, 1st Ed., Kluwer Academic Publishers, Netherlands, p. 75, 1996.

OLIVEIRA, D. R., **Pré-tratamento do processo de osmose inversa utilizando microfiltração e investigação de técnicas de limpeza e recuperação de membranas**, Dissertação (Mestrado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro), 129p, 2007.

OTITOJU, T.A.; AHMAD, A.L.; OOI, B.S., **Polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane for oil rejection from oily wastewater: A performance review**, Journal of Water Process Engineering, v.14, p. 41-59, 2016.

PARK, J. Y.; JIN CHOI, S.; REUM PARK, B., **Effect of N₂-back-flushing in multichannels ceramic microfiltration system for paper wastewater treatment**. Desalination, v. 202, n. 1-3, p. 207–214, 2007.

PAK, A.; MOHAMMAD, T.; HOSSEINALIPOUR, S.M.; ALLAHDINIB, V., **CFD modeling of porous membranes**, Desalination, v.222, n. 1-3, p. 482-488, 2008.

PARIS, J.; GUICHARDON, P.; CHARBIT, F., **Transport phenomena in ultrafiltration: a new two-dimensional model compared with classical models**, Journal of Membrane Science, v.207, n. 1, p. 43–58, 2002.

PERLES, C. E., **Propriedades Físico-Químicas Relacionadas ao Desenvolvimento de Membranas de Nafion[®] para Aplicações em Células a Combustível do tipo PEMFC**, Polímeros, v. 18, n. 4, p. 281–288, 2008.

RAMIRES, M. L. V.; de CASTRO, C. A. N.; NAGASHIMA, A.; ASSAEL, M. J.; WAKEHAM, W. A., **Standard reference data for the thermal conductivity of water**. Journal of Physics and Thermophysics, v. 33, n. 3, p. 925-929, 1977.

ROSA, D. S.; SALVINI, V. R.; PANDOLFELLI, V. C., **Processamento e avaliação das propriedades de tubos cerâmicos porosos para microfiltração de emulsões**. Cerâmica, v. 52, n. 322, p. 167–171, 2006.

SAADATI, J.; PAKIZEH, M., **Separation of oil/water emulsion using a new PSf/pebax/F-MWCNT nanocomposite membrane**, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, v.71, p. 265-276, 2017.

SANTANA, C. R., **Tratamento de água produzida através do processo de flotação utilizando a moringa *oleifera lam* como coagulante natural**, Dissertação (Mestrado pela Universidade Federal de Sergipe), 153p, 2009.

SANTOS, A. C.; SILVA, S. R.; TONHOLO, J.; ZANTA, C. L. P. S., **Tratamento de água produzida de petróleo através da tecnologia eletroquímica**. In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, UFRJ, 2005.

SERRA, C.A.; WIESNER, M.R.; LAÎNÉ, J.M., **Rotating membrane disk filters: design evaluation using computational fluid dynamics**, Chemical Engineering Journal, v. 72, n. 1, p. 1–17, 1999.

SERRA, C.A.; WIESNER, M.R., **A comparison of rotating and stationary membrane disk filters using computational fluid dynamics**, Journal of Membrane Science, v. 165, n. 1, p.19–29, 2000.

SILVA, A. A.; MELO, K. S.; MAIA, J. B. N., **Estudo do potencial de separação água/óleo de membranas cerâmicas tubulares de alumina através da análise das medidas de fluxo**

e turbidez. In: 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Rio de Janeiro: UFRJ, 2003.

SILVA, C. R. R., **Água produzida na extração de petróleo.** Monografia, Escola Politécnica (Departamento de Hidráulica e Saneamento), 27p, 2000.

SILVA, F. A.; LIRA, H. L., **Preparação e caracterização de membranas cerâmicas de cordierita,** Cerâmica, v. 52, n. 324, p. 276–282, 2006.

SILVA, M. M. M., **Ensaio de coagulação floculação da água residual afluyente à Etar de Avis.** Dissertação (Mestrado em Universidade Nova de Lisboa), Lisboa, Portugal, 120p, 2010.

SILVA, J. M., **Separação água / óleo usando um separador ciclônico: modelagem e simulação.** Monografia (Universidade Federal de Campina Grande), Campina Grande, PB, p.74, 2013

SIMÕES, A. M. B. M., **Simulação numérica da fluidodinâmica de um hidrociclone aplicado na separação óleo / água,** Dissertação (Mestrado em Universidade Federal de Campina Grande), UFCG, Campina Grande, 110p, 2005.

SOUZA, J. S. DE., **Estudo teórico do processo de microfiltração em membranas cerâmicas,** 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, p.134, 2014.

SOUZA, J. S. DE.; CUNHA, A. L.; FARIAS NETO, S. R. DE.; FARIAS, F. P. M.; LIMA, A. G. B. DE., **Separação não isotérmica água / óleo pesado e ultra- viscoso via hidrociclone – modelagem e simulação.** In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande-PB, 2010.

SOUZA, J. S.; PAIVA, M. K. N.; FARIAS, F. P. M.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B. DE., **Hydrocyclone Applications in Produced Water: a Steady-State Numerical Analysis.** Brazilian Journal of Petroleum and Gas, v. 6, n. 3, p. 133–143, 2012.

SVAROVSKY, L., **Solid-Liquid Separation.** 2. ed , Elsevier Ltd, Londres, 2000.

SURESH, K.; PUGAZHENTHI, G.; UPPALURI, R., **Fly ash based ceramic microfiltration membranes for oil-water emulsion treatment: Parametric optimization using response surfacemethodology**, Journal of Water Process Engineering, v.13, p. 27-43, 2016a.

SURESH, K.; PUGAZHENTHI, G., **Cross flow microfiltration of oil-water emulsions using clay based ceramic membrane support and TiO₂ composite membrane**, Egyptian Journal of Petroleum, v.14, n.1, p. 1-10, 2016b.

TAKETA, T. B.; FERREIRA, M. Z.; GOMES, M. C. S.; CURVELO, N., **Produção de biodiesel por transesterificação etílica de óleos vegetais e sua separação e purificação por membranas cerâmicas**. In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2009.

TASHVIGH, A. A.; FOULADITAJAR, A.; ASHTIANI, F. Z., **Modeling concentration polarization in crossflow microfiltration of oil-in-water emulsion using shear-induced diffusion: CFD and experimental studies**, Desalination, v.357, p.225-232, 2015.

TIMOTEO, J. F. J., **Anodização para obtenção de membranas cerâmicas**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, Brasil, 69p, 2007.

TUMMONS, E. N.; TARABARA, V. V.; CHEW, J. W.; FANE, A. G., **Behavior of oil droplets at the membrane surface during crossflow microfiltration of oil-water emulsions**, Journal of Membrane Science, v.500, p. 211-224, 2016.

WANG X.; WANG C.; TANG C. Y.; HU, T.; LI, X.; REN, Y., **Development of a novel anaerobic membrane bioreactor simultaneously integrating microfiltration and forward osmosis membranes for lowstrength wastewater treatment**, Journal of Membrane Science, v.527, p.1-7, 2017.

WHITE, F. M., **Mecânica dos Fluidos**, 6 ed., AMGH Editora Ltda, Nova York, p.280, 2011.

WWW.QUIMICA.COM.BR, **Artigo técnico: Tecnologias para reuso de efluentes e dessalinização de água do mar**. Disponível em: <http://www.quimica.com.br/artigo-tecnico->

[tecnologias-para-reuso-de-efluentes-e-dessalinizacao-de-agua-do-mar-3/3/](#). Acesso em: 01/02/2017.

YANG, X.; ZHOU, S.; LI, M.; WANG, R.; ZHAO, Y., **Purification of cellulase fermentation broth via low cost ceramic microfiltration membranes with nanofibers-like attapulgite separation layers**, Separation and Purification Technology, v.175, p. 435–442, 2017.

ZHANG, X.; TIAN, J.; GAO, S.; ZHANG, Z.; CUI, F.; TANG, C. Y., **In situ surface modification of thin film composite forward osmosis membranes with sulfonated poly(arylene ether sulfone) for anti-fouling in emulsified oil/water separation**, Journal of Membrane Science, v.527, p.26-34, 2017.

ZHU, L.; CHEN, M.; DONG, Y.; TANG, C. Y.; HUANG, A.; LI, L., **A low-cost mullite-titania composite ceramic hollow fiber microfiltration membrane for highly efficient separation of oil-inwater emulsion**, Water Research, v.90, p. 277-285, 2016.

ZHU, X.; DUDCHENKO, A.; GU, X.; JASSBY, D., **Surfactant-stabilized oil separation from water using ultrafiltration and nanofiltration**, Journal of Membrane Science, v.529, p.159-169, 2017.