



ESTUDO DE NOVO PERMEADOR PARA BIORREATORES COM MEMBRANAS
(BRM) VISANDO AO CONTROLE DE INCRUSTAÇÕES

Robson Rodrigues Mororó

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadores: Cristiano Piacsek Borges

Frederico de Araujo Kronemberger

Rio de Janeiro

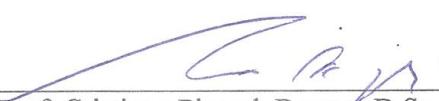
Abril de 2013

ESTUDO DE NOVO PERMEADOR PARA BIORREATORES COM MEMBRANAS
(BRM) VISANDO AO CONTROLE DE INCRUSTAÇÕES

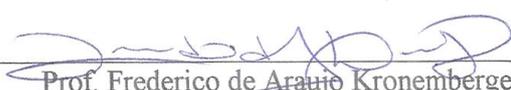
Robson Rodrigues Mororó

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA QUÍMICA.

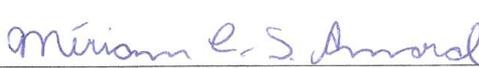
Examinada por:



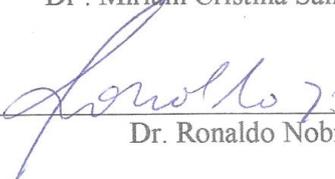
Prof. Cristiano Piacsek Borges, D.Sc.



Prof. Frederico de Araujo Kronemberger, D.Sc.



Dr.^a Miriam Cristina Santos Amaral, D.Sc.



Dr. Ronaldo Nobrega, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2013

Mororó, Robson Rodrigues

Estudo de novo permeador para biorreatores com membranas (BRM) visando ao controle de incrustações/
Robson Rodrigues Mororó. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XVII, 147 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Cristiano Piacsek Borges

Frederico de Araujo Kronemberger

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Química, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 137-147.

1. Biorreatores com membranas. 2. Incrustações. 3. Hidrodinâmica. I. Borges, Cristiano Piacsek *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Química. III. Título.

À todos que contribuíram para a realização deste trabalho.
À minha família pelo carinho, dedicação e suporte, permitindo-me chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus professores orientadores Cristiano P. Borges e Frederico de A. Kronemberger, que me repassaram conhecimento acadêmico com atenção e dedicação, me proporcionando a realização deste maravilhoso trabalho. Agradecimentos também são direcionados à PAM-Membranas Seletivas Ltda., pelo fornecimento dos permeadores para realização deste trabalho. Em seguida, agradeço aos meus pais, irmã e parentes, que se fizeram presente em toda essa etapa da minha vida, seja com palavras de apoio, carinho ou com aporte financeiro, quando necessário. Não posso deixar de agradecer também, aos meus companheiros da turma de mestrado do PEQ 2011, que me ofereceram apoio psicológico, em alguns momentos, e que me ajudaram nos estudos para provas das disciplinas, além dos momentos de descontração que passamos juntos. Incluo, nesses agradecimentos, meus amigos do laboratório de Membranas – PAM, pela acolhida e disponibilidade. Gostaria de citar alguns, em especial a Cris, Kátia, Bob, Mariana, Rafael, Jane, Gisele, Nicolas, Felipe e o Mateus. Para finalizar, agradeço a todos, que de alguma forma participaram direta ou indiretamente dessa empreitada.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DE NOVO PERMEADOR PARA BIORREATORES COM MEMBRANAS
(BRM) VISANDO AO CONTROLE DE INCRUSTAÇÕES

Robson Rodrigues Mororó

Abril/2013

Orientadores: Cristiano Piacsek Borges

Frederico de Araujo Kronemberger

Programa: Engenharia Química

O presente trabalho tem como objetivo o estudo de um novo permeador, com membranas em forma de fibras-ocas e injetor de ar acoplado em sua base, de forma distribuída, visando à busca de condições favoráveis à hidrodinâmica, que é parâmetro chave no controle de incrustações. Para tal, foi realizada a análise da resistência ao transporte por incrustações, variando a quantidade de furos no injetor de ar e a densidade de empacotamento de fibras, mantendo fixas as dimensões do novo permeador em 44 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento útil de fibras, em diversas condições de testes de permeação com suspensões de fermento biológico variando parâmetros como concentração, velocidade superficial de ar e pressão de filtração. As menores resistências por incrustações foram encontradas na variante do novo permeador com 64 furos no injetor de ar e densidade de empacotamento igual a $650 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Quantidade de furos no injetor de ar, neste caso, equivale a 20,1% do número de fibras utilizadas), para o qual se observou que as bolhas de ar formadas apresentavam melhor distribuição nas regiões próximas às fibras-ocas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY OF NEW PERMEATOR FOR MEMBRANE BIOREACTORS (MBR)
AIMING AT FOULING CONTROL

Robson Rodrigues Mororó

April/2013

Advisors: Cristiano Piacsek Borges
Frederico de Araujo Kronemberger

Department: Chemical Engineering

The present work aims at studying new permeator for membrane bioreactors (MBR), with hollow fiber membranes and air injector attached to their base, in a distributed manner, in order to search for favorable conditions for hydrodynamics, which is key parameter to control fouling. For this purpose, transport resistances to yeasts suspensions permeation were assessed using permeators with different number of holes in the air injector and packing density, keeping the dimensions of the new permeator 44 mm in diameter and 200 mm length of fibers, under several permeation conditions, with distinct yeast concentration, superficial air velocity and filtration pressure. The lowest resistances were found for the variant of new permeator with 64 holes in the air injector and packing density of $650 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Number of holes in air injector, in this case, amounts to 20.1% of the number of fibers), in which it was observed that the air bubbles presented a distribution near the hollow fibers.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiv
I INTRODUÇÃO.....	1
II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
II.1 Legislação brasileira de águas.....	6
II.2 Reuso de águas.....	8
II.3 Caracterização de poluentes.....	10
II.4 Tratamento de efluentes.....	12
II.5 Tratamento secundário.....	14
II.6 Tratamento terciário.....	14
II.7 Processos de lodos ativados convencional (LAC).....	16
II.8 Biorreatores com membranas (BRM).....	19
II.8.1 Perspectiva histórica.....	19
II.8.2 Mercado.....	20
II.8.3 Dificuldades e custos operacionais.....	21
II.8.4 Tipos de BRM.....	23
II.8.5 Configuração das membranas utilizadas nos sBRM.....	24
II.9 Comparação entre LAC e BRM.....	26
II.10 Teoria dos processos de separação por membranas (PSM).....	29
II.10.1 Operação nos PSM.....	30
II.11 Incrustações (fouling) nas membranas dos BRM.....	34
II.12 Fatores que afetam a intensidade de incrustações.....	36
II.12.1 Influência dos parâmetros relacionados às membranas.....	36
II.12.2 Influência dos parâmetros relacionados à microbiologia do processo.....	39
II.12.3 Influência dos parâmetros relacionados as condições operacionais.....	42
II.12.4 Influência dos parâmetros relacionados à hidrodinâmica.....	45
III MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
III.1 Sistema de permeação.....	53
III.2 Permeador de membranas em forma de alça.....	56
III.2.1 Membranas de microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF).....	56
III.2.2 Construção dos permeadores de membranas em forma de alça.....	57

III.2.3 Sistema de aeração utilizado nos testes com permeadores de membranas em forma de alça Sistema de aeração.....	58
III.2.4 Caracterização das membranas.....	59
III.2.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	59
III.2.4.2 Pré-limpeza química, compactação e permeabilidade hidráulica à água pura.....	60
III.2.5 Testes de permeação com suspensões de fermento biológico.....	61
III.2.6 Determinação das condições críticas.....	62
III.2.7 Determinação das resistências ao transporte.....	62
III.2.8 Efeito da recuperação por retrolavagem.....	64
III.2.9 Recuperação por limpeza química.....	64
III.3 O Novo Permeador.....	65
III.3.1 Pré-limpeza química, compactação e permeabilidade hidráulica à água pura.....	67
III.3.2 Testes de permeação com suspensões de fermento biológico.....	67
III.3.3 Determinação das resistências ao transporte.....	69
III.3.4 Recuperação por retrolavagem.....	69
III.3.5 Comparação entre as variantes do novo permeador quanto ao controle de incrustações.....	69
III.3.6 Comparação entre o novo permeador e o permeador de membranas em forma de alça quanto ao controle de incrustações.....	70
III.3.7 Análise qualitativa de bolhas ascendentes no novo permeador a partir de fotografias.....	70
III.3.8 Avaliação do consumo de energia.....	70
IV RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	76
IV.1 Permeadores de membranas em forma de alça.....	71
IV.1.1 Caracterização das membranas.....	71
IV.1.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	72
IV.1.1.2 Compactação das membranas e permeabilidade hidráulica à água pura (L_p).....	74
IV.1.2 Testes de permeação com suspensões de fermento biológico.....	76
IV.1.3 Determinação das condições críticas.....	79
IV.1.4 Determinação das resistências ao transporte.....	82
IV.1.4.1 Resistências das membranas (R_m).....	82

IV.1.4.2 Resistência por adsorção (R_a).....	83
IV.1.4.3 Resistência por bloqueio de poros (R_{bp}).....	84
IV.1.4.4 Resistência da torta formada (R_t).....	86
IV.1.5 Efeito da recuperação por retrolavagem.....	89
IV.1.6 Recuperação por limpeza química.....	92
IV.2 O Novo permeador.....	94
IV.2.1 Pré-limpeza química, compactação e permeabilidade hidráulica à água pura.....	94
IV.2.2 Testes de permeação de suspensões de fermento biológico.....	95
IV.2.2.1 A variante 32650 do novo permeador.....	96
IV.2.2.2 As variantes 16650, 32800, 321000 e 64650 do novo permeador....	103
IV.2.3 Determinação das resistências ao transporte.....	108
IV.2.4 Recuperação por retrolavagem.....	120
IV.2.5 Comparação entre as variantes do novo permeador.....	121
IV.2.6 Comparação entre o novo permeador e o permeador de membranas em forma de alça quanto ao controle de incrustações.....	123
IV.2.7 Análise qualitativa de bolhas ascendentes a partir de fotografias.....	124
IV.2.8 Análise de gasto energético de aeração.....	128
V CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	133
IV.1 Conclusões.....	133
IV.1.1 Permeador de membranas em forma de alça.....	133
IV.1.2 Novos permeadores.....	134
IV.2 Sugestões para futuros trabalhos.....	135
VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1. Vista superior de um LAC inserido na ETE de Suzano-SP.....	16
Figura II.2. Fluxograma do processo de lodos ativados convencional.....	17
Figura II.3. Injetores de ar em LAC.....	19
Figura II.4. Sistema de complexas interações entre os parâmetros de controle e operação dos BRM.....	22
Figura II.5. Modalidades de BRM.....	23
Figura II.6. Tipos de membranas para BRM. (a) planas e (b) fibras-ocas.....	24
Figura II.7. Detalhe de uma fibra-oca.....	25
Figura II.8. Etapas dos processos envolvendo BRM e LAC.....	26
Figura II.9. Unidade BRM da Kubota no Reino Unido.....	28
Figura II.10. Representação transversal das diversas morfologias de membranas.....	30
Figura II.11. Perfis de J_p versus ΔP	32
Figura II.12. Fenômeno de polarização por concentração.....	32
Figura II.13. Mecanismos de incrustações. (a) Bloqueio de poros, (b) adsorção e (c) formação de torta.....	36
Figura II.14. Parâmetros que influenciam na formação de incrustações.....	36
Figura II.15. EPS e SMP e sua relações com as células no lodo.....	41
Figura III.1. Fluxogramas do sistema de permeação em (a) operação de permeação e (b) operação de retrolavagem.....	54
Figura III.2. Sistema de permeação.....	56
Figura III.3. Permeador de membranas em forma de alça.....	58
Figura III.4. Mangueira aerador usada nos testes de permeação.....	58
Figura III.5. Microscópio eletrônico de varredura do PAM/COPPE/UFRJ.....	60
Figura III.6. Compactação da membrana através de pressão aplicada.....	60
Figura III.7. Perfil de L_p no tempo de permeação.....	64
Figura III.8. Ilustração de uma variante do novo permeador testada (32650).....	66
Figura III.9. Desenho do injetor de ar da base do novo permeador.....	66
Figura IV.1. Fotomicrografias da seção transversal das membranas de MF (a) e UF (b).....	72
Figura IV.2. Fotomicrografias da membrana de MF de PEI. (a) ampliação da parede porosa na seção transversal (aumento de 870 vezes) e (b) poros da superfície externa da membrana (aumento de 11.362 vezes).....	72

Figura IV.3. Fotomicrografias da membrana de UF de PES. (a) Ampliação da parede da seção transversal da membrana (aumento de 1.240 vezes) e (b) detalhes da camada seletiva (superfície mais externa) da fibra-oca (aumento de 5.240 vezes).....	73
Figura IV.4. Queda de $J_p / J_{p\text{inicial}}$, com a compactação das fibras de MF e UF.....	74
Figura IV.5. Comparação entre as L_p das fibras de MF e UF.....	75
Figura IV.6. Queda de fluxo de permeado com o tempo em testes de permeação com fermento biológico na concentração de 8.000 mg.L ⁻¹ , pressão de filtração de 0,4 bar e vazão de ar de 7.590 mL.min ⁻¹	76
Figura IV.7. Queda de fluxo de permeado com o tempo em testes de permeação com fermento biológico utilizando o permeador de membranas de MF em alça, pressão de filtração de 0,4 bar e vazão de ar de 7.590 mL.min ⁻¹	77
Figura IV.8. Queda de fluxo de permeado com o tempo em testes de permeação com fermento biológico na concentração de 8.000 mg.L ⁻¹ , utilizando o permeador de membranas de MF em alça, pressão de filtração de 0,4 bar.....	78
Figura IV.9. Determinação de condições críticas em teste de permeação com fermento biológico na concentração de 4.000 mg.L ⁻¹ e vazão de ar de 7.590 mL.min ⁻¹ , utilizando membranas de UF.....	79
Figura IV.10. Determinação de condições críticas em teste de permeação, com suspensão de fermento biológico na concentração de 4.000 mg.L ⁻¹ e vazão de ar de 7.590 mL.min ⁻¹ , para as fibras-ocas de MF.....	80
Figura IV.11. Determinação de condições críticas em teste de permeação, com suspensão de fermento biológico na concentração de 8.000 mg.L ⁻¹ e vazão de ar de 7.590 mL.min ⁻¹ , para as fibras-ocas de MF.....	81
Figura IV.12. Determinação de condições críticas em teste de permeação, com suspensão de fermento biológico na concentração de 8.000 mg.L ⁻¹ e vazão de ar de 4.017 mL.min ⁻¹ , para as fibras-ocas de MF.....	81
Figura IV.13. Permeabilidade hidráulica das membranas de MF do permeador alça, antes e após contato com suspensões de 4.000 mg.L ⁻¹ e 8.000 mg.L ⁻¹	83
Figura IV.14. Permeabilidade hidráulica das membranas de MF do permeador em alça, antes e após contato com suspensão de 8.000 mg.L ⁻¹	84
Figura IV.15. Determinação das permeabilidades hidráulicas após os testes de permeação com fermento biológico nas concentrações de 4.000 e 8.000 mg.L ⁻¹ , vazões de ar de 4.017 e 7.590 mL.min ⁻¹ e pressão de filtração de 0,4 bar.....	85

Figura IV.16. Perfis de J_p ao longo do tempo para testes com fermento, com e sem retrolavagem, na concentração de 8.000 mg.L ⁻¹ e vazão de ar de 7.590 mL.min ⁻¹	89
Figura IV.17. Perfis de J_p ao longo do tempo para testes com fermento, com e sem retrolavagem, na concentração de 8.000 mg.L ⁻¹ e sem uso de ar.....	90
Figura IV.18. Perfis de J_p ao longo do tempo para testes com fermento, com e sem retrolavagem, na concentração de 8.000 mg.L ⁻¹ e vazão de ar de 7.590 mL.min ⁻¹	90
Figura IV.19. Comparação entre os ciclos de retrolavagem e a influência do uso de ar.....	91
Figura IV.20. Recuperação da L_p da membrana de MF por limpeza química.....	93
Figura IV.21. Queda de permeabilidade com o tempo, nos testes com concentração de 4.000 mg.L ⁻¹ , vazão de ar de 7.590 mL.min ⁻¹ ($U_g = 5,04 \text{ m.s}^{-1}$) e pressões de filtração de 0,3, 0,5 e 0,7 bar.....	97
Figura IV.22. Queda de permeabilidade com o tempo, nos testes com concentração de 8.000 mg.L ⁻¹ , vazão de ar de 7.590 mL.min ⁻¹ ($U_g = 5,04 \text{ m.s}^{-1}$) e pressões de filtração de 0,3, 0,5 e 0,7 bar.....	97
Figura IV.23. Queda de permeabilidade com o tempo, nos testes com concentração de 12.000 mg.L ⁻¹ , vazão de ar de 7.590 mL.min ⁻¹ ($U_g = 5,04 \text{ m.s}^{-1}$) e pressões de filtração de 0,3, 0,5 e 0,7 bar.....	98
Figura IV.24. Queda de permeabilidade com o tempo, nos testes de permeação com concentração de 4.000 mg.L ⁻¹ , pressão de filtração de 0,3 bar e nas vazões de ar citadas.....	99
Figura IV.25. Queda de permeabilidade com o tempo, nos testes de permeação com concentração de 8.000 mg.L ⁻¹ , pressão de filtração de 0,3 bar e nas vazões de ar citadas.....	99
Figura IV.26. Queda de permeabilidade com o tempo, nos testes de permeação com concentração de 12.000 mg.L ⁻¹ , pressão de filtração de 0,3 bar e nas vazões de ar citadas.....	100
Figura IV.27. Perfis de permeabilidade de (a) 16650, (b) 32800, (c) 321000 e (d) 64650 nos testes a pressão de 0,3 bar, concentrações de 8.000 mg.L ⁻¹ e vazões de ar citadas.....	105
Figura IV.28. Perfis de permeabilidade de (a) 16650, (b) 32800, (c) 321000 e (d) 64650 nos testes a pressão de 0,7 bar, concentrações de 8.000 mg.L ⁻¹ e vazões de ar citadas.....	106

Figura IV.29. Evolução de R_i e L_{pfinal} das membranas da variante 32650 com a variação de U_g , nos testes com fermento, na concentração de 8.000 mg.L ⁻¹ , a pressão de filtração de 0,3 bar.....	117
Figura IV.30. Evolução de R_i e L_{pfinal} com a variação de U_g nos testes a variante 16650, na pressão de filtração de (a) 0,3 e (b) 0,7 bar e na concentração de fermento de 8.000 mg.L ⁻¹	118
Figura IV.31. Evolução de R_i e L_{pfinal} com a variação de U_g , nos testes de permeação com fermento, na concentração de 8.000 mg.L ⁻¹ , nas variantes do novo permeador (a e b) 32800, (c e d) 321000, (e e f) 64650, nas pressões de 0,3 e 0,7 bar, em cada, respectivamente.....	119
Figura IV.32. Comparação de $L_{pmédio}$ das membranas do 32650 nos testes de permeação com as seguintes condições: (a) concentração de fermento de 4.000 mg.L ⁻¹ , pressão de 0,3 bar, sem e com utilização de ciclos de retrolavagem de 3/6 e 15/15, e (b) concentração de fermento de 12.000 mg.L ⁻¹ , pressão de 0,7 bar, sem e com utilização de ciclos de retrolavagem de 3/6 e 15/15.....	120
Figura IV.33. Comparação entre R_i obtidos ao final dos testes de permeação com fermento biológico nas variantes 16650, 32650 e 64650 do novo permeador, na pressão de filtração de (a) 0,3 e (b) 0,7 bar e concentração de fermento de 8.000 mg.L ⁻¹	121
Figura IV.34. Comparação entre os R_i obtidos ao final dos testes de permeação com fermento nas variantes 32650, 32800 e 321000 do novo permeador, na pressão de filtração de (a) 0,3 e (b) 0,7 bar, concentração de fermento de 8.000 mg.L ⁻¹	122
Figura IV.35. Comparação de R_i encontrados nos testes de permeação com fermento na concentração de 4.000 mg.L ⁻¹ e pressão de filtração de 0,3 bar, para o permeador de membranas em forma de alça e a variante 64650 do novo permeador.....	124
Figura IV.36. Bolhas de ar formadas nos injetores de ar acoplados as bases das variantes (a e b) 32650 e (c e d) 16650 do permeador, na velocidade superficial de ar de 1,31 m.s ⁻¹	125
Figura IV.37. Bolhas de ar formadas nos injetores de ar acoplados as bases das variantes (a e b) 32800, (c e d) 321000 e (e) 64650 do novo permeador, na velocidade superficial de ar de 1,31 m.s ⁻¹	125
Figura IV.38. Bolhas de ar formadas nos injetores de ar acoplados as bases das variantes (a e b) 32650, (c e d) 16650, (e e f) 32800, (g) 321000 e (h) 64650 do novo permeador, na velocidade superficial de ar de 2,67 m.s ⁻¹	126

Figura IV.39. Bolhas de ar formadas nos injetores de ar acoplados as bases das variantes (a e b) 32650 e (c e d) 16650 do novo permeador, na velocidade superficial de ar de $5,04 \text{ m.s}^{-1}$	127
Figura IV.40. Bolhas de ar formadas no injetores de ar acoplado a bases da variantes 32800 do novo permeador, na velocidade superficial de ar de $5,04 \text{ m.s}^{-1}$	127
Figura IV.41. Bolhas de ar formadas nos injetores de ar acoplados nas bases das variantes (a, b, c, d, e, f) 321000 e (g) 64650 do novo permeador, na velocidade superficial de ar de $5,04 \text{ m.s}^{-1}$	128
Figura IV.42. R_i em função da energia consumida nos testes a pressão de permeação na pressão de 0,3 bar.....	129
Figura IV.43. Variação de R_i pela variação de E em cada U_g nos testes de permeação a pressão de filtração de 0,3 bar.....	130
Figura IV.44. Evolução da energia consumida em função de U_g nos testes de permeação com suspensão de fermento biológico.....	131
Figura IV.45. R_i em função da energia consumida nos testes de permeação com fermento biológico na pressão de filtração de 0,7 bar.....	131

LISTA DE TABELAS

Figura III.1: Fluxogramas do sistema de permeação em (a) operação de permeação e (b) operação de retrolavagem.....	54
Tabela III.2: Especificação das fibras-ocas de MF e UF para construção dos permeadores com membranas em alça.....	57
Tabela III.3: Especificações técnicas das variantes do novo permeador estudadas.....	66
Tabela III.4: Condições dos testes de permeação com fermento biológico utilizando as variantes do novo permeador.....	68
Tabela IV.1: Resistência das membranas testadas.....	82
Tabela IV.2: Resistências por bloqueio de poros.....	85
Tabela IV.3: Resumo das resistências ao transporte por mecanismos de incrustações e das membranas, com determinação das resistências das tortas formadas nos testes citados.....	87
Tabela IV.4: Resultados detalhados dos testes de permeação com fermento biológico com uso de retrolavagem.....	92
Tabela IV.5: Caracterização por rejeição das membranas MF das variantes do novo permeador.....	95
Tabela IV.6: Comparação entre as permeabilidades hidráulicas à água pura antes e após pré-limpeza química.....	95
Tabela IV.7: Condições de testes de permeação com fermento biológico fresco.....	96
Tabela IV.8: L_{pfinal} obtidas nos testes de permeação de fermento biológico na variante 32650 do novo permeador.....	102
Tabela IV.9: Condições de testes de permeação com suspensões de fermento biológico utilizando as variantes 16650, 32800, 321000 e 64650 do novo permeador.....	104
Tabela IV.10: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 32650, na concentração de 4.000 mg.L ⁻¹	109
Tabela IV.11: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 32650, na concentração de 8.000 mg.L ⁻¹	110
Tabela IV.12: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 32650, na concentração de 12.000 mg.L ⁻¹	111
Tabela IV.13: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 16650, na pressão de filtração de 0,3 bar.....	112

Tabela IV.14: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 16650, na pressão de filtração de 0,7 bar.....	113
Tabela IV.15: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 32800.....	114
Tabela IV.16: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 321000.....	115
Tabela IV.17: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 64650.....	116

I INTRODUÇÃO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

O planeta terra possui abundante quantidade de água, porém 97,5% desse montante encontra-se em mares e dentre os 2,5% restantes, denominada de água doce, menos de 1% é disponível ao consumo pelo ser humano (UNEP, 2013). Tendo em vista que água doce é essencial às atividades humanas, o aumento de consumo atrelado ao aumento populacional contínuo, que leva ao crescimento das cidades e de seus parques industriais, além da necessidade de crescimento econômico dos países, pode levar ao quadro irreversível de escassez. Por sua vez, a dessalinização dos 97,5 % de água salgada disponível em mares e oceanos ainda é inviável em muitos países, pelo alto custo energético demandado. Essa preocupação entrou em pauta nos principais encontros de órgãos ambientais e chefes de estado no mundo, como na Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, Eco-92, e recentemente na Rio +20. Um dos tópicos discutidos foi o conceito de reuso, já existente há décadas para os resíduos sólidos, chamado de reciclagem, e agora inserido para águas. O reuso de água ganhou relevância e passou a ser tratado como uma das ações fundamentais para a economia de água. O sucesso dessa ação consiste na integração de atividades, de modo que a água de rejeito de processos industriais ou domésticos seja utilizada diretamente em um novo processo, em geral com requerimentos mais brandos em termos da qualidade da água, de descarga em vasos sanitários em casas, estabelecimentos comerciais e praças esportivas, permitindo uma grande economia.

O efluente tratado em uma estação de tratamento de efluentes (ETE) pode ser utilizado para fins de água de reuso. Para tal, o efluente a ser tratado passa por 4 etapas principais na ETE: a preliminar, que consiste processos físicos para remoção de sólidos grosseiros, a primária, que através de processos físico-químicos, como coagulação, floculação e decantação primária, tem como função a retirada de sólidos suspensos menores, a etapa secundária, na qual a carga orgânica e nutrientes do efluente é degradada por microrganismos aeróbicos, anaeróbicos ou facultativos, e por último a etapa terciária, para polimento final. Atualmente, o processo mais empregado na etapa secundária é o de lodos ativados convencionais (LAC). Neste processo, o efluente tratado no tanque aerado com lodo é continuamente descarregado em um decantador secundário, para remoção do lodo. Para esgotos domésticos, este processo possui boa eficiência, até 95 % de remoção de carga poluente, porém necessita de grandes volumes de decantador, tem alta produção de lodo, baixa remoção de micropoluentes, dentre

I INTRODUÇÃO

outras limitações. Em contra partida, desde o final da década de 90, com relevante desenvolvimento ao final dos anos 2000, é estudada a associação do processo de degradação biológica com o processo de separação por membranas, denominado de Biorreatores com Membranas (BRM). Esta tecnologia representa uma inovação importante no tratamento de efluentes. Em comparação com os LAC, os BRM produzem efluente de melhor qualidade, com até 99% de remoção de carga poluente, uma vez que toda a biomassa é retida pelas membranas (JUDD, 2006). Também é possível a operação com maior concentração de lodo, já que a etapa de decantação é substituída pelas membranas. Em relação aos equipamentos, os BRM são significativamente mais compactos, se tornando um aspecto fundamental, principalmente levando-se em conta que nas grandes cidades, o espaço físico para instalação de unidades de tratamento de efluente sanitário, ou mesmo industrial, é limitado. O tratamento de efluente sanitário é responsável pela maior fatia de aplicação dos BRM no mercado mundial, com 44%, com prevalência nos Estados Unidos e Europa (KRAUME e DREWS, 2010).

A maior vantagem dos BRM é evidentemente a obtenção de um efluente com maior qualidade final, para reutilização em outras cadeias de produção, gerando economia significativamente grande de água.

Como qualquer tecnologia, os BRM esbarram em limitações que impedem seu maior crescimento. A principal limitação dessa tecnologia é ainda seu alto custo. Embora o custo das membranas tenha caído drasticamente nos últimos anos, levando a uma diminuição dos custos de capital, a demanda de energia para controlar os efeitos de incrustações nas membranas se tornou a principal contribuição para os altos custos operacionais. As incrustações afetam estes custos das seguintes maneiras:

- Queda da produtividade da planta/redução de produção de permeado devido a:
(i) parada para retrolavagem, para a remoção de camada de material depositado nas membranas, (ii) limpezas excessivas;

- Redução da vida útil das membranas, devido à formação de incrustações irreversíveis e a demanda por limpezas excessivas, resultando em maior custo de reposição;

- Alta demanda de energia para aeração: até 90% do custo energético total (BRAAK, 2011).

Existem diversos trabalhos na literatura que apontam que a hidrodinâmica nos BRM é o parâmetro chave para o controle de incrustações. Ainda não existem modelos

I INTRODUÇÃO

que relacionem com precisão a hidrodinâmica de escoamentos multifásicos em biorreatores e a formação de incrustações. Dentre os fatores que afetam a hidrodinâmica dos BRM e, conseqüentemente, o controle de incrustações, os mais estudados são o uso de ar para produzir forças de cisalhamento na camada depositada na superfície das membranas e o projeto de novos permeadores, que envolve o tipo e a posição do injetor de ar, e a geometria e densidade de empacotamento das membranas, que é área de membrana disponível para permeação por volume do permeador. Para o caso dos BRM, as membranas na forma de fibras-ocas são as mais utilizadas. Com relação à aeração, são estudadas a influência da vazão de ar ou velocidade de ascensão de ar, a distribuição e o tamanho das bolhas formadas no injetor de ar. Já com relação ao projeto de permeadores, os trabalhos na literatura ainda são escassos, com a maior parte concentrada em estudos de permeadores com injetores de ar acoplados às suas bases de forma centralizada, o que pode dar origem a regiões estagnadas próximas às membranas, provocando acúmulo intenso de material suspenso.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é estudar um novo permeador de fibras-ocas desenvolvido com injetor de ar acoplado em sua base, de forma distribuída, visando ao melhor controle de incrustações.

Entre os objetivos específicos destacam-se:

- Caracterização das fibras-ocas dos permeadores de membranas em forma de alça, utilizados para os testes iniciais, quanto à morfologia e à permeabilidade hidráulica;
- Determinação das condições críticas de operação para os permeadores de membranas em forma de alça em testes de permeação com suspensões de fermento biológico fresco;
- Avaliação da eficiência de controle de incrustações do novo permeador, variando parâmetros de projeto como números de orifícios no injetor de ar e densidade de empacotamento das fibras-ocas, mantendo fixo seu volume útil;
- Comparação das resistências por incrustações obtidas nos testes de permeação com suspensões de fermento biológico fresco entre o permeador de membranas em forma de alça e as variantes do novo permeador;
- Avaliação da distribuição e tamanho das bolhas de ar geradas pelos diferentes tipos de injetores, através de fotografias;

I INTRODUÇÃO

- Avaliação do gasto energético com uso de ar para controle de incrustações nas variantes do novo permeador, em cada teste de permeação com fermento biológico fresco;

O trabalho pode ser dividido em 4 fases. Na primeira etapa, foram estudados permeadores de membranas em forma de alça visando ao melhor entendimento da influência de alguns parâmetros operacionais sobre a formação de incrustações, como concentração de fermento biológico e vazão de ar. Nesta etapa, as membranas utilizadas na confecção dos permeadores em alça, foram caracterizadas quanto à sua morfologia e à permeabilidade hidráulica à água pura. As condições críticas utilizando suspensão modelo de fermento biológico e as resistências ao transporte foram determinadas e, por último, avaliou-se o efeito da limpeza física por retrolavagem e química, sobre a limitação dos efeitos de incrustações sobre o transporte através das membranas.

Na segunda etapa, foram selecionadas e estudadas variantes, com relação ao projeto do novo permeador, desenvolvidos pela empresa PAM-Membranas Seletivas Ltda. Foram avaliados os efeitos da variação de dois parâmetros no projeto do novo permeador sobre a limitação de incrustações nas membranas: A quantidade de furos no injetor de ar e a densidade de empacotamento de fibras. Para tal, foram realizados testes de permeação com as variantes de projeto do novo permeador utilizando fermento biológico fresco, para obtenção das resistências ao transporte e finalmente estas foram comparadas quanto à eficiência no controle de incrustações. O uso de fermento biológico nesta etapa, em substituição ao lodo ativado utilizado em BRM, se deu devido a diversos fatores, porém os principais deles foram os fatos de que, os fermentos biológicos conferem resistências por incrustações semelhantes aos lodos e dispensam a etapa de aclimação. Baseando-se no objetivo geral a ser alcançado, a concluiu-se que o uso de lodo não traria maiores benefícios ao êxito do trabalho.

Na terceira etapa, foram caracterizadas as bolhas formadas pelos injetores de ar acoplados às bases das variantes do novo permeador, de modo a melhor entender os resultados da etapa anterior.

Na quarta e última etapa, foi feita a avaliação do gasto energético com uso de ar em cada teste de permeação com as variantes do novo permeador.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

No capítulo II são apresentadas as motivações para o estudo de BRM, como a legislação brasileira e o reuso de águas, assim como a apresentação do processo de lodos ativados convencional (LAC) e suas limitações. Os BRM e os fundamentos

I INTRODUÇÃO

teóricos de transporte através de membranas são amplamente discutidos. Por último, foi feita uma revisão da literatura sobre fatores que influenciam incrustações em BRM, com especial ênfase àqueles relacionados à hidrodinâmica em escoamentos multifásicos, quanto ao uso de ar e o projeto de permeadores.

No capítulo III são apresentados os materiais e métodos experimentais utilizados neste trabalho.

No capítulo IV, os resultados obtidos são apresentados e discutidos, enfatizando a comparação da eficiência no controle de incrustações entre as variantes de projeto do novo permeador.

O capítulo V traz as principais conclusões sobre o presente trabalho e algumas sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados a legislação brasileira de águas e suas nuances, o conceito de reuso de águas, a caracterização de poluentes em um efluente líquido e alguns fundamentos teóricos do tratamento de efluentes, abordando especialmente a etapa secundária, focando nos processos com lodos ativados convencionais (LAC). Também são apresentados os principais conceitos, dos Biorreatores com Membranas (BRM) e dos processos de separação por membranas (PSM) em geral. Em seguida, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a formação de incrustações nos BRM. Dentre os fatores que influenciam as incrustações, foram estudados os relacionados às membranas, à biologia dos processos, às condições operacionais e à hidrodinâmica, com maior ênfase neste último item.

II.1 Legislação brasileira de águas

A água era considerada por muitos como um bem inesgotável. Uma mudança fundamental desse conceito ocorreu em 1992, no cenário internacional. Em janeiro, a “Conferência Internacional da Água e do Meio Ambiente: Desenvolvimento de temas para o século XXI” ocorreu em Dublin, como evento preparatório para a “Rio 92” (Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento). Nessa conferência, foi consenso geral foi de que a política em relação à água precisaria ser reformulada.

O Brasil possui alta disponibilidade hídrica, destacando-se como o país mais rico do mundo nesse bem, com 12% do total da água doce existente. Mais de 90% do território nacional recebe chuvas entre 1.000 e 3.000 mm³.ano⁻¹. Em termos de águas subterrâneas, a disponibilidade brasileira é da ordem de 5.000 m³ per capita.ano⁻¹, o que significa que cerca de 80% da população urbana brasileira poderia ser abastecida por esta fonte. No estado de São Paulo, cerca de 70% das cidades e 95% das indústrias são abastecidas por poços. Mesmo com tamanha abundância, o Brasil sofre a escassez de água, devido a sua má distribuição. Além disso, com a falta de conscientização, ocorre o grande desperdício e a não realização dos investimentos necessários ao seu uso e proteção mais eficiente. No Brasil, ainda tem-se a pequena valorização econômica da água (CARVALHO *et al.* 2008).

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A principal atividade de consumo de água no Brasil é a agricultura. A demanda brasileira de água para irrigação é da ordem de 61% de todo consumo (TESTEZLAF *et al.*, 2002).

O uso indiscriminado da água ao longo dos anos, quando ainda não existia uma legislação própria para regulamentação da qualidade das águas, motivou o desenvolvimento de uma legislação. A constituição de 1988 estabelece a política nacional do meio ambiente, no qual um dos artigos torna a água como bem protegido pelo poder público. A partir desse ponto, os vários estados brasileiros criaram suas leis com relação à gestão das águas sob seus domínios, com incorporação da cobrança pelo uso de recursos hídricos.

Com relação à gestão da qualidade dos recursos hídricos, em território nacional, o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), órgão consultivo e deliberativo do SISNAMA (Sistema Nacional do Meio o Ambiente), instituído pela Lei 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, regulamentada pelo Decreto 99.274/90, se tornou responsável pela formulação de resoluções que representaram importantes instrumentos normativos. A Resolução 357/2005, depois alterada e complementada pela Resolução 430/2011, classifica e estabelece os padrões de qualidade dos corpos de águas no território nacional, assim como e os padrões de qualidade de efluentes a serem emitidos em corpos receptores. As águas são classificadas em nove categorias, sendo cinco de águas doces (com salinidade igual ou inferior a 5 g.L⁻¹), duas de salobras (salinidade entre 5 e 30 g.L⁻¹) e duas de salinas (salinidade superior a 30 g.L⁻¹), de acordo com seu uso e nível de qualidade. Os níveis de qualidade são obtidos pela fixação de condições e limites de concentração. Com relação à água doce, por exemplo, os limites a serem observados referem-se ao número de coliformes, demanda bioquímica de oxigênio em 5 dias (DBO₅), oxigênio dissolvido (OD), turbidez, cor, pH e um conjunto de substâncias potencialmente prejudiciais. São fixados, também, limites de concentração de poluentes diversos que deverão ser observados na caracterização dos efluentes líquidos a serem lançados direta ou indiretamente nos corpos d'água, assim como os limites de pH, temperatura, cor e materiais sedimentáveis (CONAMA, 2011).

Em 17 de julho de 2000, foi criada a Agência Nacional de Águas (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (MEDAUAR, 2002).

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estabelecimento dos padrões de qualidade deve ser baseado em metas definidas pelas autoridades ambientais, que deverão ser atingidas gradualmente pelos respectivos comitês de bacias hidrográficas, que são órgãos colegiados da gestão de recursos hídricos, com atribuições de caráter normativo, consultivo e deliberativo e integra o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos (CÁNEPA *et al.*, 1997). Os comitês utilizam vários instrumentos de gestão, do qual se destaca a cobrança pelo uso dos recursos hídricos, que visa incentivar o uso mais moderado e racional das águas. Em 2002, teve início a cobrança pelo uso da água no país e a primeira ocorrência foi estabelecida na bacia do rio Paraíba do Sul (cujo rio principal, que dá nome à bacia, tem suas águas de domínio federal) através do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e, a partir dessa data, outros comitês iniciaram a cobrança em novas bacias.

O projeto de uma estação de tratamento de efluentes (ETE) pode-se diferenciar entres os Estados, devido as diferentes legislações, ocorrendo em, de uma ETE ser adequada para tratamento de efluente de um Estado e não para outro (GIORDANO, 1999). Os parâmetros para controle da carga orgânica são aplicados de forma muito diferente, de acordo com o Estado em questão. No Estado do Rio de Janeiro, os parâmetros DBO e DQO são avaliados. Para a DBO, as eficiências de redução aceitas são nas faixas de até 70% e até 90%, enquanto com relação à DQO o controle é tabelado por concentração, variando de acordo com o tipo de indústria (INEA, 1989). No Estado de São Paulo, é exigida redução de carga orgânica de 80% ou que a DBO apresente valor máximo de $60\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ (CETESB, 1976). No Estado de Minas Gerais, existe uma relação de indústrias com os seus respectivos limites de lançamento segundo o porte e o potencial poluidor (COPAM, 2008). O Estado de Goiás determina que a DBO máxima seja de $60\text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ ou que sua redução seja superior a 80%. Nos demais Estados, a carga orgânica é controlada pelas resoluções do CONAMA (GIORDANO, 2004).

II.2 O reuso de águas

O reuso de água é um conceito baseado nos problemas relacionados à sua escassez e poluição nas cidades, além de que a água é um bem econômico, devendo ser utilizada de forma racional. O reuso de água se torna mais importante devido às restrições das legislações ambientais, implicando em altos investimentos para o

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

tratamento dos efluentes, tornando mais vantajoso reutilizar estes efluentes ao invés de lançá-los de volta aos rios (METCALF E EDDY, 2003).

A prática do reuso gera uma água de qualidade inferior para aplicações que não necessitam de padrões de potabilidade (FILHO e MANCUSO, 2003). O reuso de água não é um conceito novo na história do planeta. A natureza, por meio do ciclo hidrológico, vem reciclando e reutilizando a água há milhões de anos, e com muita eficiência.

O reuso de água pode ocorrer de duas formas: direta e indireta. O reuso direto é aquele que se trata um efluente para sua reutilização em uma determinada aplicação, que pode ser de uso próprio do empreendimento ou para uso externo, como por exemplo, o reuso de água proveniente de efluentes urbanos tratados na agricultura. Já o reuso indireto visa ao tratamento de um efluente para ser descartado em rios ou águas subterrâneas de forma que seja usado novamente em algum momento (FILHO E MANCUSO, 2003).

As práticas potenciais de reuso de água estão na área urbana, industrial e na área agrícola (HESPANHOL, 2002). Dentro do setor urbano, pode-se gerar água de reuso para fins potáveis, porém associada a elevado risco, devido a presença de microrganismos patogênicos e de muitos compostos orgânicos na maioria dos efluentes industriais gerados, que se misturam aos efluentes domésticos que são direcionados às estações de tratamento. Os fins não potáveis são mais praticados, como na irrigação de parques e jardins públicos, chafarizes, descarga sanitária em banheiros e lavagem de transportes públicos, entre outros. Industrialmente, esta prática vem sendo considerando uma solução para autonomia em termos de abastecimento de água e na racionalização de seu consumo, tornando o reuso não apenas uma forma de garantir o seu crescimento, mas até mesmo uma questão de sobrevivência. Dentre as principais aplicações na indústria estão a reposição de água em torres de resfriamento, caldeiras, irrigação das áreas verdes, lavagens de pisos, uso em banheiros e águas de processos. Porém, o reuso interno não substitui integralmente a necessidade de captação de água de uma planta industrial, pois existem limitações de ordem técnica, operacional e ambiental que restringem a utilização de sistemas de circuito fechado. Finalmente, para fins agrícolas, responsável pela maior demanda de água entre os setores, o reuso de água deve ter atenção especial, no tocante à irrigação.

Antes da prática do reuso de água, devem ser analisadas as características do efluente disponível, pois estas devem ser compatíveis com os requisitos de qualidade

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

exigidos pela aplicação na qual se pretende usar o efluente como fonte de abastecimento (FILHO E MANCUSO, 2003).

Alguns casos bem sucedidos em reuso de águas no Brasil encontram-se em Betim (MG), na empresa Fiat, onde foi alcançado o reaproveitamento de cerca de 92% dos 1,5 bilhões de litros de água usados continuamente na produção e na Fábrica de Taubaté (SP), da Volkswagen, onde a prática do reuso recupera cerca de 70% da água consumida, fazendo com isso, que a fábrica deixe de consumir $70.000 \text{ m}^3.\text{mes}^{-1}$ de água da rede pública (FRANCO, 2007).

II.3 Caracterização dos poluentes

Os efluentes são caracterizados segundo parâmetros térmicos, sensoriais e físico-químicos (GIORDANO, 2004).

O parâmetro de controle térmico em um efluente é a temperatura. A legislação brasileira é restritiva quanto a este parâmetro. A poluição térmica, devido às perdas de energia calorífica nos processos de resfriamento ou devido às reações exotérmicas no processo industrial, também é importante fonte de poluição dos corpos hídricos.

O odor e a cor são os mais importantes parâmetros sensoriais dos efluentes, pois o despejo de efluentes em corpos hídricos com forte cor e odor constitui uma fonte de poluição de fácil identificação por pessoas, inclusive por autoridades ambientais.

As características físico-químicas são definidas por parâmetros que quantificam os sólidos e a matéria orgânica e inorgânica dissolvida, além de alguns outros componentes.

Em efluentes, os sólidos são toda a matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura pré-estabelecida durante determinado espaço de tempo (PERPETUO, 2012). Os sólidos são compostos por substâncias dissolvidas e em suspensão, de composição orgânica e ou inorgânica. São considerados como sólidos dissolvidos particulados com diâmetros inferiores a $1,2 \mu\text{m}$ e como sólidos em suspensão, aqueles que possuem diâmetros superiores a este valor. Os sólidos em suspensão podem ser coloidais, sedimentáveis ou flutuantes. Os sólidos coloidais são aqueles que se mantêm no seio da suspensão devido ao seu pequeno diâmetro e pela ação da camada de solvatação que impede o crescimento dessas partículas. Os sólidos que se separam da fase líquida por diferença de densidade são denominados como sedimentáveis ou flutuantes. Referente à composição dos

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

sólidos, seja em suspensão ou dissolvidos, ainda adota-se outro tipo de caracterização, sendo os sólidos inorgânicos denominados fixos e os orgânicos, voláteis (GIORDANO, 2004).

A matéria orgânica é a principal fonte de poluição em efluentes (VON SPERLING, 2005). Existem três parâmetros que são normalmente utilizados para quantificar matéria orgânica, de forma indireta, que são a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e o carbono orgânico total (COT). A DBO mede a quantidade de oxigênio utilizada pelos microrganismos para degradar a matéria orgânica biodegradável. A DQO é a medida da quantidade de oxigênio consumida na oxidação da matéria orgânica por algum agente químico. O COT é uma medida direta de matéria orgânica por quantificação do CO₂ gerado em sua oxidação. A medida de COT não distingue se a matéria orgânica é ou não biodegradável. Para esgotos domésticos, a relação DQO/DBO é um parâmetro que indica a biodegradabilidade dos efluentes. Se em um efluente esta relação é baixa, a fração biodegradável é elevada, e quando for elevada, a fração inerte é predominante (VON SPERLING, 2005). Detergentes, fenóis, óleos e graxas e outros componentes orgânicos podem ser analisados diretamente.

A matéria inorgânica é toda aquela composta por átomos que não sejam de carbono (exceto no caso do ácido carbônico e seus sais). Os poluentes inorgânicos são os sais, óxidos, hidróxidos e os ácidos. A presença excessiva de sais, mesmo sais inertes tais como o cloreto de sódio, pode retardar ou inviabilizar os processos biológicos (GRADY *et al.*, 1980) e, em casos extremos, pode inviabilizar o uso das águas por salinização.

Os compostos nitrogenados e fosforados, presentes nos efluentes sanitários e industriais, se constituem outras fontes de poluição importante. Nos esgotos sanitários, são provenientes de urina humana e resíduos de produtos de limpeza domésticos e ou industriais, tais como detergentes (VON SPERLING, 1996). Nos efluentes industriais, são advindos de proteínas, aminoácidos, ácidos fosfóricos e seus derivados, entre outros.

Os metais são analisados de forma elementar. Os que apresentam toxicidade são os seguintes: alumínio; cobre; cromo; chumbo; estanho; níquel; mercúrio; vanádio; zinco. A toxicidade dos metais é função também de seus números de oxidação, como por exemplo, o cromo trivalente que não apresenta toxicidade, já o hexavalente é irritante e corrosivo aos tecidos humanos, entre outros (DE FREITAS, 2006). Outros

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

metais tais como o sódio, cálcio, magnésio, e potássio são analisados principalmente em casos de reuso de águas ou em casos nos quais a salinidade do efluente influencia significativamente em processos de corrosão e osmose (GIORDANO, 2004).

Por último, os contaminantes biológicos podem constituir uma fonte de poluição patogênica. As características biológicas dos efluentes referem-se à presença de diversos microrganismos tais como bactérias inclusive do grupo coliforme, vírus e vermes (VON SPERLING, 1996).

II.4 Tratamento de efluentes

O tratamento de efluentes objetiva reduzir a carga poluente dissolvida e suspensa em uma corrente residual proveniente de setores industrial, agrícola, doméstico ou urbano. Este é realizado em etapas, através de processos físico-químicos e biológicos. De forma geral, o tratamento de efluente pode ser dividido em tratamento preliminar, primário, secundário e terciário (polimento final).

O tratamento preliminar é constituído por processos físicos para a remoção dos materiais grosseiros em suspensão, através do uso de grades (gradeamento) e peneiras (peneiramento), e de areia a partir de canais (desarenação). Ainda nessa etapa, o efluente pode passar por uma equalização de vazão e neutralização. No tratamento preliminar, a vazão é geralmente medida em uma calha parshall, que é uma calha de dimensões padronizadas, onde o valor medido do nível pode ser correlacionado com a vazão.

O tratamento primário, baseado em processos físico-químicos, tem como finalidade a remoção de sólidos em suspensão, óleos e gorduras. O tratamento primário é constituído unicamente por processos físico-químicos. Esta etapa tem como objetivo o enquadramento do efluente para etapa posterior de degradação biológica, quando esta for necessária, para aumentar sua eficiência. Dentro do tratamento primário se destacam:

Gradeamento - Com o objetivo da remoção de sólidos grosseiros capazes de causar entupimentos e aspecto desagradável nas unidades do sistema de tratamento, são utilizadas grades mecânicas ou de limpeza manual. O espaçamento entre as barras varia normalmente entre 0,5 e 2 cm (GIORDANO, 2004).

Peneiramento - Com o objetivo da remoção de sólidos normalmente com diâmetros superiores a 1 mm. As peneiras normalmente utilizadas possuem malhas com

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

barras triangulares com espaçamento variando de 0,5 a 2 mm, podendo a limpeza ser mecanizada ou manual.

Separação água e óleo - Um processo físico que ocorre por diferença de densidade, sendo normalmente as frações oleosas mais leves recolhidas na superfície. No caso de óleos ou borras oleosas mais densas que a água, esses são sedimentados e removidos por limpeza de fundo do tanque. Este processo não é capaz de remover óleo emulsionado, sendo utilizado na etapa preliminar dos sistemas de tratamento.

Decantação primária - O processo de decantação é uma das etapas de clarificação. Dá-se pela ação da gravidade nos sólidos, que se depositam ao fundo. Os decantadores podem ser acoplados aos tanques de coagulação e floculação. Os decantadores podem ser circulares ou retangulares.

Flotação - A flotação é processo físico utilizado para a clarificação de efluentes, do qual parte do material menos denso se acumula na superfície e é retirado por escoamento superficial ou raspagem. É normalmente aplicada efluentes com altos teores de óleos e graxas e ou detergentes. Existem flotadores com ar induzido (FAI) e com ar dissolvido (FAD), no qual o ar é agente promotor de redução de densidade das partículas oleosas. O diferencial dos FAD, é que ar é dissolvido em altas pressões em um saturador e microbolhas são geradas, com grande área superficial para a coleta de partículas em suspensão, quando o efluente é levado ao flotador em pressão atmosférica.

Coagulação/Floculação – O processo de coagulação, ou floculação, consiste na adição de produtos químicos que promovem a aglutinação e o agrupamento das partículas a serem removidas, tornando o peso específico das mesmas maior que o da água, facilitando a decantação. A adição de agentes coagulantes (sais de ferro ou alumínio) é muito utilizada, sendo também eficaz para a remoção de fósforo, tendo como desvantagens o custo dos produtos químicos e o maior volume de lodo formado. As grandes vantagens são a praticidade e a boa qualidade dos efluentes obtidos. Existe também a eletrocoagulação e eletrofloculação que consistem na passagem de corrente elétrica pelo efluente sendo responsável por reações de oxidação dos compostos, substituição iônica entre os eletrólitos inorgânicos e os sais orgânicos e desestabilização das partículas coloidais.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.5 Tratamento secundário

No tratamento secundário predomina os mecanismos biológicos, cujo o objetivo é a remoção de matéria orgânica e eventualmente nutrientes, como nitrogênio e fósforo, por meio de reações bioquímicas promovidas por microrganismos (bactérias, fungos e protozoários), por processos aeróbicos, anaeróbicos ou facultativos (RAMALHO, 1983, METCALF e EDDY, 2003, GIORDANO, 2004). Os processos aeróbios simulam o processo natural de decomposição, produzindo, principalmente, CO_2 e H_2O . O oxigênio é obtido por injeção de ar no tanque em que se encontram os microrganismos. Já os anaeróbios consistem na digestão da matéria orgânica biodegradável, na ausência de ar ou oxigênio elementar, com produção principal de CH_4 e CO_2 . Ainda existem os processos os processos facultativos, onde os dois processos ocorrem ao mesmo tempo, como é o exemplo das lagoas facultativas, onde na superfície ocorre degradação anaeróbica e no fundo ocorre anaeróbica.

Nos processos aeróbios, se destacam o processo de lodos ativados e suas variantes.

II.6 Tratamento terciário

O tratamento terciário tem a finalidade de conferir um polimento final ao efluente que passou pelo tratamento secundário, para remoção de cargas adicionais de poluentes, antes do seu reuso ou descarga no corpo receptor. Esta etapa é muito diversificada em função das necessidades de cada indústria, no entanto os processos mais utilizados são:

Filtração – A filtração pode ser utilizada para retenção de sólidos que não foram removidos no decantador secundário, através de um meio poroso (filtro). Existe a filtração superficial e profundidade. Na filtração de profundidade os sólidos ficam retidos em toda espessura do filtro, enquanto que na filtração superficial, toda a retenção ocorre na entrada do filtro. São normalmente utilizados filtros prensas ou rotativos e os filtros de areia.

Oxidação química – Esta etapa consiste na remoção de substâncias recalcitrantes à biodegradação e desinfecção do efluente devido ao alto potencial de oxidação dos compostos utilizados. Alguns processos como cloração, ozonização e processos avançados, baseados no ataque dos radicais hidroxilas são utilizados. A grande

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

vantagem dos processos oxidativos é que, na maioria dos casos ocorre destruição completa dos poluentes, diferente dos processos físicos, que os transferem da fase líquida para outra fase. Existem algumas ocasiões, em que o efluente pós-oxidação tem toxicidade superior ao efluente anterior, devido à presença de subprodutos gerados no processo. Os processos oxidativos são não seletivos, ou seja, eliminam todos os microrganismos e oxidam a matéria orgânica e inorgânica presente. Dentre os processos mais utilizados, destaca-se os de oxidação com H_2O_2 e com H_2O_2 e íons Fe^{2+} , chamados de reagentes de Fenton (MANENTI, 2011).

Adsorção com carvão ativado – O carvão ativado é um material de carbono com alta porosidade, com capacidade de adsorver de moléculas orgânicas e inorgânicas que causam odor e toxicidade (LETTERMAN, 1999).

Remoção de fósforo e nitrogênio – Outra forma de poluição nos efluentes, são os compostos que contém fósforo e nitrogênio, que devem ser removidos face aos problemas de eutrofização dos corpos receptores estagnados. Os métodos para remoção de compostos nitrogenados podem ser físicos, químicos ou biológicos. Já no caso dos compostos fosforados, os processos de remoção não biológicos são basicamente processos de precipitação química (GIORDANO, 2004).

Processos de separação por membranas (PSM) – Os processos de filtração com membranas é atualmente um dos processos com maior desenvolvimento para aplicações em efluentes industriais. Nos processos de separação por membranas o transporte de dada espécie é realizado através de uma força motriz, que pode ser o potencial químico ou eletroquímico, dependendo do processo. Dentre alguns PSM, estão a microfiltração (MF), ultrafiltração (UF) e a osmose inversa (OI), que utilizam membranas com poros, nos dois primeiros, cujos tamanhos médios decrescem na sequencia citada e membranas compostas, apresentando uma fina camada densa, seletiva aos solutos, e um suporte poroso que confere estabilidade mecânica, para o último. Para MF e UF, a força motriz ao transporte se traduz em diferença de pressão entre os lados das membranas, já para a OI, na subtração da pressão osmótica da diferença de pressão aplicada. Segundo HABERT *et al.* (2006), a MF tem obtido sucesso na remoção de 99% de sólidos suspensos e microrganismos, enquanto que a UF é geralmente utilizada para purificação e fracionar soluções de macromoléculas e a OI é responsável por reter solutos de baixa massa molar, como sais inorgânicos ou pequenas moléculas orgânicas como a glicose. A osmose inversa é tradicionalmente aplicada na dessalinização de água do mar, porém com o desenvolvimento de novas membranas com maiores fluxo e resistentes a amplas

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

faixas de pH, temperatura e presença de produtos cáusticos, a osmose inversa vem sendo empregada na obtenção de água ultra pura, no tratamento de água dura na indústria alimentícia e em muitas outras aplicações.

II.7 Processo de lodos ativados convencional (LAC)

O tratamento convencional com lodos ativados foi desenvolvido entre o final do século XIX e o início do século XX, por cientistas britânicos, e hoje é a tecnologia mais utilizada no tratamento biológico de efluentes. A definição de lodo ativado se deu por se ter acreditado que este tipo de conjunto de microrganismos se ativavam sob certas condições experimentais.

Tecnicamente, os lodos ativados são um conjunto de microrganismos floculentos que são capazes de degradar contaminantes de um efluente, por reações de oxidação biológica através da presença de oxigênio dissolvido no meio. A degradação se dá em um tanque com fornecimento de ar em batelada ou em processo contínuo com alimentação de efluente (substrato). Em seguida, o efluente vai a etapa posterior, de decantação, onde o lodo é separado no fundo e retornado ao tanque de degradação. A Figura II.1 mostra uma ETE com um LAC e a Figura II.2, o fluxograma do processo de LAC.



Figura II.1. Vista superior de um LAC inserido na ETE de Suzano (SP) (SABESP, 2013)

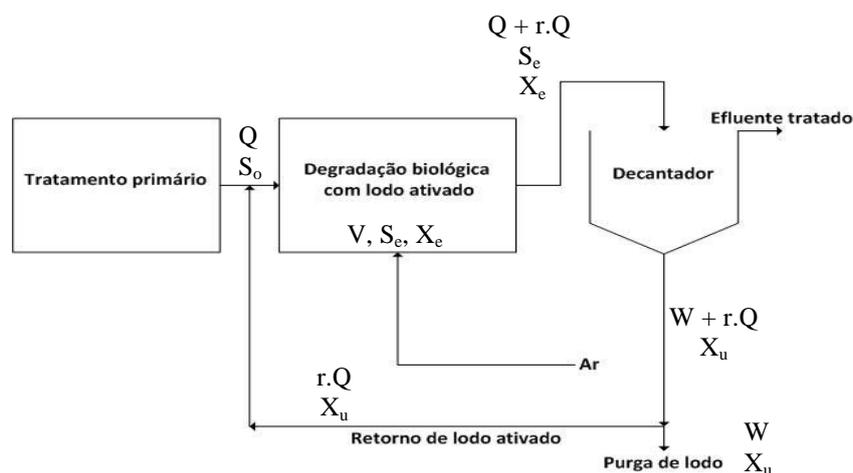


Figura II.2. Fluxograma do processo de lodos ativados convencional (LAC) (Adaptado de VON SPERLING, 1996)

Na Figura II.2, Q representa a vazão de efluente, S_o a concentração inicial de matéria orgânica, V o volume de reator de degradação biológica, X_e a concentração de microrganismos, r é a razão de reciclo da corrente líquida, W a vazão de purga e X_u a concentração de lodo saída do fundo do decantador.

O sucesso do processo de lodos ativados depende do estabelecimento de uma comunidade mista de microrganismos que consumirão a matéria orgânica, se agregarão (biofloculação) e sedimentarão de forma a produzir um lodo concentrado para reciclo. Qualquer problema de separação de sólidos, indica um desbalanceamento no componente biológico do processo. Portanto o processo é altamente dependente de sedimentabilidade do lodo gerado, que se não for adequada, gera um efluente de má qualidade e um reciclo de concentração inadequada. Em um sistema adequado, os organismos filamentosos crescem dentro dos flocos (agregado de microrganismos formadores de floco – bactéria), conferindo a este boas características de compactação e sedimentação. As bactérias filamentosas servem de esqueletos para o crescimento dos flocos e o mesmo não se forma adequadamente se existirem poucos filamentos. No entanto flocos com muitos filamentos não possuem boa sedimentabilidade, sendo desejável um número moderado de filamentos.

A principal desvantagem desse processo é a sensibilidade das características do lodo, que afetam na sedimentabilidade, em relação aos vários fatores operacionais. Os principais fatores operacionais são a carga mássica (A/M), o tempo de retenção hidráulica (TRH) e celular (TRC), concentração de lodo no tanque (X_e), vazão de fornecimento de ar (Q_{ar}) e a razão de reciclo de lodo (r).

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A remoção de poluentes orgânicos dos efluentes é realizada para a geração de energia nas células microbianas, que ocorre na fase celular conhecida por catabolismo. O metabolismo é representado pelas reações que conduzem ao crescimento do lodo. Esta fase ocorre com o auxílio da energia liberada no catabolismo.

A quantidade de bactérias presentes no meio é variante ao longo do tempo de acordo com a disponibilidade de substrato. Para excesso de substrato, o crescimento é exponencial. Quando o alimento começa a ficar escasso, a taxa de crescimento bacteriano se torna igual à taxa de mortalidade. Para uma quantidade de substrato reduzida, se inicia a fase de declínio. Nesta fase, prevalecem as características da respiração endógena. As células morrem e liberam seus nutrientes, servindo de alimento para outras células (VIANA, 2004).

Os lodos ativados são predominantemente formados por bactérias heterotróficas, protozoários e, em menos quantidade, fungos e rotíferos. Bactérias nitrificantes também podem ser encontradas, sendo sua concentração dependente das concentrações de nitrogênio e carbonos disponíveis. Os microrganismos do lodo ativado são influenciados pelas características do efluente a ser tratado no tanque de aeração, pelas condições ambientais e pelos parâmetros de operação (RAMALHO, 1983, VON SPERLING, 1997, METCALF e EDDY, 2003, JUDD, 2002).

A aeração exerce dois papéis nos LAC. O primeiro deles é de fornecimento de oxigênio dissolvido suficiente para realização das reações de oxidação da matéria orgânica e o segundo de promover turbulência no interior no tanque para que o lodo se mantenha em suspensão.

O ar pode ser disponibilizado através de compressores e injetores e/ou agitadores mecânicos. Os distribuidores se encontram geralmente ao fundo do tanque, mas há sistemas em que a distribuição é móvel pelo tanque. A Figura II.3 mostra foto de injetores de ar utilizados nos LAC.



Figura II.3. Injetores de ar em LAC (BOMBAS BETO, 2013, PARKSON, 2013).

Os injetores geram bolhas finas, médias e grossas. Bolhas finas de ar possuem maior área de contato superficial com o líquido, logo a transferência de oxigênio da fase gasosa para líquida é mais eficiente quando comparadas a outros tamanhos de bolhas.

A agitação mecânica coloca o líquido em maior contato com ar da atmosfera, promovendo a incorporação do oxigênio no meio líquido.

A massa de oxigênio que é transferida ao biorreator deve ser suficiente para suprir as necessidades de consumo pelos microrganismos, garantindo a boa operação dos sistema.

II.8 Biorreatores com membranas (BRM)

Os biorreatores com membrana (BRM) são processos híbridos que integram a degradação biológica com lodos ativados e processos separação com membrana. Nos BRM, diferentemente do que ocorre nos LAC, não existe a etapa de decantação, substituída pela retenção do lodo por membranas. As membranas também podem ser acopladas a biorreatores anaeróbicos (BEN AIM & SEMMENS, 2002).

II.8.1 Perspectiva histórica

O primeiro BRM foi desenvolvido comercialmente por Dorr-Oliver no final da década de 60 para tratamento de efluentes de navio. Outros sistemas que utilizavam membranas para separação de lodos ativados, em escala piloto, foram desenvolvidos na

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

mesma época. Durante duas décadas esses sistemas foram baseados na configuração externa (eBRM), com filtração sendo realizada externamente ao tanque principal, necessitando de elevada velocidade tangencial para a manutenção do desempenho. O primeiro biorreator utilizava membranas planas de ultrafiltração (UF) com módulo externo operando em altas pressões e com baixos fluxos permeados. Este sistema foi colocado no mercado no Japão sob licença da Sanki Engenharia, obtendo algum sucesso até o início dos anos 90. No final dos anos 80, a Thetford Systems dos EUA havia desenvolvido outro processo, utilizando o reciclo do efluente. Em 1989 foi desenvolvida a primeira membrana em forma de fibra-oca de ultrafiltração para BRM, simultaneamente no Japão e EUA e a Zenon Environmental, uma empresa formada em 1980, adquiriu a Thetford Systems e introduziu no mercado o conceito de BRM submerso utilizando fibras-ocas, os permeadores ZeeWeed®, em 1993, nos EUA e Europa. No mesmo período, a Kubota, uma empresa japonesa, entrou no mercado com a comercialização de sistema de BRM submersos utilizando membranas de placas planas. Hoje, as duas empresas são as maiores no mercado mundial, com a Kubota mais voltada a comercialização dos pequenos BRM enquanto a Zenon, atualmente uma empresa do grupo GE, preocupada com os de grande escala (JUDD, 2006).

II.8.2 Mercado

Atualmente, é esperado o crescimento anual de 10,5% para o mercado global de BRM, aumentando sua participação de \$290 milhões em 2008 para \$488 milhões em 2013, segundo projeções (KRAUME e DREWS, 2010). O crescimento do mercado de BRM não é regular em todo mundo. O tratamento de efluentes municipais ou domésticos tem a maior fatia de aplicação dessa tecnologia, marca de 44% do total. Este mercado é prevalecente nos EUA e Europa.

As projeções para o mercado de BRM dão conta de um grande potencial de crescimento no futuro. As projeções levam em conta as principais causas que conduzem o mercado atual, onde no futuro se espera que exerça influência maior (KRAUME e DREWS, 2010, JUDD, 2011). Entre essas causas estão a legislação mais exigente na descarga de efluente domésticos e industriais, a escassez local de água doce, incentivos governamentais e a diminuição de custo de investimento e operacionais com relação ao uso da água.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Já no Brasil, as empresas especializadas ainda focam apenas em pequenos BRM. No momento, com exceção da Petrobras e agora da SANASA (de Campinas), as ETE com estes sistemas são de pequeno porte.

As empresas de maior expressão no mercado de BRM são GE e a Kubota. Porém, há outras empresas, como a Wehrle Werk A. G., Orelis & Mutsui Chemicals, Degremont, US Filter, entre outras.

A Kubota fornece soluções e tecnologia em BRM submersos utilizando membranas planas. A maior unidade instalada pela empresa possui capacidade para $78.000 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ em Al Ansab, Muscat, Oman. As membranas da Kubota tem diâmetro de poros nominal de $0,4 \mu\text{m}$ (EIMCO WATER TECHNOLOGIES, 2013).

Até hoje, a Kubota já instalou mais de 550 unidades de BRM para tratamento de efluentes municipais e mais de 1500 para industriais (KUBOTA, 2013).

A Zenon, que atualmente é GE, já instalou unidades de BRM para tratamento de efluente com capacidades maiores que $100.000 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, utilizando fibras-ocas patenteadas como ZeeWeed®. As fibras ZeeWeed possuem tamanho de poro nominal de $0,1 \mu\text{m}$ e o fluxo permeado é obtido no sentido da superfície externa para o lúmen da fibra (GE, 2013). A pressão de filtração é obtida por uma combinação da pressão gerada pela coluna de líquido no biorreator e por uma pressão negativa no lado do permeado promovida por bombas centrífugas convencionais. Os permeadores são encaixados formando-se uma espécie de cassete. Os investimentos da empresa em produção de novos permeadores, com este tipo de membranas e cada vez com densidade de empacotamento maiores, permitiram a redução da área ocupada pelos BRM.

II.8.3 Dificuldades e custos operacionais

A principal limitação que retarda o desenvolvimento ainda mais acelerado dos BRM é o seu custo operacional. A Figura II.4 mostra o sistema de complexas de parâmetros em BRM, que influenciam nos custos operacionais.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

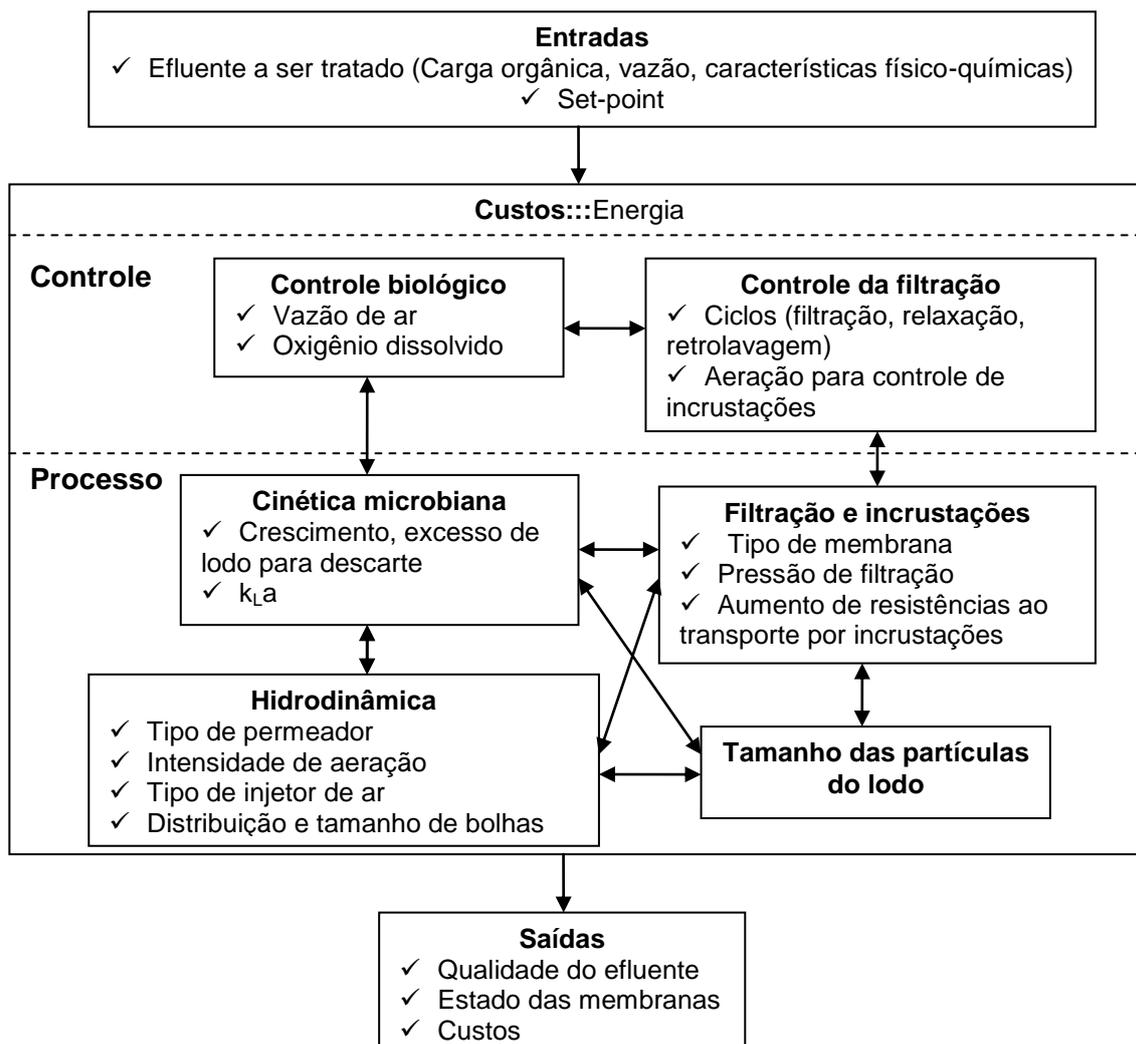


Figura II.4. Sistema de complexas interações entre os parâmetros de controle e operação dos BRM (adaptado de NAESSENS *et al.*, 2012)

Enquanto os permeadores de membranas tem sofrido declínio em seu preço nos últimos anos, reduzindo os custos de capital, a energia demandada com sopradores de ar e bombas são as principais contribuições para o alto custo operacional. O ar tem duas funções nos BRM, a promoção de cisalhamento suficiente na superfície das membranas, para retirada de pelo menos parte do material sólido que ficara retido, fenômeno chamado de incrustação, ou, do inglês *fouling*, e a transferência de oxigênio suficiente para o lodo executar a oxidação dos poluentes. A aeração em BRM de membranas submersas consome cerca de 0,4 kWh por m³ de efluente tratado (KRAUSE, 2005). Já com relação aos custos com limpeza das membranas, em instalações de BRM para tratamento de efluentes urbanos, variam de 0,2 a 1 € por m² de superfície de membrana por ano (WEDI *et al.*, 2005).

II.8.4 Tipos de BRM

As principais configurações de BRM vigentes, são as configurações externa (eBRM) e submersa (sBRM). A Figura II.5 mostra as duas.

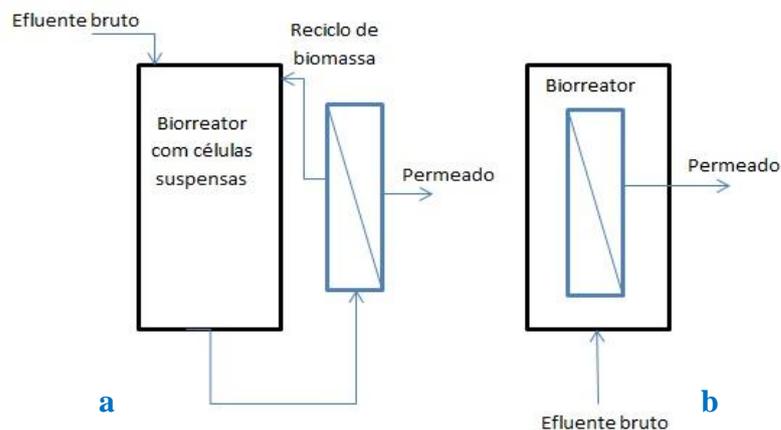


Figura II.5. Modalidades de BRM. a) eBRM e b) sBRM

Nos eBRM, os permeadores de membranas são operados em fluxo cruzado fora do biorreator, ou seja, a suspensão escoar paralelamente à superfície da membrana enquanto o permeado é transportado transversalmente à mesma. A velocidade tangencial no permeador promove turbulência na região próxima à membrana, arrastando parte das partículas sólidas que se depositam sobre a superfície da membrana. Nesta configuração, a força motriz para produção de permeado é a diferença de pressão gerada pela corrente de alimentação de efluente saído do biorreator e pressão atmosférica, já que o permeador se encontra aberto. Pode-se também utilizar uma bomba de sucção conectada à tubulação de recolhimento do permeado, com o objetivo de aumentar o fluxo permeado.

Nos sBRM, os permeadores podem se encontrar submersos no seio do biorreator com efluente e lodo ou em um tanque anexo com efluente tratado sendo vertido. A turbulência para desprendimento de material depositado na superfície da membrana é fornecida pelas bolhas de ar que ascendem no tanque. A energia necessária para o transporte através das membranas pode ser fornecida por uma bomba de sucção na linha de permeado ou pela pressão estática da própria coluna líquida no biorreator, os chamados sBRM por gravidade.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os dois sistemas possuem vantagens e desvantagens. O eBRM são mais simples e tem maior flexibilidade operacional, com maior facilidade de substituição dos permeadores, porém as elevadas velocidade tangenciais para controle do depósito de material sólido na membrana (incrustações), de cerca de 4 m.s^{-1} (UEDA, 1997) implicam em grandes perdas de carga, ou seja alto consumo energético. Além disso, esta alta velocidade pode provocar rompimento de células, aumentando a liberação de compostos intracelulares que adsorvem nos poros das membranas e aumentam a resistência à permeação.

Em geral, os sBRM utilizam membranas na forma de fibras-ocas, pois elas são auto-suportadas, podem ser submetidas a retrolavagem vigorosa, a fabricação é mais simples e possuem uma relação de área/volume maior (CUI, 2003). Os permeadores são geralmente formados por um feixe de fibras-ocas fixas em resinas sólida em ambas as extremidade ou em somente uma delas, envolto de uma carcaça aberta lateralmente em contato com o líquido. O permeado é coletado no interior das fibras.

Há casos em que, o fluxo de permeado nos sBRM é menor, pois este opera com menores diferenças de pressão e, conseqüentemente, há menor propensão à formação de incrustações.

II.8.5 Configuração das membranas utilizadas nos sBRM

As configurações de membranas mais usadas em sBRM são duas: Membranas planas e fibras-ocas, mostradas na Figura II.6.

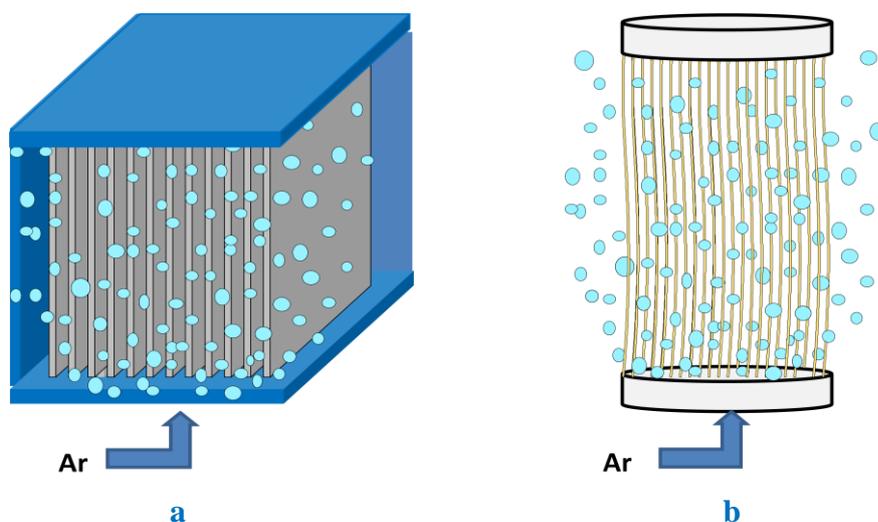


Figura II.6. Tipos de membranas para BRM. (a) planas e (b) fibras-ocas

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

a) Membranas planas

Possuem melhores condições de escoamento ao longo das membranas, porém, com uma baixa razão de área superficial de membrana por volume de permeador. Os permeadores de membranas planas (tipo placa-quadro) foram os primeiros a serem utilizados e possuem uma disposição semelhante a dos filtros prensas.

b) Fibras-ocas

As membranas na forma de fibras-ocas são as mais utilizadas e se caracterizam por apresentarem alta razão de área de membrana por volume de permeador e possibilidade de operar com retrolavagem (bombeio de permeado em fluxo contrário ao da permeação para sua limpeza). Entretanto, as condições de escoamento não são favoráveis ao longo das fibras. O fluxo permeado ocorre do exterior para o interior da fibra, conforme a Figura II.7.

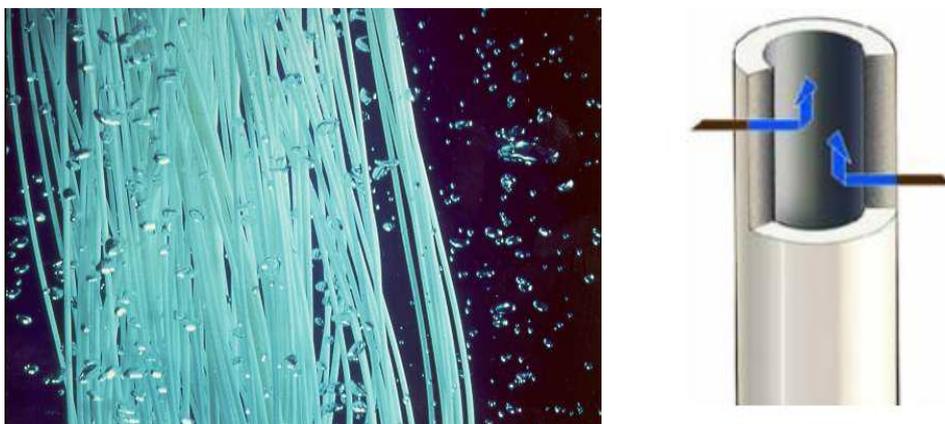


Figura II.7. Detalhe de uma fibra-oca (AUGUSTÍ, 2010)

Cada permeador é formado por feixes de centenas ou milhares de membranas, dispostas verticalmente e fixas em ambas as extremidades ou soltas em uma destas, a superior, como é o caso dos permeadores Puron® da Koch, o que lhes permite mover-se livremente de modo que as partículas acumuladas entre as fibras podem desprender mais facilmente. As fibras não se encontram tensionadas, possuindo uma certa liberdade de movimentação, de maneira que junto à agitação criada pelo borbulhamento de ar, este seja um fator de controle de incrustações adequado.

II.9 Comparação entre LAC e BRM

Os BRM possuem uma série de vantagens em relação aos processos de degradação biológica convencionais, que são enumeradas a seguir:

1) *Número de etapas*

O fluxograma da Figura II.8 mostra evidentemente que o número de etapas utilizadas no tratamento com BRM é inferior ao observado nos LAC. Os BRM eliminam a necessidade de decantador secundário, filtro de areia e etapa de desinfecção.

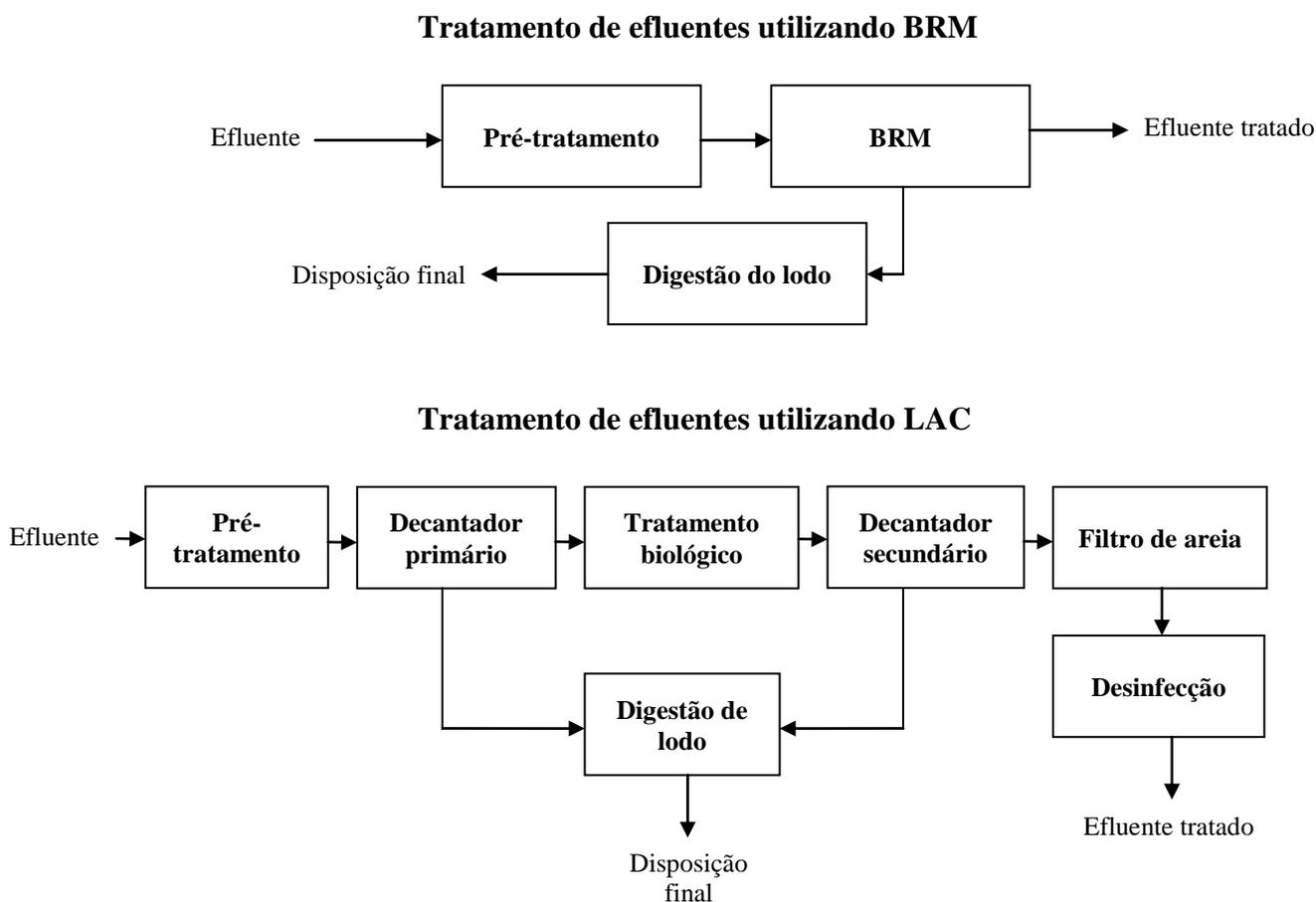


Figura II.8. Etapas dos processos envolvendo BRM e LAC (adaptado de DA SILVA, 2009)

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2) *Concentração de lodo e sensibilidade à carga poluente*

O fato de ser dispensável o uso de decantador secundário, pois os permeadores de membranas realizam a função de reter o lodo completamente, implica no fato de ser possível o uso de maiores concentrações de lodo no biorreator, ou seja, diminuição da relação A/M, permitindo que picos de carga orgânica e cargas com toxicidade sejam aceitos. Também, em BRM é possível operar com maiores tempos de retenção celular (TRC), que permite maior aclimatação do lodo à toxicidade ou elevada carga no efluente.

3) *Volume do biorreator*

Maior concentração de lodo possível, menor volume de biorreator, menores áreas que os LAC, tornando menor o custo e facilitando sua instalação em regiões de grande densidade populacional e escasso espaço físico das grandes metrópoles e grandes indústrias.

4) *Qualidade do efluente*

A qualidade de efluente nos LAC é facilmente afetada por problemas operacionais com relação à sedimentabilidade do lodo. Portanto pode haver um arraste de parte de lodo e areia no clarificado, o que não acontece nos BRM, já que a retenção nas membranas é de 99% (HABERT *et al.*, 2006). A qualidade do efluente também está relacionada à possibilidade de manutenção de uma elevada concentração de lodo no biorreator permite a operações com menores A/M, aumentando a eficiência de degradação e elevados tempos de retenção celular (TRC), que aumenta a aclimatação do lodo aos poluentes. Devido a maior turbulência nos BRM, os flocos apresentam menores dimensões, de forma que a área superficial disponível em contato com a matéria orgânica é maior, possibilitando aos microrganismos metabolizar e adsorver maior carga orgânica.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5) *Produção de lodo*

A operação com elevada concentração de lodo no biorreator leva a um aumento na TRC, onde prevalecem as características da fase respiração endógena, pois há uma diminuição da atividade do anabolismo, sendo a matéria orgânica usada principalmente para manutenção celular e não para formação de material celular. A produção de lodo nos BRM é 50% menor que nos LAC (CHOI, 2002).

6) *Flexibilidade operacional*

A produtividade nos BRM é proporcional à área de membrana, ou seja, quanto maior a área de membranas, maior é a produção de permeado, se tornando um processo modular. Nos BRM comerciais utilizam-se inúmeros permeadores de membrana em um único biorreator. Uma estação de tratamento de esgotos por BRM, instalada no Reino Unido, um dos tanques de aeração desta ETE, com 22 módulos de membranas submersas da empresa Kubota, podem ser observados na Figura II.9.



Figura II.9. Unidade BRM da Kubota no Reino Unido (KUBOTA, 2012)

Para o tratamento de vazões acima da capacidade da estação, é possível modificar as condições de operação de forma a obter maior fluxo permeado ou pode-se manter algum permeador reserva, usando-os apenas nos momentos de pico de vazão. Quando a vazão de operação for menor que a de projeto, permeadores podem ser bloqueados.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os defeitos em membranas são bastante raros, podendo ser facilmente detectados durante a operação. Os sistemas são construídos de modo que, ao ser detectada alteração na qualidade do permeado (podendo-se adotar como parâmetro básico para esta análise a cor ou a turbidez do permeado), o permeador danificado é bloqueado, de forma que o sistema possa continuar a operar com os outros permeadores e, assim que realizada a manutenção no permeador com defeito (ou troca), o mesmo é desbloqueado, voltando a fazer parte do sistema em operação.

II.10 Processos de separação por membranas (PSM)

As membranas são barreiras que separam duas fases e que restringe, totalmente ou parcialmente, a transferência de massa de uma ou várias espécies presentes (STRATHMANN, 1979, HABERT *et al.*, 2006). O transporte através das membranas se dá a partir de uma força motriz. Economia de energia, alta seletividade e simplicidade operacional são algumas das principais vantagens dos PSM em relação aos processos de separação físico-químicos convencionais (DAVIS, 1998, HABERT *et al.*, 2003).

A força motriz nos PSM é o gradiente de potencial químico ou eletroquímico, dependendo do tipo de processo empregado se traduz em diferença de pressão mecânica, osmótica ou de vapor, de concentração ou temperatura. O líquido que permeia através da membrana é denominado de permeado e a fração retida é denominada de concentrado (MULDER, 1996, SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

Atualmente, os 6 PSMs mais desenvolvidos comercialmente, são a diálise (hemodiálise), microfiltração, ultrafiltração, osmose inversa, eletrodiálise e separação de gases. Os processos de micro e ultrafiltração utilizados nos BRM são processos que utilizam como força motriz a pressão mecânica, onde uma membrana porosa promove a separação por exclusão de tamanho das espécies químicas presente na alimentação. A diferença entre os dois processos consiste no tamanho de poros das membranas e na intensidade de pressão aplicada para determinada separação (UF > MF). A MF é capaz de reter partículas de 0,1 a 10 μm de diâmetro, enquanto que a UF retém macromoléculas dissolvidas, como proteínas. As principais aplicações destes processos são para tratamento de efluente e água, clarificação de vinho e cervejas, esterilização bacteriana, recuperação de pigmentos e óleos, concentração de proteínas e purificação de enzimas.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As membranas utilizadas nesses processos são sintetizadas a partir de materiais poliméricos ou cerâmicos e apresentam morfologias isotrópicas (simétricas) ou anisotrópicas (assimétricas). As membranas anisotrópicas podem ser porosas ou apresentar uma camada superior densa e fina, denominada de pele. Essas membranas anisotrópicas podem ser ainda classificadas em integrais, quando essas duas regiões são compostas pelo mesmo material, ou compostas quando um material diferente da matriz é utilizado para a formação da pele, conforme a Figura II.10.

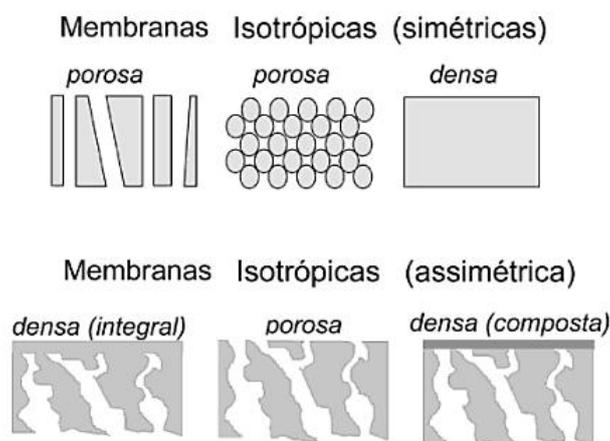


Figura II.10. Representação transversal das diversas morfologias de membranas
(HABERT *et al.*, 2006)

A fabricação de membrana pode ser em duas geometrias: plana e cilíndrica. As membranas planas são acondicionadas em módulos de permeação do tipo placa/quadro e espiral. As membranas cilíndricas darão origem aos permeadores de fibras-ocas ou capilares e tubulares (HABERT *et al.*, 2003, MULDER, 1996, STRATHMANN, 2001).

II.10.1 Operação nos PSM

Existem duas formas de operação nos PSM, escoamento da alimentação paralelo ou perpendicular (*dead-end*) a superfície da membrana. A operação em fluxo tangencial dá origem a duas correntes: permeado e concentrado.

O fluxo de permeado é definido como o volume que permeia pela membrana por unidade de tempo (vazão, Q) e unidade de área de membrana (A), expresso geralmente em $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ (Equação II.1).

$$J_p = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação II.1}$$

Admitindo-se que a membrana é inerte em relação ao solvente e não se deforma pela ação da pressão, para os processos que utilizam pressão mecânica como força motriz, o fluxo de solvente puro é proporcional a pressão aplicada, segundo a Equação II.2.

$$J_p = L_p \cdot \Delta P \quad \text{Equação II.2}$$

Onde ΔP é a diferença de pressão entre a membrana (pressão de filtração) e L_p é a constante de proporcionalidade, chamada de permeabilidade hidráulica e expressa geralmente em $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot bar^{-1}$.

O desempenho do processo é medido através da seletividade e do fluxo de permeado obtido em uma determinada pressão de filtração, sendo o objetivo obter maior fluxo possível com menor pressão, ou seja, menor custo energético.

Na permeação com solvente puro, a única resistência ao escoamento é a da membrana. No tratamento de misturas ocorrem os fenômenos de polarização de concentração e de incrustação. O primeiro fenômeno é intrínseco ao processo de separação e ocorre rapidamente, enquanto o último é caracterizado pelo aumento de resistência ao transporte com o tempo, devido ao acúmulo de espécies retidas pela membrana em sua superfície (torta) e nos poros por restrição (bloqueio de poros) ou adsorção. O aumento de resistência ao transporte com o tempo causa queda de permeabilidade das membranas. A Figura II.11 mostra o comportamento do fluxo de permeado em função da diferença de pressão através da membranas.

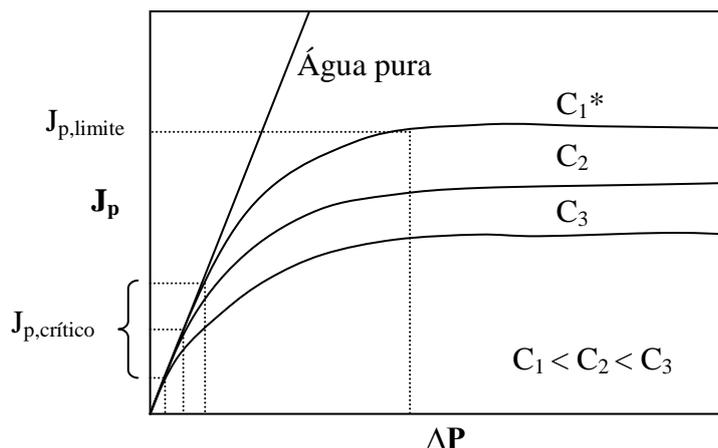


Figura II.11. Perfil do fluxo permeado em função da diferença de pressão através da membrana (adaptado de VISVANATHAN *et al.*, 2000)

*C – Concentração da suspensão

Durante o processo de permeação um ou mais componentes da mistura são retidos total ou parcialmente pela membrana, e as suas concentrações se tornam mais elevadas próximas à superfície da membrana que no seio da fase, então, um fluxo difusivo da espécie é estabelecido na direção oposta ao escoamento convectivo. A Figura II.12 ilustra esse fenômeno. O balanço de massa para a espécie retida no estado estacionário é descrito pela Equação II.3.

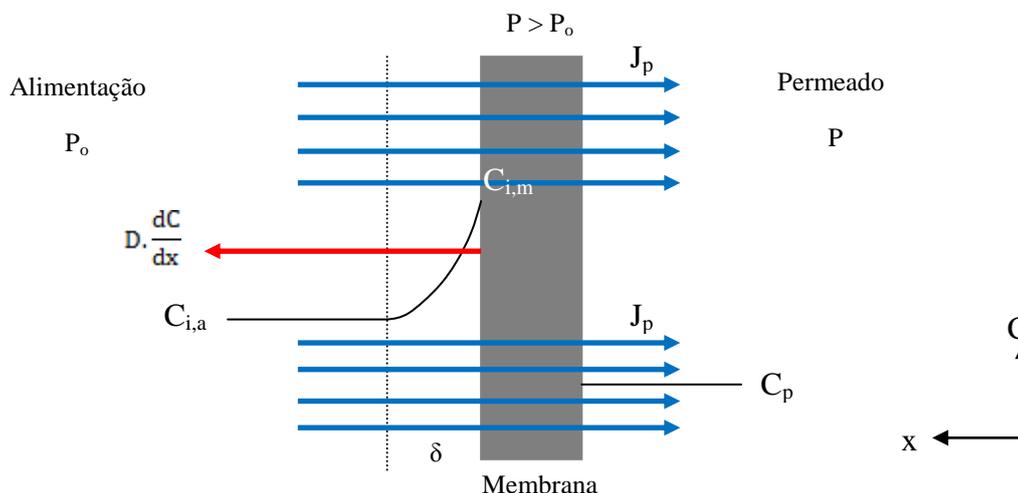


Figura II.12. Fenômeno de polarização por concentração

$$J_p \cdot C - J_p \cdot C_p + D \cdot \frac{dC}{dx} = 0 \quad \text{Equação II.3}$$

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Onde J_i é o contra-fluxo de espécie retida ($\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), D é o coeficiente de difusão binária ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), $\frac{dC}{dx}$ é o gradiente de concentração de retido entre a superfície da membrana e o seio da alimentação, J_p é o fluxo de permeado ($\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), C é a concentração de retido no seio da alimentação (kg.m^{-3}), C_p a concentração de retido na corrente de permeado (kg.m^{-3}).

De acordo com a Figura II.11, a pressões baixas, a permeação de suspensão, por exemplo, praticamente não é influenciada pelo efeito de polarização, reduzindo a possibilidade da formação de incrustações. Nesta condição o perfil de fluxo de permeado com filtração da suspensão se confunde com o perfil de permeação de solvente puro pela membrana. Existe uma pressão a partir da qual, os efeitos de incrustações começam a se intensificar, sendo denominada de pressão crítica e o fluxo nessa pressão é chamado de fluxo crítico. O fluxo crítico é possivelmente um dos parâmetros operacionais mais importantes em alguns PSM, inclusive nos BRM. Acima do fluxo crítico, é observada a maior intensidade na formação de incrustações nas membranas, pois nesta condição existe maior tendência de arraste de partículas para a superfície da membrana. O fluxo crítico é função das características do meio, como concentração, carga, tamanho de sólidos e das condições hidrodinâmicas.

Elevando-se mais ainda a pressão na operação, chega-se a um ponto em que a força motriz é compensada pela espessura de torta formada na superfície da membrana, então o fluxo se torna estacionário, sendo denominado fluxo limite.

Em uma operação a pressão ou vazão fixa, a resistência total ao escoamento líquido aumenta com o tempo com o progressivo de depósito de material na superfície da membrana. O aumento de resistência hidrodinâmica da região próxima à membrana é descrito pelo modelo de resistências em série. Neste modelo, a força motriz é contraposta pela resistência da membrana, pela polarização por concentração e pelas incrustações. O fluxo de permeado através da membrana pode ser descrito pela lei de Darcy, como expresso pela Equação II.4 (LEE *et. al.*, 2003).

$$J_p = \frac{\Delta P}{\mu.R_T} \quad \text{Equação II.4}$$

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Onde J_p é o fluxo de permeado geralmente expresso em $L.h^{-1}.m^{-2}$, ΔP a diferença de pressão (pressão de filtração) aplicada em bar, μ é a viscosidade do meio e R_T é a resistência total em m^2 .

A resistência total ao transporte (R_T) é soma das contribuições das resistências intrínseca da membrana (R_m) e de incrustações, segundo os mecanismos de adsorção nos poros (R_a), de bloqueio de poros (R_{bp}) e de formação de torta sobre a superfície da membrana (R_t), além da contribuição do fenômeno de polarização por concentração (R_{pc}). A Equação II.5 expressa R_T .

$$R_T = R_m + R_a + R_{bp} + R_t + R_{pc} \quad \text{Equação II.5}$$

Quando a resistência total ao transporte se torna elevada, a redução do fluxo de permeado pode provocar a inviabilização técnica e econômica do processo, sendo necessário a limpeza das membranas. Autores, como COTÊ *et al.* (1997), BOUHABILA *et al.* (2001) e JUDD (2006) relataram que o uso das técnicas de retrolavagem e relaxação são adequadas para recuperação da permeabilidade das membranas. Na relaxação, há uma pausa na filtração e os sólidos depositados na membrana soltam-se e, na retrolavagem, parte do permeado armazenado é injetado por dentro das membranas para remoção total ou parcial dos mesmos sólidos depositados na superfície das fibras-ocas. A retrolavagem também pode ser feita com o uso de ar, ao invés do permeado.

II.11 Incrustações (*fouling*) nas membranas dos BRM

Nos BRM, a produtividade do processo de permeação é monitorada pelo fluxo de permeado ou pela permeabilidade da membrana. A queda de fluxo de permeado é resultado da influência de dois fenômenos inerentes aos PSM, o de polarização por concentração e incrustações (*fouling*), sendo o primeiro inevitável e o segundo controlável. A principal limitação dos BRM consiste nos custos operacionais em função do fornecimento de ar para controle de incrustações, das paradas do processo para limpezas, traduzindo-se no tempo perdido de processo, no uso de bombas para retrolavagem e produtividade total reduzida devido ao uso do permeado armazenado na

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

retrolavagem, além da redução de vida útil das membranas devido às incrustações irreversíveis (LIAO *et al.*, 2004).

Os principais mecanismos que somados resultam na resistência ao transporte por incrustações, são:

a) Bloqueio de poros

O bloqueio de poros das membranas é realizado por sólidos com granulometria menor que o tamanho dos poros ou por macromoléculas, como proteínas, polissacarídeos e polímeros que envolvem as células de microrganismos do lodo, as substâncias poliméricas extracelulares (EPS).

b) Adsorção

Consiste na adsorção de moléculas solúveis que possuem afinidade química com o material da membrana. Estas moléculas se adsorvem na superfície e reduzem o tamanho dos poros, dificultando a permeação. Geralmente essas moléculas são produzidas pelas células de microrganismos do lodo e são excretadas de seu interior quando estas se rompem, os chamados produtos microbianos solúveis (SMP).

c) Formação de torta

O material retido na superfície das membranas se acumula e forma uma camada de espessura variável com o tempo de operação. A pressão de filtração auxilia na compactação da camada. A formação de torta é controlada pela hidrodinâmica da região próxima a membrana. O ar tem função de promover desprendimento de parte desse material.

A Figura II.13 esquematiza os mecanismos de incrustação.

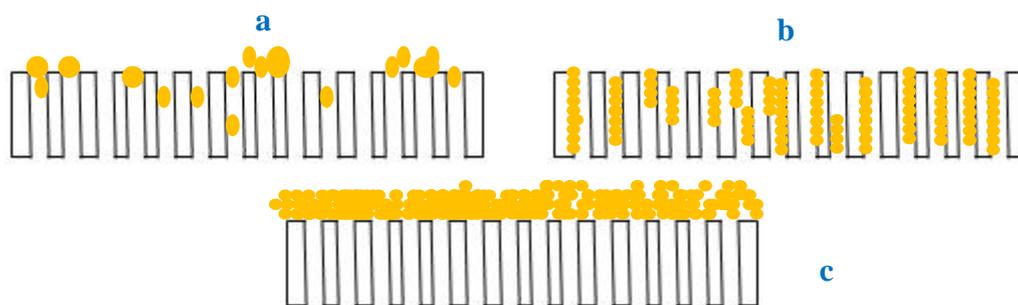


Figura II.13. Mecanismos de incrustações. (a) Bloqueio de poros, (b) adsorção e (c) formação de torta

II.12 Fatores que afetam a intensidade de incrustações

Existe uma extensa lista de parâmetros que influencia a formação de incrustações na membrana, que possuem relações complexas entre si. A Figura II.14 mostra estes parâmetros, e como eles estão relacionados no processo.

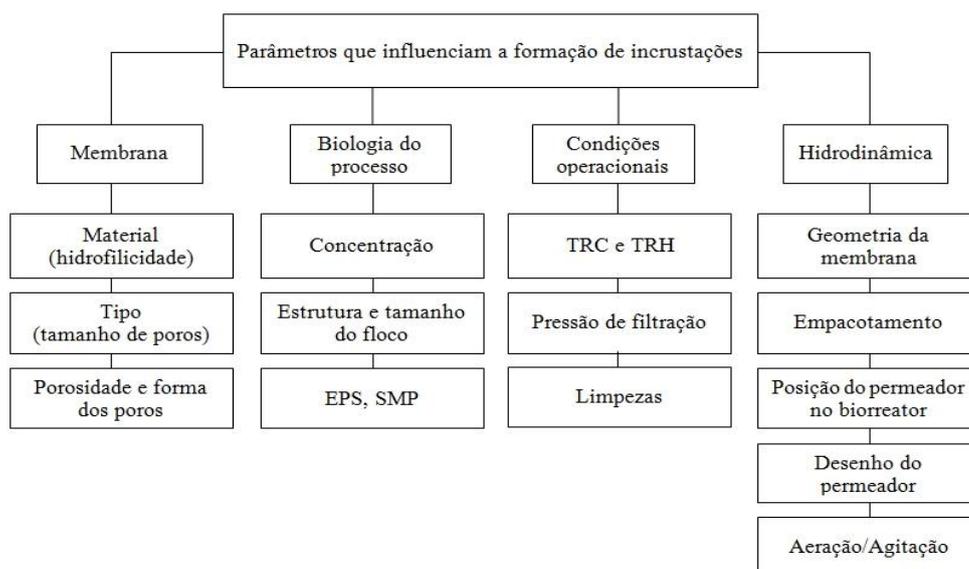


Figura II.14. Parâmetros que influenciam na formação de incrustações (adaptado de LIAO *et al.*, 2004)

II.12.1 Influência dos parâmetros relacionados às membranas

Com relação às membranas no BRM, as incrustações são influenciadas pelo tipo de membrana utilizada, seja uma membrana de MF ou UF, por exemplo, que possuem

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

poros de tamanho médio diferentes, por sua porosidade e rugosidade. Estes fatores não atuam de forma isolada no processo.

a) *Material*

O tanque de degradação dos BRM é majoritariamente composto por substâncias de caráter hidrofóbico, que variam de hidrofobicidade conforme sua característica biológica (CHOI *et al.*, 2002) . Portanto, membranas constituídas de materiais hidrofóbicos possuem maior potencial a sofrerem incrustações do que de materiais hidrofílicos. LEE *et al.* (2003) concluíram que a hidrofobicidade do meio nos BRM esta relacionada à concentração de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) e ao tempo de retenção celular (TRC).

O polifluoreto de vinilideno (PVDF), polímero hidrofóbico, é um material amplamente usado em membranas de MF e UF aplicadas em BRM, devido as suas excelentes propriedades mecânicas (WANG *et al.*, 2001). Diversos estudos recentes visam o enxerto de grupos funcionais na superfície dessas membranas a fim de modificar suas propriedades hidrofóbicas. O polietileno glicol (PEG) é um dos materiais mais utilizados como polímeros de enxerto por possuir características hidrofílicas, que reduz a interação de diferentes solutos com a membrana, diminuindo assim a formação de incrustações (LI *et al.*, 2005). A hidrofiliabilidade de membranas de polipropileno (PP), PVDF, poliácridonitrila (PAN) e polietersulfonas (PES) foram acentuadamente aumentadas pela modificação com PVA (DU *et al.*, 2009, LIU *et al.*, 2009, LI *et al.*, 2010, YOON *et al.*, 2009). O PVA é muito hidrofílico não tóxico, biocompatível, possui excelentes propriedades mecânicas e estabilidade térmica. LIU *et al.* (2012) estudaram os compósitos de TiO₂ e PVA com poliésteres e concluíram que essas membranas tinham excelentes propriedades hidrofílicas, com baixíssima adsorção de EPS.

b) *Tipo de membrana (tamanho médio de poros)*

O aumento de resistência por incrustações numa operação é diretamente relacionado à quantidade de material retido na membrana. A distribuição de tamanho de poros numa membrana se relaciona com as características do meio, como a distribuição de tamanho das espécies presentes, e influencia na intensidade com qual estes ficam retidos. Se o tamanho da espécie for menor que o tamanho do poro, seu bloqueio é

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

esperado, portanto membranas de MF, cujos poros são mais largos, possuem maior potencial para sofrer incrustações por bloqueio de poros. Por outro lado, membranas com pequenos poros rejeitam maior quantidade de espécies, resultando em uma camada de torta com alta resistência ao fluxo de permeado quando comparado a membranas de poros maiores. Entretanto este tipo de incrustação é mais reversível, mais facilmente controlada por turbulência e passível de remoção por limpezas que as incrustações por bloqueio de poros (SILVA, 2009).

HONG *et al.* (2002) estudaram quatro tipos de membranas de polisulfona, duas de UF, com rejeição de 10 e 30 kDa e duas de MF, com tamanho médio de poros de 0,01 mm e 0,1 mm, e observaram que a queda de fluxo de permeado aumentou com o tamanho de poros das membranas.

Outros fatores devem ser levados em consideração, com o tempo de experimento. HE *et al.* (2005), em estudo com membranas de UF com retenção nominal de massa molar de 20 a 70 kDa, observaram que, em testes com longas durações (100 dias) a membrana de 70 kDa apresentou a maior perda de permeabilidade por conta de incrustações (94% de redução da permeabilidade da membrana à água pura) com em relação às demais.

c) *Porosidade e forma dos poros*

FANG *et al.* (2005) atribuíram à porosidade da membrana o comportamento da formação de incrustações no estudo com quatro membranas de poros semelhantes (em torno de 0,2 μm), operadas sob as mesmas condições. Uma membrana com alta densidade de poros cilíndricos pequenos apresentou menor propensão as incrustações por bloqueio de poros, quando comparada com as membranas com microestrutura esponjosa.

KIM *et al.* (2005) observaram que membranas microporosas que possuíam poros com forma elíptica resultavam em menor formação de incrustações do que membranas com poros na forma circular.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.12.2 *Influência dos parâmetros relacionados à microbiologia do processo*

a) *Concentração de lodo*

É de se esperar que quanto maior for a concentração de lodo nos BRM, maior é o acúmulo de material na superfície da membrana, ou seja, maior resistência ao transporte. No entanto, esse efeito pode ser minimizado à medida que as condições hidrodinâmicas são melhoradas, aumentando a turbulência na região próxima as membranas.

Os resultados na literatura são contraditórios. Segundo ROSENBERGER e KRAUME (2002), não houve variação na intensidade de incrustações apreciável variando-se a concentração de lodo, em um BRM, de 2.000 a 24.000 mg.L⁻¹. HONG *et al.* (2002) realizaram testes de permeação com membrana de MF a pressão de filtração constante de 20 kPa com concentrações de lodo de 3.600, 6.800 e 8.400 mg.L⁻¹, e os perfis de queda de fluxo de permeado se apresentaram semelhantes. Já TRUSSEL *et al.* (2007) observaram que o aumento da concentração de lodo de 14.000 para 18.200 mg.L⁻¹ causou uma diminuição da permeabilidade das membranas em 10%. Alguns autores afirmam que existe uma concentração crítica, acima da qual, a permeabilidade das membranas declina rapidamente com o depósito de material sobre a superfície. ROSS *et al.* (1990), por exemplo, observaram que a concentração crítica de lodo foi de 40.000 mg.L⁻¹, enquanto YAMAMOTO *et al.* (1989) determinaram que a faixa crítica de concentração de lodo fica entre 30.000 e 40.000 mg.L⁻¹, que varia com as condições operacionais.

Os BRM possuem como vantagem o fato de se poder trabalhar com maiores concentrações de lodo, devido a ausência de decantador secundário, porém, principalmente em SMBR, concentrações elevadas podem dificultar a promoção de turbulência responsável por controlar o depósito de espécies na superfície da membrana devido a alta viscosidade do meio, além de que os valores de remoção de 90 a 95% DQO podem ser atingidos para as concentrações de lodo adequadas, sem necessidade de concentração mais elevada. Comercialmente, a faixa de concentração adequada é de 15.000 a 30.000 mg.L⁻¹ (VIANA, 2004).

Apesar da deposição de sólidos suspensos sobre a superfície da membrana, formando uma torta, ser o fator que mais afeta o fluxo em um BRM, a espessura dessa torta pode ser reduzida melhorando-se as condições hidrodinâmicas. Já as partículas

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

coloidais e solúveis contribuem para o bloqueio total ou parcial dos poros, podendo afetar o desempenho da membrana de modo irreversível.

b) *Estrutura e tamanho dos flocos*

A estrutura e tamanho dos flocos no BRM são dependentes das condições operacionais, como TRC, TRH, razão A/M e intensidade de aeração.

O floco biológico consiste em uma estrutura heterogênea composta principalmente por microrganismos, uma fração de partículas orgânicas e inorgânicas presentes nos efluentes e substâncias poliméricas extracelulares (EPS). A função do EPS na formação do floco é de agregação entre as células.

Estruturalmente, existem quatro tipos de flocos de lodo: normal, filamentosos e granular. O floco normal possui baixa concentração de bactérias filamentosas, tornando-o bem definido. O lodo filamentosos se caracteriza pela elevada concentração de bactérias filamentosas, resultando em flocos irregulares, cujo tamanho médio é de 30 µm. O granular possui partículas maiores, com média de 100 µm. Flocos menores formam tortas mais densas e compactas segundo MA *et al.* (2006).

As condições de operação dos BRM determinam a estrutura dos flocos. Elevada turbulência podem promover quebra desses flocos e provocar a formação de tortas mais compactas na superfície das membranas. A turbulência nos BRM, provocado por aeração, agitação e outros meios, deve ser suficiente para o controle da espessura da torta sobre a membrana, entretanto, não deve causar quebra acentuada dos flocos. A quebra dos flocos provoca a liberação de EPS (KIM *et al.*, 2001).

Em BRM, os flocos do lodo são geralmente consideravelmente menores que os flocos de processos de LAC (DEFRANCE *et al.*, 2000, SMITH *et al.*, 2003).

c) *Presença de EPS e SMP*

As substâncias poliméricas extracelulares (EPS) e os produtos microbianos solúveis (SMP) são considerados os principais agentes de incrustação nos BRM pela intensa influência na formação de incrustações. As EPS e SMP são basicamente formadas por proteínas e polissacarídeos, mas são encontrados em sua composição, ácidos nucleicos, lipídeos, ácidos húmicos, entre outras substâncias, sendo os EPS encontrados na superfície externa as células que compõem o lodo, enquanto que os

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

SMP se encontram no interior destas. Os SMP são liberados pelas células em resposta a alguma condição ambiental ou operacional e/ou durante a lise celular correspondendo à maior parte do efluente de processos biológicos (AUGUSTÍ, 2010). A Figura II.15 ilustra a presença dessas substâncias no lodo.

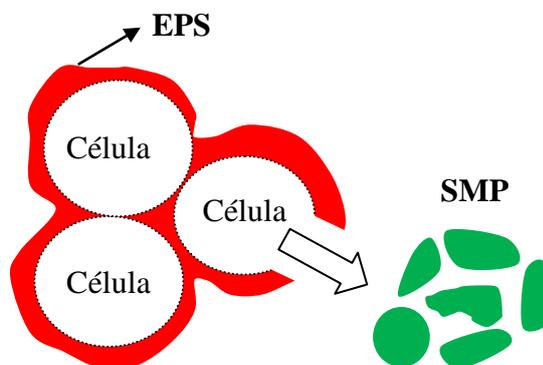


Figura II.15. EPS e SMP e sua relações com as células no lodo

A maioria dos autores identificou os EPS como um dos fatores biológicos mais importantes na contribuição para formação de incrustações (MENG *et al.*, 2006), enquanto que, alguns afirmam que os SMP influenciam mais (ROSEMBERG *et al.*, 2006).

As EPS são substâncias produzidas pelas células que possibilitam que estas formem flocos, funcionando como uma espécie de uma matriz adesiva e coesiva, e desempenhando um papel importante no declínio do fluxo de permeado nos BRM, pois estes flocos ou EPS livres aderem à superfície das membranas, formando a incrustação (CHANG e LEE, 1998, CHO *et al.*, 2005). A correlação entre EPS e ocorrência de incrustações é complexa e resultados controversos são encontrados na literatura. Segundo BOUHABILA *et al.*, (2001), ROSENBERGER e KRAUME (2002), KIM *et al.* (2001), CHO *et al.* (2004) e TIAN *et al.* (2012), as EPS são as principais responsáveis pela incrustação nos BRM e que o aumento da concentração de EPS intensifica o bloqueio dos poros, contrariando MIKKELSEN *et al.* (2002). Diversos fatores, tais como tipo de efluente, carga de lodo, idade do lodo, concentração de sólidos em suspensão, estresse mecânico e a fase de crescimento microbiano influenciam a concentração e as características das EPS segundo DREWS *et al.* (2006). JI e ZHOU (2006) observaram que a produção de EPS aumenta com a intensidade de aeração. O aumento da taxa de aeração acarreta no aumento das forças de cisalhamento que pode

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

levar à quebra dos flocos, com conseqüente liberação de EPS. A composição dos EPS também é de fundamental importância para explicar a intensidade de incrustações por estas substâncias. A idade do lodo diretamente relaciona a relação de proteínas/polissacarídeos nos BRM. Para lodos que apresentam idade mais elevada e baixa relação A/M, a concentração de carboidratos é baixa devido à baixa concentração da fonte de carbono disponível enquanto que a quantidade de proteína é alta devido à lise celular (LEE *et al.*, 2003). TIAN *et al.* (2012) observaram que, nas camadas incrustantes nas membranas de BRM, o acúmulo preferencial é de proteínas. Esses materiais podem permanecer adsorvidos na membrana mesmo após a limpeza física. MEZGER *et al.* (2007) realizaram um estudo sobre a caracterização de biopolímeros depositados sobre a membrana de um BRM. Após filtração, as camadas de incrustação foram classificadas em camada superior, camada intermediária e camada inferior, e caracterizadas individualmente. Os resultados mostraram que a camada superior era uma camada porosa, com composição semelhante à dos flocos. A camada intermediária era resultado dos agregados de células e EPS, com elevada concentração de polissacarídeos. A camada inferior representava a fração responsável por incrustações irreversíveis e tinha uma alta concentração de proteínas (SMP).

MENG *et al.* (2006), HUANG *et al.* (2000), ROJAS *et al.* (2005) e LEE *et al.* (2002) observaram que os SMP contribuem significativamente para a incrustação de membranas nos BRM. Os SMP preenchem os espaços entre as partículas da torta, provocando seu aumento de resistência (TIAN *et al.*, 2012). Já LEE *et al.* (2003) concluíram que a influência dos SMP pode ser desprezada, tornando esses resultados um tanto contraditórios.

Em geral, os estudos apontam que a presença de EPS e dos SMP influenciam na incrustação de membranas nos BRM e deixam como informação a importância do controle da composição de EPS e SMP em BRM.

II.12.3 Influência dos parâmetros relacionados as condições operacionais

a) TRC e TRH

Nos BRM, o tempo de retenção celular (TRC) e tempo de retenção hidráulica (TRH) são parâmetros independentes entre si, diferentemente dos LAC. Segundo HAN *et al.* (2005) e LEE *et al.* (2003), elevadas TRC provocam maior incrustação nas

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

membranas dos BRM através do aumento de concentração de sólidos suspensos, redução da relação A/M, alterando as características da biomassa e aumento de lise celular por morte liberando SMP. Entretanto, incrustações tem sido relatadas com baixas TRC (TRUSSEL *et al.*, 2006) e resultados satisfatórios já foram reportados mesmo com elevados TRC (BOUHABILA *et al.*, 1998 e NUENGGJAMNONG *et al.*, 2005).

A produção de lodo é maior para pequenos TRH, devido à maior disponibilidade de nutrientes aos microrganismos (A/M), aumentando assim a incrustação. Assim, em uma operação no BRM, não se pode atingir o menor TRH e a mínima produção de lodo simultaneamente. Portanto, quando a produção de lodo é minimizada, os custos com aeração são maximizados e vice-versa. Existe um ponto ótimo em que o custo operacional total é minimizado.

b) Pressão de filtração

Obviamente é de se esperar que quanto maior for a força motriz ao escoamento, maior será a deposição de materiais sobre a membrana. GÜNDER e KRAUTH (1998) e HONG *et al.* (2002) observaram este comportamento. Os autores ressaltam que, quanto maior a pressão de filtração, mais rápido as partículas se depositam sobre a superfície da membrana. Após atingir o fluxo limite, o fluxo de permeado é reduzido, devido ao aumento da espessura da torta sobre a membrana e a sua compactação (HONG *et al.*, 2002).

Deve-se selecionar a pressão de filtração adequada na operação de BRM. Autores, como FIELD *et al.* (1995) e BACHIN *et al.* (2006) apontaram que, para operações em pressões de filtração sub-críticas, não há ocorrência de incrustações severas, que influenciam no custo operacional. CHO e FANE (2002) avaliaram a operação abaixo do fluxo crítico, de uma operação utilizando membranas de MF, concluindo que BRM podem ser operados por períodos longos a fluxo constante, desde que o fluxo esteja substancialmente abaixo do fluxo crítico. Segundo BEZERRA e MATSUMOTO (2011) e LE CLECH *et al.* (2006), BRM equipados de membranas de fibras-ocais de ultrafiltração e baixas diferenças de pressões (inferior à 0,1 bar) operam bem em fluxos na ordem de 15 a 20 L.m⁻².h⁻¹, tratando esgotos sanitários. A partir desses valores, a ocorrência da deposição irreversível, que exige paradas para limpeza

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

química, passa ser muito frequente, comprometendo a capacidade de produção do sistema e inviabilizando o projeto.

c) *Limpezas física e química*

As técnicas de limpezas tem como função recuperar a permeabilidade das membranas, reduzida por conta das incrustações. Existem as limpezas física e química.

A retrolavagem é a técnica de limpeza física mais usada, pois é bastante eficiente para recuperação do fluxo. A retrolavagem consiste de injeção de permeado acumulado por dentro das fibras-ocas, forçando o desprendimento de parte do material aderido em sua superfície externa. A retrolavagem acoplada a períodos de relaxamento, que se designa por um período em que a permeação é interrompida, mas a aeração do biorreator continua a desprender o material aderido na membrana, se mostrou bastante favorável no controle da formação de incrustações segundo BOUHABILA *et al.* (2001) e CHUA *et al.* (2002). As incrustações reversíveis são facilmente removidas pelas técnicas de retrolavagem e relaxamento (WU *et al.*, 2012). A frequência e a vazão de retrolavagem estão relacionadas às condições de operação dos BRM e às características do efluente a ser tratado. CÔTÉ *et al.* (1997) mostraram que foi possível obter uma operação com fluxo permeado estável, durante longos períodos de tempo, com o uso de retrolavagem. Para JUDD (2002) o uso de retrolavagem e aeração é o método mais eficiente para remoção de incrustações reversíveis, não permitindo ocorrer o aumento exagerado da resistência ao transporte. A frequência de retrolavagem em BRM deve ser avaliada e otimizada para uma operação sustentável.

Tendo em vista que a retrolavagem não é capaz de retirar completamente o material incrustado do interior dos poros das membranas, utiliza-se a limpeza química como estratégia. Geralmente são usadas soluções de NaOH, HCl, ácido cítrico, ácido oxálico e NaOCl para limpeza química (LE-CLECH *et al.*, 2006). Deve-se ter conhecimento prévio do tipo de espécie incrustante que se deseja retirar para a seleção correta da solução de limpeza. Os agentes de limpeza têm que ser capazes de dissolver o material retido pela membrana e removê-los da sem causar danos à mesma.

Segundo KOPSER *et al.* (2000), a limpeza das membranas Zeeweed®, da empresa GE, deve ser realizada a cada seis a doze meses. A empresa Kubota recomenda que a limpeza química de seus módulos seja realizada a cada seis meses.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A vida útil das membranas depende da frequência e da duração da limpeza. Conhecer a natureza da incrustação é fundamental para a seleção de técnicas de limpeza mais eficientes e econômicas.

II.12.4 Influência dos parâmetros relacionados à hidrodinâmica

A hidrodinâmica nos BRM é o parâmetro mais importante para o controle de incrustações. Agentes promotores de turbulência e o projeto de permeadores são fatores que, de maneira geral, criam condições hidrodinâmicas favoráveis à redução da resistência ao transporte por incrustações e por polarização de concentração. Maiores velocidades de escoamento em regiões próximas às membranas criam forças de cisalhamento que são capazes de remover parte do material aderido em sua superfície. Os principais fatores modificadores da hidrodinâmica em BRM são: aeração, agitação e projeto de permeadores, que envolve a densidade de empacotamento das fibras-ocas, que é a razão da área de membranas por volume de permeador, e o tipo de injetor de ar.

a) Aeração

As bolhas de ar exercem duas funções nos BRM: fornecer oxigênio na forma dissolvida necessária à degradação de matéria orgânica pelos microrganismos e promover aumento de velocidade tangencial na região próxima as membranas dos permeadores, o que gera tensões de cisalhamento, que são responsáveis pela remoção parcial ou mesmo total da torta (UEDA *et al.*, 1997, CUI *et al.*, 2003, TRUSSEL *et al.*, 2006, KIM *et al.*, 2008, PARK *et al.*, 2010). A redução da formação de incrustações pode ser conseguida através do controle a hidrodinâmica do escoamento bifásico na região próxima à membrana. Este tipo de escoamento fornece altas tensões de cisalhamento perto da superfície da membrana. A velocidade tangencial é promovida pelo fluxo ascendente de bolhas de ar, de forma que a convecção e a contra-difusão das espécies determinam a intensidade da formação de incrustações. O aumento da velocidade tangencial aumenta o cisalhamento na superfície das membranas e melhora o transporte das espécie em direção ao seio do biorreator.

Estudos apontam que, a resistência por incrustações diminui com aumento da intensidade de aeração até um determinado valor, a partir do qual o aumento da vazão de ar não influência mais na formação de incrustações (CABASSUD *et al.*, 1997,

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

UEDA *et al.*, 1997, CHANG e FANE, 2000, LIU *et al.*, 2000, LE-CLECH *et al.*, 2003). É fundamental a determinação do valor ótimo de vazão de ar para que se limite os custos de operação dos BRM (BRAAK *et al.*, 2011). BOUHABILA *et al.* (1998) estudaram permeações em BRM com diferentes vazões de ar (20, 150, 400, 600 e 800 L.h⁻¹) e observaram que o fluxo de permeado em função da pressão de filtração utilizada não foi alterado para vazões de ar acima de 150 L.h⁻¹. CHANG e FANE (2000) observaram que vazões de ar acima de 2 L.min⁻¹ para filtração de uma suspensão de 5 g.L⁻¹, de fermento biológico, a pressão constante não aumentaram a vazão de permeado. CHUA *et al.* (2002) filtraram uma suspensão de concentração de lodo de 15 g L⁻¹ e constataram que a taxa de incrustação diminuiu exponencialmente quando a velocidade superficial do gás aumentou de 0,02 para 0,15 m.s⁻¹. DELGADO *et al.* (2008) obteve o mesmo comportamento da taxa de incrustação contra a intensidade média de cisalhamento devido ao borbulhamento de ar. Estes resultados evidenciam a existência de um valor limite para vazão de ar para além do qual nenhuma melhoria na filtração pode ser alcançada. A existência de um valor limite ou um de platô nas taxas de incrustação em função da intensidade de aeração pode estar ligada ao fato de que a velocidade tangencial de ascensão das bolhas não é proporcional a vazão de ar, além de que, a forma das bolhas podem ser alteradas, o seu tamanho e o seu número, o que influencia na coalescência. Em um BRM piloto, SOFIA *et al.* (2004) verificaram que, para além de um certo valor, o efeito do aumento da vazão de ar na velocidade tangencial de bolhas foi insignificante. NGUYEN *et al.* (2008) observaram, em um BRM com fibras ocas, que a velocidade tangencial de ascensão de bolhas aumentou em 34% quando o fluxo de ar foi aumentada de 20 para 50 Nm³.h⁻¹ e em cerca de 6% quando se variou de 50 a 90 Nm³.h⁻¹. LE-CLECH *et al.* (2003) filtraram uma suspensão de 4 g.L⁻¹, de fermento biológico, em um sBRM com permeador de membranas tubulares e relataram que o fluxo crítico aumentou de 16 para 51 L.h⁻¹.m⁻² variando a velocidade superficial de ar de 0,07 para 0,22 m.s⁻¹. É importante ressaltar que os valores apresentados de vazão de ar e velocidade tangencial de ascensão de bolhas não podem ser comparados diretamente, devido ao fato de que os experimentos foram realizados em condições distintas. Apenas as tendências observadas com relação a modificações na injeção de ar podem ser comparadas entre si.

Atrelado a isto, alguns autores observaram que operação em BRM com vazões de aeração muito elevadas podem promover o efeito contrário do desejado, que é o aumento da resistência por incrustações devido à quebra dos flocos que, uma vez

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

depositados, contribuem para a diminuição de porosidade da torta, além de liberar EPS e SMP no meio (WISNIEWSKI e GRASMICK, 1998, JI e ZHOU, 2005, PARK *et al.*, 2005, MENG *et al.*, 2008). O uso de valores elevados de vazão de ar elevadas também pode diminuir a espessura da torta formada sobre as membranas, tornando-as menos protegida de partículas finas que provocam incrustações internas irreversíveis, como incrustações por bloqueio de poros e adsorção por EPS e SMP (WU *et al.*, 1999). Devido a este problema em relação à aeração, vários estudos em estratégia de aeração foram realizados. NAGAOKA e NEMOTO (2005), PSOCH e SCHIEWER (2005) e UEDA *et al.* (1997) estudaram o uso da aeração intermitente e resultados contraditórios foram reportados. UEDA *et al.* (1997) sugerem que a variação na intensidade de aeração tem um efeito positivo no controle de incrustação. NAGAOKA e NEMOTO (2005) relataram que a incrustação foi razoavelmente controlada em ciclos de aeração de 10 minutos em 10 minutos. Enquanto PSOCH e SCHIEWER (2005) observaram que houve forte intensidade de formação de incrustações uma vez que a aeração era interrompida. Nesses estudos não foi levada em conta a distinção entre incrustações reversíveis e irreversíveis. WU *et al.* (2012) estudaram o efeito da aeração cíclica em BRM e, comparado com operações com vazão de ar constante, e os resultados indicaram uma maior taxa de incrustação geral com aeração cíclica do que com aeração constante. No entanto, uma percentagem menor de incrustações irreversíveis foi observada para o modo cíclico, sendo a recuperação da membrana mais viável, pois esta pode ser mais facilmente recuperada com limpezas físicas.

A intensidade de aeração tem efeitos diferentes no controle de incrustações reversíveis e irreversíveis em BRM. As resistências ao escoamento por incrustações reversíveis, que são advindas do fenômeno de polarização por concentração e da formação de torta na superfície das membranas, são bem sensíveis à intensidade de aeração. Já as resistências causadas por incrustações irreversíveis, que são associadas à adsorção de partículas solúveis (SMP) e ao bloqueio de poros por coloides (EPS), não sofrem grandes influência por uso de ar (CHANG, 2011).

Em BRM submersos que utilizam permeadores com membranas na forma de fibras-ocas, os fatores relacionados à aeração que direta e indiretamente influenciam na intensidade da formação de incrustações são: intensidade de aeração (vazão de ar), tipo e posição do injetor de ar e densidade de empacotamento das fibras-ocas.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

UEDA *et al.* (1997) observaram que os injetores de ar geram bolhas que promovem turbulência suficiente para agitar as fibras e remover a torta formada na superfície das membranas.

CUI *et al.* (2003) relataram que o controle de incrustações em BRM obtido por aspersão de ar, em comparação com operações sem introdução de ar, é dependente do tipo de permeador de membrana e das condições de operação tais como pressão de filtração, concentração da alimentação, tamanho e forma das bolhas, velocidade do gás e tipo de injetor, entre outros.

Em relação ao tamanho de bolhas, há contradições na literatura. Segundo BRAAK *et al.* (2010), bolhas maiores geram turbulências fortes em seu rastro e bolhas próximas são aceleradas. O aumento de sua densidade melhora o efeito sinérgico da população de bolhas, tornando a hidrodinâmica dos BRM mais homogênea. CUI *et al.* (2003) relataram que bolhas grandes, com diâmetros entre 2 e 5 mm, no formato elipsoidal, se mostraram as melhores no arraste de partículas da torta incrustada nas membranas em BRM submersos, pois são bolhas que ascendem mais rapidamente, apesar de que o uso de bolhas grandes compromete a transferência de oxigênio para o meio. Nos BRM, o tamanho deve ser otimizado entre as funções de transferência de oxigênio da fase gasosa para líquida, para a qual bolhas pequenas, resultando em maior interface, são desejadas, e no controle de incrustações, em o qual se requerem bolhas grandes, pois bolhas pequenas geram menor velocidade tangencial na zona próxima as membranas, menor turbulência e menor capacidade de remoção de incrustações. O aumento na vazão de ar provoca aumento do tamanho de bolhas, devido à sua coalescência, que é a junção de duas ou mais bolhas. RAKTOVICH *et al.* (2010) mediram maiores coeficientes de transferência de massa, em escoamento de água-ar, na região próxima às membranas de um permeador tubular, com bolhas grandes, resultante da coalescência de bolhas menores, em comparação aos coeficientes obtidos com bolhas pequenas e isoladas. Contraditoriamente, SOFIA *et al.* (2004) observaram que bolhas pequenas causaram altas velocidades de escoamento no BRM, criando um maior cisalhamento do que o gerado por bolhas grandes.

b) *Projeto de permeadores*

Como já mencionado, a hidrodinâmica é um dos parâmetros chaves no controle de incrustações, conseqüentemente no sucesso dos BRM. É de fundamental interesse o

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

entendimento das condições hidrodinâmicas do escoamento bifásico gás-líquido na região próxima às membranas para sua otimização. Os principais fatores que controlam a hidrodinâmica em BRM são:

- Intensidade de aeração ou vazão de ar (já visto no tópico de aeração);
- Distribuição, tamanho e forma das bolhas (já visto no tópico de aeração);
- Projeto de permeadores:
 - i) Injetores de ar (posição, forma, número e tamanho de furos ou poros);
 - ii) Projetos de membranas
 - # Geometria das fibras;
 - # Densidade de empacotamento;
 - # Tensionamento das fibras;
 - iii) Posicionamento dos permeadores no BRM;
 - iv) Aparatos especiais adotados

A posição do injetor de ar nos BRM é muito importante no controle de incrustações (YEO *et al.*, 2006), portanto HENSHAW *et al.* (1998) investigaram a posição do aerador interno e externo ao permeador e concluíram que com aeração interna o fluxo de permeado foi cerca de quatro vezes maior do que o registrado com aeração externa. PARK *et al.* (2010) compararam a eficiência no controle de incrustações de permeadores de fibras-ocas com os injetores de ar acoplados simultaneamente na base e no topo aos com injetor acoplado somente na base, verificando que a configuração com injeção simultânea ar na base e no topo foi mais eficiente, pois foi capaz retardar o progresso da formação de incrustações irreversíveis e aumentou a permeabilidade das membranas do BRM. BERUBÉ *et al.* (2008) estudaram duas posições diferentes dos injetores de ar. Os permeadores com fibras-ocas de MF foram colocados na posição central de um aparato cilíndrico dentro do biorreator e a injeção de ar foi realizada na região interna, de forma centralizada, e externa, de forma distribuída. Os autores observaram que as condições mais propícias a incrustações foram encontradas na operação com injeção de ar externamente ao aparato. RATKOVICH (2010) simulou, via CFD, dois tipos de injetores diferentes, um anular e outro em forma de disco, e relatou que o injetor de ar em forma de disco promove melhor dispersão de ar no interior do permeador testado.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tamanho de furos do injetor de ar também influencia no tipo de bolha e no seu efeito sobre as incrustações. Em um BRM submerso com permeador de membranas planas alimentado com esgoto doméstico bruto, SOFIA *et al.* (2004) verificaram que as incrustações foram melhor controladas com um injetor de ar com furos com 0,5 mm de diâmetro do que com 2,0 mm, ratificando o que já havia sido abordado no tópico sobre aeração, no qual estes autores observaram o efeito contraditório do tamanho de bolhas sobre a formação de incrustações. Segundo SOFIA *et al.* (2004), pequenas bolhas apresentaram maiores velocidades tangenciais e um efeito de turbulência mais elevado que as bolhas grandes ($0,69 \text{ m.s}^{-1}$ contra $0,4 \text{ m.s}^{-1}$), para a mesma velocidade superficial de ar (U_g), que é a razão entre a vazões de ar e área de furos no injetor. FANE *et al.* (2005) encontraram resultados semelhantes com fibras-ocas, filtrando fermento biológico de panificação. O uso de um injetor de ar com furos de 0,5 mm de diâmetro foi mais eficiente do que outro, com 1,0 mm, no controle de incrustações. Os autores deduziram que, para a mesma U_g , o cisalhamento mais intenso foi promovido por bolhas menores e o controle de incrustações foi melhor. Isso foi confirmado em outros estudos que lidam com fibras-ocas. Muitas bolhas pequenas foram mais eficientes do que algumas grandes na mesma velocidade superficial de ar (YEO *et al.*, 2007, WICAKSANA *et al.*, 2006, TIAN *et al.*, 2010). LU *et al.* (2008) testaram três injetores de ar com furos de diâmetros de 1, 3 e 12 mm. Foi usada concentração baixa de levedura (3 g.L^{-1}) e foi observado que cada injetor tinha o mesmo efeito sobre a formação de incrustações. Os resultados foram diferentes para uma maior concentração de levedura (5 g.L^{-1}). Na vazão de ar de 80 mL.min^{-1} , as bolhas de ar grandes e *slug flow*, gerados por injetores de furos maiores, foram mais eficientes na redução de incrustações do que as bolhas pequenas geradas por injetores com menores furos. Entretanto, enquanto a vazão de ar fora sendo aumentada, o tamanho do furos dos injetores exercia menos influência no controle de incrustações. A partir da vazão de ar de 150 mL.min^{-1} nenhum efeito do tamanho de furos do injetor de ar sobre a redução de incrustações, foi observado.

Em BRM, as membranas utilizadas podem ter geometria plana ou cilíndrica, na forma de fibras-ocas. Os permeadores de fibras-ocas são mais fáceis e baratos de se fabricar, permitem alta densidade de empacotamento e toleram vigorosas retrolavagens.

Alguns autores concluíram que a densidade de empacotamento de fibras-ocas em permeadores tem impacto direto no coeficiente de transferência de massa em BRM. O aumento de densidade de empacotamento pode conduzir a severo bloqueio causado

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

por sólidos grosseiros presos entre as fibras, o que pode obstruir a subida de bolhas, limitando seu efeito sobre o controle de incrustações. YEO e FANE (2005) relataram que, variando a densidade de empacotamento das membranas de 44 para 28%, mantido fixo o volume do permeador e variando a área de membrana no permeador de um BRM, foi observada a uma diminuição do potencial de incrustações. Acredita-se que seja devido à maneira como a torta se forma sobre a fibra. Algumas das fibras podem ficar presas uma as outras quando a espessura da torta cresce. Estas fibras são então incrustadas mais rapidamente em relação as outras. WU e CHEN (2000) observaram que os coeficientes de transferência de massa rapidamente diminuíram com o aumento de densidade de empacotamento de fibras-ocas. ZHENG *et al.* (2003) analisaram os efeitos da distribuição de fibra ou densidade aleatória das fibras, sobre o coeficiente de transferência de massa para um permeador de fluxo paralelo. Eles encontraram uma má distribuição do fluxo do fluido do lado externo das fibras, que se tornou mais evidente quando a densidade de empacotamento foi aumentada. CHANG e FANE (2001) estudaram a influência do diâmetro da fibra em testes de filtração e distribuição do fluxo em permeadores de fibras-ocas para o escoamento bifásico de ar/líquido. Eles também examinaram a influência do arranjo das fibras, com dois tipos sendo estudados, com 4 e 8 fibras, e duas distâncias entre elas (24 e 8 mm). Eles mostraram que um aumento da densidade de fibras provoca diminuição no fluxo de permeado. Este resultado foi atribuído à diminuição no tamanho da bolha e deterioração do ambiente hidrodinâmico entre as fibras. GÜNTHER *et al.* (2012) estudaram a distribuição de fluxo através de feixes de fibras-ocas por modelos e concluíram as velocidades de filtração são não uniformes ao longo da fibra, o que leva à deposição irregular de partículas e ao crescimento de torta, e que moderadas densidades de empacotamento levam a altos fluxos de permeado e a um perfil de fluxo axial mais homogêneo ao longo das fibras.

KIM *et al.* (2008) estudaram a posição de um permeador de membrana de BRM submerso para controle da formação de incrustações. O permeador foi colocado na parte superior do biorreator, o dividindo em duas zonas: superior e inferior. Ar foi fornecido somente na parte superior. Os resultados mostraram que a concentração de lodo foi reduzida na zona superior, devido à deposição na zona inferior e, portanto, as incrustações na membrana na zona superior foram reduzidas, devido à concentração dos sólidos reduzida.

Além de influenciar a força de cisalhamento que provoca o desprendimento de partículas da torta na superfície das membranas e no transporte destas de volta ao meio

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

da suspensão, a turbulência provoca movimentação das fibras, que também é benéfico para a filtração ou para a prevenção de incrustações (CHANG e FANE, 2001, UEDA *et al.*, 1997). Em operação com fluxo de permeado constante, WICAKSANA *et al.* (2006) observaram que a pressão de filtração aumentou 40% mais rápido para permeadores com fibras mais tensionadas, que os com fibras mais livres para movimentação. Entretanto, embora as fibras menos tensionadas sejam preferíveis para limitar incrustações, é importante mantê-las em determinado intervalo de valores de tensões adequadas, para evitar haja rompimento.

HAI *et al.* (2008) estudaram dois tipos de espaçadores entre os feixes de fibras-ocas de permeadores de BRM para o controle de incrustações em BRM piloto operando com efluente de indústria têxtil. O primeiro era uma tela rígida com aberturas de 7 mm² e o segundo, uma tela flexível com abertura de 1 mm². Os resultados mostraram que o uso do espaçador com menor abertura foi mais eficaz no controle de incrustações, já que a necessidade de limpeza química, nos permeadores com este, se deu a partir de 40 dias após o início da operação contra 35 dias do permeador com espaçador de maior abertura. O permeador sem espaçador necessitou de limpeza química a partir de 1 dia de operação.

CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo abordar os materiais e a metodologia empregados para a realização dos testes efetuados neste trabalho. No primeiro bloco deste capítulo, são mostrados os materiais e metodologias referentes ao permeador com membranas em forma de alça, que é utilizado como instrumento de estudo prévio da influência da variação de parâmetros operacionais sobre a formação de incrustações em testes de permeação com fermento biológico, usado como modelo para o lodo ativado utilizado nos BRM. Como o objetivo principal do trabalho é o estudo das propriedades de transporte através das membranas, avaliando o projeto de permeadores como parâmetro de variação da hidrodinâmica, o fermento biológico foi escolhido em substituição ao lodo ativado, por conferir resistências de torta semelhantes. Dentro deste bloco, são apresentados a caracterização morfológica das membranas de microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF) utilizadas, a metodologia de construção do permeador em alça, e os métodos de limpeza, determinação da permeabilidade hidráulica à água pura das membranas e, por último, os testes de permeação com suspensões de fermento biológico. O segundo bloco trata do objeto principal de estudo no trabalho, o novo permeador, cujas variantes de projeto foram selecionados junto à empresa PAM-Membranas Seletivas Ltda. Nesta parte foram estudados cinco variantes do novo permeador, variando-se a quantidade de furos no injetor de ar e a densidade de empacotamento de fibras-ocas. Primeiramente as membranas destes foram caracterizadas com relação às suas permeabilidades hidráulicas à água pura e, em seguida, foi realizado um estudo detalhado e individual em cada variante de projeto do novo permeador, com relação a influência de parâmetros, como vazão de ar (velocidade superficial de ar), pressão de filtração e concentração, na queda de permeabilidade das membranas, devido às incrustações, em testes com fermento biológico. As resistências de incrustações (R_i) foram determinadas e as variantes de projeto do novo permeador comparadas sob as mesmas condições hidrodinâmicas testadas (velocidade superficial de ar). Por fim, as bolhas ascendentes, formadas nos injetores de ar das variantes do novo permeador, foram fotografadas, para melhor esclarecer as condições hidrodinâmicas na região próxima às membranas. Também foi feito um estudo breve do gasto energético de aeração.

III MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 Sistema de permeação

O sistema de permeação utilizado neste trabalho, seja para os testes com permeadores de membranas em forma de alça quanto para o novo permeador, é caracterizado por operação submersa, na qual as membranas do permeador ficam imersas no tanque de alimentação com o efluente a ser filtrado. Neste caso, a força motriz para a permeação é obtida através da pressão negativa no interior das membranas, provocada uma bomba succionante, mantida a pressão no tanque de alimentação como a atmosférica. A Figura III.1 mostra os fluxogramas do sistema utilizado neste trabalho, destacando as operações de permeação e retrolavagem e a Tabela III.1 a descrição dos equipamentos do utilizados neste sistema.

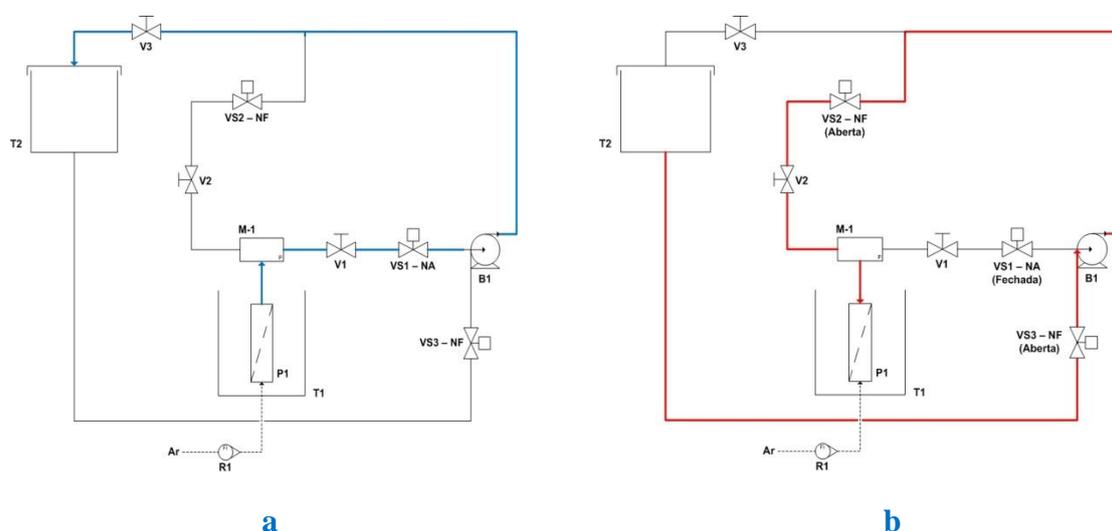


Figura III.1. Fluxogramas do sistema de permeação em (a) operação de permeação e (b) operação de retrolavagem

Tabela III.1: Descrição dos equipamentos do sistema de permeação

Equipamentos	Descrição	Especificação
R-1	Rotâmetro de ar	0 a 8.000 mL.min ⁻¹ e 0 a 23.000 mL.min ⁻¹
T-1	Tanque de alimentação	4 e 5 L
M-1	Manovacuômetro	-1 a 1 bar
V-1, V-2 e V-3	Válvulas esfera	1/4" NPT
VS-1, VS-2, VS-3	Válvulas solenóides	1/4" NPT
T-2	Tanque de recolhimento de permeado e de alimentação para retrolavagem	4 L

III MATERIAIS E MÉTODOS

Nos testes de caracterização das membranas e filtração com fermento biológico, foram utilizados béqueres de plástico de 4 L como T-1 enquanto que com os testes com novos permeadores foi utilizado tanque de PVC de 5 L.

O sistema pode ter duas operações, dependendo da posição das válvulas solenóides, que são eletricamente acionadas por um temporizador: permeação e retrolavagem. Para a permeação, as válvulas solenóides mantêm sua descrição nominal, sem atuação, ou seja, normalmente abertas e fechadas, e o permeado succionado pela bomba do interior das fibras-ocas é levado ao T-2 ou retornado ao T-1, como é feito durante todo este trabalho (Figura III.1 (a)). Na retrolavagem, o temporizador envia um sinal elétrico para a atuação sobre as válvulas solenoides, alterando sua posição, com a consequente inversão do fluxo do permeado, retornando do T-2 ao interior das fibras do permeador (Figura III.1 (b)). A retrolavagem é importante no controle de incrustações, pois o fluxo de dentro para fora das fibras faz com que parte da camada de material aderido da superfície da membrana se desprenda e retorne ao meio, diminuindo a resistência ao transporte quando a permeação é retomada.

Nos testes de permeação, a fim de obter a vazão de permeado, o tempo foi medido para permeação de 50 mL de água pura e, conhecidos o volume e o tempo, foi calculada a vazão. O fluxo foi então determinado pela razão entre a vazão e a área superficial de membrana.

A linha descontínua nos fluxogramas da Figura III.1 mostra a linha que visa ao fornecimento de ar ao T-1 ou diretamente aos permeadores. A aeração nestes testes teve como objetivo a mitigação dos efeitos de incrustações, com redução da espessura da camada de torta aderida na superfície das membranas.

A Figura III.2 mostra a foto do sistema descrito neste item.

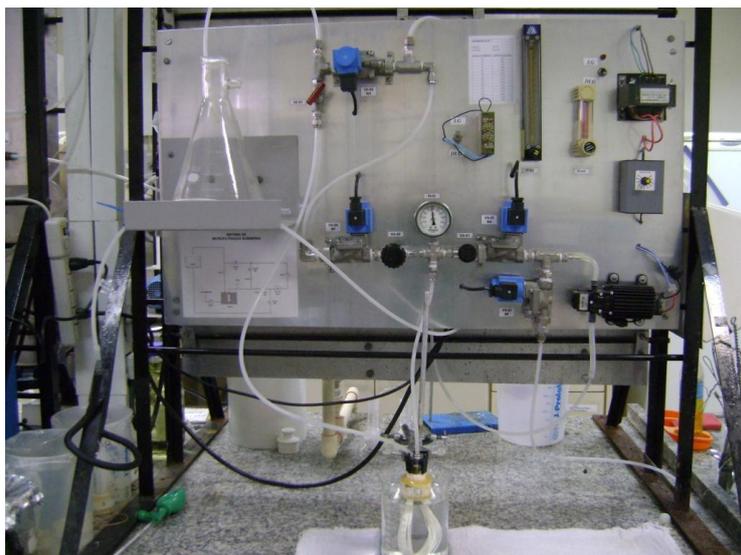


Figura III.2. Sistema de permeação

III.2 Permeador de membranas forma de alça

Segundo a literatura, citada no capítulo II, parâmetros operacionais em BRM, como vazão de ar e concentração de material suspenso, afetam a intensidade da formação de incrustações sobre as membranas. O desenvolvimento do permeador de membranas em forma alça tem como objetivo o estudo prévio destes parâmetros, realizando filtrações com suspensões de fermento biológico. Como o objetivo principal do trabalho é avaliação de um novo projeto permeador no controle de incrustações, estudando variantes em seu projeto, as resistências ao transporte devido a incrustações deste foi também comparada as do permeador de membranas em alça.

As membranas utilizadas na construção destes permeadores foram caracterizadas quanto à morfologia e determinação da permeabilidade hidráulica à água pura, antes dos testes de permeação com fermento biológico.

III.2.1 Membranas de microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF)

As membranas de micro e ultrafiltração utilizadas para a fabricação dos permeadores em forma de alça são em forma de fibras-ocas, fabricadas pela PAM-Membranas Seletivas Ltda. As membranas microporosas de microfiltração eram de poli (éter imida) (ULTEM®), enquanto que, as de ultrafiltração de poli (éter sulfona)

III MATERIAIS E MÉTODOS

desenvolvidas pela técnica de inversão de fases (HABERT *et al.*, 2006, PEREIRA *et al.*, 2003).

III.2.2 Construção dos permeadores de membranas em forma de alça

Foram preparados permeadores em alça com área de filtração de 0,025 m², utilizando os dados da Tabela III.2, para qual resultou em um feixe de 40 e 66 fibras-ocas de 20 cm de comprimento útil, de MF e UF, respectivamente.

Tabela III.2: Especificação das fibras-ocas de MF e UF para construção dos permeadores com membranas em alça

MF	
Diâmetro externo médio de uma fibra (mm)	1
Área de uma fibra de 20 cm de tamanho útil (m ²)	0,0006
Área útil desejada (m ²)	0,025
Número de fibras necessárias	40
UF	
Diâmetro externo médio de uma fibra (mm)	0,6339
Área de uma fibra de 20 cm de tamanho útil (m ²)	0,0004
Área útil desejada (m ²)	0,025
Número de fibras necessárias	63

As fibras-ocas foram fixadas em uma união de PVC de ½” NPT (Tigre®) utilizando cola feita pela mistura de resina epóxi e endurecedor (BRASCOLA®). A cola de vedação também serve como uma barreira que separa a alimentação do permeado. Os permeadores são conectados ao sistema de permeação e submersos em tanque com a suspensão a ser filtrada e então se dá partida aos testes. A coleta de permeado do interior das fibras-ocas se dá pela conexão roscada da união.

A Figura III.3 mostra como ficou um dos permeadores de membranas em forma de alça construídos.



Figura III.3. Permeador de membranas em forma de alça

III.2.3 Sistema de aeração utilizado nos testes com permeadores de membranas em forma de alça

Em BRM, a aeração possui duas finalidades, fornecer o oxigênio necessário à degradação de material orgânico pelos microrganismos e promover o cisalhamento na superfície das membranas, para diminuição da espessura de torta formada e consequentemente da resistência total ao transporte (incrustações).

O aerador (injetor de ar) utilizado nos testes de permeação com fermento biológico, utilizando os permeadores de membranas em forma de alça, foi uma mangueira perfurada e flexível com 45 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro e aproximadamente 260 furos para saída de ar (Figura III.4).



Figura III.4. Mangueira aerador usada nos testes de permeação

III MATERIAIS E MÉTODOS

O aerador foi acoplado a uma linha de ar comprimido e colocado no fundo do béquer de plástico de 4 L (T-1) de modo que as bolhas formadas preenchessem todo volume do béquer. A vazão de ar foi controlada por rotâmetro (R-1).

III.2.4 Caracterização das membranas

As fibras-ocas foram caracterizadas morfológicamente através da análise de microscopias eletrônicas de varredura (MEV). Ainda foram caracterizadas segundo permeabilidades hidráulicas à água pura.

III.2.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica de investigação das propriedades morfológicas das membranas, como diâmetro médio e distribuição de poros, diâmetros interno e externo das fibras-ocas, existência de defeitos e macrovazios. Foi utilizado o microscópio eletrônico JEOL JSM – 5300 disponível no Laboratório de Processos de Separação com Membranas da COPPE/UFRJ. A Figura III.5 mostra este equipamento. As membranas totalmente secas, foram fraturadas em nitrogênio líquido para que fossem feitas análises das seções transversais e da superfície interna. Em banho de nitrogênio líquido a 77K, os polímeros que constituem as membranas alcançam a temperatura de transição vítrea (T_g), tornando-os facilmente quebradiços evitando que as propriedades estruturais sejam prejudicadas para a análise de sua seção transversal. Após a preparação dos pequenos pedaços das membranas a serem analisadas em suportes característicos, estes foram recobertos por uma finíssima camada de ouro em um equipamento denominado JEOL QUICK AUTO COATER, para evitar que a alta voltagem da corrente de elétrons alterasse as características das amostras (MULDER, 1996). Além das seções transversais e das superfícies internas, foram também caracterizadas as superfícies externas, especialmente no tocante ao diâmetro médio e distribuição de poros. Foram também medidos os diâmetros interno e externo das fibras analisadas.



Figura III.5. Microscópio eletrônico de varredura do PAM/COPPE/UFRJ

III.2.4.2 Pré-limpeza química, compactação e permeabilidade hidráulica à água pura

As fibras-ocas utilizadas na construção dos permeadores de membranas em forma de alça, foram primeiramente, imersas em solução de 0,7 % de NaClO, por 24 horas para retirar resíduo de PVP (aditivo) que obstruem os poros. Posteriormente, foi realizada a compactação das membranas à 0,7 bar, para finalmente, terem suas permeabilidade hidráulicas à água pura determinadas. A compactação das membranas é uma deformação irreversível de seus poros devido à aplicação do gradiente de pressão necessário para a permeação, adensando-os, o que, conseqüentemente, causa a queda do fluxo de permeado com o tempo. Excluindo-se esta determinação prévia, estes efeitos seriam adicionados aos efeitos de queda de produtividade inerente aos processos de separação por membranas, como polarização de concentração e formação de incrustações, inferindo em erro de análise. A Figura III.6 mostra esquematicamente como ocorre a compactação.

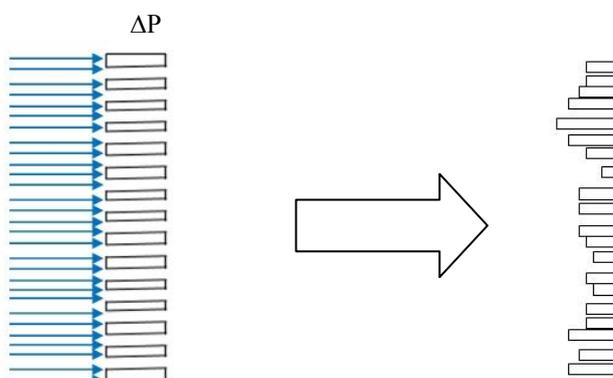


Figura III.6. Compactação da membrana através de pressão aplicada

III MATERIAIS E MÉTODOS

A compactação foi realizada com submissão das membranas à permeação de água destilada, desmineralizada e microfiltrada, que chamaremos neste trabalho de água pura, à pressão de filtração fixa e igual a máxima a ser utilizada nos testes posteriores. Pode ser observada a queda de fluxo de permeado, expressa em $L.h^{-1}.m^{-2}$, com o tempo, expresso em horas, até que este valor se torne constante, quando a deformação é máxima, sendo a permeação interrompida. Após a compactação, as membranas foram submetidas a diferentes pressões de filtração para permeação de água pura e os valores obtidos para o fluxo permeado em $L.h^{-1}.m^{-2}$ foram representados em gráfico em função da diferença de pressão utilizada, expressa em bar. Para os pontos obtidos, foi traçada uma curva de tendência linear com o coeficiente angular da reta descrevendo a permeabilidade hidráulica da membrana, expressa em $L.h^{-1}.m^{-2}.bar^{-1}$. A compactação das membranas foi conduzida com diferença de pressão (pressão de filtração) igual a 0,5 bar, enquanto que a permeabilidade hidráulica foi obtida a partir de testes realizados com diferença de pressão variando entre 0,1 a 0,5 bar. Todos os testes foram realizados a temperatura de 22°C (temperatura ambiente do laboratório).

III.2.5 Testes de permeação com suspensões de fermento biológico

Os testes deste item tiveram como objetivo o estudo dos efeitos de alguns parâmetros operacionais sobre a formação de incrustações, como o tipo de membrana, vazão de ar (velocidade superficial de ar) e concentração de material suspenso, além como a determinação das condições críticas e estudo da recuperação por retrolavagem e limpeza química.

As suspensões estudadas foram preparadas utilizando uma suspensão celular de *Saccharomyces cerevisiae* obtida através de um fermento biológico fresco (ITAIQUARA®) e água pura. O uso do fermento biológico objetivou a simulação do lodo ativado utilizado nos BRM, pois como objetivo principal do trabalho é de avaliar a influência do projeto de permeadores sobre a hidrodinâmica e conseqüentemente na atuação desta sobre a limitação da formação de incrustações, principalmente por formação de torta, os últimos não trariam ganhos significativos com relação aos resultados referentes às resistências das tortas esperadas neste trabalho.

Foram realizadas filtrações utilizando permeadores com membranas de MF e UF em alça, com suspensões de 4.000 e 8.000 $mg.L^{-1}$, utilizando 0,4 bar de pressão de

III MATERIAIS E MÉTODOS

filtração e vazões de ar de 0, 4.017 e 7.590 mL.min⁻¹, equivalente à demanda específica de ar em relação à área de membrana de 0, 9,6 e 18,2 m³.h-1.m⁻².

Todos os testes de permeação foram realizados em triplicata e seus erros associados foram determinados (desvios padrões) e os resultados mostrados em faixas de valores com 95% de confiança.

III.2.6 Determinação das condições críticas

Foi também realizado o teste de determinação de condições críticas (fluxo e pressão), visando compreender o potencial incrustante das suspensões nas condições citadas acima. Como já explorado anteriormente, as condições críticas são os maiores valores de fluxo e diferença de pressão nos quais os efeitos de polarização de concentração são não observados, se tornando uma importante medida para uma permeação sustentável, onde a queda de produtividade da operação é baixa em relação as condições acima das críticas. Os testes de determinação das condições críticas foram realizados utilizando a metodologia de degrau, em que o fluxo de permeado fora monitorado quanto a sua estabilidade com o tempo para progressivos degraus de diferença de pressão de permeação aplicados (XU *et al.*, 2012, DA SILVA, 2009). As condições críticas seriam consideradas aquelas em que o fluxo de permeado se tornasse instável e com rápida queda na pressão aplicada. As diferenças de pressão testadas foram de 0,1 a 0,5 bar com degraus de 0,5 bar. O monitoramento foi de 15 minutos para cada diferença de pressão. Foram determinadas as condições críticas em permeações através de membrana de UF com fermento na concentração de 4.000 mg.L⁻¹ e vazão de ar de 7.590 mL.min⁻¹ e através de membrana de MF nas concentrações de 4.000 e 8.000 mg.L⁻¹ e vazões de ar de 4.017 mL.min⁻¹ e 4.017 e 7.590 mL.min⁻¹, respectivamente.

III.2.7 Determinação das resistências ao transporte

A resistência de escoamento total (R_T) é descrita pelo modelo de resistências em série discutido no capítulo de revisão bibliográfica. R_T é um importante parâmetro para avaliação da evolução da formação de incrustações na permeação. R_T é a soma das resistências da membrana (R_m), do bloqueio de poros (R_{bp}), da adsorção (R_a) e da torta formada na superfície da membrana (R_t).

III MATERIAIS E MÉTODOS

R_m é obtida através da medida de permeabilidade hidráulica à água pura das membranas do permeador em alça (Equação III.1).

$$R_m = \frac{\Delta P}{J_p \cdot \mu} = \frac{1}{L_p \cdot \mu} \quad \text{Equação III.1}$$

A R_a é obtida pela medida de permeabilidade à água pura após a imersão do permeador de membranas em forma de alça nas suspensões de fermento biológico fresco durante 180 minutos (L_p^*). A diferença entre a resistência obtida e R_m , é igual a R_a (Equação III.2).

$$R_a = \frac{1}{L_p^* \cdot \mu} - R_m \quad \text{Equação III.2}$$

Ao final dos testes de permeação com fermento biológico, as R_{bp} foram obtidas. R_{bp} é obtida pela diferença da resistência calculada pela medida de permeabilidade a água pura (L_p^{**}), pós-limpeza das membranas com água corrente para retirada da torta aderida, e R_a . (Equação III.3).

$$R_{bp} = \frac{1}{L_p^{**} \cdot \mu} - R_a \quad \text{Equação III.3}$$

R_T também é obtida por cálculos após ao final de cada teste de permeação com fermento biológico. Obtida segundo a Equação III.4 através da média das permeabilidades das membranas finais, onde estas se encontram estabilizadas nas filtrações (Figura III.7). A Figura III.7 ilustra o perfil de permeabilidade da membrana ao longo do tempo. R_t foi calculada pela diferença entre a R_T e as demais resistências (Equação III.5).

$$R_T = \frac{\Delta P}{J_{p\text{final}} \cdot \mu} = \frac{1}{L_{p\text{final}} \cdot \mu} \quad \text{Equação III.4}$$

$$R_t = R_T - R_m - R_a - R_{bp} \quad \text{Equação III.5}$$

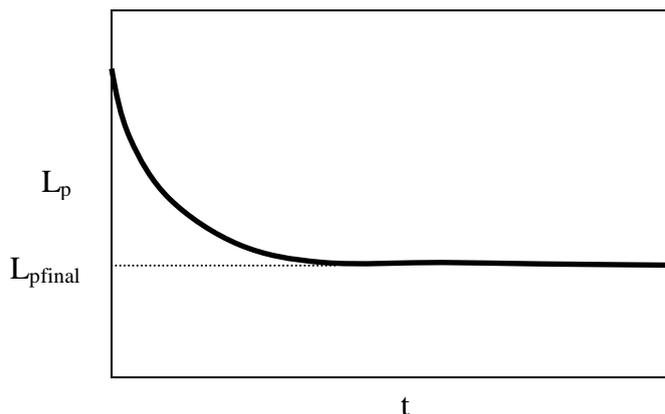


Figura III.7. Perfil de L_p no tempo de permeação

Como todos os testes de permeação foram realizados em triplicatas, os desvios padrões dos cálculos de resistências foram determinados e os resultados mostrados em faixas de valores com 95% de confiança.

III.2.8 Efeito da recuperação por retrolavagem

Com intuito de se avaliar o efeito da retrolavagem como agente de controle de incrustações, duas diferentes frequências de retrolavagem foram estudadas, sendo que, em uma delas foi avaliado o efeito do uso de ar, como agente de auxílio na recuperação de permeabilidade das fibras-ocas. Os testes de retrolavagem foram realizados para as concentrações de fermento biológico de 8.000 mg.L^{-1} e pressão de filtração de 0,4 bar. Os resultados dos testes com retrolavagem foram comparados entre as frequências utilizadas e entre os obtidos nas permeações sem retrolavagem. Os tempos foram de 3/6, 15/15 minutos de permeação/segundos de retrolavagem, sendo o último com e sem uso de ar.

III.2.9 Recuperação por limpeza química

A limpeza química foi realizada ao final de cada permeação, com intuito de recuperar a permeabilidade à água pura original da membrana.

Foram realizados dois testes para avaliação da melhor metodologia de limpeza química a ser utilizada no restante do trabalho. No primeiro deles, o permeador de membranas de UF em forma de alça foi imerso em béquer de 4 L com solução de 0,3%

III MATERIAIS E MÉTODOS

de NaClO, com fornecimento de ar na vazão de $7.590 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e o outro teste, o permeador em alça foi imerso na mesma solução de NaClO sem fornecimento de ar. De 10 em 10 minutos foram medidas as permeabilidades à água pura, até a finalização da limpeza, considerada, como a recuperação da permeabilidade das membranas em torno de 99% da permeabilidade original. Os tempos de limpeza foram anotados. Foram realizadas as limpezas do permeador em alça após dois primeiros testes (replicatas) de permeação com suspensão de fermento biológico, nas concentrações de $4.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e vazão de ar de $7.590 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Ao final de cada limpeza, a permeabilidade à água pura foi medida para recomeço de novos testes.

III.3 O Novo Permeador

Este tópico tem como objetivo apresentar a parceria com a empresa PAM-Membranas Seletivas Ltda. para o estudo de um novo modelo de permeador para BRM. O desenvolvimento do novo permeador foi realizado pela empresa enquanto que a seleção de variantes, como quantidade de furos no injetor de ar e a densidade de empacotamento, e a caracterização destas, quanto ao controle de incrustações, pelo trabalho presente. O projeto de permeador apresentado nesse tópico será chamado de novo permeador.

O desenvolvimento desse novo projeto de permeador pela PAM-Membranas tem como objetivo a melhoria na limitação da formação de incrustações em operação em BRM, principalmente. Já foi visto no Capítulo II, que o projeto de permeadores é um parâmetro fundamental para modificação das condições hidrodinâmicas próximas às membranas, podendo torná-las ideais para o controle das incrustações, reduzindo o custo operacional e viabilizando a operação.

O novo permeador para sBRM, foi desenvolvido com membranas na forma de fibras-ocais coladas nas duas extremidades, com injeção distribuída de ar acoplada em sua base, a fim de buscar melhores condições hidrodinâmicas. As membranas são alocadas no interior de um tubo de PVC perfurado de 44 mm de diâmetro interno, com tela de proteção também de PVC, para evitar que as membranas sofram intensa movimentação com a subida de bolhas e conseqüente rompimento, com uma entrada para ar na base e uma saída de permeado no topo, além de servir com agente protetor das membranas em relação ao material incrustante. A Tabela III.3 e a Figura e III.8 mostra o novo permeador e descreve suas variantes estudadas, respectivamente.

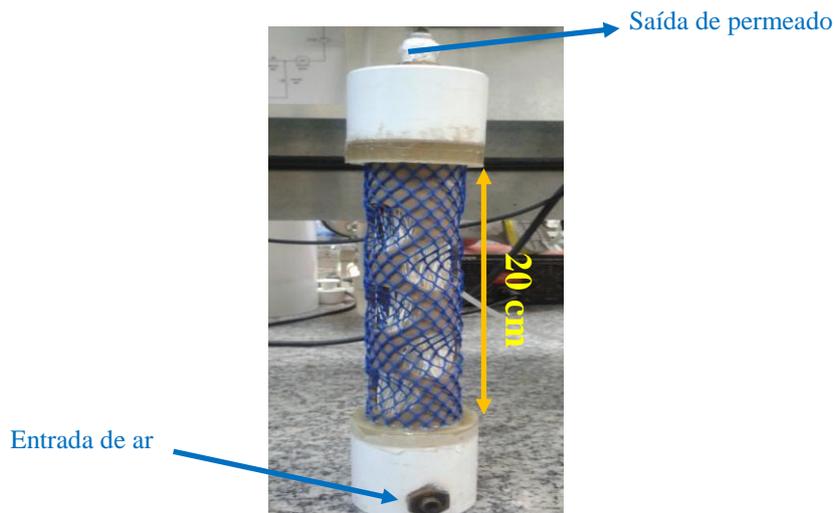


Figura III.8. Ilustração de uma variante do novo permeador testada (32650)

Tabela III.3: Especificações técnicas das variantes do novo permeador estudadas

Código usado*	Densidade de empacotamento de fibras (m ² /m ³)	Área de membranas (m ²)	Número de fibras	Quantidade de furos no injetor de ar	Furos/Fibras (%)
16650	650	0,198	318	16	5
32650	650	0,198	318	32	10,1
64650	650	0,198	318	64	20,1
32800	800	0,243	387	32	8,3
321000	1000	0,304	484	32	6,6

* Os dois primeiros números representam a quantidade de furos do injetor de ar e os números restantes a densidade de empacotamento das fibras-ocas

As variantes do novo permeador estudadas possuem diâmetro interno do tubo que envolve as fibras-ocas de 44 mm. Já o injetor de ar é acoplado à base do novo permeador e possui furos de 1 mm distribuídos de forma homogênea. A Figura III.9 mostra o desenho técnico de um injetor.

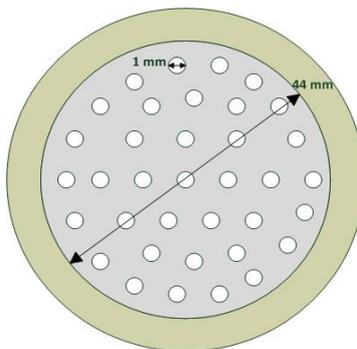


Figura III.9. Desenho do injetor de ar da base do novo permeador

III MATERIAIS E MÉTODOS

III.3.1 Pré-limpeza química, compactação e permeabilidade hidráulica à água pura

Primeiramente, foram realizadas pré-limpezas química das fibras-ocas das variantes de projeto do novo permeador, com solução de 0,7 % de NaClO, por 24 horas para retirar resíduo de PVP (aditivo) que obstruem os poros. Posteriormente, foi realizada a compactação das membranas à 0,7 bar, para finalmente, terem suas permeabilidade hidráulicas à água pura determinadas. A permeabilidade à água pura das membranas das variantes do novo permeador foi obtida pelo coeficiente angular da regressão linear do gráfico de acompanhamento do aumento do fluxo de permeado com o aumento da pressão de permeação utilizando o sistema de permeação. A pressão foi variada de 0,3 a 0,7 bar. Estes testes foram realizados em triplica, os desvios padrões dos cálculos de resistências foram determinados e os resultados mostrados em faixas de valores com 95% de confiança.

III.3.2 Testes de permeação com suspensões de fermento biológico

Assim como nos testes com os permeadores de membranas em forma de alça, foram realizados testes de permeação com suspensões de células de *Saccharomyces cerevisiae* obtida através de um fermento biológico fresco (ITAIQUARA®) e água pura, simulando a suspensão de lodo ativado utilizados no BRM. Estes testes tiveram como objetivo a avaliação individual das variantes do novo permeador, quanto à influência dos parâmetros como pressão de filtração, concentração de fermento e velocidade superficial de ar (U_g) na intensificação/limitação da formação de incrustações. A Tabela III.4 mostra as condições das permeações testadas com as variantes do novo permeador.

III MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela III.4: Condições dos testes de permeação com fermento biológico utilizando as variantes do novo permeador

Variantes	Pressão de filtração (bar)	Concentração (mg.L ⁻¹)	Vazão de ar (mL.min ⁻¹)	U _g * (m.s ⁻¹)
32650	0,3	4.000/8.000	0	0
			1.980	1,31
			4.017	2,67
	0,5/0,7	4.000/8.000/12.000	7.590	5,04
			4.017	2,67
			7.590	5,04
16650	0,3/0,7	8.000	0	0
			990	1,31
			2.009	2,67
			3.795	5,04
			7.590	10,07
32800	0,3/0,7	8.000	0	0
			1.980	1,31
			4.017	2,67
			7.590	5,04
321000	0,3/0,7	8.000	0	0
			1.980	1,31
			4.017	2,67
			7.590	5,04
64650	0,3/0,7	8.000	0	0
			3.960	1,31
			8.034	2,67
			15.180	5,04

*U_g é a velocidade superficial de ar que é a razão entre a vazão de ar e a área total de furos no injetor de ar da base do novo permeador

Os valores das condições de testes de permeação realizados foram baseados em valores tipicamente utilizados em BRM e nos testes de permeação com o permeador em forma de alça, no tópico de caracterização das membranas. Como todos os testes de permeação foram realizados em triplica, os desvios padrões dos cálculos de resistências

III MATERIAIS E MÉTODOS

foram determinados e os resultados mostrados em faixas de valores com 95% de confiança.

III.3.3 Determinação das resistências ao transporte

O objetivo deste tópico é a obtenção de um parâmetro no qual se possa comparar a eficiência no controle de incrustações, das variantes do novo permeador, de uma forma justa, já que as membranas podem ser de lotes diferentes, apresentando diferentes morfologias, e conseqüentemente resistências (R_m) diferentes, tornando não adequada a comparação pelos perfis de permeabilidade às suspensões de fermento biológico. Portanto, as L_{pfinal} e as resistências das membranas (R_m) e totais (R_T), obtidas de forma análoga as obtidas com o permeador de membranas em forma de alça, foram tabeladas para cada variante do novo permeador e as resistências de incrustações (R_i) foram calculadas, em cada condição de testes, pela Equação III.6.

$$R_i = R_T - R_m \quad \text{Equação III.6}$$

III.3.4 Recuperação por retrolavagem

Para analisar a eficiência da retrolavagem na recuperação da permeabilidade hidráulica das membranas, utilizou-a em dois testes de permeação com fermento biológico, para os quais foram encontrados o maior e o menor valor de resistência por incrustações (R_i), para o novo permeador 32650, em testes anteriores. Estudou-se a frequências de retrolavagem de 3/6 e 15/15 minutos de permeação/segundos de retrolavagem.

III.3.5 Comparação entre as variantes do novo permeador quanto ao controle de incrustações

A fim de se comparar o desempenho das variantes do novo permeador e eleger a de maior eficiência ao controle de incrustações, utilizou-se as mesmas velocidades superficiais de ar (U_g) para que as condições hidrodinâmicas próximas à superfície das membranas sejam semelhantes.

III MATERIAIS E MÉTODOS

III.3.6 Comparação entre o novo permeador e o permeador de membranas em forma de alça quanto ao controle de incrustações

A fim de se avaliar a influência do projeto de permeadores sobre o controle/limitação de incrustações, principalmente relacionada a formação de torta, comparou-se na ausência de ar, as resistências por incrustações (R_i) resultantes dos testes de permeação com fermento biológico nos dois permeadores, na mesma concentração e pressão de filtração.

III.3.7 Análise qualitativa de bolhas ascendentes no novo permeador à partir de fotografias

A análise qualitativa de bolhas nas velocidades superficiais de ar utilizadas nos testes de permeação com as suspensões de fermento biológico foi realizada para melhor compreensão dos resultados obtidos. O objetivo foi avaliar como e quanto as bolhas favorecem a hidrodinâmica próximo a membranas no controle da formação de incrustações, observando a distribuição e tamanho das bolhas nas diversas U_g testadas. As bolhas foram fotografadas utilizando uma máquina fotográfica SONY Mavica® com velocidade de obturação de 1/1000 segundos.

III.3.8 Avaliação do consumo de energia

Para avaliar e validar a eficiência global do novo permeador, avaliou-se o consumo de energia na aeração em cada teste de permeação com fermento biológico com as suas variantes, comparando com sua eficácia sob a limitação da formação de incrustações. Para tal, a pressão de ar foi medida na entrada do injetor e através da Equação III.7, a potência energética foi calculada.

$$\text{Potência} = P_{ar} \cdot Q_{ar} \qquad \text{Equação III.7}$$

A energia gasta com aeração em cada teste de permeação foi obtida pelo produto da potência energética pelo tempo de teste.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, o permeador de membranas em alça é analisado inicialmente, utilizado como modelo para a investigação de parâmetros operacionais sobre as incrustações. Os resultados são apresentados referentes à caracterização das membranas empregadas quanto à morfologia e à permeabilidade à água pura. Quanto a investigação dos parâmetros operacionais que influenciam a formação de incrustações foram realizados testes utilizando suspensões de fermento biológico, utilizado para a simulação da resistência de torta que os lodos ativados conferem em BRM. São apresentados os perfis de queda de permeabilidade com o tempo, mostrando a intensidade de incrustações nas condições testadas, a determinação das condições críticas e as resistências ao transporte nas mesmas condições. Os resultados dos testes com retrolavagem e limpeza química também são apresentados e discutidos. Na segunda parte são expostos os resultados com o novo permeador para sBRM com fibras-ocas de MF e injetor de ar acoplado à sua base. Foram estudados variantes de novo permeador que continham diferentes densidades de empacotamento de fibras e quantidades de furos no injetor de ar. O objetivo principal foi, a partir dos testes de permeação com suspensão de fermento biológico fresco, verificar a eficiência no controle de incrustações destes permeadores, observando como as condições hidrodinâmicas são afetadas pelos diferentes parâmetros investigados nos experimentos. Seguindo a metodologia empregada nos testes com os permeadores em forma de alça, são apresentados os resultados dos testes de permeabilidade hidráulica à água pura e de permeação com a suspensão de fermento biológico, bem como os resultados relativos às limpezas por retrolavagem e química. As variantes do novo permeador são confrontadas em termos de eficiência de controle de incrustações e, por fim, é apresentada uma análise de gasto energético de aeração nos testes.

IV.1 Permeadores de membranas em forma de alça

Os permeadores de membranas em forma de alça constituem um modelo adotado para o estudo de parâmetros operacionais sobre a filtração de suspensões em membranas. As membranas utilizadas neste tipo de permeador foram de microfiltração (MF) e de ultrafiltração (UF), descritas no capítulo III. Estas membranas foram caracterizadas quanto à morfologia através da análise de fotomicrografias obtidas por

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e permeabilidade à água pura. Após a caracterização, as membranas dos permeadores em alça foram submetidas a testes de permeação com suspensões de fermento biológico fresco.

IV.1.1 Caracterização das membranas

IV.1.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As fotomicrografias da seção transversal são apresentadas na Figura IV.1. A ampliação da seção transversal e da superfície externa das membranas de MF e UF são apresentadas nas Figuras IV.1, IV.2 e IV.3, respectivamente.

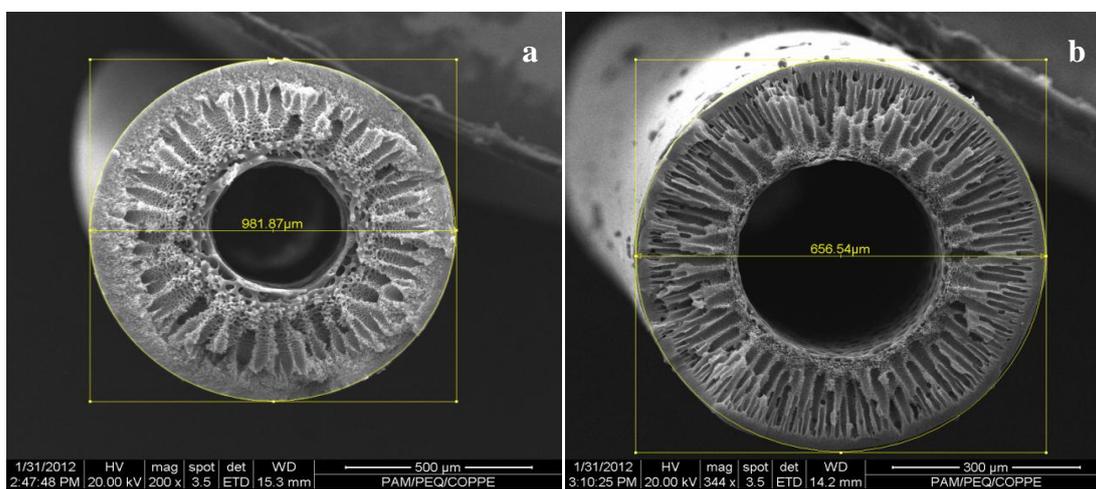


Figura IV.1. Fotomicrografias da seção transversal das membranas de MF (a) e UF (b)

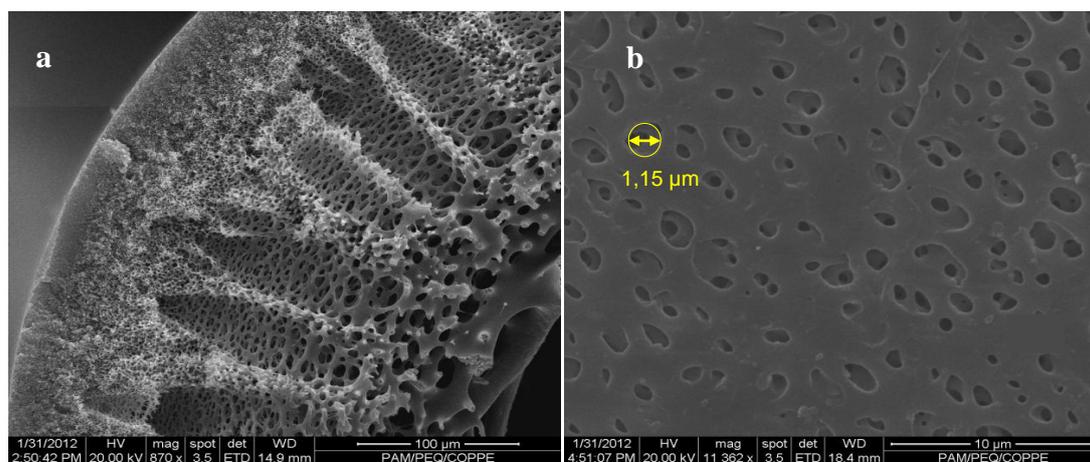


Figura IV.2. Fotomicrografias da membrana de MF de PEI. (a) ampliação da parede porosa na seção transversal (aumento de 870 vezes) e (b) poros da superfície externa da membrana (aumento de 11.362 vezes)

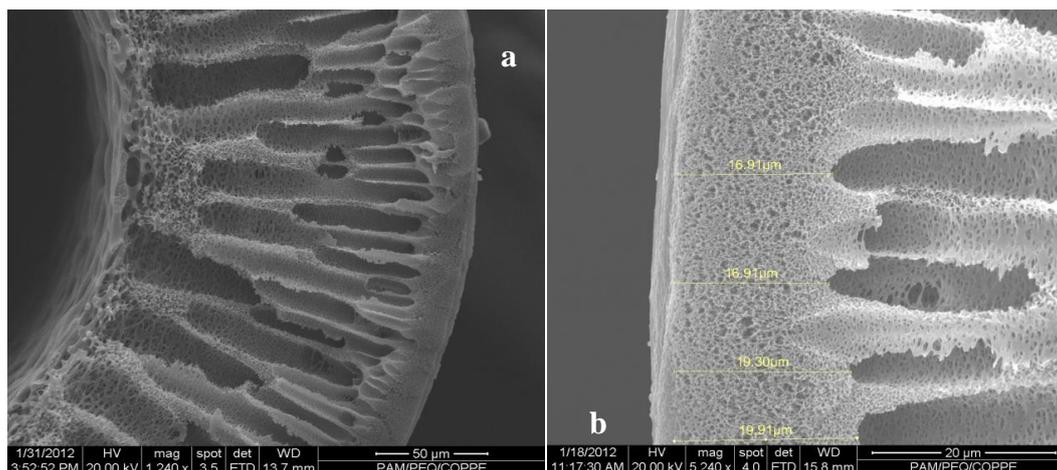


Figura IV.3. Fotomicrografias da membrana de UF de PES. (a) Ampliação da parede da seção transversal da membrana (aumento de 1.240 vezes) e (b) detalhes da camada seletiva (superfície mais externa) da fibra-oca (aumento de 5.240 vezes)

Na Figura IV.1 (a) e (b) podem ser observados os diâmetros externos das fibras-ocas de MF e UF, utilizados para cálculo do número de fibras necessárias para se atingir determinada área da filtração dos permeadores em forma de alça. Os diâmetros externo utilizados no cálculo de área efetiva de filtração foram de 981 e 658 μm para as fibras de MF e UF, respectivamente. Para construção dos permeadores de membranas em alça para os testes de caracterização e de permeação com fermento biológico, foi escolhida uma área de filtração igual a 0,025 m^2 tanto no caso de membranas de MF quanto UF, que se resultaram em 40 fibras de MF e 63 fibras de UF, com comprimento útil de 20 cm cada. As fibras de MF e UF caracterizadas possuem morfologia anisotrópica. Através das seções transversais das fibras pode-se observar também a presença de macrovazios. Os macrovazios são importantes para diminuir a resistência da membrana ao escoamento, facilitando o fluxo permeado através desta, uma vez que os particulados devem ser retidos na superfície da mesma.

A Figura IV.2 (b) apresenta a superfície externa da membrana de MF com poros aparentes de tamanho médio de 1,15 μm . Valores típicos de tamanho médio de poros de membranas de MF situam-se na faixa de 0,4 a 1 μm (BAKER, 2004). Não foi possível obter fotomicrografias da superfície externa das fibras de UF, pois no maior aumento ótico do MEV, não foram observados poros, mostrando que estes são de tamanho muito reduzido, em relação aos poros das fibras de MF.

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

IV.1.1.2 Compactação das membranas e permeabilidade hidráulica à água pura (L_p)

Conforme descrito no Capítulo III, inicialmente é necessária a realização da compactação das membranas. Esse procedimento é realizado aplicando-se uma diferença de pressão através da membrana de 0,5 bar, e medindo-se a vazão de água com o decorrer do tempo.

A Figura IV.4 ilustra as quedas de fluxo com o tempo nas compactações das fibras de MF e UF, respectivamente. Observa-se que a queda de fluxo é superior a 60% do fluxo inicial para as fibras de MF, enquanto que para as fibras de UF, a queda observada é de apenas 20% em 10h de compactação.

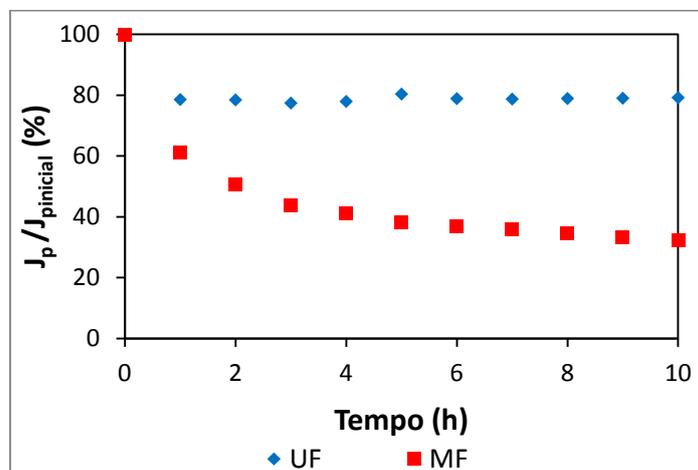


Figura IV.4. Queda de $J_p / J_{p\text{inicial}}$, com a compactação das fibras de MF e UF

Este resultado é explicado pelo fato de que as fibras de MF possuem poros maiores que as de UF, então sofrem mais deformação com a pressão aplicada.

Após a compactação, as fibras foram imersas em solução de hipoclorito de sódio (NaClO) de 0,07 %, por um período de 24 horas, visando eliminar a presença de algum aditivo (PVP) que possa causar a obstrução dos poros e a permeabilidade hidráulica à água pura das membranas foi obtida.

Neste tópico e em todo restante deste capítulo é aplicada a teoria de propagação de erros, para determinação do erro experimental de medidas indiretas, como a permeabilidade hidráulica à água pura (L_p), permeabilidades média ao final de cada permeação ($L_{p\text{final}}$) e resistências ao transporte (R). Seja a grandeza X, uma medida indireta, determinada a partir de N medidas diretas a (Equação IV.1), o desvio padrão de X é dada pela Equação IV.2.

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

$$X = X(a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_N) \quad \text{Equação IV.1}$$

$$\sigma_{\bar{X}} = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial a_1}\right)^2 (\sigma_{\bar{a}_1})^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial a_2}\right)^2 (\sigma_{\bar{a}_2})^2 + \dots + \left(\frac{\partial X}{\partial a_N}\right)^2 (\sigma_{\bar{a}_N})^2} \quad \text{Equação IV.2}$$

Os resultados são apresentados em intervalos de valores que representam que o valor real está contido no mesmo com 95 % de confiança ($\bar{X} \pm 1,96\sigma$) (VUOLO, 1992).

A Figura IV.5 mostra a comparação entre as permeabilidades à água pura das fibras de MF e UF.

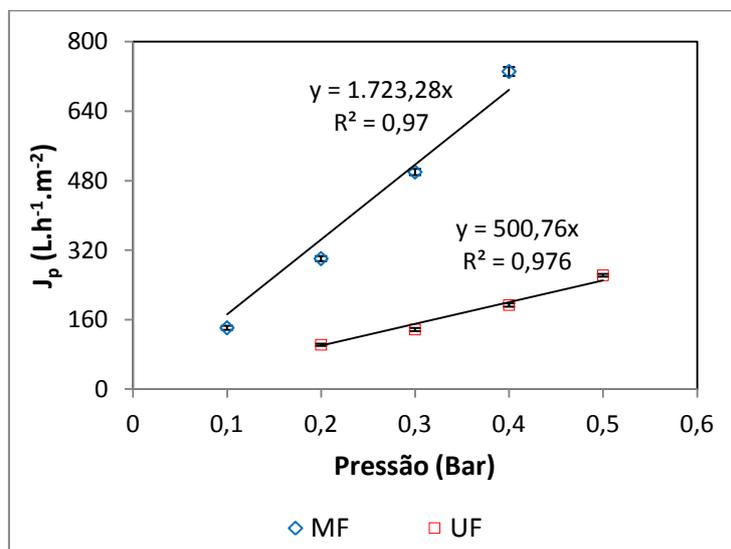


Figura IV.5. Comparação entre as L_p das fibras de MF e UF

As permeabilidades hidráulicas à água pura das fibras de MF e UF determinadas após a limpeza química apresentaram valores típicos para estes tipos de membranas, utilizadas em sBRM. As fibras de MF apresentaram L_p de $1.723 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{bar}^{-1}$, 3,4 vezes superior à determinada para as fibras de UF, que foi de $501 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{bar}^{-1}$, ratificando os resultados apresentados nas fotomicrografias por MEV, onde se mostrou que os poros da superfície das fibras de MF tem tamanho médio consideravelmente superior aos das de UF, do qual nem pudera ser observado utilizando máximo zoom do MEV. As membranas de MF conferem menor resistência a permeação que as de UF.

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

IV.1.2 Testes de permeação com suspensões de fermento biológico

Os resultados dos testes deste item visam ao melhor entendimento do efeito de alguns parâmetros sobre a formação de incrustações, como o tipo de membrana, vazão de ar (velocidade superficial de ar), concentração de fermento suspenso e a pressão de filtração na permeação. Esta etapa auxiliou o estabelecimento da metodologia a ser empregada no estudo do novo permeador, foco principal de estudo neste trabalho. Os resultados são apresentados com barras de erro, que representam que o valor real está contido nesse intervalo com 95% de confiança.

A Figura IV.6 mostra a comparação entre os fluxos de permeado dos permeadores com membranas de MF e UF utilizando as mesmas condições de testes, buscando observar a influência do tipo de membranas sobre a formação de incrustações.

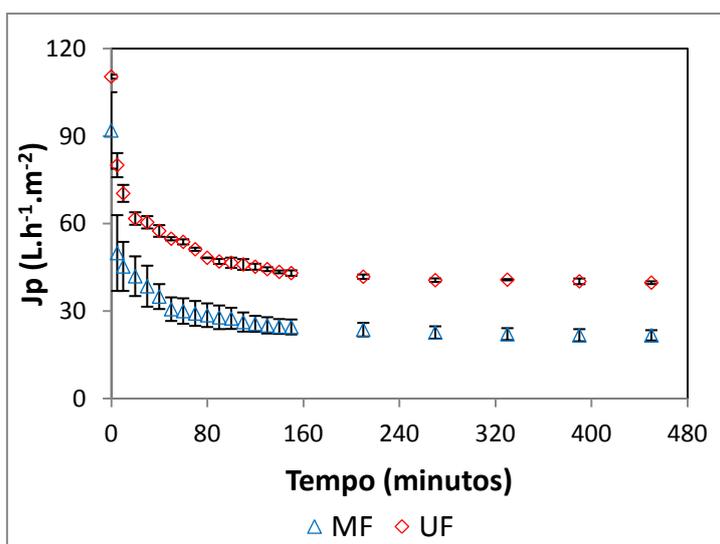


Figura IV.6. Queda de fluxo de permeado com o tempo em testes de permeação com fermento biológico na concentração de 8.000 mg.L^{-1} , pressão de filtração de $0,4 \text{ bar}$ e vazão de ar de $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$

Conforme a Figura IV.6, os fluxos de permeado sofrem queda acentuada nos primeiros minutos de permeação, resultado do estabelecimento do gradiente de concentração de sólidos entre a superfície das fibras-ocas e o seio da suspensão, que confere uma resistência adicional ao transporte (Polarização por concentração) e da formação das primeiras camadas de torta na superfície das membranas, além do bloqueio de poros. Após algumas horas, os fluxos de permeado se estabilizam. Este resultado ainda mostra que, nas mesmas condições de testes, o tipo de membrana do

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

permeador se apresentou como fator de influência na intensidade da formação de incrustações. Pelo o fato das fibras de UF possuírem poros menores que as de MF, acredita-se que a intensidade de incrustações por bloqueio de poros é menor na primeira. Outro fator a ser levado em consideração é a flexibilidade das fibras. As fibras de UF são mais flexíveis que as MF, logo são mais afetadas pelo ar ascendente e portanto pode haver o favorecimento na retirada de parte de material aderido nas membranas.

Para avaliar a extensão dos efeitos da concentração de fermento biológico, foram realizadas permeações com permeador de fibras-ocas de MF nas concentrações de 4.000 e 8.000 mg.L⁻¹, utilizando vazão de ar de 7.590 mL.min⁻¹, na pressão de filtração de 0,4 bar. A Figura IV.7 mostra para a membrana de MF a queda de fluxo com o tempo nesses testes.

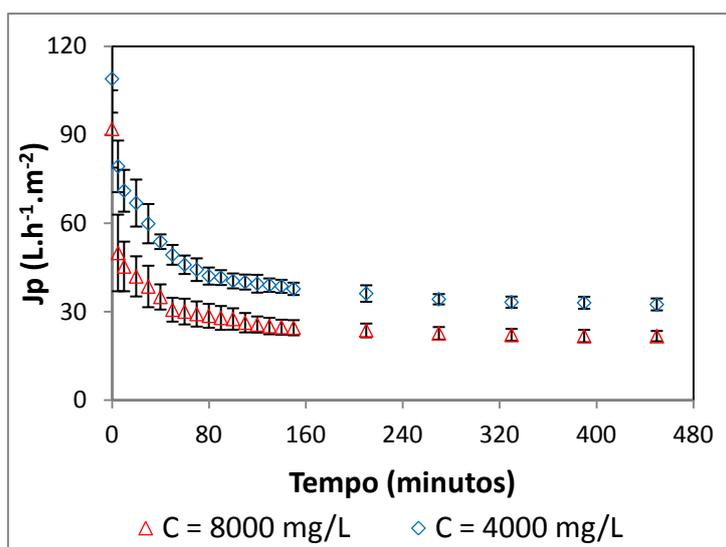


Figura IV.7. Queda de fluxo de permeado com o tempo em testes de permeação com fermento biológico utilizando o permeador de membranas de MF em alça, pressão de filtração de 0,4 bar e vazão de ar de 7.590 mL.min⁻¹

O resultado era esperado, pois para maior concentração de fermento no meio, maior é o depósito sobre a membrana, portanto maior é a espessura de torta aderida na superfície da membrana e, conseqüentemente, maior a resistência ao transporte. A permeação se estabilizou em J_p igual a aproximadamente 30 e 20 L.h⁻¹.m⁻² para as concentrações de 4.000 e 8.000 mg.L⁻¹, respectivamente.

O efeito da vazão de ar sobre o controle da formação de incrustações foi avaliado através de testes de permeação com e sem injeção de ar. Estes testes foram

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

realizados com membranas de MF, suspensões de 8.000 mg.L^{-1} de fermento biológico e $0,4 \text{ bar}$ de diferença de pressão. Os resultados são apresentados na Figura IV.8.

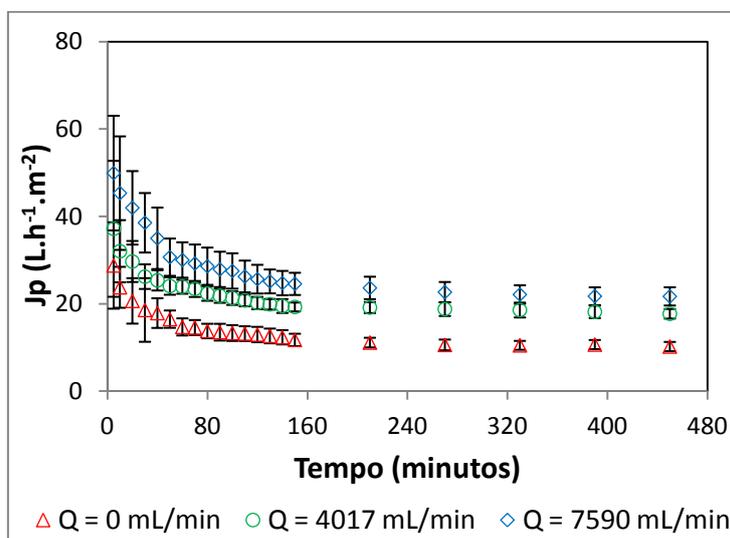


Figura IV.8. Queda de fluxo de permeado com o tempo em testes de permeação com fermento biológico na concentração de 8.000 mg.L^{-1} , utilizando o permeador de membranas de MF em alça, pressão de filtração de $0,4 \text{ bar}$

A Figura IV.8 ilustra que a aeração é um parâmetro importante para a redução de incrustações nas membranas de MF, visto observou-se os maiores fluxos de permeado nos testes nos quais a injeção de ar é utilizada para o controle das incrustações em relação ao teste sem uso de ar ($Q = 0 \text{ mL.min}^{-1}$). Observa-se também, que o fluxo de permeado e a vazão de ar não apresentam relação linear, já que os J_p médios ao final das permeações variam, primeiramente, de $10,47 \pm 1,62$ para $18,16 \pm 3,71 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, com o aumento na vazão de ar 0 para $4.017 \text{ mL.min}^{-1}$, e depois varia de $18,16 \pm 3,71$ para $21,86 \pm 3,74 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, com o aumento na vazão de ar de 4.017 para $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$. Na última comparação, os valores são estatisticamente iguais. Este resultado, discutindo até o momento, ratifica a literatura descrita no capítulo II, onde os estudos apontam para existência de um valor crítico de vazão de ar, na qual não há mais redução dos efeitos de incrustações (CABASSUD *et al.*, 1997, UEDA *et al.*, 1997, CHANG e FANE, 2000, LIU *et al.*, 2000, LE-CLECH *et al.*, 2003).

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

IV.1.3 Determinação das condições críticas

O fluxo crítico é um dos parâmetros operacionais mais importantes nos BRM e é definido como sendo o maior valor de fluxo de permeado onde não se observa uma diminuição deste fluxo com o tempo (FIELD *et. al.*, 1995). Acima do fluxo crítico, são observados os efeitos mais intensos da formação de incrustações nas membranas, pois nesta condição existe maior tendência de arraste de partículas, não permitindo que as condições hidrodinâmicas evitem o aumento de espessura da torta formada. O fluxo crítico é função das características do meio, como concentração, carga, tamanho de sólidos e das condições hidrodinâmicas.

As Figuras a seguir mostram os resultados dos testes para a determinação dos $J_{p\text{crítico}}$, para algumas condições experimentais. A Figura IV.9, ilustra o resultado do teste com permeador de membranas de UF em alça, na concentração de 4.000 mg.L^{-1} de fermento biológico e vazão de ar igual a $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$.

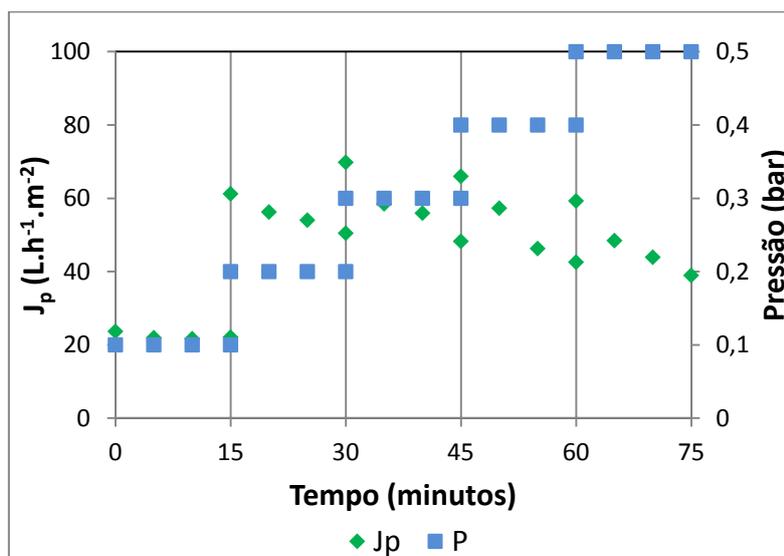


Figura IV.9. Determinação de condições críticas em teste de permeação com fermento biológico na concentração de 4.000 mg.L^{-1} e vazão de ar de $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$, utilizando membranas de UF

Da Figura IV.9, primeiramente se observa que o fluxo de permeado oscila levemente próximo ao valor de $21 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, para pressão de $0,1 \text{ bar}$, acreditando-se que o efeito de incrustações não está presente ou pouco se faz ser notado. Com o aumento na pressão, para $0,2 \text{ bar}$, houve um aumento de J_p para $61,22 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, com queda

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

contínua de fluxo de permeado até culminar no J_p de $50,48 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, em 15 minutos de permeação. Nessa pressão ficou nítido que houve formação de incrustações, devido a queda contínua de fluxo de permeado. Assim ocorre de degrau em degrau aplicado na pressão, onde há sempre um aumento de fluxo de permeado e declínio no tempo. A partir do discutido nesse parágrafo, para estas condições de teste, o valor de $J_{p\text{crítico}}$ está entre 21 e $55,5 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ (médias dos fluxos de permeado nos dois degraus) e de $P_{\text{crítica}}$ está entre $0,1$ e $0,2$ bar. Novamente, deixa-se claro que as condições críticas dependem das condições operacionais dos testes.

As Figuras IV.10, IV.11 e IV.12 ilustram os resultados dos testes de determinação das condições críticas com as membranas de MF.

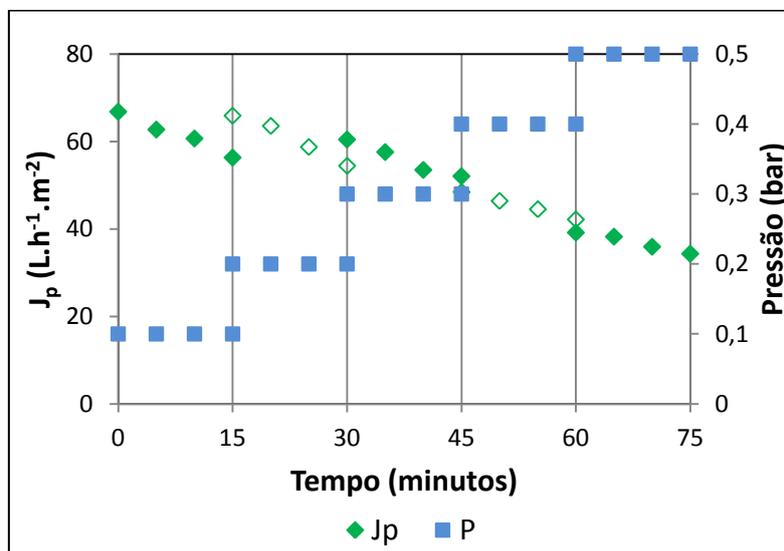


Figura IV.10. Determinação de condições críticas em teste de permeação, com suspensão de fermento biológico na concentração de 4.000 mg.L^{-1} e vazão de ar de $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$, para as fibras-ocas de MF

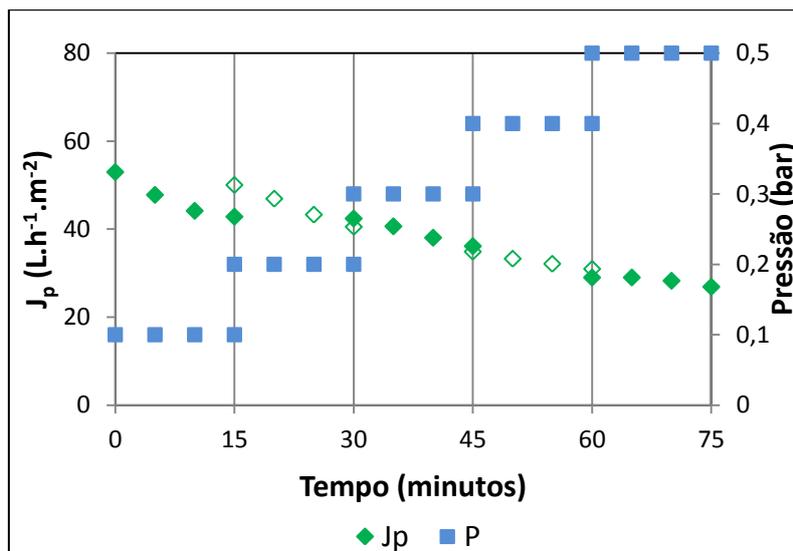


Figura IV.11. Determinação de condições críticas em teste de permeação, com suspensão de fermento biológico na concentração de 8.000 mg.L^{-1} e vazão de ar de $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$, para as fibras-ocas de MF

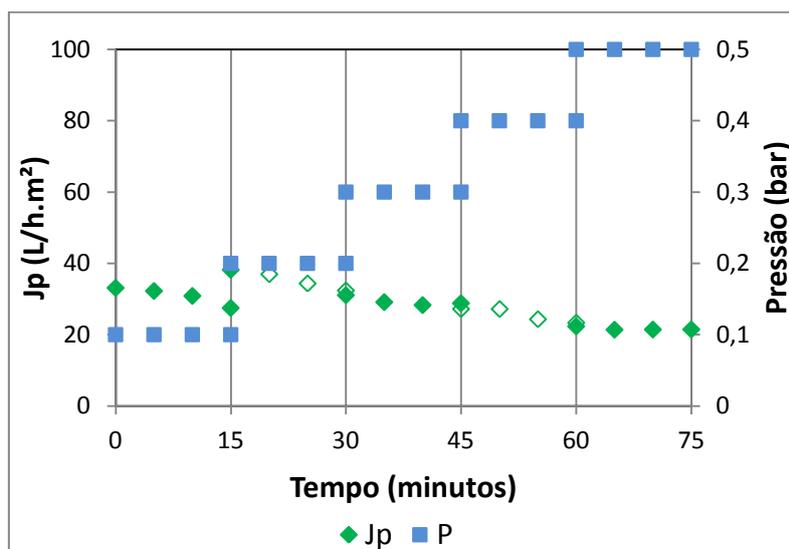


Figura IV.12. Determinação de condições críticas em teste de permeação, com suspensão de fermento biológico na concentração de 8.000 mg.L^{-1} e vazão de ar de $4.017 \text{ mL.min}^{-1}$, para as fibras-ocas de MF

Nos 3 casos apresentados nas Figuras IV.10, IV.11 e IV.12, não foi possível a determinação das condições críticas já que, na pressão de filtração da menor escala do medidor (0,1 bar) houve queda de fluxo de permeado no tempo, o que indica a formação de incrustações já nessas condições de teste. No teste em que é possível a comparação entre as fibras de MF e UF (8.000 mg.L^{-1} e $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$), acredita-se as condições hidrodinâmicas próximas às membranas de UF sejam melhores que nas de MF,

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

consequência de uma melhor movimentação das fibras, que se encontram livres para oscilar dentro do recipiente com o meio a ser filtrado. As fibras de UF são mais flexível que as de MF e visivelmente sofriam maior oscilação com aeração. Portanto, este possivelmente possa ser a razão pela qual as incrustações não sejam observáveis para os testes realizados com diferença de pressão de 0,1 bar, o que faz com que o fluxo de permeado seja estável, não acontecendo o mesmo com as fibras de MF.

IV.1.4 Determinação das resistências ao transporte

A determinação das resistências ao escoamento é importante no tocante à quantificação das incrustações sobre as membranas e a contribuição que cada mecanismo exerce sobre a resistência por incrustações total.

Todas as resistências calculadas nesse tópico utilizaram a viscosidade da água, considerando ser próxima suficiente da viscosidade real do meio a ser filtrado ($\mu = 1,003 \times 10^{-3}$ Pa.s). Os desvios padrões (σ), de medidas indiretas neste tópico, foram calculados pelo método de propagação de erros (VUOLO, 1992). As resistências são apresentadas em intervalos de valores que representam que o valor real está contido no mesmo com 95 % de confiança ($\bar{X} \pm 1,96\sigma$).

IV.1.4.1 Resistências das membranas (R_m)

As membranas representam uma resistência fixa ao escoamento, portanto é importante determiná-la para descontar da resistência total e ter conhecimento da resistência provocada somente por incrustações.

A Tabela IV.1 a seguir apresenta as R_m das membranas de MF e UF testadas nos permeadores com membranas em forma de alça para caracterização e testes de permeação.

Tabela IV.1: Resistência das membranas testadas

Membrana	\bar{L}_p (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	σ_{L_p} (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	$R_m \times 10^{11}$ (m ⁻¹)	$\sigma_{R_m} \times 10^{11}$ (m ⁻¹)
MF	1.723	8,4	2,09	0,01
UF	501	1,9	7,19	0,03

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como esperado, a R_m das membranas de UF é maior, cerca de 3,4 vezes pois, como visto na caracterização morfológica em MEV, estas fibras possuem poros de tamanho médio menores que as de MF. As R_m das fibras de MF e UF determinadas foram de $(2,09 \pm 0,02) \times 10^{11}$ e $(7,19 \pm 0,06) \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$, respectivamente.

IV.1.4.2 Resistência por adsorção (R_a)

O mecanismo de incrustação por adsorção em BRM é muito importante, já que muitos materiais excretados pelas células dos microrganismos dos lodos ativados possuem afinidade com o material das membranas, adsorvendo e reduzindo o tamanho efetivo de passagem para permeado.

Os permeadores de membranas em forma de alça foram mantidos em contato com a suspensão de fermento biológico nas concentrações de testes por 180 minutos e logo após foram determinadas suas permeabilidades hidráulicas à água pura. A Figura IV.13 e IV.14 mostram os perfis de fluxo de permeado (J_p) com a pressão de filtração, para o permeador de membranas de MF e UF em forma de alça nas condições citadas, respectivamente.

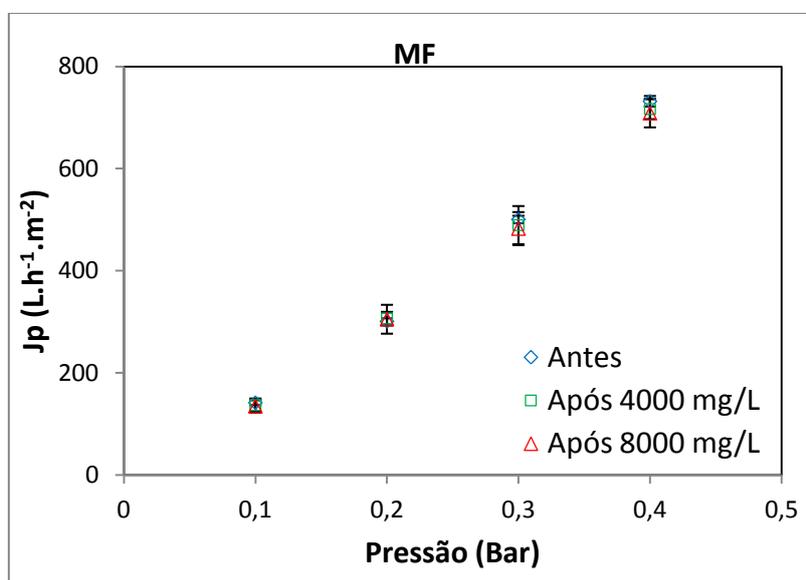


Figura IV.13. Permeabilidade hidráulica das membranas de MF do permeador alça, antes e após contato com suspensões de 4.000 mg.L^{-1} e 8.000 mg.L^{-1}

As permeabilidades hidráulicas das membranas de MF à água pura obtidas foram de 1723 ± 17 , 1694 ± 59 e $1675 \pm 44 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{bar}^{-1}$ antes, após contato com

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

suspensão de 4.000 e 8.000 mg.L⁻¹, respectivamente. Estes resultados são equivalentes estatisticamente, concluindo-se então que as R_a são praticamente nulas, para ambos os testes. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que o fermento biológico utilizado como modelo nos testes não possui substâncias que possam adsorver nos poros das membranas, diferentemente dos lodos ativados.

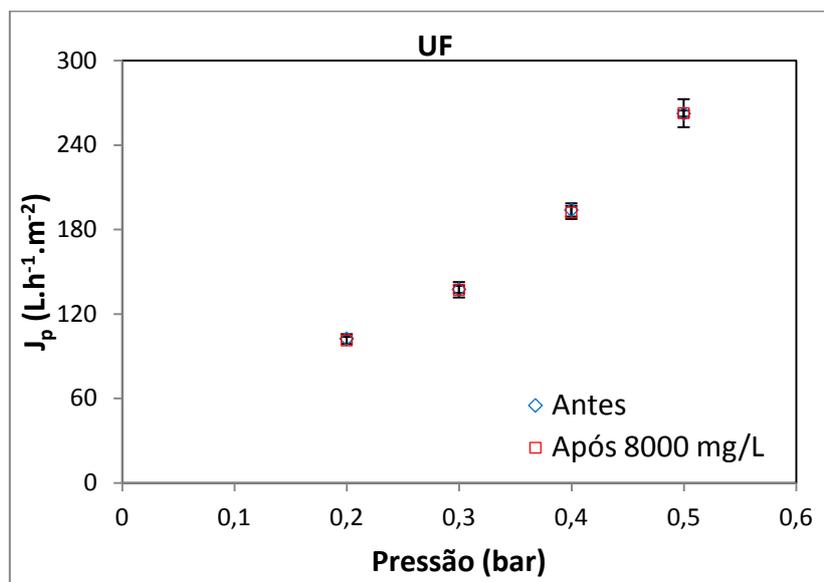


Figura IV.14. Permeabilidade hidráulica das membranas de MF do permeador em alça, antes e após contato com suspensão de 8.000 mg.L⁻¹

As permeabilidades hidráulicas à água pura obtidas para a Membrana de UF foram de 501 ± 4 e 499 ± 5 L.h⁻¹.m⁻².bar⁻¹ antes e após contato com suspensão de fermento biológico na concentração de 8.000 mg.L⁻¹, respectivamente. Estes valores também são equivalentes estatisticamente. Portanto, a mesma observação dos resultados da Figura IV.13 pode ser feita com relação a R_a nos testes de permeação com fermento utilizando fibras de UF: que esta pode ser considerada nula.

IV.1.4.3 Resistência por bloqueio de poros (R_{bp})

A Figura IV.15 mostra para a membrana de MF o perfil de fluxo de permeado (J_p) em função da diferença de pressão de filtração (ΔP) para testes com água pura, após os testes de permeação com fermento biológico em diferentes condições, conforme indicado na figura, nas condições citadas.

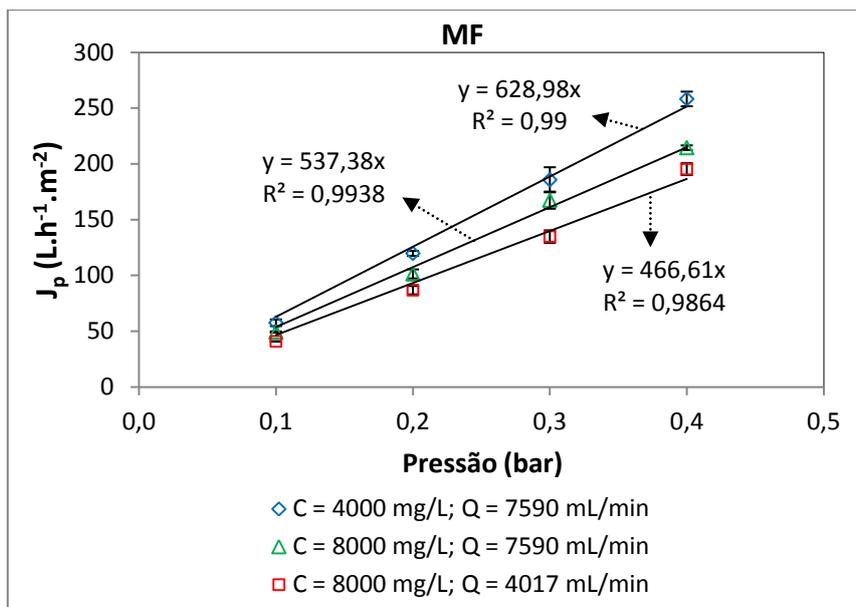


Figura IV.15. Determinação das permeabilidades hidráulicas após os testes de permeação com fermento biológico nas concentrações de 4.000 e 8.000 $mg \cdot L^{-1}$, vazões de ar de 4.017 e 7.590 $mL \cdot min^{-1}$ e pressão de filtração de 0,4 bar

Observa-se na Figura IV.15, que a permeabilidade hidráulica à água pura é maior nas membranas de MF após os testes de permeação com fermento biológico à concentração de 4.000 $mg \cdot L^{-1}$ e vazão de ar de 7.590 $mL \cdot min^{-1}$, cujo valor medido foi de 629 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot bar^{-1}$, em comparação com as L_p medidas posteriormente a testes com concentração de 8.000 $mg \cdot L^{-1}$ e vazões de ar de 4.017 e 7.590 $mL \cdot min^{-1}$, onde os valores foram de 537 e 467 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot bar^{-1}$, respectivamente.

A Tabela IV.2 apresenta os valores obtidos para as resistências por bloqueio de poros nas diferentes condições de testes de permeação com fermento biológico e para os dois tipos de membrana investigados.

Tabela IV.2: Resistências por bloqueio de poros

Membrana	MF				UF
	4.000	8.000			
Concentração ($mg \cdot L^{-1}$)	4.000	0	4.017	7.590	7.590
Q_{ar} ($mL \cdot min^{-1}$)	7.590				
$R_{bp} \times 10^{11}$ (m^{-1})	3,62	7,83	5,62	4,60	1,85
$\sigma_{bp} \times 10^{11}$ (m^{-1})	0,06	0,21	0,13	0,11	0,15

σ – desvio padrão

Nos testes de permeação na concentração de 4.000 $mg \cdot L^{-1}$, foi observado menor bloqueio de poros das membranas, conforme a Tabela IV.2, devido a menor quantidade

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

de material suspenso disponível em relação aos testes com 8.000 mg.L⁻¹. A R_{bp} determinada após os testes de permeação com fermento biológico com concentração de 4.000 mg.L⁻¹ e vazão de 7.590 mL.min⁻¹, foi de $3,62 \times 10^{11} \pm 0,12 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$, enquanto que para a concentração de 8.000 mg.L⁻¹ foi de $4,6 \times 10^{11} \pm 0,22 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$.

Com relação à variação de vazão de ar, observa-se que, o seu aumento reduz o bloqueio de poros pelas partículas de fermento biológico. Após os testes de permeação com fermento biológico para as concentrações de 8.000 mg.L⁻¹ e vazões de 4.017 e 7.590 mL.min⁻¹, foram determinadas R_{bp} de $5,62 \times 10^{11} \pm 0,26 \times 10^{11}$ e $4,6 \times 10^{11} \pm 0,22 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$, respectivamente, além da R_{bp} determinada para o teste sem ar na mesma concentração, que resultou em $7,83 \times 10^{11} \pm 0,42 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$. Acredita-se que as bolhas formadas além de reduzir a camada de torta aderida na superfície das membranas, geram condições hidrodinâmicas favoráveis para que haja menor concentração de partículas com tamanho menores que o tamanho médio de poros das membranas, que possam bloquear seus poros.

Como era esperado, por possuir poros de tamanho médio menor, as membranas de UF sofrem menor bloqueio de poros, resultando numa R_{bp} cerca de 2,5 vezes inferior que nas membranas de MF.

IV.1.4.4 Resistência da torta formada (R_t)

A resistência da torta (R_t) é resultado da adesão de material suspenso na superfície da membrana, obtida pela subtração das resistências dos outros mecanismos de incrustações (adsorção (R_a) e bloqueio de poros (R_{bp})), além da resistência por polarização por concentração (R_{pc}), da resistência total (R_T) a permeação através das membranas. A R_{pc} é de difícil determinação, portanto será considerado que seu valor está inserido no valor de R_t . As R_T foram calculadas através das médias das permeabilidades das membranas ao final de cada teste com fermento biológico e os desvios padrões associados, calculados pela Equação IV.2, a partir dos desvios padrões das permeabilidades obtidas nos experimentos em triplicatas. A Tabela IV.3 mostra um resumo das resistências relativa aos diferentes mecanismos de incrustações, comparando as condições de testes.

Tabela IV.3: Resumo das resistências ao transporte por mecanismos de incrustações e das membranas, com determinação das resistências das tortas formadas nos testes citados

Membrana		MF												UF		
Q_{ar} (mL.min ⁻¹)		7.590			0			4.017			7.590			7.590		
C (mg.L ⁻¹)		4.000			8.000											
$R \times 10^{11}$ (m ⁻¹) $\sigma_R \times 10^{11}$ (m ⁻¹) %	R_T	48,16	0,34	100	145,99	0,82	100	91,33	0,45	100	69,42	0,53	100	39,32	0,37	100
	R_a	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0
	R_{bp}	3,62	0,06	8	7,83	0,21	5	5,62	0,13	6	4,60	0,11	7	1,85	0,15	5
	R_{pc}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	R_m	2,10	0,01	4	2,10	0,01	1	2,10	0,01	2	2,10	0,01	3	7,20	0,03	18
	R_t	42,44	0,35	88	136,06	0,85	93	83,61	0,47	92	62,72	0,54	90	30,27	0,40	77

σ – desvio padrão

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados para R_t mostram claramente que, na mesma vazão de ar, um aumento na concentração de fermento biológico nos testes de permeabilidade das membranas de MF provoca maior depósito de partículas na superfície das fibras. Nestes testes, nas vazões de ar de $7.590 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e concentrações de 4.000 e $8.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, foram obtidos valores de R_t iguais a $(42,44 \pm 0,7) \times 10^{11}$ e $(62,72 \pm 1,08) \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$, respectivamente, correspondendo a uma diferença de cerca de 32%.

Já a comparação entre as R_t dos testes com as mesmas concentrações ratifica que a aeração é um parâmetro essencial relacionado ao controle de incrustações, já que houve redução de cerca de 39% e 54 % da R_t na variação da vazão de ar de 0 para 4.017 e de 0 para $7.590 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivamente, nos testes com concentração de $8.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. A eficiência é reduzida quando se leva em consideração a variação de 4.017 para $7.590 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, cerca de 25%, explicando o fato de que aumento de intensidade de aeração não leva a uma resposta linear no controle de incrustações, inclusive, atingindo a uma vazão crítica, da qual, variações a partir desta não são mais correspondidas pela redução na resistência ao transporte, como discutido no Capítulo II.

Em relação aos tipos de membranas estudados, observa-se que a resistência da torta formada nas fibras de UF é 51% inferior à observada nas fibras de MF, em condições experimentais similares. Provavelmente, este resultado está relacionado à movimentação das fibras utilizadas para a fabricação dos módulos, maior nas fibras de UF em relação às de MF.

PARK *et al.* (2010) encontraram o valor de $18 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ para a resistência de incrustações, que é a resistência total descontada da resistência de membrana ($5,9 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$), em testes com em BRM com lodo ativado, utilizando ar, na vazão de $1.180.000 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, fornecido na base e no topo do permeador de fibras-ocas de PVDF com densidade de empacotamento de $172 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

A partir da Tabela IV.3, podemos calcular quanto, percentualmente, as resistências da tortas (R_t) representam das resistências por incrustações (R_i), que é definida como a soma de todas as resistências por mecanismos de incrustações, segundo a Equação IV.3, nas diversas condições de testes de permeação.

$$\frac{R_t}{R_t + R_{bp} + R_a} \times 100 (\%) \quad \text{Equação IV.3}$$

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

Verificou-se que estes resultados variaram de 92% a 94,6%, mostrando que a formação de torta é o mecanismo de incrustação dominante e que o projeto de permeadores é importante para tentar reduzir a R_t através da modificação hidrodinâmica próxima as membranas. Segundo KIM *et al.* (2008), em testes com BRM piloto para tratamento de $50 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de efluente doméstico, operados com lodos ativados, com vazão de ar de $600.000 \text{ mL}.\text{min}^{-1}$, a R_t representa de 76 a 92% de R_i .

IV.1.5 Efeito da recuperação por retrolavagem

A retrolavagem é uma ação mitigadora proposta para o controle de incrustações em BRM. Esta age em sinergia com outras ações mitigadoras, como a aeração. Neste trabalho, os testes com retrolavagem tiveram como objetivo avaliar a extensão de sua influência sobre a formação de incrustações e estudar diferentes frequências e amplitudes, buscando a melhor delas. Foram realizados testes com duas condições de retrolavagem, expressos em minutos de permeação/segundos de retrolavagem, com os permeadores de membranas de MF em alça, de 15/15, com e sem a injeção de ar, e 3/6, com o uso de ar. As Figuras IV.16, IV.17, IV.18 e IV.19 e a Tabela IV.4 apresentam esses resultados.

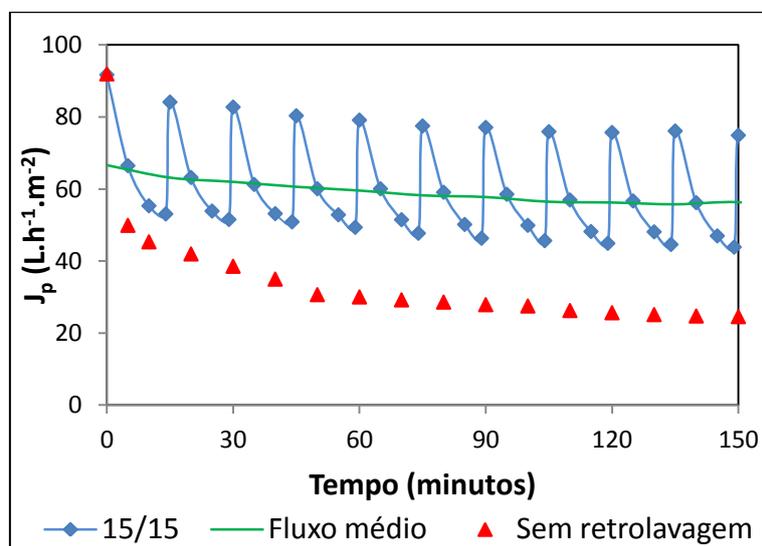


Figura IV.16. Perfis de J_p ao longo do tempo para testes com fermento, com e sem retrolavagem, na concentração de $8.000 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$ e vazão de ar de $7.590 \text{ mL}.\text{min}^{-1}$

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

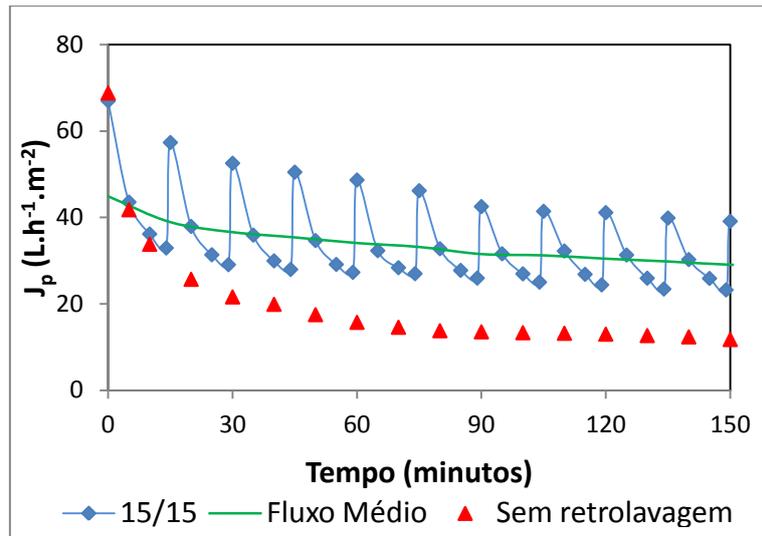


Figura IV.17. Perfis de J_p ao longo do tempo para testes com fermento, com e sem retrolavagem, na concentração de $8.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e sem uso de ar

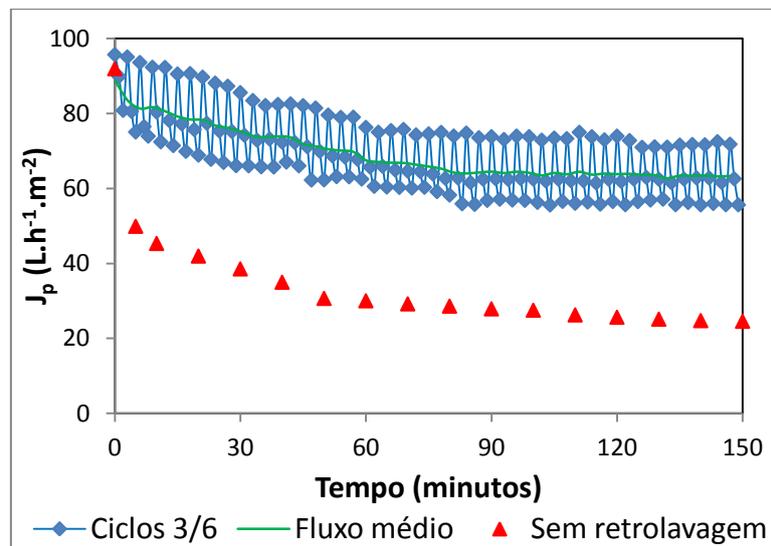


Figura IV.18. Perfis de J_p ao longo do tempo para testes com fermento, com e sem retrolavagem, na concentração de $8.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e vazão de ar de $7.590 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$

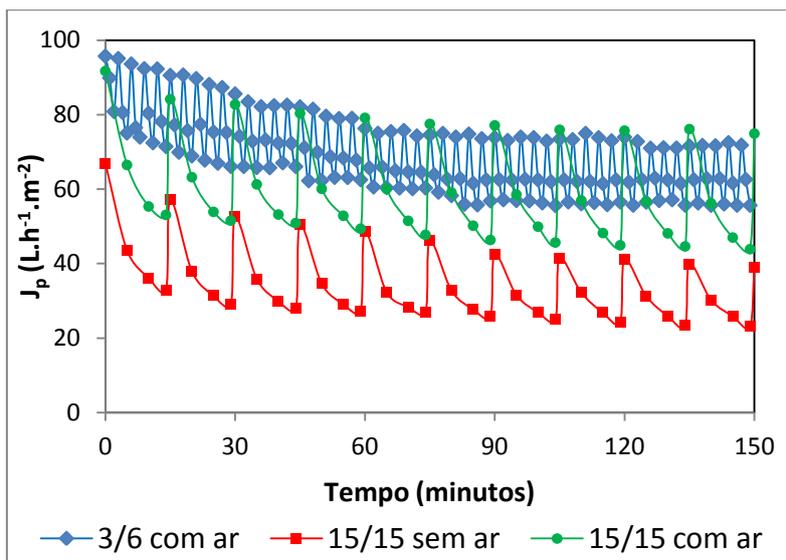


Figura IV.19. Comparação entre os ciclos de retrolavagem e a influência do uso de ar

As Figuras IV.16, IV.17 e IV.18, apresentadas acima, mostram que a retrolavagem é uma técnica adequada para controle de incrustações, pois em todas as condições de testes de permeação com fermento biológico em que foi usada, promoveu o aumento o fluxo de permeado médio. O fluxo de permeado médio, é calculado como a média dos fluxo de permeado em cada ciclo de permeação/retrolavagem. Na comparação entre os ciclos de retrolavagem adotados, observando a Figura IV.19, constata-se que o fluxo permeado médio nos ciclos de 3/6 minutos de permeação/segundos de retrolavagem, com o uso de ar, se manteve mais elevado do que nos ciclos de 15/15 com e sem uso de ar. A segunda observação é feita com relação a influência da aeração sobre a eficiência de recuperação da retrolavagem. Pode-se afirmar que o ar potencializa o efeito da retrolavagem na redução de incrustações, pois se acredita que as bolhas atuam juntamente com a inversão de fluxo de permeado na retirada de material particulado depositado na forma torta.

A Tabela IV.4 mostram os resultados detalhados dos testes de permeação com fermento biológico utilizando retrolavagem para a recuperação da permeabilidade das fibras-ocas.

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela IV.4: Resultados detalhados dos testes de permeação com fermento biológico com uso de retrolavagem

Ciclos (minutos/segundos)	15/15 sem aeração	3/6 Com aeração	15/15 com aeração
Tempo de teste (h)	2,5	2,5	2,5
Fluxo total médio com retrolavagem ($L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$)	34,60	69,28	59,68
Fluxo total médio sem retrolavagem ($L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$)	21,34	35,48	35,48
Produção efetiva com retrolavagem (L)	1,98	3,35	3,55
Produção sem retrolavagem (L)	1,33	2,22	2,22
Eficiência de recuperação (%)	49	51	60

Conforme a Tabela IV.4, o teste com ciclos de retrolavagem de 3/6 minutos de permeação/segundos de retrolavagem, com aeração, foi o que apresentou o maior fluxo total médio ($69,28 L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$). Apesar disso, a retrolavagem com ciclos de 15/15, com uso de ar, foi a que apresentou maior produção efetiva, que é o volume de permeado produzido, descontado o volume utilizado para realizar a retrolavagem. Além disso, foi a mais eficiente (60%), na comparação do aumento de produção de permeado com relação ao teste sem retrolavagem (51%). A explicação para estes resultados, é a de que, apesar de se manter num nível mais elevado de J_p , que conseqüentemente produz um volume maior de permeado, o teste com ciclos de 3/6 utilizam também maior volume de permeado produzido (980 mL), em relação aos testes com ciclos de 15/15 (180 mL), o que ao final reduz sua produção efetiva. Os testes de permeação com retrolavagem de ciclos de 3/6, com uso de ar, mantém o J_p mais elevado devido ao pequeno tempo de permeação, que reflete na formação de uma torta na superfície das fibras de espessura reduzida e que é controlada pelos vários pulsos de retrolavagem.

A Tabela IV.4, também reforça o discutido anteriormente, sobre os testes de permeação com retrolavagem com ciclos de 15/15 minutos de permeação/segundos de retrolavagem, com e sem uso de ar, em que a aeração tem ação sinérgica ao fluxo inverso de permeado na remoção de incrustações, visto a eficiência de recuperação de permeabilidade foi de 60%, ao passo que, no mesmo teste, porém sem uso de ar, foi de 49%.

IV.1.6 Recuperação por limpeza química

Apesar do uso da retrolavagem ter se mostrado eficiente para recuperar o fluxo de permeado, a limpeza química se faz necessária quando a permeabilidade atinge

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

valores abaixo do limite estabelecido para determinado processo de BRM. Neste trabalho, ao final dos testes de permeabilidade com a suspensão de fermento biológico, mesmo com o uso de retrolavagem, observou-se que houve queda da permeabilidade hidráulica à água pura das membranas por bloqueio de poros (após a retirada da torta por água corrente), tornando a limpeza química fundamental para a recuperação da permeabilidade original, antes de novos testes. Esta etapa foi realizada antes do início de cada novo experimento.

Nas duas primeiras limpezas, realizadas após os dois primeiros testes (duplicatas) de permeação com suspensão de fermento biológico, em membranas de MF, com concentração de 4.000 mg.L^{-1} e vazão de ar de $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$, foram utilizadas metodologias diferentes, buscando avaliar o efeito do ar sobre o tempo necessário para a recuperação das membranas. Foram realizadas limpezas com e sem uso de ar. Para ambos os casos, a limpeza foi realizada com soluções de NaClO 0,3%, sem permeação. Na limpeza com a injeção de ar, a vazão utilizada foi de $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$. Admitiu-se que as membranas estivessem recuperadas e prontas para novos testes a partir do momento em que suas permeabilidade hidráulicas à água pura fossem iguais a original, com variação percentual de 1%. A Figura IV.20 mostra o resultado das duas primeiras limpezas.

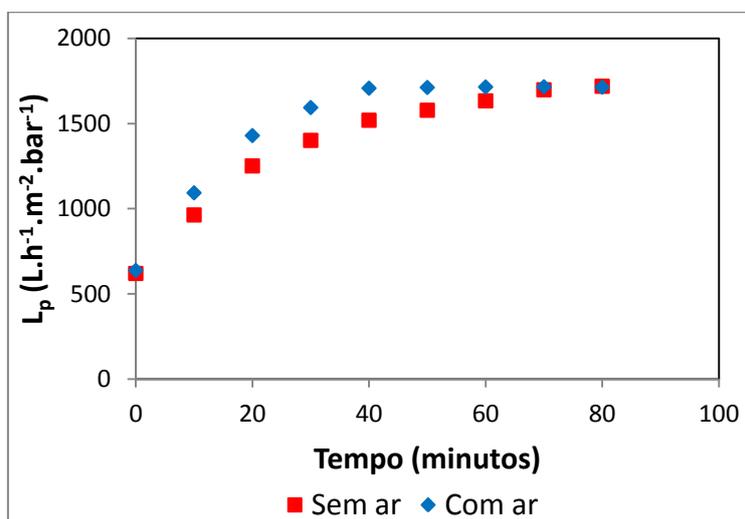


Figura IV.20. Recuperação da L_p da membrana de MF por limpeza química

A Figura IV.20 mostra, para este caso, que o uso de ar auxilia na limpeza química das membranas, pois estas são recuperadas em 40 minutos. Sem a injeção de ar, a recuperação do valor de permeabilidade hidráulica original da membrana somente é

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

atingida após 80 minutos de limpeza. O procedimento de limpeza em solução de NaClO 0,3%, com injeção de ar e duração de 40 minutos foi adotado como padrão para todos os demais experimentos.

IV.2 O Novo permeador

Como já explicitado no Capítulo III, o novo modelo permeador a ser investigados no presente trabalho foi desenvolvido pela empresa PAM-Membranas Seletivas Ltda. Foi realizada a seleção dos parâmetros construtivos, como diâmetro, comprimento das fibras, densidade de empacotamento de fibras e quantidade de furos do injetor de ar, resultando em um total de cinco variantes para estudo da influência destes parâmetros citados sobre a hidrodinâmica na região próxima as membranas e, conseqüentemente, sobre o controle da formação de incrustações. As variantes do novo permeador foram codificadas segundo a quantidade de furos no injetor de ar e sua densidade de empacotamento de fibras, mantidos fixos o seu diâmetro e o comprimento das fibras, iguais a 4,4 e 20 cm, respectivamente. Os dois primeiros números da série de codificação representam a quantidade de furos do injetor de ar e os outros números representam a densidade de empacotamento de fibras. Por exemplo, a variante cujo código é 32650, possui 32 furos no injetor de ar e 650 m²/m³ de densidade de empacotamento de fibras.

As membranas utilizadas no novo permeador foram de microfiltração (MF), pois as são as fibras comerciais da PAM-Membranas Ltda.

IV.2.1 Pré-limpeza química, compactação e permeabilidade hidráulica à água pura

Neste item foi adotada metodologia semelhante a de caracterização das membranas dos permeadores em forma de alça. Primeiramente, foi determinada integridade das fibras-ocas via teste de rejeição ao fermento biológico (Tabela IV.5), e então, foi realizada a pré-limpeza química das fibras-ocas das variantes do novo permeador, com solução de 0,7 % de NaClO, por 24 horas para retirar resíduo de PVP (aditivo) que obstruem os poros. Posteriormente, foi realizada a compactação das membranas à 0,7 bar, para finalmente, terem suas permeabilidade hidráulicas à água pura determinadas. A Tabela IV.6 mostra a comparação entre as permeabilidades à água pura antes e após a pré-limpeza química.

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela IV.5: Caracterização por rejeição das membranas MF das variantes do novo permeador

Variante	Turbidez (NTU)		Rejeição (%)
	Alimentação	Permeado	
16650	45	0,02	99
32650	41	0,02	99
64650	41	0,02	99
32800	40	0,02	99
321000	46	0,02	99

Tabela IV.6: Comparação entre as permeabilidades hidráulicas à água pura antes e após pré-limpeza química

Variante	Antes da limpeza	Após limpeza	
	L_p ($L.h^{-1}.m^{-2}.bar^{-1}$)	L_p ($L.h^{-1}.m^{-2}.bar^{-1}$)	σ ($L.h^{-1}.m^{-2}.bar^{-1}$)
16650	221,5	734,6	13,80
32650	85,1	182,3	4,69
64650	98,1	478,6	4,18
32800	170,1	537,0	12,78
321000	408,0	923,3	8,58

σ – desvio padrão

Pelos resultados, pode-se afirmar que os lotes (batelada de produção de fibras) de membranas utilizados na confecção das variantes do novo permeador foram diferentes em cada uma deles.

Observa-se também que a pré-limpeza química com NaClO remove quantidade significativa de agentes obstrutores de poros, provenientes da fabricação das membranas.

IV.2.2 Testes de permeação de suspensões de fermento biológico fresco

Assim como nos permeadores de membranas em forma de alça, os testes de permeação de suspensões de fermento biológico com as variantes do novo permeador objetivaram a análise da intensidade da formação de incrustações frente aos parâmetros operacionais, como pressão de filtração, concentração de fermento e vazão de ar, que corresponde a uma velocidade superficial de ar. Neste item apresenta uma análise individual da variante 32650 do novo permeador, onde se realizou um espectro mais completo de análise, e a análise conjunta das variantes 16650, 32800, 321000 e 64650, com o mesmo objetivo de análise do 32650, incluindo algumas comparações entre eles.

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste item são apresentados com barras de erro, que representam que o valor real está contido nesse intervalo com 95% de confiança (1,96 vezes o valor do desvio padrão).

IV.2.2.1 A variante 32650 do novo permeador

Como já mencionado, a variante do novo permeador, cujo código é 32650, possui 32 furos no injetor de ar da base e densidade de empacotamento de fibras-ocas igual a $650 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Os testes de permeação com suspensões de fermento biológico utilizando esta variante foram realizados de acordo com as condições apresentadas na Tabela IV.7.

Tabela IV.7: Condições de testes de permeação com fermento biológico fresco

Pressão (bar)	Concentração (mg.L ⁻¹)	Vazão de ar (mL.min ⁻¹)	U _g (m.s ⁻¹)
		0	0
0,3	4.000/8.000	1.980	1,31
		4.017	2,67
		7.590	5,04
	12.000	4.017	2,67
		7.590	5,04

Na Tabela IV.7, U_g representa a velocidade superficial de ar, nesse item tratada como a razão entre a vazão de ar e a área total de furos no injetor de ar da base das variante do novo permeador.

As Figuras IV.21, IV.22 e IV.23 apresentam os perfis de queda de permeabilidade das fibras-ocas ao longo do tempo, da variante 32650 do novo permeado, comparando as três pressões de filtração utilizadas, nas três concentrações testadas e com vazão de ar fixa de $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$.

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

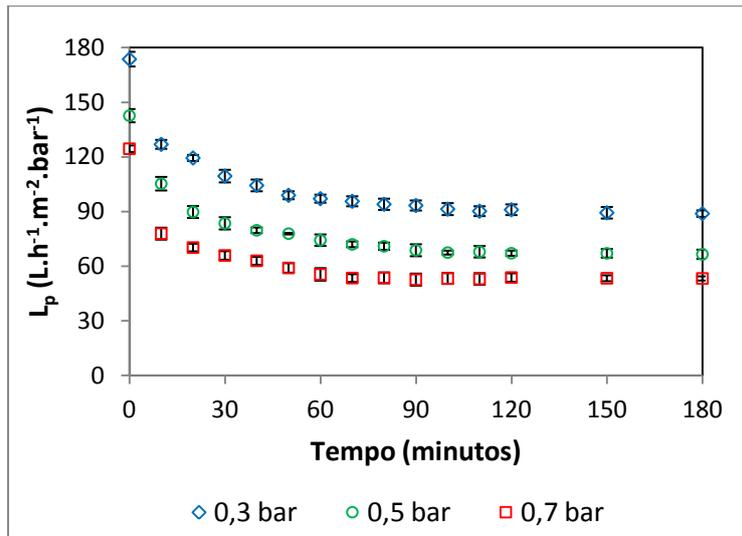


Figura IV.21. Queda de permeabilidade com o tempo, nos testes com concentração de 4.000 mg.L^{-1} , vazão de ar de $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$ ($U_g = 5,04 \text{ m.s}^{-1}$) e pressões de filtração de 0,3, 0,5 e 0,7 bar

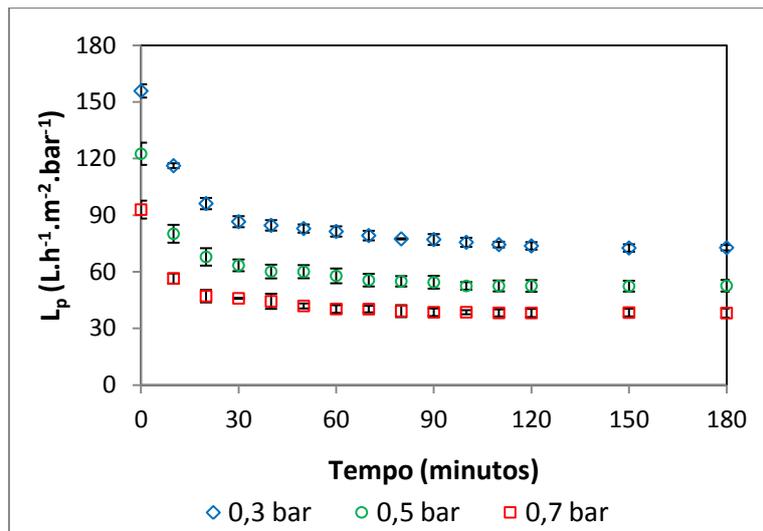


Figura IV.22. Queda de permeabilidade com o tempo, nos testes com concentração de 8.000 mg.L^{-1} , vazão de ar de $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$ ($U_g = 5,04 \text{ m.s}^{-1}$) e pressões de filtração de 0,3, 0,5 e 0,7 bar

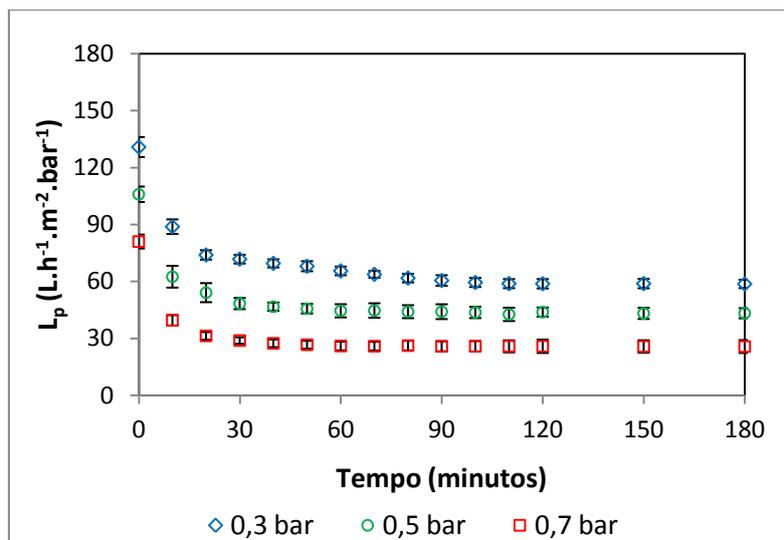


Figura IV.23. Queda de permeabilidade com o tempo, nos testes com concentração de 12.000 mg.L^{-1} , vazão de ar de $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$ ($U_g = 5,04 \text{ m.s}^{-1}$) e pressões de filtração de 0,3, 0,5 e 0,7 bar

A primeira observação é acerca do perfil de queda de permeabilidade das membranas com o tempo, da variante 32650 do novo permeador. Todos os perfis seguem o mesmo comportamento, a partir da primeira medida, com o valor de permeabilidade abaixo da permeabilidade hidráulica à água pura, resultado do fenômeno de polarização de concentração, que se estabelece nos primeiros instantes de teste, somado à intensa formação inicial de incrustações. Este valor cai rapidamente nos 10 primeiros minutos e tem sua queda suavizada até sua completa estabilização, observada em todos os testes após 90 minutos de teste. Este comportamento é observado nos processos de micro e ultrafiltração (HABERT *et al.*, 2006)

O aumento da pressão de filtração provocou maior queda de permeabilidade das membranas em todas as condições testadas, o que era esperado, visto que o aumento de força motriz ao escoamento provoca maior depósito de material suspenso na superfície das membranas, além de compactar mais a torta, diminuindo sua porosidade.

As Figuras IV.24, IV.25 e IV.26 mostram a influência da vazão de ar na queda de permeabilidade das membranas da variante 36650 do novo permeador, nas três concentrações testadas, fixada a pressão de filtração em 0,3 bar.

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

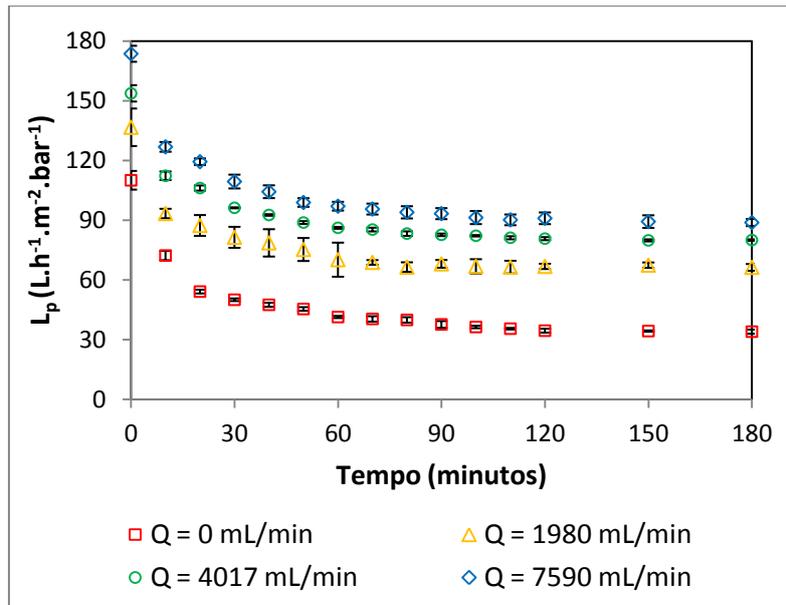


Figura IV.24. Queda de permeabilidade com o tempo, nos testes de permeação com concentração de $4.000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pressão de filtração de $0,3 \text{ bar}$ e nas vazões de ar citadas

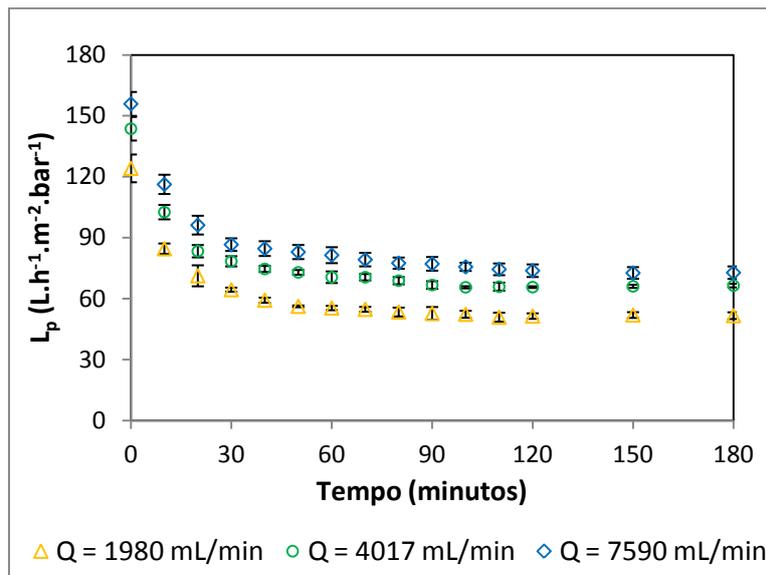


Figura IV.25. Queda de permeabilidade com o tempo, nos testes de permeação com concentração de $8.000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pressão de filtração de $0,3 \text{ bar}$ e nas vazões de ar citadas

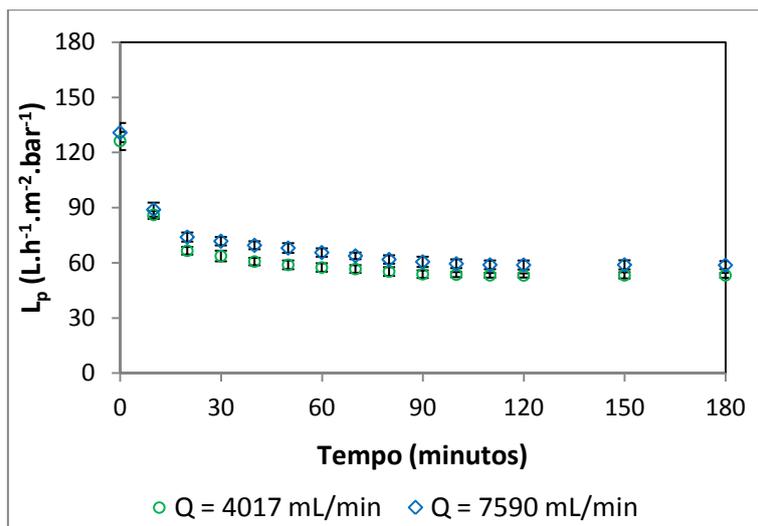


Figura IV.26. Queda de permeabilidade com o tempo, nos testes de permeação com concentração de 12.000 mg.L^{-1} , pressão de filtração de $0,3 \text{ bar}$ e nas vazões de ar citadas

A presença de bolhas de ar nas permeações provoca cisalhamento na torta aderida na superfície das membranas, fazendo com que parte das partículas se soltem, diminuindo sua espessura. A Figura IV.24 evidencia este fato, pois mostra a grande eficiência do uso de ar no controle de incrustações, visto que na variação da vazão de ar de 0 mL.min^{-1} para $1.980 \text{ mL.min}^{-1}$, houve elevação da permeabilidade das membranas, na região estabilizada, de aproximadamente 97 %. Na Figura IV.24 e IV.25, pode-se observar que, apesar do aumento progressivo da vazão de ar aumentar a turbulência na região próxima à superfície das membranas, sua eficiência no controle de incrustações é reduzida continuamente, como se observa na Figura IV.26, resultados que comprovam a literatura discutida no Capítulo II.

Com relação a influência da concentração de fermento na queda de permeabilidade das membranas nos testes, para as 3 pressões de filtração testadas ($0,3$, $0,5$ e $0,7 \text{ bar}$) e vazão de ar fixa e igual a $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$, os resultados anteriores mostram e Tabela IV.8 voltará a mostrar que, o aumento de concentração de fermento biológico nos testes provoca maior queda nos perfis de permeabilidade das membranas do permeador, enfatizando o que já foi discutido anteriormente nos testes com membranas em alça, que o aumento de concentração de fermento biológico aumenta o potencial incrustante da suspensão a ser tratada. As permeabilidades finais médias das fibras-ocas ($L_{p\text{final}}$), que é a média das permeabilidades das membranas na região do gráfico em que estas se encontram em torno de um valor estabilizado, apresentam valores em torno de 89 , 72 e $58 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{bar}^{-1}$ para a pressão de filtração de $0,3 \text{ bar}$, de

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

67, 52 e 43 $\text{L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{bar}^{-1}$ para pressão de filtração de 0,5 bar e de 53, 38 e 25 $\text{L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{bar}^{-1}$ para a pressão de filtração de 0,7 bar, para as concentrações de 4.000, 8.000 e 12.000 mg.L^{-1} , em cada pressão testada, respectivamente.

A Tabela IV.8 mostra as permeabilidades finais médias (L_{pfinal}) em todas as condições de testes de permeação com a variante 32650 do novo permeador estudado.

Tabela IV.8: L_{pfinal} obtidas nos testes de permeação de fermento biológico na variante 32650 do novo permeador

Concentração (mg.L ⁻¹)	Pressão de filtração (bar)	0,3				0,5				0,7							
		Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		Vazão de ar (mL.min ⁻¹)					
		0	1980	4017	7590	4017	7590	4017	7590	4017	7590	4017	7590				
4.000	L_{pfinal} (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	34,3	0,55	66,8	0,74	80,22	0,65	89,7	0,99	64,4	1,02	66,9	0,89	50	0,97	53,5	0,8
8.000	σ (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	30,2	0,88	51,6	0,75	65,98	0,78	73	0,82	50,9	0,51	52,5	1,06	35,9	0,63	38,2	0,91
12.000		-	-	-	-	53,13	0,72	58,8	0,94	41,2	0,9	43,4	1	23,9	0,74	25,7	1,13

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de L_{pfinal} das membranas da variante 32650 do novo permeador variam de 89,7 a 23,9 $L.h^{-1}.m^{-2}.bar^{-1}$, nas condições de testes de permeação com fermento nas concentrações de 4.000 e 12.000 $mg.L^{-1}$ e vazões de ar de 7.590 e 4.017 $mL.min^{-1}$ (0,00064 e 0,00034 $m^3.s^{-1}$ por m^2 de membrana), respectivamente. Essas condições se mostraram como as condições de menor e maior potencial incrustante, respectivamente. Pela Tabela IV.8, ressalta-se que os valores de L_{pfinal} aumentam para o aumento da vazão de ar, entretanto, diminuem para o aumento da pressão de filtração e a concentração de fermento, como já discutido anteriormente.

Para efeito de comparação, PARK *et al.* (2010) conseguiu manter o L_{pfinal} das membranas em 100 $L.h^{-1}.m^{-2}.bar^{-1}$, para teste de permeação em um BRM piloto com lodo ativado na concentração em torno de 8.000 $mg.L^{-1}$ em um tanque de 8,3 m^3 e aeração de 1.180.000 $mL.min^{-1}$ (0,0000972 $m^3.s^{-1}$ por m^2 de membrana), localizada na base e no topo do permeador, de 20 m^2 de fibras-ocas, fixo o fluxo de permeado em 25 $L.h^{-1}.m^{-2}$.

IV.2.2.2 As variantes 16650, 32800, 321000 e 64650 do novo permeador

As variantes de códigos 16650, 32800, 321000 e 64650 do novo permeador possuem 16, 32, 32 e 64 furos no injetor de ar da base e densidades de empacotamento de 650, 800, 1.000 e 650 m^2/m^3 , respectivamente. Foram obtidos os perfis de permeabilidade das membranas das variantes do novo permeador, mantendo o mesmo objetivo dos perfis obtidos para a variante 32650, que é o estudo da influência de parâmetros operacionais, como pressão de filtração e vazão de ar, na formação de incrustações. Nos novos testes, foi estudada somente uma concentração de fermento biológico, a de 8.000 $mg.L^{-1}$, tendo em vista não se julgar necessário verificar novamente a influência da concentração. Os testes de permeação com fermento biológico utilizando estas variantes do novo permeador foram realizados de acordo com as condições apresentadas na Tabela IV.9.

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela IV.9: Condições de testes de permeação com suspensões de fermento biológico utilizando as variantes 16650, 32800, 321000 e 64650 do novo permeador

Variante (código)	Pressão de filtração (bar)	Concentração (mg.L ⁻¹)	Vazão de ar (mL.min ⁻¹)	U _g (m.s ⁻¹)
16650			0	0
			990	1,31
			2.009	2,67
			3.795	5,04
			7.590	10,07
32800	0,3/0,7	8.000	0	0
			1.980	1,31
			4.017	2,67
			7.590	5,04
321000			0	0
			1.980	1,31
			4.017	2,67
			7.590	5,04
64650			0	0
			3.960	1,31
			8.034	2,67
			15.180	5,04

As vazões de ar usadas nestes testes foram escolhidas em função das utilizadas nos testes com 32650, operando-se nas mesmas velocidades superficiais de bolhas (U_g), onde se espera que os regimes hidrodinâmicos sejam compatíveis e sejam passíveis de comparação entre as eficiências dos parâmetros construtivos do novo permeador no controle de incrustações. A comparação será apresentada no item IV.2.5.

As Figuras IV.27 (a, b, c e d) e IV.28 (a, b, c e d) mostram a influência da variação na vazão de ar nos perfis de permeabilidade das membranas das variantes do novo permeador à suspensão de fermento biológico na concentração de 8.000 mg.L⁻¹ e nas pressões de filtração de 0,3 e 0,7 bar, respectivamente.

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

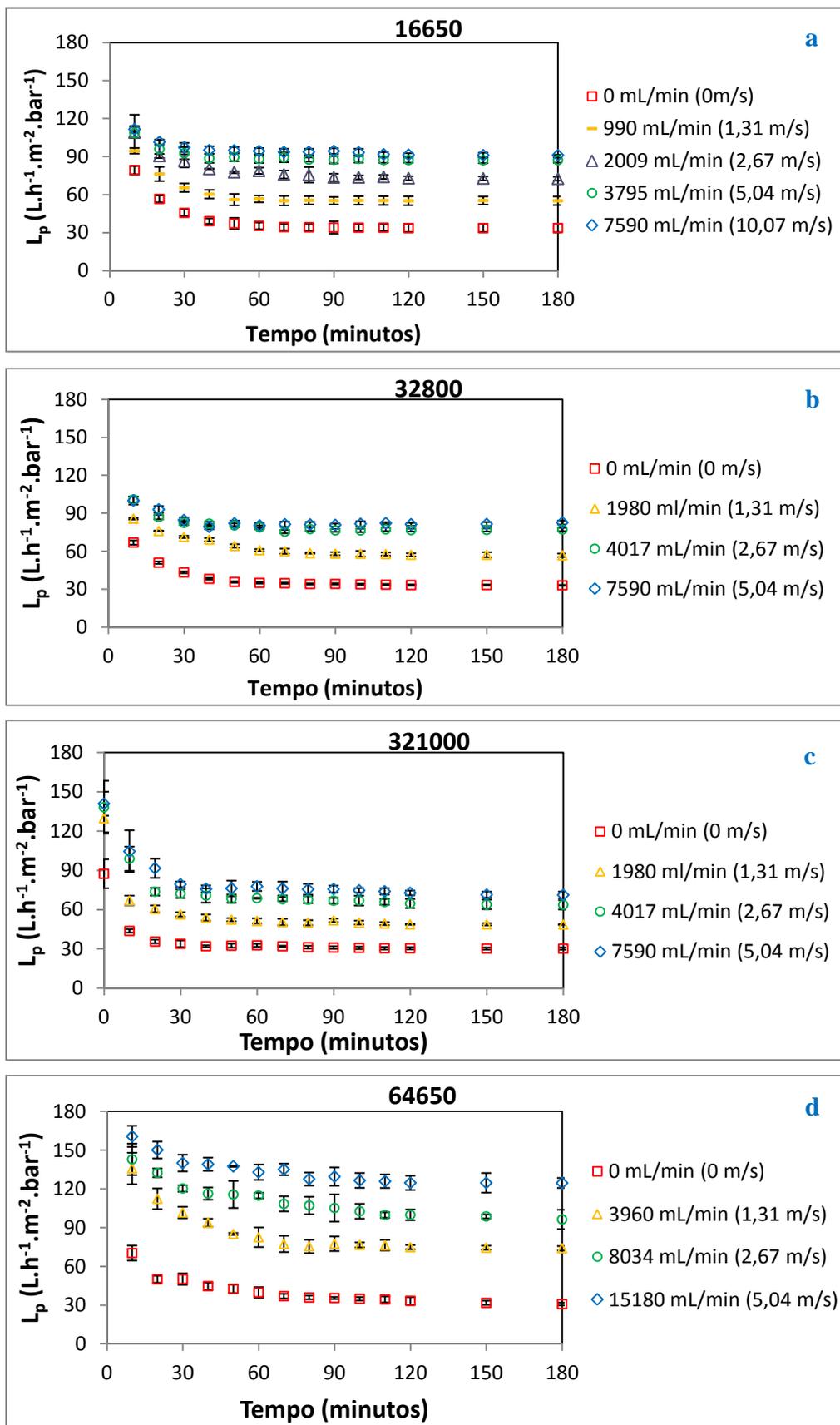


Figura IV.27. Perfis de permeabilidade de (a) 16650, (b) 32800, (c) 321000 e (d) 64650 nos testes a pressão de 0,3 bar, concentrações de $8.000 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ e vazões de ar citadas

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

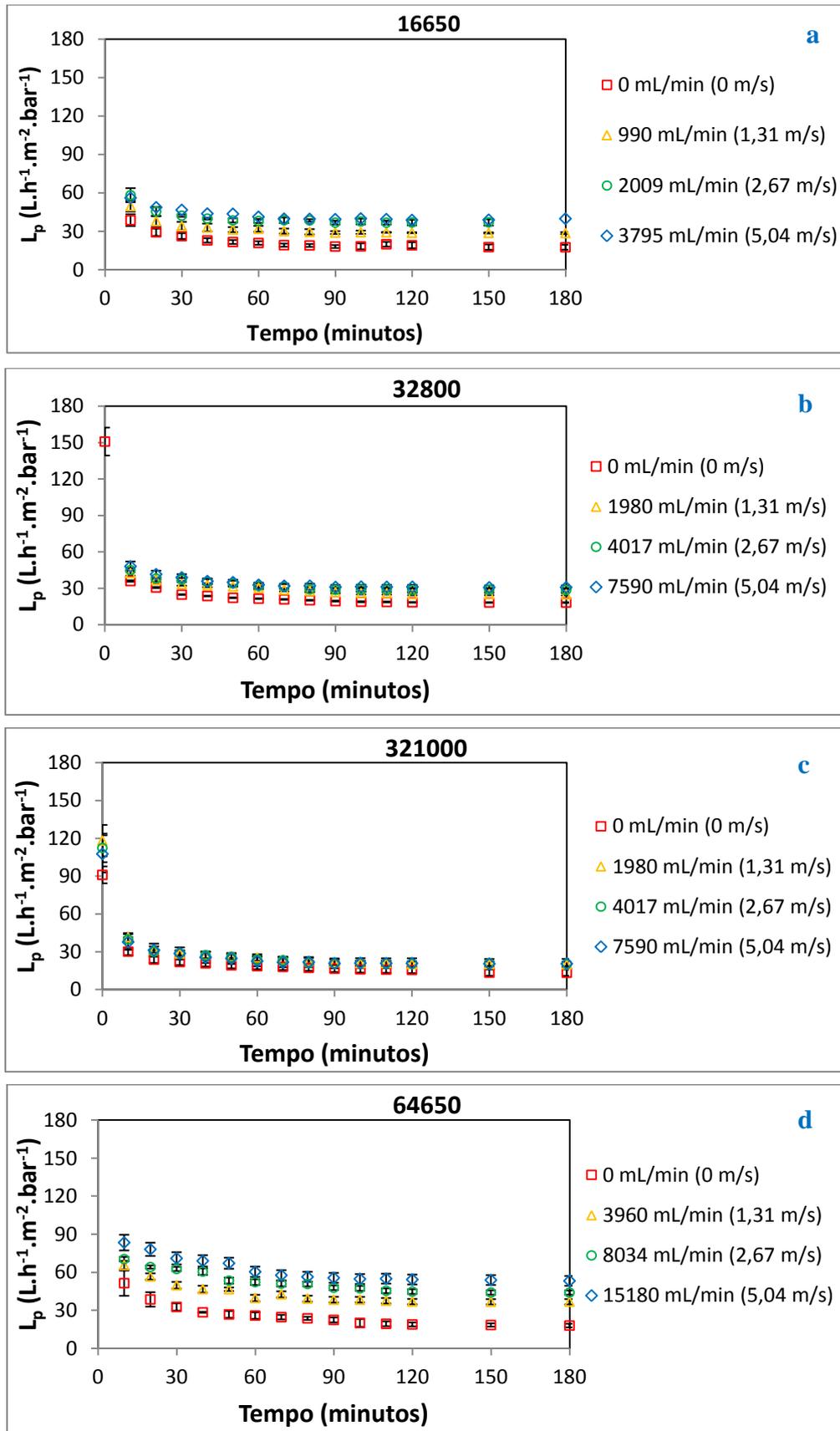


Figura IV.28. Perfis de permeabilidade de (a) 16650, (b) 32800, (c) 321000 e (d) 64650 nos testes a pressão de 0,7 bar, concentrações de $8.000 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ e vazões de ar citadas

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo as Figuras IV.27 e IV.28, os perfis de permeabilidade das membranas à suspensão de fermento biológico, das variantes 16650, 32800, 321000 e 64650 do novo permeador, apresentam o mesmo comportamento dos apresentados para a variante 32650, nos quais se observa que o uso de ar é um parâmetro adequado para a redução dos efeitos de incrustações. Também é observado, nas duas pressões de filtração (0,3 e 0,7 bar), que o aumento da vazão ou velocidade superficial de ar provoca menor queda de permeabilidade com o tempo, até a vazão de ar, denominada crítica, onde não se observa variação nestes perfis. Esses resultados são comprovados pela literatura, onde diversos trabalhos afirmam que a eficiência de aeração no controle de incrustações é limitada (CABASSUD *et al.*, 1997, UEDA *et al.*, 1997, CHANG e FANE, 2000, LIU *et al.*, 2000, LE-CLECH *et al.*, 2003). Para as variantes 16650, 32800 e 321000, nos testes com pressão de filtração de 0,3 bar, a vazão de ar crítica é por volta de 4.000 mL.min⁻¹. Nestes casos, a comparação entre as variantes do novo permeador ainda se faz justa, devido a diferença entre as permeabilidades hidráulicas à água pura das membranas utilizados nos novos permeadores. Já para a variante 64650, não se observa a vazão de ar crítica dentre as testadas, ou seja, a queda de permeabilidade pode ainda minimizada por vazões de ar superiores. Este fato pode ser explicado pelo número de furos no injetor de ar do desta variante do novo permeador (64 furos), que gera melhor distribuição de bolhas entre as fibras-ocas, tornando maior sua eficiência no controle de incrustações em relação aos demais (16 e 32 furos). Na pressão de filtração de 0,7 bar, observa-se que o uso de ar se torna menos eficiente no controle da formação de incrustações, devido ao desequilíbrio entre as forças de cisalhamento e a força motriz da permeação, sendo a última dominante, que faz com que maior quantidade de partículas suspensas se desloquem e fiquem aderidas à superfície da membrana e que a porosidade da torta gerada seja reduzida por compactação. Nos perfis de permeabilidade obtidos para as variantes 16650 e 32800, consegue-se ainda observar um pequeno desempenho da aeração no controle de incrustações, enquanto que, para a 321000, praticamente não se observa efeito do uso de ar nos testes. A variante 64650 do novo permeador estudado é novamente um caso especial, como fora observado para os testes com pressão de filtração de 0,3 bar, no qual não se observa a vazão de ar crítica dentre as testadas.

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

IV.2.3 Determinação das resistências ao transporte

Nesse tópico, as resistências das membranas (R_m) e totais (R_T) obtidas a partir da permeabilidade ao final dos testes ($L_{p\text{final}}$) com suspensões de fermento biológico são mostradas e as resistências por incrustações (R_i) são calculadas. R_i é o resultado da soma das resistências da torta (R_t), de bloqueio de poros (R_{bp}) e de adsorção (R_a), obtida pela subtração da resistência da membrana (R_m) da resistência total ao transporte (R_T). As Tabelas IV.10, IV.11, IV.12, IV.13, IV.14, IV.15, IV.16 e IV.17 mostram detalhadamente todas as resistências e seus respectivos desvios padrões, calculados pela teoria de propagação de erros, para as variantes 32650, 16650, 32800, 321000 e 64650 do novo permeador.

Tabela IV.10: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 32650, na concentração de 4.000 mg.L⁻¹

Pressão de filtração (bar)		0,3				0,5				0,7							
Concentração (mg.L ⁻¹)		4.000															
Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		0	1.980	4.017	7.590	4.017	7.590	4.017	7.590	4.017	7.590						
L_{pfinal} (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	σ (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	34,27	0,55	66,84	0,74	80,22	0,65	89,72	0,99	64,35	1,02	66,88	0,89	49,99	0,97	53,45	0,80
$R_T \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		105,05	1,69	53,86	0,60	44,88	0,36	40,12	0,44	55,94	0,89	53,83	7,16	72,01	1,40	67,35	1,01
$R_m \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51
$R_i \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		85,25	0,88	34,06	0,39	25,08	0,31	20,32	0,34	36,14	0,51	34,03	3,59	80,39	0,74	47,55	0,56

Tabela IV.11: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 32650, na concentração de 8.000 mg.L⁻¹

Pressão de filtração (bar)		0,3				0,5				0,7							
Concentração (mg.L ⁻¹)		8.000															
Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		0	1.980	4.017	7.590	4.017	7.590	4.017	7.590								
L_{pfinal} (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	σ (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	30,22	0,88	51,57	0,75	65,98	0,78	72,99	0,82	50,93	0,51	52,45	1,06	35,93	0,63	38,20	0,91
$R_T \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		119,13	3,47	69,81	1,02	54,56	0,65	49,32	0,55	70,69	0,71	68,64	1,39	100,19	1,76	94,24	2,25
$R_m \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51
$R_i \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		99,33	1,75	50,01	0,57	34,76	0,41	29,52	0,38	50,89	0,44	48,84	0,74	80,39	1,83	74,44	1,15

Tabela IV.12: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 32650, na concentração de 12.000 mg.L⁻¹

Pressão de filtração (bar)		0,3		0,5		0,7							
Concentração (mg.L ⁻¹)		12.000											
Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		4.017		7.590		4.017		7.590					
L_{pfinal} (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	σ (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	53,13	0,72	58,78	0,94	41,23	0,90	43,42	1,00	23,87	0,74	25,73	1,13
$R_T \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		67,76	0,92	61,25	0,98	87,32	1,91	82,91	1,91	150,82	4,68	139,91	6,14
$R_m \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51	19,80	0,51
$R_i \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		47,96	0,53	41,45	0,55	67,52	0,99	63,11	0,99	131,02	2,35	120,11	3,08

Tabela IV.13: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 16650, na pressão de filtração de 0,3 bar

Pressão de filtração (bar)		0,3									
Concentração (mg.L ⁻¹)		8.000									
Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		0		990		2.009		3.795		7.590	
L_{pfinal} (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	σ (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	33,66	1,24	55,21	1,29	73,05	0,88	87,19	1,04	91,34	0,78
$R_T \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		106,95	3,94	65,21	1,52	49,28	0,59	41,29	0,49	39,41	0,34
$R_m \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		4,90	0,09	4,90	0,09	4,90	0,09	4,90	0,09	4,90	0,09
$R_i \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		102,05	1,97	60,31	0,76	44,38	0,30	36,39	0,25	34,51	0,17

Tabela IV.14: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 16650, na pressão de filtração de 0,7 bar

Pressão de filtração (bar)		0,7									
Concentração (mg.L ⁻¹)		8.000									
Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		0		990		2.009		3.795		7.590	
L_{pfinal} (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	σ (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	18,58	1,01	28,86	0,48	36,85	0,83	39,27	1,06	39,61	0,66
$R_T \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		193,76	10,53	124,74	2,07	97,69	2,20	91,67	2,47	90,89	1,51
$R_m \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		4,90	0,09	4,90	0,09	4,90	0,09	4,90	0,09	4,90	0,09
$R_i \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		188,86	5,27	119,84	1,04	92,79	1,10	86,77	1,24	85,99	0,76

Tabela IV.15: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 32800

Pressão de filtração (bar)		0,3				0,7											
		8.000															
Concentração (mg.L ⁻¹)																	
Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		0	1.980	4.017	7.590	0	1.980	4.017	7.590								
L_{pfinal} (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	σ (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	33,50	0,50	57,56	0,98	76,88	0,80	81,71	0,84	18,54	0,41	25,55	0,76	28,77	0,90	31,03	0,92
$R_T \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		107,46	1,60	62,54	1,06	46,83	0,49	44,08	0,45	194,17	4,29	140,90	4,19	125,13	3,91	116,02	3,44
$R_m \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		6,70	0,08	6,70	0,08	6,70	0,08	6,70	0,08	6,70	0,08	6,70	0,08	6,70	0,08	6,70	0,08
$R_i \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		100,76	0,80	55,84	0,53	40,13	0,25	37,36	0,23	187,47	2,15	134,20	2,10	118,43	1,96	109,32	1,72

Tabela IV.16: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 321000

Pressão de filtração (bar)		0,3								0,7							
Concentração (mg.L ⁻¹)		8.000															
Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		0		1.980		4.017		7.590		0		1.980		4.017		7.590	
L_{pfinal} (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	σ (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	30,44	0,69	49,18	0,70	65,27	1,28	73,14	1,02	15,12	1,13	20,44	1,03	20,47	0,94	20,56	1,40
$R_T \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		118,27	2,68	73,20	1,04	55,16	1,08	49,22	0,69	238,10	17,79	176,13	0,88	175,87	8,08	175,10	11,92
$R_m \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		3,90	0,04	3,90	0,04	3,90	0,04	3,90	0,04	3,90	0,04	3,90	0,04	3,90	0,04	3,90	0,04
$R_i \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		114,37	1,34	69,30	0,52	51,26	0,54	45,32	0,34	234,20	8,90	172,23	4,44	171,97	4,04	171,20	5,96

Tabela IV.17: L_{pfinal} , R_T , R_m e R_i obtidos a partir de testes de permeação com fermento na variante 64650

Pressão de filtração (bar)		0,3								0,7							
		Concentração (mg.L ⁻¹)															
Vazão de ar (mL.min ⁻¹)		0		3.960		8.034		15.180		0		3.960		8.034		15.180	
L_{pfinal} (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	σ (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹)	33,63	1,02	75,63	1,08	100,30	1,31	125,50	1,73	19,16	1,00	37,37	1,27	45,37	0,75	54,15	1,00
$R_T \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		107,05	3,25	47,60	0,68	35,89	0,47	28,69	0,40	187,89	9,81	96,33	3,27	79,35	1,31	66,48	1,23
$R_m \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		7,50	0,07	7,50	0,07	7,50	0,07	7,50	0,07	7,50	0,07	7,50	0,07	7,50	0,07	7,50	0,07
$R_i \times 10^{11}$ (m ⁻¹)		99,55	1,62	40,10	0,34	28,39	0,24	21,19	0,20	180,39	4,90	88,83	1,64	71,85	0,66	58,98	0,61

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura IV.29 a seguir apresentam a variação dos valores de resistência de incrustação (R_i) e da permeabilidade média final à suspensão de fermento biológico das membranas da variante 32650 do novo permeador ($L_{p\text{final}}$) em função da velocidade superficial de bolhas de ar (U_g).

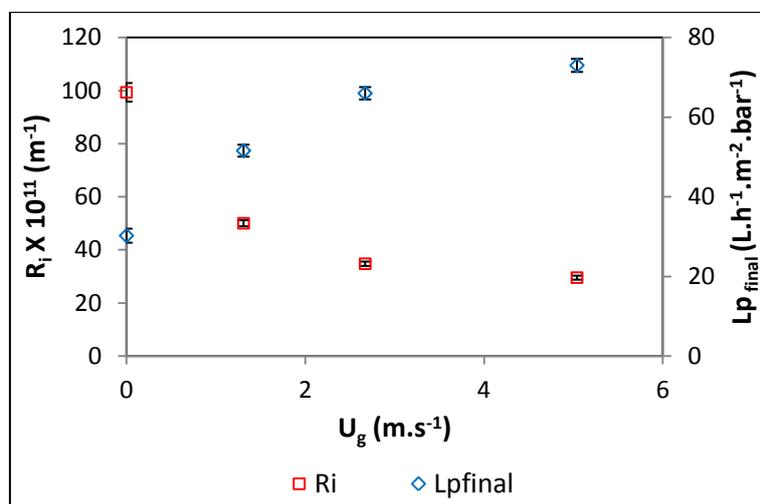


Figura IV.29. Evolução de R_i e $L_{p\text{final}}$ das membranas da variante 32650 com a variação de U_g , nos testes com fermento, na concentração de 8.000 mg.L^{-1} , a pressão de filtração de 0,3 bar

Pela Figura IV.29, pode ser visto que o aumento na velocidade superficial de ar (U_g) denota em aumento, não proporcional, da permeabilidade final média ($L_{p\text{final}}$) das membranas da variante 32650 do novo permeador. O aumento de $L_{p\text{final}}$ é acompanhado da redução da resistência de incrustações ao transporte (R_i). Este resultado, que já foi amplamente discutido em seções anteriores, refere-se à turbulência promovida pelas bolhas de ar, que cria um campo de forças de cisalhamento sobre a torta aderida na superfície das fibras-ocas, fazendo com que partículas de fermento retornem a solução. Quanto maior for U_g , maior a velocidade de ascensão de bolhas, portanto maior a turbulência e maior a intensidade dos vetores de força cisalhante, até um valor crítico para o qual o aumento de U_g não é acompanhado de um aumento da velocidade de ascensão de bolhas, e o efeito sobre a redução de incrustações não se altera (UEDA *et al.*, 1997, CABASSUD *et al.*, 1997, CHANG e FANE, 2000, LIU *et al.*, 2000, LECLECH *et al.*, 2003, CUI *et al.*, 2003, SOFIA *et al.*, 2004, KIM *et al.*, 2008, PARK *et al.*, 2010, BRAAK *et al.*, 2011). Na Figura IV.32, pode ser observado, tanto para os perfis de R_i , quanto para $L_{p\text{final}}$, a existência de um valor limite de U_g para além do qual

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

nenhuma melhoria no controle de incrustações pode ser alcançada. As razões mais prováveis para a existência deste valor de limite de U_g , ou de um platô nos perfis de R_i contra U_g , podem estar ligadas ao fato de que o aumento de U_g não é acompanhado por um aumento proporcional da velocidade de ascensão das bolhas, além de que a forma das bolhas pode estar sendo alterada, além de seu tamanho e número, o que influencia a coalescência. A variação de U_g de 0 para $1,31 \text{ m.s}^{-1}$ provocou uma queda de aproximadamente 50% de R_i , enquanto que a variação de $2,67$ para $5,04 \text{ m.s}^{-1}$ promoveu uma queda de somente de 14% no valor da resistência provocada por incrustações.

Nas Figuras IV.30 e IV.31 são apresentados os gráficos com a variação de R_i e $L_{p\text{final}}$ em função da velocidade superficial de ar para as demais variantes do novo permeador.

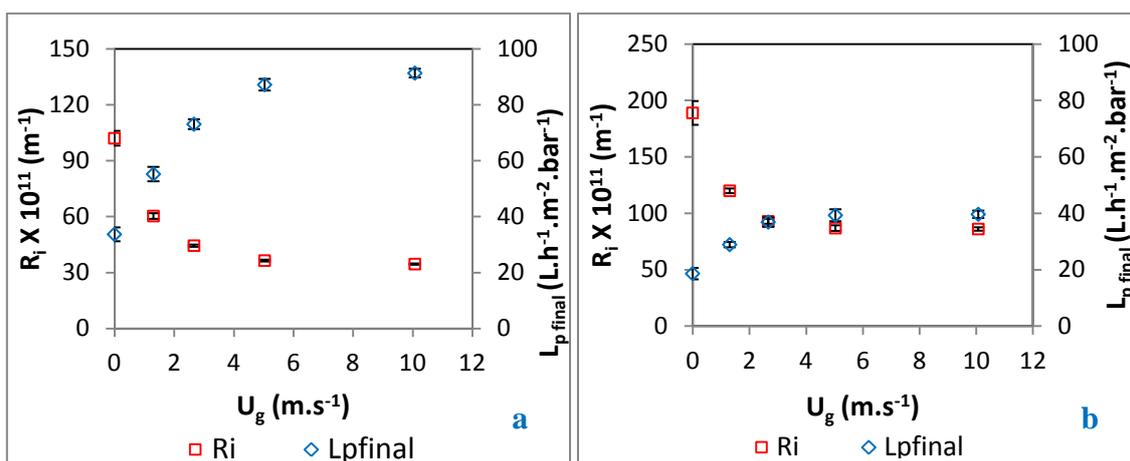


Figura IV.30. Evolução de R_i e $L_{p\text{final}}$ com a variação de U_g nos testes a variante 16650, na pressão de filtração de (a) 0,3 e (b) 0,7 bar e na concentração de fermento de 8.000 mg.L^{-1}

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

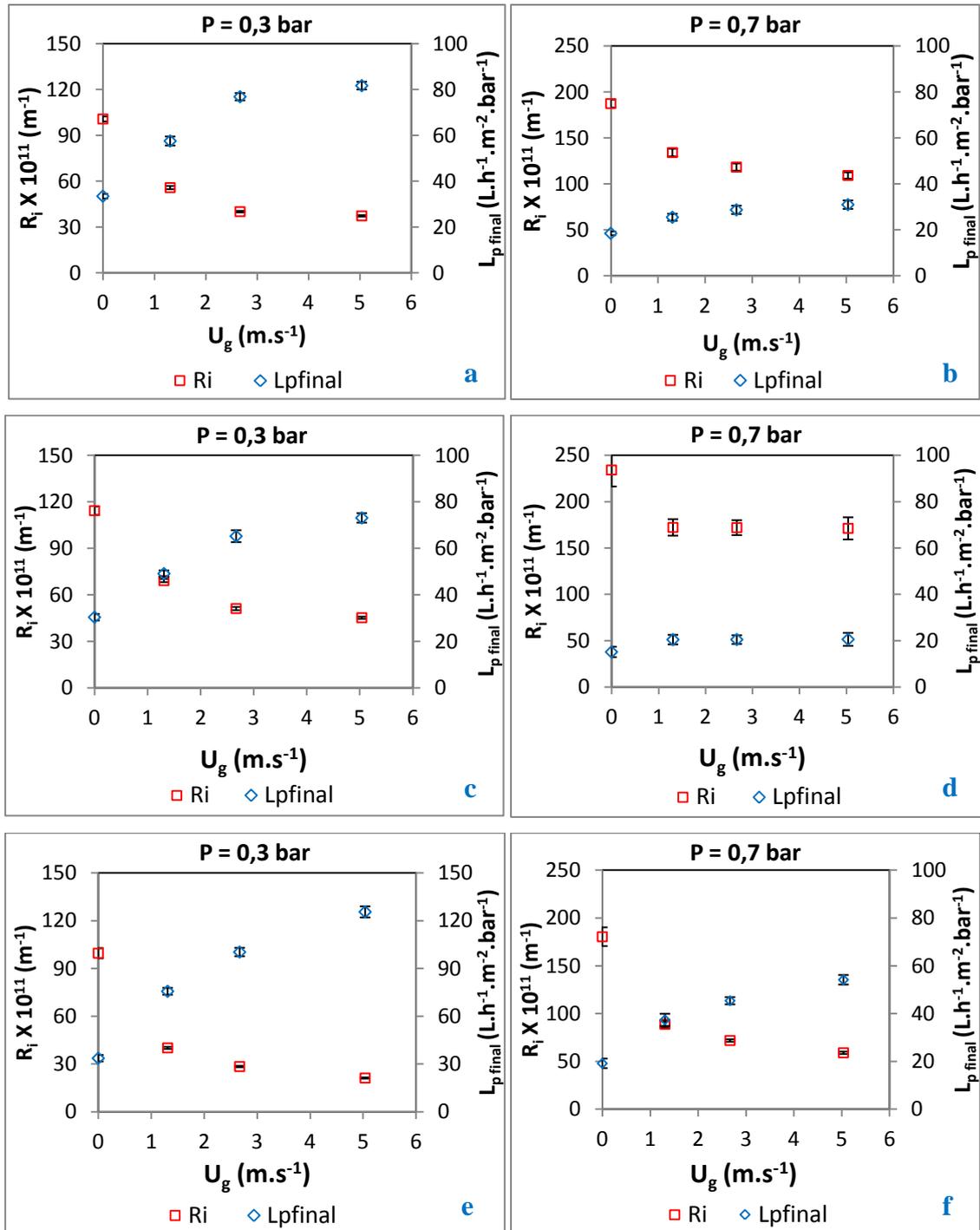


Figura IV.31. Evolução de R_i e $L_{p\text{final}}$ com a variação de U_g , nos testes de permeação com fermento, na concentração de $8.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, nas variantes do novo permeador (a e b) 32800, (c e d) 321000, (e e f) 64650, nas pressões de 0,3 e 0,7 bar, em cada, respectivamente

O comportamento dos perfis de R_i e $L_{p\text{final}}$ versus U_g para as demais variantes do novo permeador é o mesmo que foi observado para a 32650, onde a queda de R_i não foi

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

linear com o aumento de U_g , chegando a um ponto em que não sofre mais influência com aumento de custo energético de aeração.

IV.2.4 Recuperação por retrolavagem

Neste tópico, foi avaliado o efeito da retrolavagem no controle de incrustações sobre as membranas da variante 32650 do novo permeador. Foram realizados testes com duas frequências de minutos de permeação/segundos de retrolavagem com a utilização de aeração em duas condições distintas, a primeira, a mais branda em termos de R_i , que foi encontrada nos testes de permeação com fermento biológico na concentração de 4.000 mg.L^{-1} , vazão de ar de $7.590 \text{ mL.min}^{-1}$ e pressão de filtração de $0,3 \text{ bar}$, e a outra, a com potencial incrustante mais agressivo, que foi encontrada nos testes à concentração de 12.000 mg.L^{-1} , vazão de ar de 4.017 mg.L^{-1} e pressão de filtração de $0,7 \text{ bar}$. A Figura IV.32 mostram esses resultados em termos da permeabilidade média das membranas nos ciclos.

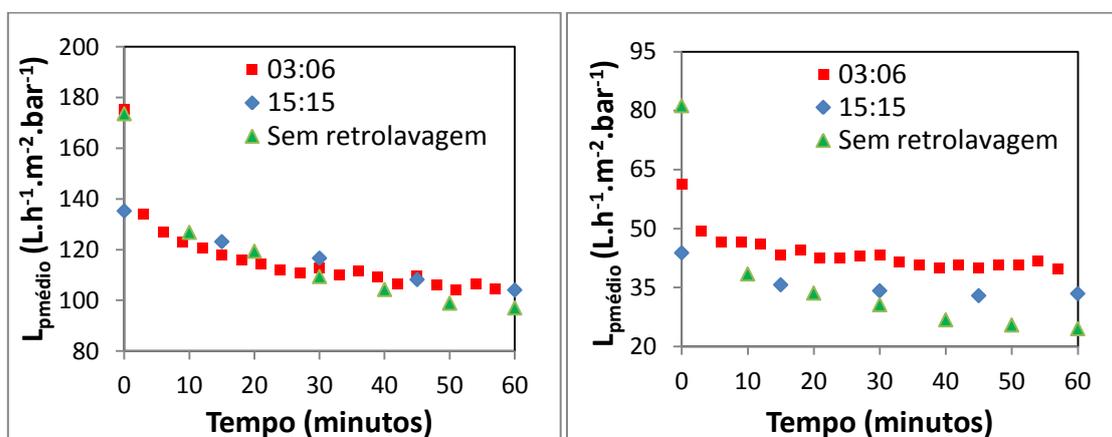


Figura IV.32. Comparação de $L_{p\text{méd}} \text{ (L.h}^{-1}\text{.m}^{-2}\text{.bar}^{-1}\text{)}$ das membranas do 32650 nos testes de permeação com as seguintes condições: (a) concentração de fermento de 4.000 mg.L^{-1} , pressão de $0,3 \text{ bar}$, sem e com utilização de ciclos de retrolavagem de 3/6 e 15/15, e (b) concentração de fermento de 12.000 mg.L^{-1} , pressão de $0,7 \text{ bar}$, sem e com utilização de ciclos de retrolavagem de 3/6 e 15/15

A Figura IV.32 (a) mostra que, para a condição de menor potencial incrustante, a eficiência de recuperação de permeabilidade das membranas por retrolavagem foi baixa, pois se acredita que a espessura da torta de material suspenso aderida as fibras-ocas seja

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

pequena nesta condição, tornando a retrolavagem com uma técnica desnecessária do ponto de vista prático. Já a Figura IV.32 (b) mostra que essa mesma técnica se torna importante quando o potencial incrustante do processo se eleva, principalmente para a maior frequência de retrolavagem investigada, 3/6, que não permite que grandes espessuras de torta sejam atingidas.

IV.2.5 Comparação entre as variantes do novo permeador

Feitas as análises de R_i individualmente nas variantes do novo permeador, nesse item, discute-se comparativamente a influência dos parâmetros construtivos destes sobre o seu desempenho, baseado nas respostas em termos de R_i . A Figura IV.33 compara os valores de R_i resultantes dos testes de permeação com suspensão de fermento biológico com variantes de mesma densidade de empacotamento ($650 \text{ m}^2/\text{m}^3$) e quantidade diferentes de furos no injetor de ar (16, 32 e 64). Os testes foram executados nas pressões de filtração de 0,3 e 0,7 bar e concentração de fermento de 8.000 mg.L^{-1} .

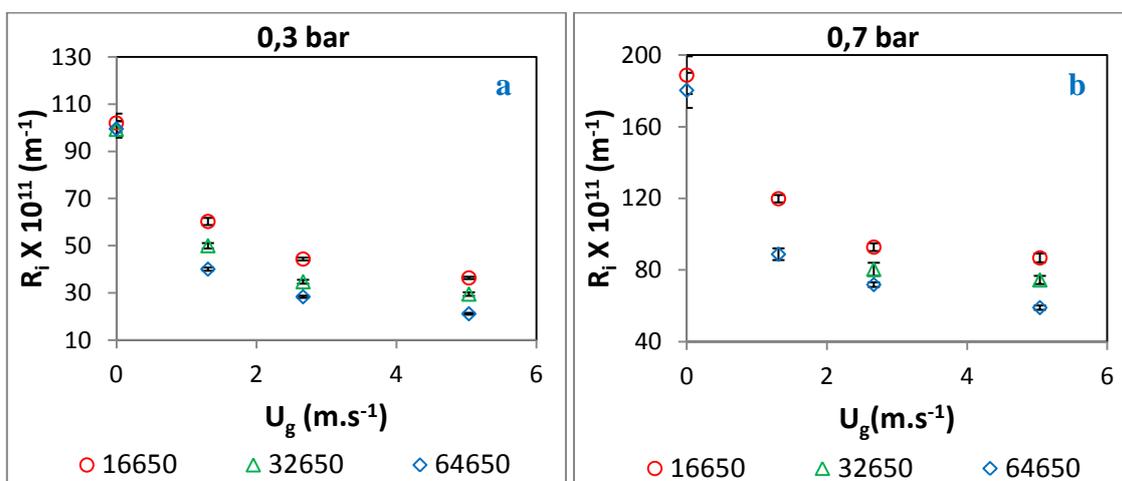


Figura IV.33. Comparação entre R_i obtidos ao final dos testes de permeação com fermento biológico nas variantes 16650, 32650 e 64650 do novo permeador, na pressão de filtração de (a) 0,3 e (b) 0,7 bar e concentração de fermento de 8.000 mg.L^{-1}

Os resultados acima mostram que a quantidade de furos do injetor de ar na base dos novos permeadores exerce importante influência no controle das incrustações. Observa-se que para injetores de ar com mais furos houve maior redução de R_i em todas as velocidades superficiais de bolhas de ar (U_g), seja na pressão de 0,3 quanto na de 0,7 bar. O resultado se remete ao fato de que em injetores de ar com mais furos disponíveis,

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

é obtida uma melhor distribuição de bolhas entre as membranas das variantes do novo permeadores. Como visto anteriormente no Capítulo II, a homogeneidade da hidrodinâmica é importante e pode depender da boa concepção do sistema de aeração (FANE *et al.*, 2005). MAYER *et al.* (2006) em seu trabalho recomendou a utilização de sistemas complexos, providos de furos numerosos, o que tornaria a distribuição mais homogênea do ar e, portanto, mais eficaz, o que é coerente com os resultados apresentados na Figura IV.33. Ainda seguindo esta linha de raciocínio, pode-se pensar que as variantes do novo permeador com maior número de furos no injetor de ar promovem melhor distribuição do campo de forças cisalhantes na superfície das membranas e geram maior quantidade de bolhas em um espaço confinado, aumentando a probabilidade de que duas ou mais bolhas se unam, aumentando a coalescência. Segundo BRAAK *et al.* (2010), bolhas de grandes diâmetros formadas pela união de bolhas menores promovem regiões de maior turbulência, que estas últimas isoladas.

A Figura IV.34 compara os R_i resultantes dos mesmos testes de permeação com fermento biológico anteriores, na pressão de filtração de 0,3 e 0,7 bar, com as variantes 32650, 32800 e 321000 do novo permeador, que possuem a mesma quantidade de furos no injetor de ar da base (32 furos) e densidades de empacotamento de fibras de 650, 800 e 1000 m^2/m^3 , respectivamente.

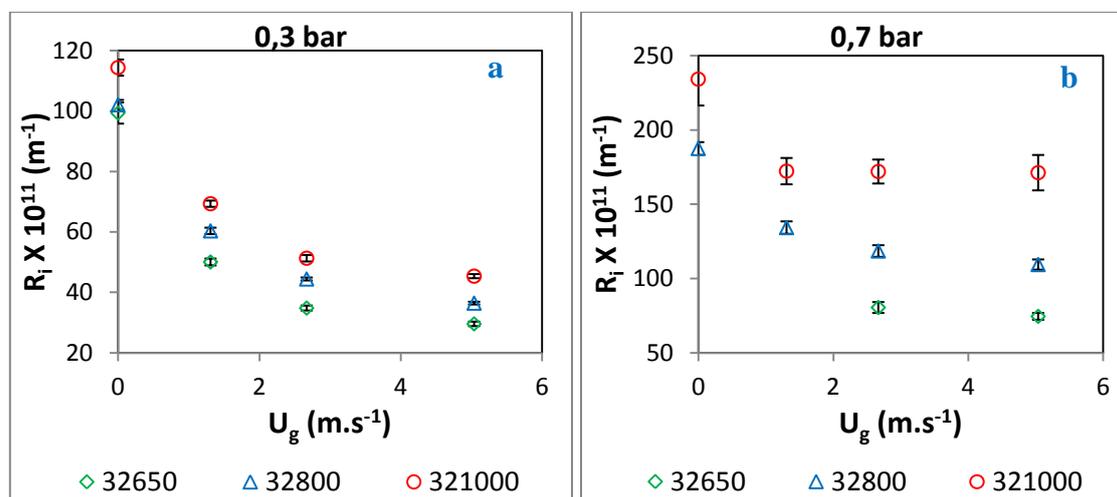


Figura IV.34. Comparação entre os R_i obtidos ao final dos testes de permeação com fermento biológico nas variantes 32650, 32800 e 321000 do novo permeador, na pressão de filtração de (a) 0,3 e (b) 0,7 bar, concentração de fermento de 8.000 $mg.L^{-1}$

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura IV.34 mostra que o aumento de densidade de empacotamento de fibras nas variantes do novo permeador aumenta severamente as incrustações sobre as membranas, principalmente na pressão de filtração de 0,7 bar, que oferece maior força motriz ao escoamento, fazendo com que maior quantidade de torta seja formada e que esta seja mais compacta (menos porosa). Estes resultados se devem provavelmente ao fato de que o aumento de densidade de empacotamento de fibras-ocas possa dificultar o contato das bolhas com fibras mais internas, devido ao bloqueio físico, limitando o efeito da aeração sobre o controle de incrustações. Tem que ser ressaltado que o aumento de densidade de empacotamento de fibras, reduz a relação percentual de número de furos no injetor de ar e número de fibras-ocas. As variantes 32650, 32800 e 321000 possuem 10,1, 8,3 e 6,6 % de número de furos de injetor em relação ao número de fibras, respectivamente. Isto também contribui para que a distribuição de ar seja pior para variantes com maiores densidade de empacotamento de fibras. Por exemplo, na U_g de $5,04 \text{ m.s}^{-1}$, o R_i é de $29,52 \times 10^{11}$, $36,39 \times 10^{11}$ e $45,32 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ para 10,1, 8,3 e 6,6 % de número de furos em relação ao número de fibras-ocas (650 , 800 e $1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$), respectivamente.

Dentre as variantes do novo permeador, aquela que apresentou menor valor de R_i em todas as velocidades superficiais de ar (U_g) (exceto na ausência de ar), ou seja, maior eficiência no controle de incrustações, foi a 64650, que possui o maior quantidade de furos no injetor de ar (64) e a menor densidade de empacotamento, igual a $650 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Nesta variante, acredita-se que são encontradas as condições hidrodinâmicas mais adequadas ao controle de incrustações, devido a melhor distribuição de bolhas, que exclui a presença de zonas estagnadas, onde se tem grande potencial à formação de incrustações.

IV.2.6 Comparação entre o novo permeador e o permeador de membranas em forma de alça quanto ao controle de incrustações

A partir dos resultados dos testes de permeação com fermento biológico com o novo permeador e o permeador em alça, observou-se que a formação de torta é mecanismo dominante na formação de incrustações. Então um bom projeto de permeador é importante para a redução da R_i , a partir da influência na hidrodinâmica do meio próximo as fibras-ocas. A Figura IV.35 mostra a comparação entre a R_i

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

determinadas nos testes de permeação com fermento, para ambos permeadores citados, na mesma concentração e pressão de filtração.

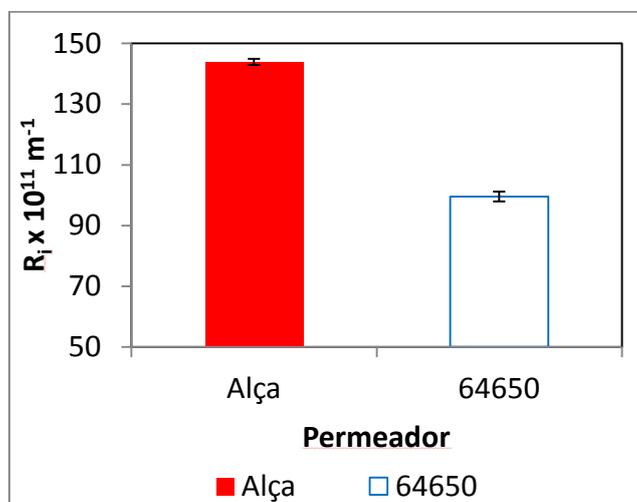


Figura IV.35. Comparação de R_i encontrados nos testes de permeação com fermento na concentração de 4.000 mg.L^{-1} e pressão de filtração de $0,3 \text{ bar}$, para o permeador de membranas em forma de alça e a variante 64650 do novo permeador

A Figura IV.x reforça que o projeto de permeadores é importante na limitação da resistência por incrustações em uma operação de permeação. A variante 64650 do novo permeador apresenta R_i aproximadamente 30% menor que o permeador de membranas em alça, no teste de permeação com fermento nas mesmas condições.

IV.2.7 Análise qualitativa de bolhas ascendentes no novo permeador à partir de fotografias

Este item tem como objetivo a análise visual de fotos de bolhas tiradas nas condições de aeração dos testes de permeação com as suspensões com fermento, buscando o melhor entendimento dos resultados apresentados anteriormente. Serão mostradas fotos das bolhas formadas no injetor de ar em todas as velocidades superficiais de ar, em todas variantes do novo permeador testadas.

As Figuras IV.36 a IV.41, mostram individualmente como as bolhas se distribuem e qual a forma e o tamanho que elas adquirem nas diferentes velocidades superficiais de ar testadas. As Figuras IV.36 e IV.37 mostram as bolhas sendo formadas nos injetores de ar das variantes do novo permeador na U_g de $1,31 \text{ m.s}^{-1}$.

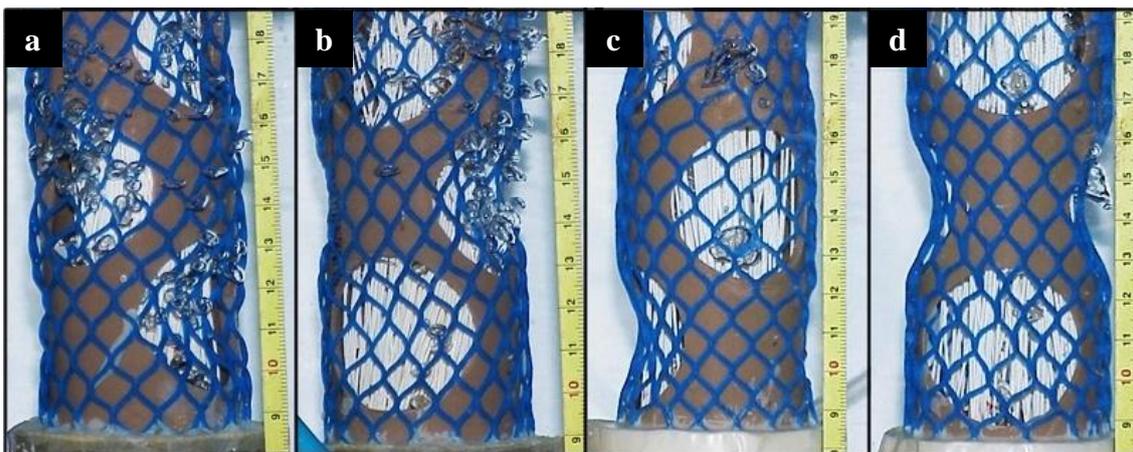


Figura IV.36. Bolhas de ar formadas nos injetores de ar acoplados as bases das variantes (a e b) 32650 e (c e d) 16650 do permeador, na velocidade superficial de ar de $1,31 \text{ m.s}^{-1}$

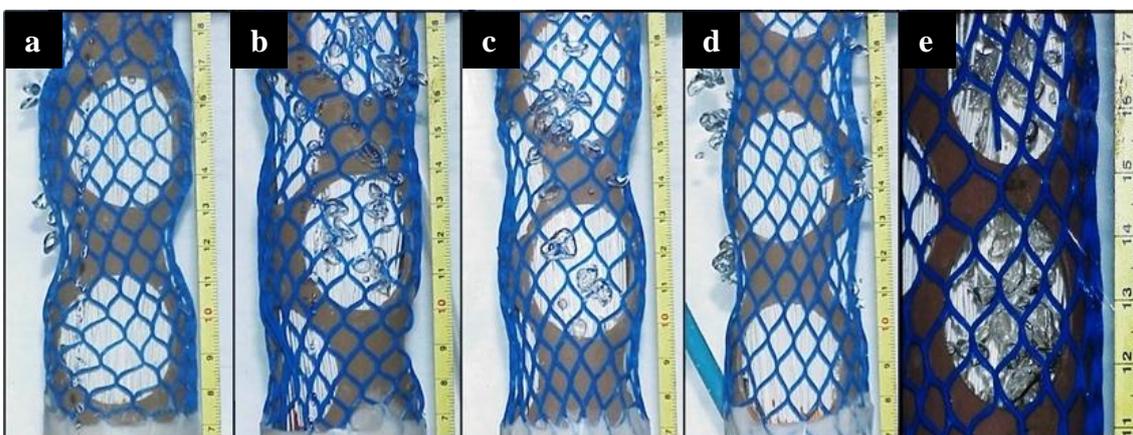


Figura IV.37. Bolhas de ar formadas nos injetores de ar acoplados as bases das variantes (a e b) 32800, (c e d) 321000 e (e) 64650 do novo permeador, na velocidade superficial de ar de $1,31 \text{ m.s}^{-1}$

Observadas as fotos das Figuras IV.36 e IV.37, para a velocidade de ar igual a $1,31 \text{ m.s}^{-1}$, ressalta-se primeiramente que as bolhas formadas no injetor da variante 64650 tem a melhor distribuição entre os feixes de fibras de todos novos permeadores, portanto contribuindo para uma hidrodinâmica melhor no controle de incrustações nas fibras, reduzindo a presença de zonas mortas. Nesta variante, também se observa que as bolhas formadas são de maior tamanho, devido a coalescência de grande quantidade de bolhas que se encontram em espaço limitado.

Na variante 32650 do novo permeador, a distribuição de bolhas parece adequada, como mostra a Figura IV.36 (a), o que não se observa pela Figura IV.36 (b),

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

na qual se pode ver que as bolhas tomam um caminho preferencial, o que torna o controle de incrustações dificultado.

A variante 16650 apresenta poucas bolhas coalescidas, de forma geral, na posição centralizada, conferindo uma hidrodinâmica pobre (ausência de forças de cisalhamento, turbulência) para o controle de incrustações.

Devido ao aumento da densidade de fibras nas variantes 32800 e 321000, observa-se que as bolhas tomam caminhos preferenciais na parte externa do feixe, devido a dificuldade de escoamento pelo bloqueio físico imposto para ascensão destas, o que gera zonas mortas hidrodinâmicas na parte interior do feixe de fibras.

A Figura IV.38 mostram as fotos de bolhas para U_g de $2,67 \text{ m.s}^{-1}$.

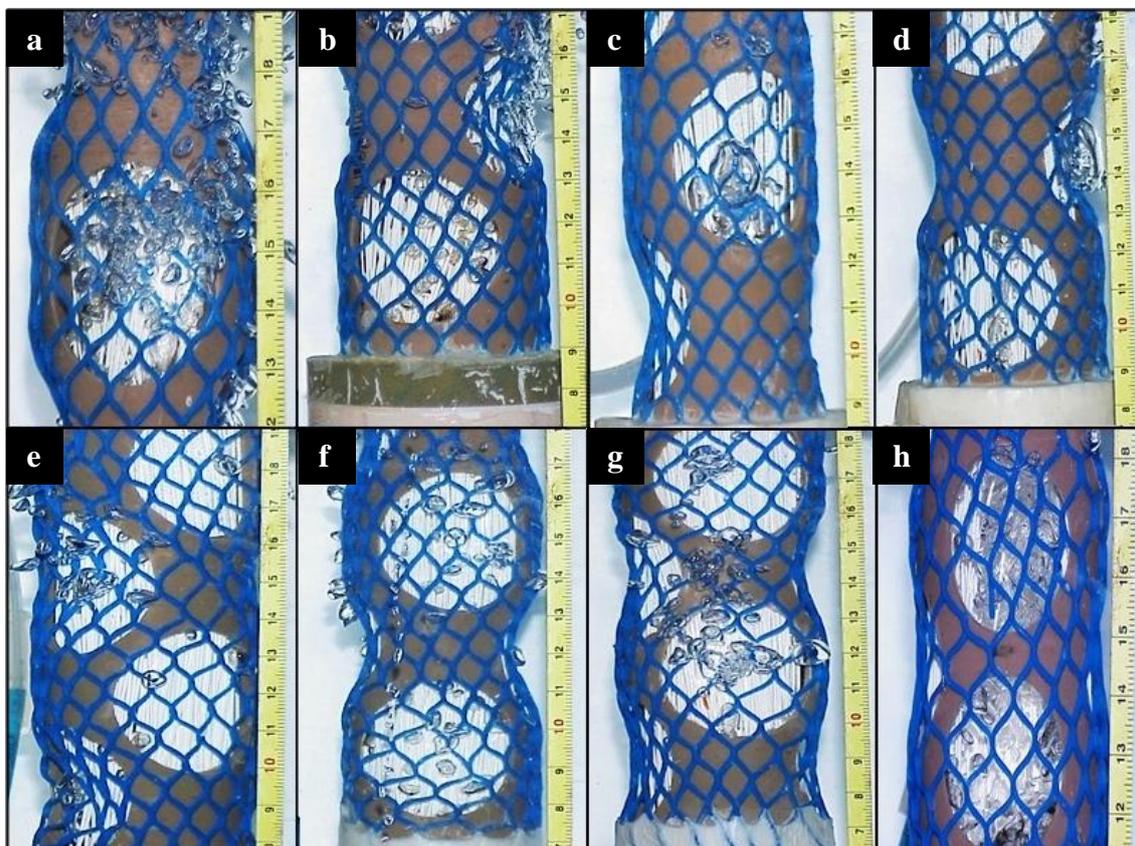


Figura IV.38. Bolhas de ar formadas nos injetores de ar acoplados as bases das variantes (a e b) 32650, (c e d) 16650, (e e f) 32800, (g) 321000 e (h) 64650 do novo permeador, na velocidade superficial de ar de $2,67 \text{ m.s}^{-1}$

Após variação de U_g de $1,31$ para $2,67 \text{ m.s}^{-1}$, não foi notada diferença na distribuição de bolhas nas variantes do novo permeador, somente no tamanho. A variante 64650 novamente apresenta uma grande quantidade de bolhas entre o feixe de

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

fibras, gerando alta turbulência e altas forças de cisalhamento, o que é muito adequado no controle das incrustações na superfície das membranas. Para as outras variantes, houve aumento do tamanho de bolhas, devido a maior quantidade de ar fornecida (maior vazão de ar), o que aumenta a turbulência no meio próximo às membranas e melhora o controle de incrustações, enfatizando os resultados dos perfis de permeabilidade das membranas à suspensão de fermento biológico.

As Figuras IV.39 a IV.41 ilustram a fotos de bolhas formadas nos injetores das variantes do novo permeador na U_g de $5,04 \text{ m.s}^{-1}$.

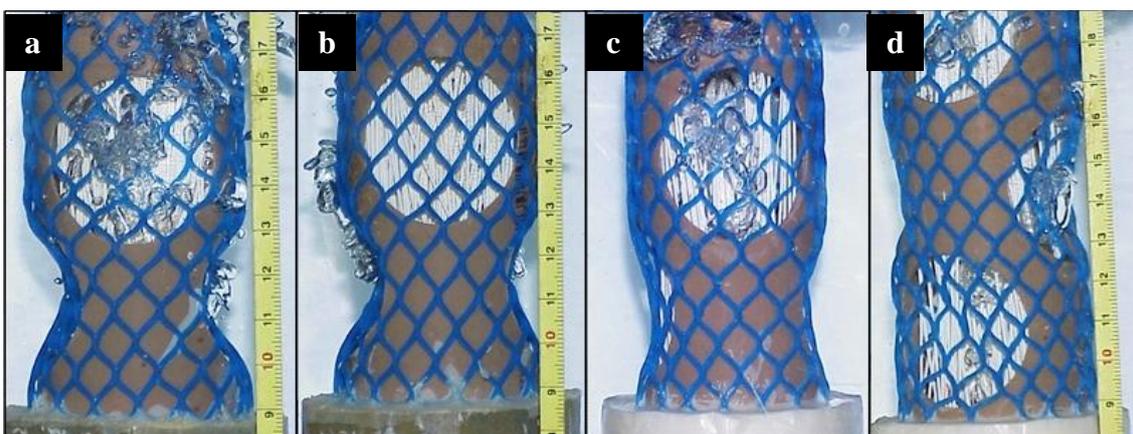


Figura IV.39. Bolhas de ar formadas nos injetores de ar acoplados as bases das variantes (a e b) 32650 e (c e d) 16650 do novo permeador, na velocidade superficial de ar de $5,04 \text{ m.s}^{-1}$

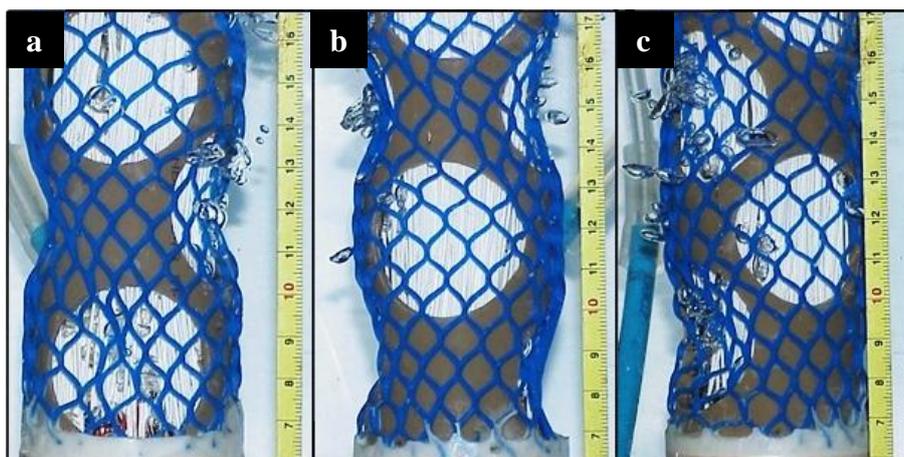


Figura IV.40. Bolhas de ar formadas no injetores de ar acoplado a bases da variantes 32800 do novo permeador, na velocidade superficial de ar de $5,04 \text{ m.s}^{-1}$

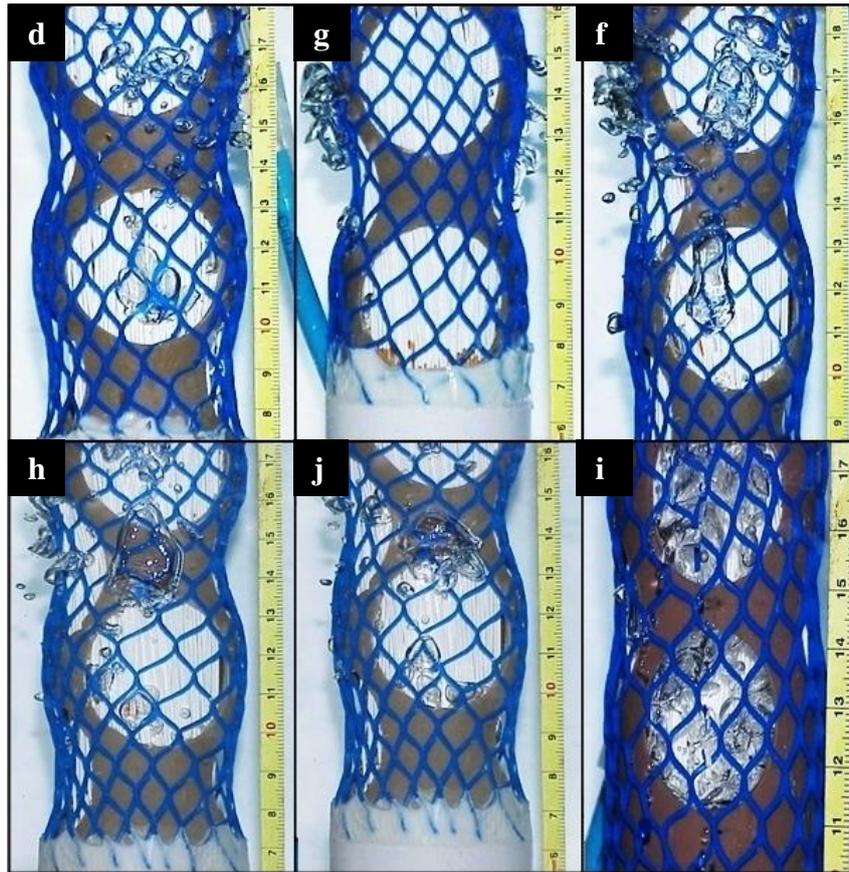


Figura IV.41. Bolhas de ar formadas nos injetores de ar acoplados nas bases das variantes (a, b, c, d, e, f) 321000 e (g) 64650 do novo permeador, na velocidade superficial de ar de $5,04 \text{ m.s}^{-1}$

Na maior velocidade superficial de ar, $5,04 \text{ m.s}^{-1}$, novamente é visto que as bolhas na variante 64650 estão mais bem distribuídas, e devido à sua enorme quantidade, um *slug* é formado na zona intermediária do permeador. Lu *et al.* (2008) relataram que esta condição possibilita maior eficiência no controle de incrustações, devido à maior turbulência promovida. Esta observação explica o fato de que na variação de U_g de 2,67 para $5,04 \text{ m.s}^{-1}$ ainda se notar grande queda de R_i em 64650, diferentemente das outras variantes.

O aumento de U_g provoca aumento das bolhas em todas variantes do novo permeador e o aparecimento de *slugs* na parte externa do feixe de fibras em 321000.

IV.2.7 Análise de gasto energético de aeração

Em BRM a aeração é responsável por aproximadamente 90% do gasto energético total, portanto deve-se ter uma atenção especial com relação a este aspecto

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

(BRAAK *et al.*, 2011). O controle de incrustações é importante, para se garantir a estabilidade do processo, o que resulta em boa produtividade de permeado, diminuição do número de limpezas e aumento da vida útil das membranas, dentre outras que reduzem o custo operacional. Em contrapartida, o custo operacional pelo gasto energético por aeração para o controle de incrustações não pode ser tão elevado, a ponto de inviabilizar financeiramente o processo. Cabe então, buscar o equilíbrio entre os benefícios trazidos pelo controle de incrustações e o gasto energético. A Figura IV.42, a seguir, mostra a variação de R_i em função da energia de aeração consumida (E) durante os testes de permeação utilizando fermento biológico fresco com as variantes do novo permeador.

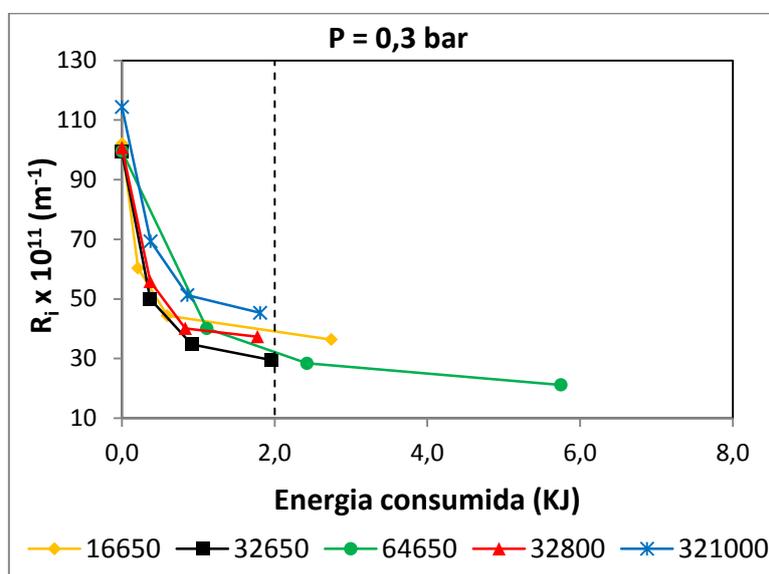


Figura IV.42. R_i em função da energia consumida nos testes a pressão de permeação na pressão de 0,3 bar. OBS: As linhas que unem os pontos nesta Figura não indicam uma tendência real de fenômeno discutido, e sim, foram usadas para melhor identificação dos pontos

Pela Figura IV.42, é possível constatar que a variante 64650 é que alcança menores valores de R_i , porém as custas de maior gasto energético de aeração (6 KJ). Nota-se, que o menor valor R_i alcançado nos testes de permeação com fermento biológico para a variante 32650 do novo permeador foi inferior a da variante 64650 para o mesmo gasto energético de aeração necessário. Este fato, reflete que, apesar da variante 65650 apresentar a melhor hidrodinâmica entre as todas as variantes do novo

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

permeador testadas, sua eficiência de redução de incrustações em relação ao gasto energético é semelhante ou até mesmo inferior a da variante 32650.

De modo geral, a Figura IV.42 mostra que para todos as variantes do novo permeador há queda de eficiência da aeração no controle de incrustações, ou seja, o aumento do gasto energético por uso de ar, não resulta proporcionalmente em uma queda de R_i , chegando a um ponto do qual o aumento da energia de aeração não se converte em controle adicional de incrustações. A Figura IV.43, mostra a variação da razão entre R_i e a energia de aeração consumida nos testes em função de U_g e reforça o discutido acima.

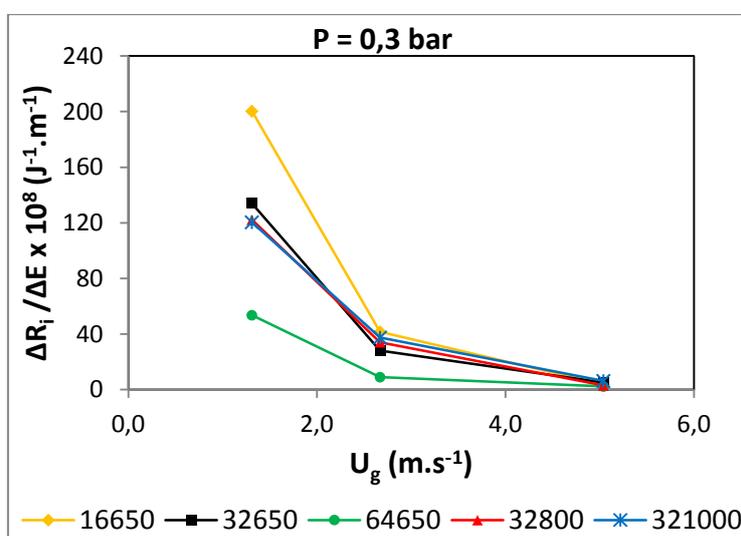


Figura IV.43. Variação de R_i pela variação de E em cada U_g nos testes de permeação a pressão de filtração de 0,3 bar. OBS: As linhas que unem os pontos nesta Figura não indicam uma tendência real de fenômeno discutido, e sim, foram usadas para melhor identificação dos pontos

A Figura IV.43 mostra que a aeração foi mais eficiente no controle de incrustações na variante 16650 do novo permeador, na variação de U_g de 1,31 para 2,67 m.s⁻¹, porém tal eficiência é praticamente igualada a dos novos permeadores 32650, 32800 e 321000 no aumento de U_g de 2,67 a 5,04 m.s⁻¹. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que a variante 16650 é o que apresenta o menor gasto energético nos U_g 1,31 e 2,67 m.s⁻¹, compensado por um aumento mais intenso em U_g de 5,04 m.s⁻¹, mostrado pela Figura IV.43. As variantes do novo permeador com a mesma quantidade de furos no injetor de ar (32 furos) apresentam comportamento semelhante na Figura IV.43, explicado pela Figura IV.44, onde é mostrado que o perfil de energia

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

consumida com U_g é praticamente igual para os 3 casos. Para a variante 64650, a redução de R_i é feita a custa de maior quantidade de energia de aeração, tanto na variação de U_g de 1,31 para 2,67 m.s^{-1} , quanto na de 2,67 para 5,04 m.s^{-1} , apesar de já se ter observado que, nesta variante do novo permeador, os menores valores de R_i foram encontrados.

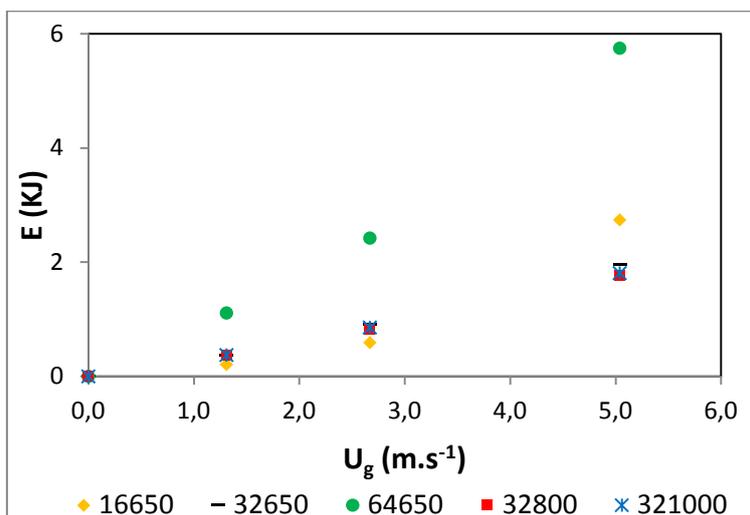


Figura IV.44. Evolução da energia consumida em função de U_g nos testes de permeação com suspensão de fermento biológico

A Figura IV.45 mostra a variação de R_i com energia de aeração consumida nos testes de permeação com fermento biológico na pressão de filtração de 0,7 bar.

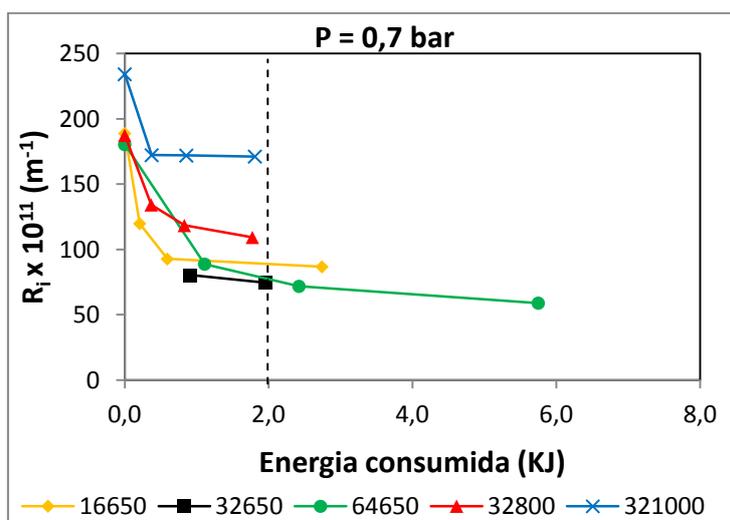


Figura IV.45. R_i em função da energia consumida nos testes de permeação com fermento biológico na pressão de filtração de 0,7 bar

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para pressão de filtração de 0,7 bar, a análise anterior para a permeação com a diferença de pressão de 0,3 bar é mantida, ou seja, a variante 32650 do novo permeador alcança menor de R_f para um mesma energia consumida de aeração nos testes, porém com valor muito semelhante a variante 64650 do novo permeador.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões acerca dos resultados obtidos neste trabalho e as sugestões para futuros trabalhos.

V.1 Conclusões

V.1.1 Permeador de membranas em forma de alça

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A partir dos testes de permeação com fermento realizados, comparando os valores de permeabilidade média final ($L_{p\text{final}}$) e das resistências ao transporte, pode-se concluir que as membranas de UF apresentaram menor incidência de incrustações que as de MF;
- Tendo em vista o aumento de $L_{p\text{final}}$ das membranas de MF, do permeador em alça, e a consequente redução de resistência da torta ao transporte (R_t) nos testes de permeação com fermento biológico com aeração em relação aos testes sem aeração, pode-se concluir que seu uso foi importante para a redução na formação de incrustações nas membranas de MF. Entretanto, nestes mesmos testes, a redução dos efeitos de incrustações não se mostrou linear ao aumento da vazão de ar, apresentando valor limite em $4.017 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$;
- Somente foi possível a determinação das condições críticas para a membrana de UF, para o qual o $J_{\text{crítico}}$ esta entre 21 e $55,5 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ e $P_{\text{crítica}}$ é de $0,1$ e $0,2$ bar para a filtração de suspensão de fermento biológico a $4.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e vazão de ar de $7.590 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, enquanto que para as membranas de MF, a $P_{\text{crítica}}$ se encontra abaixo de $0,1$ bar (menor escala inteira do manovacuômetro) em todas as condições de filtração testadas;
- Observando que as resistências de adsorção foram nulas, nas membranas de MF e UF, conclui-se que o fermento biológico não adsorve nas membranas estudadas;

V CONCLUSÕES E SUGESTÕES

- As membranas de UF apresentaram resistência por bloqueio de poros (R_{bp}) 2,5 vezes inferior que as de MF;
- Foram encontradas maiores resistências da torta (R_t) nos testes de permeação com suspensões de fermento biológico nas concentrações de 8.000 mg.L⁻¹;
- Nos testes de permeação com retrolavagem, a frequência de 15/15 minutos/segundos de permeação/retrolavagem com uso de ar na vazão de 7.590 mL.min⁻¹ mostrou ser a condição mais eficiente no controle de incrustações;
- A limpeza química recupera 100% da permeabilidade original das membranas de MF e UF, após os testes com fermento biológico. A injeção de ar na vazão de 7.590 mL.min⁻¹ reduz o tempo necessário para esta recuperação em cerca de 50%.

V.1.2 *Novos permeadores*

- O aumento de pressão de filtração nos testes de permeação com as suspensões de fermento biológico provoca maior queda de permeabilidade das membranas ao longo dos experimentos;
- Nos testes com fermento biológico, o aumento da permeabilidade média final (L_{pfinal}) das membranas acompanha proporcionalmente o aumento de vazão de ar, existindo um valor limite para qual essa variação não é observada;
- Baseando-se nas resistências ao transporte por incrustações (R_i), na variante 32650 do novo permeador, as condições com menor potencial incrustante (menor R_i) foram encontradas na concentração de 4.000 mg.L⁻¹ e vazão de ar de 7.590 mL.min⁻¹, enquanto que a maior (maior R_i) foi na concentração de 12.000 mg.L⁻¹ e vazão de ar de 4.017 mL.min⁻¹, dentre as condições testadas;
- Para as variantes 16650, 32800 e 321000 do novo permeador, nos testes de permeação com fermento, na pressão de filtração de 0,3 bar, as vazões de ar críticas são por volta de 4.000 mL.min⁻¹;
- Nos testes de permeação com fermento, à pressão de 0,3 bar, não foi possível determinar a vazão crítica de ar dentre as vazões testadas para a variante 64650 do novo

V CONCLUSÕES E SUGESTÕES

permeador, concluindo que o injetor de ar, acoplado a base desta, possivelmente, nestes condições, geram bolhas com melhor distribuição e que sofrem menores modificações, na forma e no tamanho, que limitam seu efeito sobre a remoção de material sólido aderido na torta de filtração, relação as demais variantes do novo permeador;

- A retrolavagem, testada nas condições de menor e maior potencial incrustante, na variante 32650 do novo permeador, só se mostrou importante parâmetro de recuperação de permeabilidade das membranas na pior condição de filtração;
- A variante 64650 do novo permeador foi que apresentou menores resistências por incrustações (R_i) entre as variantes do novo permeador testadas em todas as velocidades superficiais de ar (U_g);
- A melhor distribuição de bolhas entre os feixes de fibras, observada na fotografia de bolhas ascendentes, foi encontrada na variante 64650 do novo permeador, atribuindo a esta a que melhor tem hidrodinâmica para controle de incrustações;
- A variante 32650 do novo permeador apresentou valor mínimo R_i , dentre as condições testadas, próximo ao valor de R_i para a variante 64650, para com o mesmo gasto energético de aeração, de 2 KJ.

Diante do que foi exposto, é possível concluir que o novo permeador de fibras-ocas de MF com injeção de ar distribuída na base são eficientes no controle de incrustações e tecnicamente viável para a aplicação em BRM comerciais, possibilitando operações estáveis e longo tempo sem necessidade de limpezas químicas, reduzindo os custos operacionais. As variantes 32650 e 64650 do novo permeador, dentre as testadas, possuem eficiências semelhantes no controle de incrustações, levando-se em conta o gasto energético por aeração.

V.2 Sugestões

Algumas sugestões para trabalhos futuros visando o melhor desenvolvimento do tema estão relacionadas a seguir:

- Utilização de lodos ativados nos testes de permeação para validação;

V CONCLUSÕES E SUGESTÕES

- Desenvolvimento de outros projetos de injetor de ar para a base dos permeadores, como variação do tamanho dos furos;
- Utilização de membranas de UF para o mesmo permeador do presente trabalho;
- Modelagem matemática para melhor entendimento dos fenômenos da polarização de concentração e incrustações;
- Estudo da utilização de outros fatores promotores de turbulência na região próxima às membranas para a redução dos custos de aeração;
- Análise completa dos custos energéticos envolvidos e determinação das condições de operação ótimas;
- Validação dos resultados obtidos em escala piloto.

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASSI, B., DULLSTEIN, S. & RABIGER, N. “Minimization of excess sludge production by increase of oxygen concentration in activated sludge flocs; experimental and theoretical approach”. *Water Res.*, v. 34, pp. 139–146, 1999.

AUGUSTÍ, E. Z. *Biorreactores de membrana y su correlación com las resistências a la filtración*, Dissertação de M.Sc., Master oficial em Seguridad Industrial y médio ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2010.

BAKER, R. W. “Membrane technology and applications”. 2 Ed., Wiley, California, 2004.

BEN AIM, R. M., SEMMENS, M. J. “Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment and Reuse: A Success Story”, *Water Science and Technology*, v. 47, n. 1, pp. 01-05, 2002.

BÉRUBÉ, P.R., LIN, H. & WATAI, Y. “Fouling in air sparged submerged hollow fiber membranes at sub- and super-critical flux conditions” *Journal of Membrane Science*, v.307, pp. 169–180, 2008.

BEZERRA, L.F, MATSUMOTO, T. “Avaliação da remoção de matéria orgânica carbonácea e nitrogenada de águas residuárias em biorreator com membranas”, *Eng. Sanit. Ambient.*, v.16, n.3, pp. 253-260, 2011.

BOMBAS BETO. Catálogo de Sistemas de aeração por difusão. Disponível em: <http://www.bombasbeto.com.br/uploads/pdf/150512180538-sistema_de_Aeracao_por_Difusao_SAD.pdf> Acesso em: Fev. 2013.

BOUHABILA, E. H., AÏM, R. B. & BUISSON, H. “Microfiltration of Activated Sludge using Submerged Membrane with Air Bubbling (Application to Wastewater Treatment)”, *Desalination*, v. 118, pp. 315-322, 1998.

BOUHABILA, E. H., AÏM, R. B. & BUISSON, H. “Fouling Characterization in Membrane Bioreactors”, *Separation and Purification Technology*, v. 22-23, pp. 123-132, 2001.

BRAAK, E. ALLIET, M., SCHETRITTE, S. & ALBASI, C. “Aeration and hydrodynamics in submerged membrane bioreactors”, *Journal of Membrane Science*, v. 379, pp. 1– 18, 2011.

CABASSUD, C, LABORIE, S. & LAINÉ, J. M. “How Slug Flow can Improve Ultrafiltration Flux in Organic Hollow Fibres”, *Journal of Membrane Science*, v. 128, pp. 93-101, 1997.

CAMMAROTA, M. C. *Notas de Aula: Tratamento de Efluentes*. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CÁNEPA, E.M., PEREIRA, J.S., LANNA, A.E.L. 1997. “A Política de Recursos Hídricos e o Princípio Usuário Pagador”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, pp. 103-117, 1997.

CARVALHO, Y.M.C., MORAES, J.F.L., MENEZES, L.B., MARTINS, S.S. “A Legislação brasileira de recursos hídricos como instrumentação à gestão compartilhada”, *Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária*, pp. 112-134, Jun. 2008.

CHANG I.S. & LEE, C.H. “Membrane filtration characteristics in membrane coupled activated sludge system—the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling”, *Desalination*, v.120, pp.221–33, 1998.

CHANG, S. & FANE, A.G. “The effect of fibre diameter on filtration and flux distribution— relevance to submerged hollow fibre modules”, *Journal of Membrane Science*, v.184, pp. 221–231, 2001.

CHO, B. D. & FANE, A. G. “Fouling Transients in Nominally Sub-Critical Flux Operation of a Membrane Bioreactor”, *Journal of Membrane Science*, v.209, pp. 391 – 403, 2002.

CHOI, J. G., BAE, T. H., KIM, J. H. et al., 2002, “The Behavior of Membrane Fouling Initiation on The Crossflow Membrane Bioreactor System”, *Journal of Membrane Science*, v. 203, pp.103-113.

CHO, J. *Model Development for a Submerged Membrane Bio-reactor with the Effect of Extracellular Polymeric Substances*, Tese de D.Sc., Seoul National University, Seoul, 2004.

CHO, J., SONG, K.G & AHN, K.H. “The Activated Sludge and Microbial Substances Influences on Membrane Fouling in Submerged Membrane Bioreactor: Unstirred Batch Cell Test”, *Desalination*, v.183, pp. 425 – 429, 2005.

CHUA, H. C., ARNOT, T. C. & HOWELL, J. A. “Controlling Fouling in Membrane Bioreactors Operated with Variable Throughput”, *Desalination*, v.149, pp. 225 – 229, 2002.

CODAS, B. *Avaliação da Transferência de Oxigênio em um Biorreator Aerado Submerso com Enchimento*, Dissertação de M.Sc., USP, São Paulo, 2001.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DE SÃO PAULO – SABESP. ETE de Suzano – SP. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=59>> Acesso em: 22 fev. 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Decreto Nº 8.468, de 8 de setembro 1976 que aprova o Regulamento da Lei n. 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente no Estado de São Paulo. Online. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Servicos/licenciamento/postos/legislacao/Decreto_Estado_al_8468_76.pdf> Acesso em: 16 jan. 2013.

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005 que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Online. Disponível em: <<http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAMA%20n%C2%BA%20357.pdf>> Acesso em: 15 jan. 2013.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 1, de 05 de Maio de 2008 que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências do Estado de Minas Gerais. Online. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151>> Acesso em 15 jan. 2013.

CÔTÉ, P., BUISSON, H., POUND, C. & ARAKAKI, G. “Immersed Membrane Activated Sludge for the Reuse Municipal Wastewater”, *Desalination*, v. 113, pp. 189 – 196, 1997.

CUI, Z. F., CHANG, S. & FANE, A. G. “The Use of Gas Bubbling to Enhance Membrane Processes”, *Journal of Membrane Science*, v.221, pp. 1- 35, 2003.

DA SILVA, M. K. *Biorreatores com membranas: uma alternativa para o tratamento de efluentes*, Tese de D.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2009.

DAVIES, W. J., LE, M. S. & HEATH, C. R. “Intensified Activated Sludge Process with Submerged Membrane Microfiltration”, *Water Science Technology*, v. 38, pp. 421 – 428, 1998.

DE FREITAS, T.C.M. *O Cromo na Indústria de Curtumes de Mato Grosso do Sul: Aspectos ecológicos*, Tese de D.Sc. Programa multiinstitucional de Pós-graduação em Ciências da Saúde, Rede Centro-oeste, Campo Grande, 2006.

DEFRANCE, L., JAFFRIN, M. Y., GUPTA, B. *et al.*, 2000, “Contribution of Various Constituents of Activated Sludge to Membrane Bioreactor Fouling”, *Bioresource Technology*, v. 73, pp. 105-112.

DELGADO, S., VILLAROEL, R. & GONZÁLEZ, E. “Effect on the shear intensity on fouling in submerged membrane bioreactor for wastewater treatment”, *Journal of Membrane Science*, v.311, pp. 173–181, 2008.

DREWS, A., VOCKS, M., IVERSEN, V., LESJEAN, B. & KRAUME, M. “Influence of unsteady membrane bioreactor operation on EPS formation and filtration resistance”, *Desalination*, v.192, pp.1-9, 2006.

DU, J.R., PELDSZUS, S., HUCK, P.M. & FENG, X.S. “Modification of poly(vinylidene fluoride) ultrafiltration membranes with poly(vinyl alcohol) for fouling control in drinking water treatment”, *Water Research*, v. 43, n.18, pp. 4559-4568, 2009.

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EIMCO WATER TECHNOLOGIES. Swanage Wastewater Treatment Works. Disponível em: <[http://www.kubota-mbr.com/municipal/Swanage%20\(UK\).pdf](http://www.kubota-mbr.com/municipal/Swanage%20(UK).pdf)> Acesso em: Jan. 2013.

EPA/ASCE. *Design manual on fine pore aeration*. Cincinnati, Ohio, 1989.

FANE, A.G., YEO, A., LAW, A., PARAMESHWARAN, K., WICAKSANA, F. & CHEN, V. “Low pressure membrane processes – doing more with less energy”, *Desalination*, v. 185, pp. 159–165, 2005.

FANG, H. H. P., SHI, X. “Pore Fouling of Microfiltration Membranes by Activated Sludge”, *Journal of Membrane Science*, v. 264, pp. 161 – 166, 2005.

FERREIRA, A. M. G. Efeito de alta pressão na diálise de uma solução de uma proteína com sal, Dissertação de M.Sc., Departamento de Química, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2011.

FIELD, R. W., WU, D., HOWELL, J. A. & GUPTA, B. B. “Critical Flux Concept for Microfiltration Fouling”, *Journal of Membrane Science*, v.100, pp. 259 – 272, 2005.

FILHO, D.B. & MANCUSO, P.C.S. “Conceito de Reuso de Água”. In: MANCUSO, P.C.S., DOS SANTOS, H.F., *Reuso de água*, 1 Ed., capítulo 2. Manole Ltda., USP, São Paulo, 2003.

GE WATER AND PROCESS TECHNOLOGIES. Disponível em: <http://www.gewater.com/products/equipment/mf_uf_mbr/zeeweed_1500.jsp> Acesso em: Jan. 2013.

GIORDANO, G. *Avaliação ambiental de um balneário e estudo de alternativa para controle da poluição utilizando o processo eletrolítico para o tratamento de esgotos*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ, 1999.

GIORDANO, G. *Tratamento e controle de efluentes industriais*. Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2004.

GRADY JR, C.P.L. e LIN, H.C. *Biological wastewater treatment, Pollution engineering and technology*, 1 Ed., New York, Marcel Decker, 1980.

GUNDER, B. & KRAUTH, K. “Replacement of secondary clarification by membrane separation - Results with plate and hollow fibre modules”, *Water Science and Technology*. v. 38, n. 4-5, pp. 383-393, 1998.

GÜNTHER, J., HOBBS, D., ALBASI, C., LAFFORGUE, C., COCKX, A. & SCHMITZ, P. “Modeling the effect of packing density on filtration performances in hollow fiber microfiltration module: A spatial study of cake growth”, *Journal of Membrane Science*, v. 389, pp. 126– 136, 2012.

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HABERT, A. C., BORGES, C. P., NOBREGA, R. *Escola Piloto em Engenharia Química: Processos de Separação com Membranas*. 2 Ed., Programa de Engenharia Química, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

HAI, F. I., YAMAMOTO, K., FUKUSHI, K & NAKAJIMA, F. “Fouling resistant compact hollow-fiber module with spacer for submerged membrane bioreactor treating high strength industrial wastewater”, *Journal of Membrane Science*, v. 317, pp. 34–42, 2008.

HAN, S. S., BAE, T. H., JANG, G. G. & TAK, T. M. “Influence of sludge retention time on membrane fouling and bioactivities in membrane bioreactor system”, *Process Biochemistry*, v. 40, pp. 2393-2400, 2005.

HE, Y., XU, P., LI, C. & ZHANG, B. “High-concentration food wastewater treatment by an anaerobic membrane bioreactor”, *Water Research*, v. 39, pp.4110-4118, 2005.

HENSHAW, W. J., MAHENDRAN, M. & BEHMANN, H. “Vertical Cylindrical Skein of Hollow Fiber Membranes and Methods of Maintaining Clean Fiber Surfaces”, USP, v. 5,783,083, 1998.

HESPANHOL, I. “Potencial de reuso de água no Brasil. Agricultura, Indústria, Municípios, Recarga de aquíferos”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 4, pp. 75-95. Porto Alegre, RS, 2002.

HONG, S. P., BAE, T. H., TAK, T. M., HONG, S. & RANDALL, A. “Fouling Control in Activated Sludge Submerged Hollow Fiber Membrane Bioreactors”, *Desalination*, v. 143, pp. 219 – 228, 2002.

HUANG, X., LIU, R. & QIAN, Y. “Behaviour of soluble microbial products in a membrane bioreactor”, *Process Biochemistry*, v.36, pp.401– 406, 2000.

IRANPOUR, R., MAGALLANES, M., ZERMEÑO, M., VARSH, V., ABRISHAMCHI, A. & STENSTROM, M. “Assessment of aeration basin performance efficiency: sampling methods and tank coverage”. *Water Res.*, v. 34, n. 12, pp. 3137–3152, 2000.

JI, L. & ZHOU J. “Influence of aeration on microbial polymers and membrane fouling in submerged membrane bioreactors”, *Journal of Membrane Science*, v.276, n.1-2; pp.168-177, 2006.

JI, L., ZHOU, J., Influence of Aeration on Microbial Polymers and Membrane Fouling in Submerged Membrane Bioreactors, *Journal of Membrane Science*, 2005.

JORDÃO, E.P. *Pesquisas Visando Melhorias Operacionais no Processo de Lodos Ativados*, Tese de D.Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

JUDD, S. “Submerged Membrane Bioreactor: Flate plates or Hollw Fibers?”. *Filtration Separation*”, v.39, p-30-31, 2002.

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JUDD, S. *Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*, 1 Ed., San Diego, California, USA, Elsevier, 2006.

JUDD, S. *Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*, 2 Ed., San Diego, California, USA, Elsevier, 2011.

KIM, J., JANG, M., CHIO, H. & KIM, S. “Characteristics of membrane and modules affecting membrane fouling”, In: Proceedings of Water Environmental Membrane Technology, Seoul, Korea, 2004.

KIM, J.S., LEE, C.H. & CHANG, I.S. “Effect of pump shear on the performance of a crossflow membrane bioreactor”, *Water Research*, v.35, pp. 2137–2144, 2001.

KIM, J-Y., CHANG, I-S., SHIN, D-H. & PARK, H-H. “Membrane fouling control through the change of the depth of a membrane module in a submerged membrane bioreactor for advanced wastewater treatment”, *Desalination*, v. 231, pp. 35–43, 2008.

KOPSER, C. G., MONTI, S. & PETERSON, R. “Application of Membrane Bioreactor Technologies to Cruise Ship Gray and Black Water Treatment”. In: Maritime Environment International Conference and Exhibition - Fresh Water Production and Waste Water Treatment Technologies for Ships and Islands, Genoa, Itália, Março, 2000.

KRAUME, M. & DREWS, A. “Membrane Bioreactors in Waste Water Treatment – Status and Trends”, *Chemical Engineering & Technology. Special Issue: Mechanical Solid Liquid Separation*, v.33, n.8, pp. 1251–1259, 2010.

KRAUSE, S. Untersuchungen zum Energiebedarf von Membranbelebungsanlagen, Ph.D. Thesis, Technische Universitaet Darmstadt., 2005.

KUBOTA MEMBRANE EUROPE. Disponível em: <<http://www.kubota-mbr.com/>> Acesso em Jan. 2013.

LE-CLECH, P., CHEN, V. & FANE, T. A. G. “Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment”, *Journal of Membrane Science*, v. 284, pp. 17-53, 2006.

LEE, W., KANG & S. SHIN, H. “Sludge Characteristics and their Contribution to Microfiltration in Submerged Membrane Bioreactors”, *Journal of Membrane Science*, v. 216, pp. 217-227, 2003.

LEE, Y., CHO, J., SEA, Y., LEE, J.W. & AHN, K.H. “Modeling of submerged membrane bioreactor process for wastewater treatment”, *Desalination*, v.146, p.451–457, 2002.

LETTERMAN, R.D. *Water quality and treatment: a handbook of community water supplies*. 5 Ed., New York, McGraw-Hill, American Water Works Association, 1 v., 1999.

LI, L.Y., CHEN, S.F., ZHENG, J., RATNER, B.D. & JIANG. S.Y. “Protein adsorption on oligo(ethylene glycol) – terminated alkanethiolate self-assembled monolayers: the molecular basis for non-fouling behavior, *J. Phys. Chem. B.*, v. 109, 2005.

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LI, N., XIAO, C.F., AN, S.L. & HU, X.Y. "Preparation and properties of PVDF/PVA hollow fiber membranes". *Desalination*, v, 250, n.2, pp. 530-537, 2010.
- LIAO, B. Q., BAGLEY, D. M., KRAEMER, H. E., LEPPARD, G. G. & LISS, S. N. "A Review of Biofouling and its Control in Membrane Separation Bioreactors", *Water Environmental Research*, v. 76, n. 5, pp. 425-436, 2004.
- LIU, L., ZHAO, z. & YANG, F. "TiO₂ and polyvinyl alcohol (PVA) coated polyester filter in bioreactor for wastewater treatment" . *Water Research*, v.46, pp. 1969-1978, 2012.
- LIU, L.F., XIAO, L. & YANG, F.L. "Terylene membrane modification with polyrotaxanes, TiO₂ and polyvinyl alcohol for better antifouling and adsorption property", *Journal of Membrane Science*, v. 333, pp. 110-117, 2009.
- LU, Y., DING, Z., LIU,L., WANG, Z. & MA, R."The influence of bubble characteristics on the performance of submerged hollow fiber membrane module used in microfiltration, *Separation and Purification Technology*, v. 61, pp. 89–95, 2008.
- MA, B.C., LEE, Y.N., PARK, J.S., LEE, C.H., LEE, S.H., CHANG, I.S., AHN, T.S. "Correlation between dissolved oxygen concentration, microbial community and membrane permeability in a membrane bioreactor". *Process Biochemistry*, v.41, n.5, pp.1165-1172, 2006.
- MANENTI, D.R. Tratamento de Efluente têxtil utilizando o processo Foto-Fenton, Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, 2011.
- MEDAUAR, O. Coletânea de Legislação de Direito Ambiental. São Paulo: Ed. Revista dos Tribunais; 2002.
- membrane bioreactor at high mixed liquor suspended solids concentrations", *Water Res*, v. 41, n.5, pp. 947–958, 2007.
- MENG, F., YANG, F. SHI, B. & ZHANG, H. "A comprehensive study on membrane fouling in submerged membrane bioreactors operated under different aeration intensities", *Separation and Purification Technology*, .v.59. pp. 91–100, 2008.
- MENG, F.G., ZHANG, H.M., YANG, F.L., LI, Y.S., XIAO, J.N. & ZHANG, X.W. "Effect of filamentous bacteria on membrane fouling in submerged membrane bioreactor". *Journal of Membrane Science*., v.272, pp.161–168, 2006.
- METCALF & EDDY, *Wastewater Engineering – Treatment and Reuse*, Ed. 4, New York, Mc-Graw-Hill, 2003.
- METZGER, U., LE-CLECH, P., STUETZ, R.M, FRIMMEL, F.H. & CHEN, V. "Characterization of polymeric fouling in membrane bioreactors and the effect of different filtration modes", *Journal of Membrane Science*, v. 301, pp. 180–189, 2007.
- MIKKELSEN L., HAUGAARD & KEIDING, K. "Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to dewatering". *Water Research*, v.36, n.10, pp.2451-2462, 2002.

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MULDER, M. *Basic Principles of Membrane Technology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, 1996.

NAESSENS, W., MAERE, T., RATKOVICH, N., VEDANTAM, S. & NOPENS, I. “Critical review of membrane bioreactor models – Part 2: Hydrodynamic and integrated models”, *Bioresource Technology*, v. 122, pp. 107–118, 2012.

NAGAOKA, H. & NEMOTO, H. “Influence of extracellular polymeric substances on nitrogen removal in an intermittently-aerated membrane bioreactor”, *Water Science Technology*, v. 51, n.11, pp. 151-158, 2005.

NGUYEN E., FOURNIER, L., LEVEQ, C., LESJEAN B., GRELIER, P. & TAZI-PAIN, A. “Local hydrodynamic investigation of the aeration in a submerged hollow fibre membrane cassette”, *Journal of Membrane Science*, v. 321, pp. 264–271, 2008.

NUENJAMNONG, C., KWEON, J. H., CHO, J., POLPRASERT, C. & AHN, K.H. “Membrane Fouling Caused by Extracellular Polymeric Substances During Microfiltration Processes”, *Desalination*, v. 179, pp. 117-124, 2005.

PARK, H-D., LEE, Y. H., KIM, H-B., MOON, J., AHN, C-H., KIM, K.T. & KANG, M-S. “Reduction of membrane fouling by simultaneous upward and downward air sparging in a pilot-scale submerged membrane bioreactor treating municipal wastewater”, *Desalination*, v. 251, pp. 75–82, 2010.

PARK, J.S., YEON, K.M. & LEE, C.H. “Hydrodynamics and microbial physiology affecting performance of a new MBR, membrane-coupled high-performance compact reactor”, *Desalination*, v.172, pp.181–188, 2005.

PARKSON DO BRASIL. Disponível em: <<http://www.parkson.com.br/load.php?main=aeracao>> Acesso em: Fev. 2013.

PENG, W., ESCOBAR, I. “Rejection efficiency of water quality parameter by reverse osmosis (RO) and nanofiltration (NF) membranes”, *Environmental Science and Technology*, v.37, pp.4435-4441, 2001.

PERPETUO, E.A. “Parâmetros de caracterização da qualidade das águas e efluentes industriais”, *Notas de Aula*, CEPEMA-USP, São Paulo, 2012.

PSOCH, C. & SCHIEWER, S. “Long-term study of an intermittentair sparged MBR for synthetic wastewater treatment”, *Journal of Membrane Science*, v.260, pp.56–65, 2005.

RAMALHO, R.S. *Introduction to Wastewater Treatment Processes*, 1 Ed., San Diego, California, Academic Press, 1983.

RATKOVICH, N., *Understanding hydrodynamics in Membrane Bioreactor systems for wastewater treatment:Two-phase empirical and numerical modelling and experimental validation*, PhD Thesis, Ghent University, Belgium, pp. 223, 2010.

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ROJAS, M. E. H., VAN KAAM, R., SCHETRITTE, S. & ALBASI, C. “Role and Variations of Supernatant Compounds in Submerged Membrane Bioreactor Fouling”, *Desalination*, v.179, pp. 95 – 107, 2005.

ROSENBERGER, S. & KRAUME, M. “Filterability of Activated Sludge in Membrane Bioreactors”, *Desalination*, v. 151, pp. 195-200, 2002.

ROSENBERGER, S., LAABS, C., LESJEAN, B., GNIRSS, R., AMY, G., JEKEL, M. & SCHROTTER, J.C. “Impact of colloidal and soluble organic material on membrane performance in membrane bioreactors for municipal wastewater treatment”. *Water Research*, v.40, pp.710–720, 2006.

ROSS, W. R., BARNARD, J.P., LE-ROUX, J. & VILLIERS H.A. *Water SA*, v.16, pp. 85-95, 1990.

SCHNEIDER, R. P. & TSUTIYA, M. T. *Membranas Filtrantes para o Tratamento de Água, Esgoto e Água de Reuso*. 1 Ed., São Paulo, Brasil, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2001.

SMITH, S., JUDD, S., STEPHENSON, T. *et al.*, 2003, “Membrane Bioreactors – Hybrid Activated Sludge or a New Process?”, *Membrane Technology*, v. 2003, n. 12, pp. 05-08.

SOFIA, A., NG, W. J., ONG, S. L., *Engineering Design Approaches for Minimum Fouling in Submerged MBR*, *Desalination*, v.160, pp. 67 – 74, 2004.

STRATHMANN, H. “Membrane Separation Processes: Current Relevance and Future Opportunities”, *AIChE Journal*, v. 47, n. 5, pp. 1077-1087, 2001.

STRATHMANN, H. “Separação de misturas moleculares com membranas sintéticas”, *Steinkopff Verlag, Darmstadt*, 1979.

TESTEZLAF, R., MATSURA, E.E., CARDOSO, J.L. *Importância da irrigação no desenvolvimento do agronegócio*, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Jul. 2002.

TIAN, J.Y., XU, Y.P., CHEN, Z.L., NAN, J. & LI, G.B. “Air bubbling for alleviating membrane fouling of immersed hollow-fiber membrane for ultrafiltration of river Water”, *Desalination*, v.260, pp. 225–230, 2010.

TIAN, Y., LI, Z., CHEN, L. & LU, Y. “Role of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane fouling of membrane bioreactor coupled with worm reactor”, *Bioresource Technology*, v.123, pp. 566–573, 2012.

TRABULSI, L., ALTERTHUM, F., GOMPERTZ, O., CANDEIA, J. A. *Microbiologia*, 3 Ed., São Paulo, editora Atheneu, 1999.

TRUSSEL, R. S., MERLO, R. P., HERMANOWICZ, S. W. & JENKINS, D. “The effect of organic loading on process performance and membrane fouling in a submerged

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

membrane bioreactor treating municipal wastewater”, *Water Research*, v.40, pp. 2675-2683, 2006.

TRUSSEL, R.S., MERLO, R.P., HERMANOWICZ, S.W. & JENKINS, D., “Influence of mixed liquor properties and aeration intensity on membrane fouling in a submerged

UEDA, T., HATA, K., KIKUOKA, Y. & SEINO, O., “Effects of Aeration on Suction Pressure in a Submerged Membrane Bioreactor”, *Water Research*, v. 31, n. 3, pp. 489 – 494, 1997.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. Disponível em: <<http://www.unep.org/>>. Acesso em: Jan. 2013.

VIANA, P. Z. *Biorreator com membrana aplicado ao tratamento de esgotos domésticos: Avaliação do desempenho de módulos de membranas com circulação externa*, Dissertação de M.Sc. Programa de Engenharia Química, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

VISVANATHAN, C., BEN AIM, R. & PARAMESHWARAN, K. “Membrane Separation Bioreactors for Wastewater Treatment”, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 30, n. 1, pp. 1-48, 2000.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3 Ed., Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2005.

VON SPERLING, M. *Lodos Ativados – Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*, v. 4, 2 ed., Belo Horizonte, MG, Brasil, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 2002.

VON SPERLING, M. *Princípios básicos do tratamento de esgotos*. 1 Ed., Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

VUOLO, J. H. *Fundamentos da Teoria de Erros*, Edgard Blücher, São Paulo, 1992.

WANG, P., TAN, K. L., KANG, E. T. & NEOH, K. G. “Synthesis, characterization and anti-fouling properties of poly(ethylene glycol) grafted poly (vinylidene fluoride) copolymer membranes”, *Journal of Materials and Chemistry*, v.11, pp. 783-789, 2001.

WEDI, D., WILD, W., RESCH, H., & BLEISTEINER, S. Os resultados operacionais do tratamento de águas residuais MBR e preservação da permeabilidade das membranas usando limpeza a seco com cloro livre, *Conferência de Engenharia Ambiental e Engenharia Química*. In: *Membrantechnik*, v. 6. pp. A9-1–A9-12, 2005.

WICAKSANA, F., FANE, A.G. & CHEN, V. “Fibre movement induced by bubbling using submerged hollow fibre membranes”, *Journal of Membrane Science*, v. 271, pp. 186–195, 2006.

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

WISNIEWSKI, C. & GRASMICK, A. “Floc Size Distribution in a Membrane Bioreactor and Consequences for Membrane *Fouling*, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*”, v. 138, pp. 403-411, 1998.

WU, D., HOWELL, J. A. & FIELD, R. W. “Critical flux measurement for model colloids”, *Journal of Membrane Science*, v.152, n.1, pp.89–98, 1999.

WU, J. & CHEN, V. “Shell-side mass transfer performance of randomly packed hollow fiber modules”, *Journal of Membrane Science*, v. 172, pp. 59–74, 2000.

WU, J., HE, C. “Effect of cyclic aeration on fouling in submerged membrane bioreactor for wastewater treatment”, *Water Research*, v. 46, n. 11, pp. 3507-3515, 2012.

YAMAMOTO, K., HIASA, M., MAHMOOD, T. & MATUSO, T. “Direct solid–liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank”, *Water Science Technology*, v.21, p.43–54, 1989.

YEO, A. & FANE, A.G. “Performance of individual fibers in a submerged hollow fiber bundle”, *Water Science Technology*, v. 51, pp. 165–172, 2005.

YEO, A., FANE, A.G. & LAW, W.K.A. “Factors affecting the performance of a submerged hollow fiber bundle”, *Journal of Membrane Science*, v.280, n.1–2, pp.969–982, 2006.

YEO, A.P.S., LAW, A.W.K. & FANE, A.G.T. “The relationship between performance of submerged hollow fibers and bubble-induced phenomena examined by particle image velocimetry”, *Journal of Membrane Science*, v.304, pp. 125–137, 2007.

YOON, K., HSIAO, B.S. & CHU, B., 2009. “High flux ultrafiltration nanofibrous membranes based on polyacrylonitrile electrospun scaffolds and crosslinked polyvinyl alcohol coating”, *Journal of Membrane Science*, v. 338, n. 1, pp. 145-152.

XU, J., RUAN, L.G., WANG, X., JIANG, Y.Y., GAO, L.X., GAO, J.C. “Ultrafiltration as pretreatment of seawater desalination: Critical flux, rejection and resistance analysis”, *Separation and Purification Technology*, v. 85, pp. 45–53, 2012.

ZHENG, J., XU, Y. & XU, Z. “Flow distribution in a randomly packed hollow fiber membrane module”, *Journal of Membrane Science*, v. 211, pp. 263–269, 2003.