

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS – IPH

**EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO DE BIOMASSA E
PRESSÃO TRANSMEMBRANA NA FILTRAÇÃO COM
MEMBRANAS DE FIBRAS OCAS EM BIORREATORES**

TESE DE DOUTORADO

Juliano Rodrigues Gimenez



Porto Alegre
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS – IPH

**EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO DE BIOMASSA E
PRESSÃO TRANSMEMBRANA NA FILTRAÇÃO COM
MEMBRANAS DE FIBRAS OCAS EM BIORREATORES**

Juliano Rodrigues Gimenez

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador:

Dr. Luiz Olinto Monteggia – IPH/UFRGS

Co-orientador:

Dr. Lademir Luiz Beal – CCET/UCS

Banca Examinadora:

Dr^a Miriam Cristina Santos Amaral – DESA/UFMG

Dr^a Isabel Cristina Tessaro – DEQUI/UFRGS

Dr^a Edith Beatriz Camano Schettini – IPH/UFRGS

Porto Alegre, 2013

AGRADECIMENTOS

Ao longo de 40 anos de vida, sendo pelos menos 33 envolvidos com a busca sistematizada de conhecimentos, sem dúvidas a conclusão de um trabalho em nível de doutoramento é um momento marcante. Nesta caminhada, são muitos momentos e muitas pessoas as quais devemos gratidão. Momentos que fizeram repensar, decidir, seguir em frente, recuar, tomar decisões, etc., e pessoas que participaram, motivaram ou que simplesmente provocaram estas ações, de forma direta ou indireta, positiva ou negativamente. Cada momento vivido de fato é um aprendizado. Cada pessoa que passa pelas nossas vidas contribui com todo este processo.

Agradeço primeiramente aos meus pais, Egon e Isolete, que sempre me motivaram a perseverar nos estudos, e que mesmo sem terem tido condições de sequer fazerem um curso de graduação, nunca demonstraram em momento algum qualquer incompreensão ou questionamento sobre as minhas decisões. Às minhas irmãs, Gisele e Andresa, que da mesma forma sempre me apoiaram em todos os momentos. À minha querida e amada Rubia, que nestes últimos anos tem me apoiado e caminhado ao meu lado, com muito amor e dedicação, sem dúvidas um dos elementos mais fortes para alimentar a perseverança. Também agradeço aos meus sobrinhos (Henrique, Nicolás, Gustavo e Laís), que por vezes me perguntam ainda o que eu faço, o que estudo e mais recentemente, o que eu leciono. Sei que este também é um dos motivos para perseverar, pois além de poder compartilhar e multiplicar conhecimentos, acabamos servindo de baliza para a tomada de decisões destas futuras gerações, assim como muitos dos nossos professores também assim serviram para nós.

Aos professores deixo aqui o meu profundo agradecimento, especialmente a este que além de professor foi também orientador, Luiz Olinto Monteggia, um exemplo de dedicação e competência naquilo que faz. Também ao meu co-orientador, colega e amigo, prof. Lademir Luiz Beal, que nunca desistiu de me perguntar sobre o andamento das atividades. Agradeço ainda especialmente a professora Terezinha R. C. de Borba, que infelizmente não tenho mais contato, mas sem dúvidas representou um momento marcante em minha vida, sendo responsável pela minha alfabetização. Em nome dela, agradeço a todos os professores que se sucederam, bem como ao fato de também ter me tornado um professor.

A lista de amigos, graças a Deus, é imensa e todos eles sabem do meu reconhecimento e gratidão por este momento. Deus, é Ele quem coloca estes amigos em nossos caminhos, para nos ajudar e também para ajudarmos. Cabe a cada um o ato de cultivar estas boas amizades.

Agradeço também a este Deus, sem mesmo ter a competência para compreender do que se trata, mas fica o agradecimento por cada momento vivido.

Aos colegas de trabalho e de profissão que também são muitos, agradeço a cada um pessoalmente por me apoiarem nesta caminhada. As decisões, os exemplos, os percalços e os sucessos, são frutos de uma troca constante, especialmente com estas pessoas que convivemos no mínimo a metade do tempo de nossos dias. Obrigado a cada um por fazerem parte desta caminhada.

Aos alunos que nestes últimos onze anos significaram também um elemento de perseverança muito importante. O prazer do compartilhamento, da percepção de que se está contribuindo com o futuro de muitos, sem dúvidas, é um dos elementos mais fortes para nos fazer persistir. Especialmente gostaria de citar o prof. Saulo V. Della Giustina, a prof. Larissa N. Carli e a prof. Joice Cagliari, ex-alunos que optaram por seguir esta jornada pela docência e pela pesquisa, e hoje mais do que ex-alunos, são colegas, e mais do que colegas, são amigos. Em nome deles, agradeço a cada um destes alunos que tive a oportunidade e o privilégio de poder contribuir em suas caminhadas.

Agradeço ainda a todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente com esta pesquisa, especialmente ao também ex-aluno e amigo André Lovatel, que em boa parte do seu curso de mestrado, tivemos oportunidades de compartilhar ideias e propósitos de pesquisa. Em nome dele agradeço a todos os demais professores, funcionários e estagiários que contribuíram durante as diversas etapas dos trabalhos.

Agradeço também às instituições, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e Universidade de Caxias do Sul – UCS. A primeira por diretamente me proporcionar a oportunidade do aprendizado, especialmente ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH, que desde a graduação contribuiu significativamente com este processo. A segunda por me acolher profissionalmente e nesta fase de doutoramento apoiar os trabalhos executadas em sua infraestrutura laboratorial.

Além de agradecer, dedico este momento a todas estas pessoas que fazem ou que um dia fizeram parte desta minha caminhada.

*“Quem conhece a sua ignorância
revela a mais profunda sapiência.
Quem ignora a sua ignorância vive
na mais profunda ilusão.”*

(Lao Zi, VII a.C.)

RESUMO

EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO DE BIOMASSA E PRESSÃO TRANSMEMBRANA NA FILTRAÇÃO COM MEMBRANAS DE FIBRAS OCAS EM BIORREATORES

O uso de membranas filtrantes para o tratamento de efluentes tem sido crescente nas últimas décadas, com o foco na otimização destes sistemas, que ocupam menos espaço físico e atendem aos critérios de qualidade ambiental cada vez mais rigorosos. Processos convencionais de tratamento por lodos ativados, têm sido substituídos por sistemas com módulos de membranas submersas, denominados de Biorreatores Associados à Membranas, ou MBR – *Membrane Bioreactor*. Os problemas com esta condição de uso das membranas relacionam-se à redução do fluxo de permeado (J_{20}) devido ao aumento da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração, associados à formação de distintos mecanismos de bloqueio devido à colmatação de biossólidos junto as membranas, processo denominado genericamente de *fouling*. Neste trabalho é analisado o comportamento da filtração de três lodos ativos oriundos de fontes distintas: indústria petroquímica, hospitalar e lixiviado de aterro sanitário. A diversidade da composição destes efluentes contribui para a análise do comportamento da queda do J_{20} e do aumento da R_t ao longo de ensaios de filtração, que foram realizados com quatro horas de duração. Para cada lodo foram ensaiadas três concentrações de Sólidos Suspensos Totais (SST): 8.000, 17.000 e 23.000 mg/L, bem como três pressões transmembranas (PTM): 180, 240 e 300 mbar. Os lodos foram caracterizados, determinando-se: viscosidade, massa específica, características físicas dos biossólidos (diâmetros médios e efetivos, coeficientes de uniformidade e de curvatura), além da quantificação da concentração das frações de EPS (Substâncias Poliméricas Extracelulares). Os ensaios em bancada foram realizados com módulos de membranas de fibras ocas submersas, confeccionados de forma a garantir sua uniformidade. Os procedimentos também foram realizados de forma padronizada, incluindo-se a promoção de turbulência através de aeração forçada. Os resultados permitiram a análise do comportamento da queda do J_{20} e do aumento da R_t , comparando-se estas relações com as variações das concentrações de SST e da PTM para cada lodo ensaiado, e também permitiram uma análise das relações entre os distintos lodos. Ainda foram analisados os valores do Índice Modificado de Fouling – IMF e dos mecanismos de bloqueio que ocorreram durante as filtrações para cada efluente. Os resultados indicam que tanto a variação da concentração de SST quanto da PTM, não implicam em diferenças significativas nos valores absolutos do J_{20} , mas em valores bem distintos para a R_t final. Dessa forma, conclui-se que o aumento da PTM, com o objetivo de aumentar o J_{20} em um sistema real, não teria efetividade e decorreria no aumento do custo energético do sistema devido ao aumento da R_t . Os resultados para IMF, com objetivo buscar correlações com as variações da concentração de SST e da PTM, não apresentaram resultados que caracterizem o uso deste indicador para este tipo de filtração. Ainda foi possível estabelecer correlações entre a queda do J_{20} e as concentrações de EPS, além da viscosidade e massa específica. Foram identificados os mecanismos de bloqueio preponderante, concluindo-se que a filtração por torta prevalece na maioria dos ensaios.

ABSTRACT

EFFECTS OF BIOMASS CONCENTRATION AND TRANSMEMBRANE PRESSURE IN THE FILTRATION WITH HOLLOW FIBER MEMBRANES IN BIOREACTORS

The use of membranes processes for wastewater treatment has increased in recent decades, with focus on optimizing these systems, requiring less physical space and meeting increasingly stringent environmental quality criteria. Conventional treatment processes using activated sludge units, have been replaced by systems with submerged membrane modules, called Membrane Bioreactor - MBR. The problems with the use of the membranes in these conditions are related to the reduction of the permeate flow (J_{20}) and the increase in the total resistance (R_t) along the running time of the filtration, associated with different block mechanisms, due to fouling of the membranes with biosolids. This study analyzes the filtration behavior of three activated sludges coming from different sources: the petrochemical industry, hospital and landfill leachate. The diversity of the composition of these effluents allowed the analysis the declining behavior of J_{20} and the increasing behavior of R_t throughout the filtration tests, conducted with four hours duration time. For each sludge three concentrations of Total Suspended Solids (TSS) were tested: 8,000, 17,000 and 23,000 mg / L, as well as three transmembrane pressures (TMP): 180, 240 and 300 mbar. The sludge were characterized by determining viscosity, density, physical characteristics of biosolids (average and effective diameters, coefficients of uniformity and curvature), and the quantification of the EPS fractions concentration (Extracellular Polymeric Substances). The bench tests were performed with hollow fiber submerged membrane modules, manufactured in order to ensure uniformity. The procedures were performed in a standardized way, including the promotion of turbulence through forced aeration. The results allowed the analysis of the permeate flux decline behavior and the increasing of the total resistance, comparing these ratios to the variations in the concentrations of TSS and TMP for each sludge tested and also allowed the analysis of relations between the distinct sludges. Values of the Modified Fouling Index - MFI and blocking mechanisms that occurred during the filtrations for each sludge were also analyzed. The results indicate that both the variation of the TSS concentration and the TMP do not lead to significant differences in J_{20} values, but do generate distinct final R_t values. Thus, one possible conclusion is that increasing TMP, with the objective of increasing J_{20} in a real system is not an effective action and would result in the increase of energy costs, due to the increase of R_t . No correlation could be established between the MFI results and the parameters TSS and TMP. However, it was possible to establish correlations between the fall of J_{20} and the concentrations of EPS, as well as viscosity and density. Predominant blocking mechanisms were identified, allowing the conclusion that cake filtration prevails in most testing situations.

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

α	resistência específica da torta
Δx	espessura da membrana
ε	porosidade
μ	viscosidade dinâmica
ρ	massa específica
θ_c	idade do lodo
A	área
A/M	razão matéria orgânica (DQO) afluyente e biomassa presente nos reatores
C_c	coeficiente de curvatura
C_u	coeficiente de uniformidade
d_{10}	“diâmetro efetivo”, correspondente ao ponto de 10% da curva granulométrica
d_{30}	diâmetro correspondente ao ponto de 30% da curva granulométrica
d_{60}	diâmetro correspondente ao ponto de 60% da curva granulométrica
DBO	demanda bioquímica de oxigênio
d	diâmetro
DQO	demanda química de oxigênio
EPS	substância poliméricas extracelulares
EPS _{fo}	substância poliméricas extracelulares fortemente ligadas à biomassa
EPS _{fr}	substâncias poliméricas extracelulares fracamente ligadas à biomassa
EPS _s	substâncias poliméricas extracelulares solúveis
J	fluxo de permeado
J ₂₀	fluxo de permeado normalizado à 20°C
LATAM	Laboratório de Tecnologia Ambiental
MBR	biorreatores associados a membranas
MF	microfiltração
NTK	nitrogênio total Kjeldahl
OD	oxigênio dissolvido
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S. A.
P	pressão
PTM	pressão transmembrana
PVDF	poli (fluoreto de polivinilideno)
R_b	resistência à filtração decorrente de bloqueio dos poros
R_c	resistência da torta à filtração
REPAR	Refinaria Presidente Getúlio Vargas
R_f	resistência do ‘fouling’ à filtração
R_g	resistência da camada gel à filtração
R_m	resistência intrínseca da membrana à permeação de água limpa
rpm	rotações por minuto
R_t	soma de todas as resistências à filtração
PTM	pressão transmembrana
SMP	produtos microbianos solúveis
SST	sólidos suspensos totais
ST	sólidos totais
t	tempo
T	temperatura
TDH	tempo de detenção hidráulica
UETAR	Unidade Experimental de Tratamento de Águas Residuárias
UCS	Universidade de Caxias do Sul
UF	ultrafiltração
V	volume

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação das possibilidades de configurações nas operações de filtração com membranas: à esquerda filtração do tipo frontal e à direita filtração do tipo tangencial.	24
Figura 2 - Diferentes configurações para instalação dos módulos de membranas em MBR.	27
Figura 3 - Esquema operacional na filtração e na retrolavagem em uma fibra de um feixe de membranas.	27
Figura 4– Identificação das frações que compõem os EPS.	31
Figura 5– Representação esquemática dos mecanismos de formação do fouling.	41
Figura 6– Curvas tempo X Volume X Pressão transmembrana, obtidas por Bowen et al. (1995), a partir de uma solução ideal em uma membrana de microfiltração.	42
Figura 7 – Curvas (d^2t/dV^2) X (dt/dv), permitindo analisar as tendência de comportamento para \bar{v} e \bar{v}_0 , inferindo-se o mecanismo de bloqueio preponderante (BOWEN et al., 1995).	43
Figura 8– Dados obtidos a partir dos resultados do declínio do fluxo ao longo do tempo para diferentes concentrações de biomassa.	45
Figura 9 – Fotografias ilustrando parte do processo de construção dos módulos de membranas.	49
Figura 10 – Viscosímetros rotativo (esquerda) e de Hoespler (direita), utilizados para as medições das viscosidades dos lodos e permeados.	51
Figura 11 – Conjunto de picnômetros (esquerda) e balança analítica (direita), utilizados para a medição das massas específicas dos lodos e permeados.	52
Figura 12 – Fotografia do equipamento utilizado para caracterização física dos biossólido, um analisador de tamanho de partícula por dispersão a laser, Horiba LA-950.	53
Figura 13 – Comportamentos possíveis em curvas granulométricas.	54
Figura 14 – Exemplo de laudo extraído do equipamento analisador de partículas.	55
Figura 15 – Fotografias mostrando uma vista geral e um detalhe do microscópio utilizado para a visualização dos biossólidos e micro-organismos presentes em cada amostra de lodo ensaiado.	56
Figura 16 – Fotografias mostrando a UETAR utilizada para os ensaios de filtração, com sua vista geral (A), painel eletroeletrônico (B) e a tela do sistema supervisorío (C).	58
Figura 17 – Ilustração com o esquema do aparato aplicado para os ensaios de filtração.	59
Figura 18 – Fotografias mostrando o reator montado junto a UETAR durante um dos ensaios de filtração, com uma vista geral (A) e um detalhe da bomba peristáltica utilizada para a filtração (B) e do medidor de vazão (C).	59
Figura 19 – Aparato montado para a caracterização dos módulos de membranas.	61
Figura 20 – Fotografias dos procedimentos de limpeza química e retrolavagem dos módulos de membranas, mostrando de forma geral o aparato montado (esquerda) e um detalhe das membranas em processo de retrolavagem (direita).	63
Figura 21 – Resultado gráfico da variação da viscosidade dinâmica e da massa específica para diferentes concentrações de SST do lodo de indústria petroquímica.	71
Figura 22 – Resultado gráfico da variação da viscosidade dinâmica e da massa específica para diferentes concentrações de SST do lodo de aterro sanitário.	71
Figura 23 – Resultado gráfico da variação da viscosidade dinâmica e da massa específica para diferentes concentrações de SST do lodo de indústria petroquímica.	71

Figura 24 – Resultado gráfico da variação da massa específica para cada um dos lodos e para cada uma das concentrações de SST.	72
Figura 25 – Resultado gráfico da variação da viscosidade dinâmica para cada um dos lodos e para cada uma das concentrações de SST.	72
Figura 26 – Resultado gráfico da variação da viscosidade cinemática para cada um dos lodos e para cada uma das concentrações de SST.	73
Figura 27 – Resultado gráfico da caracterização física dos biossólidos para cada lodo: diâmetro efetivo, diâmetro mediano e diâmetro médio.	75
Figura 28 – Coeficientes de uniformidade e de curvatura para cada um dos lodos ensaiados.	75
Figura 29 – Duas tomadas mostrando o resultado da microscopia ótica para o efluente E1-Petroquímico.	77
Figura 30 – Duas tomadas mostrando o resultado da microscopia ótica para o efluente E2-Lixiviado.	78
Figura 31 – Duas tomadas mostrando o resultado da microscopia ótica para o efluente E3-Hospitalar.	78
Figura 32 – Resultados das concentrações totais de EPSs, EPSfr e EPSfo para cada concentração de SST ensaiada e para cada um dos lodos.	81
Figura 33 – Resultados das concentrações totais de EPSs, EPSfr e EPSfo para cada concentração de SST ensaiada para o lodo E2-Lixiviado.	81
Figura 34 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E1-Petroquímico, na concentração de SST de 8.000 mg/L, para diferentes pressões.	84
Figura 35 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E1-Petroquímico, na concentração de SST de 17.000 mg/L, para diferentes pressões.	86
Figura 36 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E1-Petroquímico, na concentração de SST de 23.000 mg/L, para diferentes pressões.	88
Figura 37 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E1-Petroquímico, para a PTM = 180 mbar, para as diferentes concentrações de SST.	89
Figura 38 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E1-Petroquímico, para a PTM = 240 mbar, para as diferentes concentrações de SST.	91
Figura 39 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E1-Petroquímico, para a PTM = 300 mbar, para as diferentes concentrações de SST.	93
Figura 40 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E2-Lixiviado, na concentração de SST de 8.000 mg/L, para diferentes pressões.	96
Figura 41 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E2-Lixiviado, na concentração de SST de 17.000 mg/L, para diferentes pressões.	98
Figura 42 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E2-Lixiviado, na concentração de SST de 23.000 mg/L, para diferentes pressões.	100
Figura 43 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E2-Lixiviado, para a PTM = 180 mbar, para as diferentes concentrações de SST.	102

Figura 44 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E2-Lixiviado, para a PTM = 240 mbar, para as diferentes concentrações de SST.....	103
Figura 45 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E2-Lixiviado, para a PTM = 300 mbar, para as diferentes concentrações de SST.....	105
Figura 46 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E3-Hospitalar, na concentração de SST de 8.000 mg/L, para diferentes pressões.....	109
Figura 47 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E3-Hospitalar, na concentração de SST de 17.000 mg/L, para diferentes pressões.....	111
Figura 48 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E3-Hospitalar, na concentração de SST de 23.000 mg/L, para diferentes pressões.....	112
Figura 49 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E3-Hospitalar, para a PTM = 180 mbar, para as diferentes concentrações de SST.....	114
Figura 50 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E3-Hospitalar, para a PTM = 240 mbar, para as diferentes concentrações de SST.....	115
Figura 51 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J20) e da resistência total (Rt) ao longo do tempo de filtração de E3-Hospitalar, para a PTM = 300 mbar, para as diferentes concentrações de SST.....	117
Figura 52 – Agrupamento de gráficos para fins de análise comparativa entre os distintos lodos submetidos à filtração, na concentração de SST de 8.000 mg/L e para as distintas pressões ensaiadas...	121
Figura 53 – Agrupamento de gráficos para fins de análise comparativa entre os distintos lodos submetidos à filtração, na concentração de SST de 17.000 mg/L e para as distintas pressões ensaiadas.....	125
Figura 54 – Agrupamento de gráficos para fins de análise comparativa entre os distintos lodos submetidos à filtração, na concentração de SST de 23.000 mg/L e para as distintas pressões ensaiadas.....	129
Figura 55 – Agrupamento de gráficos da relação t/v versus V para E1-Petroquímico e para cada concentração de SST ensaiada submetidas às distintas pressões.....	133
Figura 56 – Gráfico da variação do IMF com a PTM, para cada uma das concentrações de SST ensaiadas para E1-Petroquímico.....	135
Figura 57 – Gráfico da variação do IMF com as concentrações de SST, para cada uma das PTM ensaiadas para E1-Petroquímico.....	135
Figura 58 – Agrupamento de gráficos da relação t/v versus V para E2-Lixiviado e para cada concentração de SST ensaiada submetidas às distintas pressões.....	137
Figura 59 – Gráfico da variação do IMF com a pressão transmembrana, para cada uma das concentrações de SST ensaiadas para E2-Lixiviado.....	138
Figura 60 – Gráfico da variação do IMF com as concentrações de SST, para cada uma das pressões transmembranas ensaiadas para E2-Lixiviado.....	139
Figura 61 – Agrupamento de gráficos da relação t/v versus V para E3-Hospitalar e para cada concentração de SST ensaiada submetidas às distintas pressões.....	141
Figura 62 – Gráfico da variação do IMF com a pressão transmembrana, para cada uma das concentrações de SST ensaiadas para E3-Hospitalar.....	142

Figura 63 – Gráfico da variação do IMF com as concentrações de SST, para cada uma das pressões transmembranas ensaiadas para E3-Hospitalar.....	143
Figura 64 – Resultado gráfico e tabela com os R^2 correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E1-Petroquímico, na concentração de SST fixa em 8.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.	147
Figura 65 – Resultado gráfico e tabela com os R^2 correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E1-Petroquímico, na concentração de SST fixa em 17.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.	148
Figura 66 – Resultado gráfico e tabela com os R^2 correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E1-Petroquímico, na concentração de SST fixa em 23.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.	149
Figura 67 – Resultado gráfico e tabela com os R^2 correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E2-Lixiviado, na concentração de SST fixa em 8.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.....	156
Figura 68 – Resultado gráfico e tabela com os R^2 correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E2-Lixiviado, na concentração de SST fixa em 17.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.....	157
Figura 69 – Resultado gráfico e tabela com os R^2 correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E2-Lixiviado, na concentração de SST fixa em 23.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.....	158
Figura 70 – Resultado gráfico e tabela com os R^2 correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E3-Hospitalar, na concentração de SST fixa em 8.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.	165
Figura 71 – Resultado gráfico e tabela com os R^2 correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E3-Hospitalar, na concentração de SST fixa em 17.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.	166
Figura 72 – Resultado gráfico e tabela com os R^2 correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E3-Hospitalar, na concentração de SST fixa em 23.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Algumas características da filtração através de membranas que utilizam ΔP como força motriz.	23
Tabela 2– Coeficientes α e β para os diferentes tipos de bloqueio, segundo Bowen et al. (1995).....	41
Tabela 3 – Parâmetros analisados para cada um dos efluentes.	51
Tabela 4 – Cruzamentos dos dados: Concentrações X Efluentes	65
Tabela 5 – Cruzamentos dos dados: Pressões X Efluentes.....	65
Tabela 6 – Cruzamentos dos dados: Pressões X Concentrações	66
Tabela 7 – Resultado das caracterizações dos efluentes brutos submetidos aos ensaios.....	69
Tabela 8 – Massa Específica e Viscosidades para cada um dos lodos e concentrações ensaiadas.	70
Tabela 9 – Resultados da caracterização física dos biossólidos para cada um dos efluentes.	75
Tabela 10 – Resultados das concentrações de cada fração de EPS para cada lodo e suas respectivas concentrações de SST ensaiadas.	80
Tabela 11 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J20) e resistência total (RT) da filtração de E1-Petroquímico, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 8.000 mg/L.....	84
Tabela 12 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J20) e resistência total (RT) da filtração de E1-Petroquímico, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 17.000 mg/L.....	86
Tabela 13 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J20) e resistência total (RT) da filtração de E1-Petroquímico, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 23.000 mg/L.....	88
Tabela 14 – Síntese dos resultados da variação percentual entre a R_t final e a R_t inicial dos ensaios de filtração de E1-Petroquímico, para as diferentes concentrações de SST e PTM ensaiadas.	95
Tabela 15 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J20) e resistência total (RT) da filtração de E2-Lixiviado, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 8.000 mg/L.....	97
Tabela 16 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J20) e resistência total (RT) da filtração de E2-Lixiviado, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 17.000 mg/L.....	99
Tabela 17 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J20) e resistência total (RT) da filtração de E2-Lixiviado, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 23.000 mg/L.....	100
Tabela 18 – Síntese dos resultados da variação percentual entre a R_t final e a R_t inicial dos ensaios de filtração de E2-Lixiviado, para as diferentes concentrações de SST e PTM ensaiadas.	107
Tabela 19 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J20) e resistência total (RT) da filtração de E3-Hospitalar, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 8.000 mg/L.....	109
Tabela 20 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J20) e resistência total (RT) da filtração de E3-Hospitalar, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 17.000 mg/L.....	111

Tabela 21 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J20) e resistência total (RT) da filtração de E3-Hospitalar, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 23.000 mg/L	113
Tabela 22 – Síntese dos resultados da variação percentual entre a Rt final e a Rt inicial dos ensaios de filtração de E3-Hospitalar, para as diferentes concentrações de SST e PTM ensaiadas.	119
Tabela 23 – Resultados do IMF para os ensaios de filtração de E1-Petroquímico, para diferentes concentrações de SST e pressões transmembranas.....	134
Tabela 24 – Resultados do IMF para os ensaios de filtração de E1-Petroquímico, para diferentes concentrações de SST e pressões transmembranas.....	138
Tabela 25 – Resultados do IMF para os ensaios de filtração de E1-Petroquímico, para diferentes concentrações de SST e pressões transmembranas.....	142
Tabela 26 – Resultados do coeficiente R ² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E1-Petroquímico na concentração de SST de 8.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.....	145
Tabela 27 – Resultados do coeficiente R ² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E1-Petroquímico na concentração de SST de 17.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.....	146
Tabela 28 – Resultados do coeficiente R ² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E1-Petroquímico na concentração de SST de 23.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.....	146
Tabela 29 – Resultados do coeficiente R ² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E2-Lixiviado na concentração de SST de 8.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.....	154
Tabela 30 – Resultados do coeficiente R ² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E2-Lixiviado na concentração de SST de 17.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.....	155
Tabela 31 – Resultados do coeficiente R ² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E2-Lixiviado na concentração de SST de 23.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.....	155
Tabela 32 – Resultados do coeficiente R ² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E3-Hospitalar na concentração de SST de 8.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.	163
Tabela 33 – Resultados do coeficiente R ² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E3-Hospitalar na concentração de SST de 17.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.....	163
Tabela 34 – Resultados do coeficiente R ² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E3-Hospitalar na concentração de SST de 23.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.....	164

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
3.1	FILTRAÇÃO ATRAVÉS DE MEMBRANAS	21
3.2	BIORREATORES ASSOCIADOS À MEMBRANAS.....	26
3.3	COMPORTAMENTO E ESTUDOS HIDRODINÂMICOS	33
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	46
4.1	LODOS A SEREM FILTRADOS	46
4.2	CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS TOTAIS CONTROLADAS EM CADA ENSAIO	48
4.3	PRESSÕES TRANSMEMBRANAS CONTROLADAS EM CADA ENSAIO.....	48
4.4	CONSTRUÇÃO DOS MÓDULOS DE MEMBRANAS.....	49
4.5	CARACTERIZAÇÕES DOS LODOS E EFLUENTES.....	50
4.5.1	Parâmetros Físico e Químicos	50
4.5.2	Viscosidade	51
4.5.3	Massa Específica	52
4.5.4	Caracterização Física dos Biossólidos	53
4.5.5	Avaliação de Micro-organismos	56
4.5.6	Substâncias Poliméricas Extracelulares - EPS.....	57
4.6	ENSAIOS DE FILTRAÇÃO – PROCEDIMENTOS.....	57
4.6.1	Procedimentos Pré e Pós-Ensaio de Filtração	61
4.6.2	Tratamento e Análise dos Dados das Filtrações.....	64
4.6.2.1	Análises dos fluxos de permeados e das resistências totais	65
4.6.2.2	Análises dos IMF	67
4.6.2.3	Análises dos mecanismos de bloqueio	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.1	CARACTERIZAÇÕES DOS EFLUENTES	69
5.1.1	Massa Específica e Viscosidade	70
5.1.2	Caracterização Física dos Biossólidos	74

5.1.3	Visualização da Biomassa.....	77
5.1.4	Substâncias Poliméricas Extracelulares - EPS.....	79
5.2	ENSAIOS DE FILTRAÇÃO	83
5.2.1	Filtração do Lodo E1-Petroquímico	83
5.2.2	Filtração do Lodo E2-Lixiviado	96
5.2.3	Filtração do Lodo E3-Hospitalar	108
5.2.4	Análise Cruzada entre os Distintos Lodos	120
5.3	ÍNDICE MODIFICADO DE FOULING - IMF	132
5.3.1	IMF para E1-Petroquímico	132
5.3.2	IMF para E2-Lixiviado	136
5.3.3	IMF para E3-Hospitalar	140
5.4	IDENTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE BLOQUEIO	144
5.4.1	Mecanismos de Bloqueio nos ensaios para E1-Petroquímico	145
5.4.2	Mecanismos de Bloqueio nos ensaios para E2-Lixiviado.....	154
5.4.3	Mecanismos de Bloqueio nos ensaios para E3-Hospitalar	162
6	ANÁLISE FINAL DOS RESULTADOS	171
7	CONCLUSÕES	175
8	RECOMENDAÇÕES FINAIS.....	176
9	REFERÊNCIAS	177
APÊNDICE A – GRÁFICOS DA RELAÇÃO $TV^{-1} \times V$, LINEARIZADOS PARA A EXTRAÇÃO DO VALOR DO IMF.....		182
APÊNDICE B – GRÁFICOS LINEARIZADOS PARA EXTRAÇÃO DOS VALORES DE R^2 RELATIVOS À DETERMINAÇÃO DOS MECANISMOS DE BLOQUEIO.		186
APÊNDICE C – PROCEDIMENTOS PARA MEDIÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA		214

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de efluentes industriais é um desafio para os profissionais das áreas de engenharia, seja por suas características particulares dependentes do tipo de indústria e do tipo de processo aplicado, seja pelas condicionantes do processo de tratamento a ser aplicado. As questões ambientais em termos de preservação dos ecossistemas têm sido um dos principais fatores condicionantes, de onde surgem parâmetros e padrões cada vez mais restritivos para o tratamento dos efluentes, bem como se percebe o incentivo para o reúso, reduzindo os volumes consumidos e o lançamento final nos corpos receptores. Neste sentido, é constante o desenvolvimento e aprimoramento de sistemas de tratamento cada vez mais efetivos e eficazes, atendendo tanto aos requisitos legais, quanto à própria demanda da sociedade em torno do objetivo de preservação da qualidade ambiental.

Dentre os tipos de efluentes em função de suas origens, destacam-se aqui três categorias distintas: de refinaria de petróleo, lixiviados e hospitalares. Efluentes de processos de refino de petróleo podem variar significativamente sua composição, dependendo do processo que os originaram. Além disso, normalmente estão associados a compostos potencialmente tóxicos. Para estes tipos de efluentes é necessário que se tenham processos de tratamento que tanto garantam o cumprimento dos padrões estabelecidos pelos órgãos ambientais, bem como tenham uma operação o mais estável possível, sem grandes necessidades de intervenções que porventura causem a paralisação do processo.

Em uma leitura similar, destacam-se também tanto os efluentes gerados nos processos de tratamento e disposição final dos resíduos sólidos urbanos, o lixiviado, quanto os efluentes gerados em unidades hospitalares. Ambos, de forma geral, caracterizam-se como um fluido de relativa complexidade em termos de composição físico-química, além da sua potencialidade de contaminação microbiológica. Os sistemas de tratamento para estas categorias de efluentes devem estar preparados para garantir a adequada remoção destes compostos, indesejáveis de serem lançados aos corpos hídricos receptores.

Os principais sistemas de tratamento destes tipos de efluentes, têm se concentrado em aplicar operações e processos físico-químicos, envolvendo etapas de separação por

sedimentação-decantação, flotação e ou filtração em meios granulares. Também se aplicam processos biológicos, principalmente os aeróbios, como os sistemas de lodos ativados. Mais modernamente, visando a otimização destes sistemas tem-se também pesquisado e utilizado em escala real processos biológicos associados à membranas, tanto para melhorar a qualidade do efluente final, quanto para ocupar um menor espaço nas unidades de tratamento.

As operações de separação com o uso de membranas têm sido objeto crescente de estudos, apontada como uma solução viável para o tratamento de águas e efluentes. As membranas são elementos filtrantes produzidos com certo controle de porosidade variando seus diâmetros médios de poros desde $10\mu\text{m}$ a $10^{-4}\mu\text{m}$ (Mulder, 1996), permitindo uma gama significativa de seletividade entre soluto e soluções nas operações de separação.

Estudos associando processos biológicos de tratamento de efluentes com uso de membranas em reatores biológicos têm sido um dos temas mais instigantes na área de efluentes industriais, tentando associar as vantagens de um e de outro na busca de processos mais eficientes e com custos menores. Uma das vantagens nestes processos combinados se refere a poder aproveitar sistemas de tratamento biológico já existentes adicionando-se módulos com membranas, como forma de incrementar estes processos de tratamento, tanto em termos de capacidade quantitativa a ser tratada, quanto de qualidade do efluente final, o que contribui com as perspectivas de viabilizar técnica, econômica e ambientalmente estas unidades.

Entretanto, a redução das dificuldades operacionais no uso de membranas tem sido um desafio para pesquisadores e engenheiros. Neste cenário, um dos maiores fatores limitantes à disseminação desta tecnologia trata-se da suscetibilidade destes sistemas à colmatação de torta e entupimentos dos poros.

O fluxo através das membranas exige a aplicação de pressões que originem um gradiente entre a pressão na alimentação e a pressão no permeado, denominado pressão transmembrana (PTM). Este fator, associado às diferentes características do material da membrana, do efluente e da interação entre a membrana e soluto, contribui para o surgimento de efeitos adversos que resultam na redução do fluxo de permeado ao longo do tempo de operação. São diversas as estratégias adotadas para a manutenção de um fluxo constante de permeado, tais como a de se incrementar a pressão transmembrana,

promover retrolavagens periódicas, limpezas químicas, aumento da turbulência no entorno da mesma, etc.

Avanços frequentes na compreensão de todos os fatores intervenientes e fenômenos diversos envolvidos com este processo têm motivado pesquisadores em aprimorar os conhecimentos técnicos e científicos a respeito deste tema. A diversidade de aplicações e conseqüentemente dos resultados abre uma gama significativa de pesquisas nesta área. A modelagem do comportamento da filtração associado com a redução do fluxo de permeado e conseqüentemente da eficiência dos sistemas, é um dos fenômenos que merecem maior detalhamento e exploração.

Segundo Santos et al. (2011), entre os anos de 1999 e 2009, a taxa de crescimento anual nas instalações de Biorreatores Associados a Membranas (MBR) foi de 13%, enquanto as pesquisas publicadas sobre esse tema cresceram 20%. Os autores destacam ainda que 31% delas abordaram os fenômenos de colmatação junto as membranas, *fouling*, como tema central e a maioria destas tratam as Substâncias Poliméricas Extracelulares, EPS, como tópico principal. Segundo os mesmos autores, apenas pesquisas relacionadas à micropoluentes alavancadas pela legislação cresceram mais rapidamente.

A acumulação e a interação de material na superfície e nos poros das membranas, denominado genericamente de *fouling*, são os principais responsáveis pela redução de fluxo de permeado e pelo conseqüente aumento das pressões transmembranas, fatores indesejados no processo. Este processo de *fouling* se dá pela ação de certos mecanismos de bloqueio que vão se estabelecendo, relacionados com fatores diversos ao longo do tempo de filtração, dentre eles a concentração de sólidos presente, a pressão transmembrana aplicada, e outros fatores associados às características do lodo submetido à filtração. A otimização deste tipo de processo de tratamento deve propor condições operacionais que minimizem os efeitos da ação destes mecanismos de bloqueio, ou seja, que reduzam as magnitudes dos valores de queda do fluxo de permeado, reduzindo também a frequência da necessidade de retrolavagem e limpeza química das membranas. Deve também evitar a necessidade de aumento da pressão aplicada, necessária para manter-se um fluxo mais constante, que, por sua vez, está relacionada diretamente com incremento dos custos com energia para sustentar o sistema. Para o cumprimento deste objetivo geral, serão avaliadas as correlações entre as principais variáveis intervenientes ao longo do tempo: volume filtrado, resistência das membranas e fluxo de permeado. São

avaliadas quantitativamente relações entre fluxo de permeado ao longo do tempo, para diferentes condições de pressões e de concentração de biomassa, e para três efluentes de diferentes origens: refinaria de petróleo, hospitalar e lixiviado de aterro sanitário. Associativamente serão avaliados parâmetros físicos como: viscosidade, massa específica e características granulométricas dos biossólidos, e ainda parâmetros representativos da atividade microbológica presente, como o quantitativo de EPS (*Extracelular Polymeric Substancies* – Substâncias Poliméricas Extracelulares), além da caracterização por microscopia ótica. Com estes parâmetros e para lodos de distintas origens, realiza-se a busca de correlações com a redução de fluxo com o intuito de identificar elementos que contribuam com a intervenção operacional nestes processos para incrementar a sua eficiência.

Neste contexto, surge a proposição do presente trabalho, com vistas a gerar resultados que contribuam com a compreensão sobre o comportamento das membranas frente aos processos de tratamento em biorreatores, para diferentes tipos de efluentes. Associado a isto, que ainda contribua para o estabelecimento de melhores condições operacionais para o dimensionamento destes processos, considerando condicionantes operacionais com diferentes pressões transmembranas e diferentes concentrações de sólidos no efluente.

2 OBJETIVOS

Quando se depara com a diversidade de fatores intervenientes na modelagem de biorreatores associados com membranas filtrantes, há que se considerar um escopo definido de trabalho, que associado ao estado da arte atual, contribua com o avanço científico nesta área. Assim, surgem os objetivos a seguir traçados com vistas a contribuir com as pesquisas nesta área do conhecimento.

Como objetivo geral para o desenvolvimento do presente trabalho propõe-se:

ANALISAR AS RELAÇÕES ENTRE A REDUÇÃO DE FLUXO DE PERMEADO E AUMENTO DA RESISTÊNCIA TOTAL PARA TRÊS LODOS DISTINTOS SUBMETIDOS À FILTRAÇÃO COM USO DE MEMBRANAS SOB DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS E PRESSÕES TRANSMEMBRANAS.

Com vistas a cumprir com este objetivo geral, a pesquisa apresenta os seguintes objetivos específicos:

- a) Simular em condições de bancada um sistema de tratamento do tipo MBR, com aplicação de um módulo submerso de membranas de fibras ocas efetuando a filtração em condições padronizadas que permitam a análise comparativa dos resultados para os distintos lodos;
- b) Avaliar a influência de distintas concentrações de sólidos e das distintas pressões transmembranas sobre a filtração de diferentes lodos;
- c) Analisar a influência dos parâmetros viscosidade, massa específica, EPS e características físicas dos bio-sólidos dos distintos lodos, como fatores intervenientes nas relações de queda de fluxo e aumento da resistência total;
- d) Determinar os valores e avaliar a aplicação do Índice Modificado de Fouling para caracterizar o incremento da resistência total ao longo dos ensaios;
- e) Identificar e avaliar os distintos mecanismos de bloqueio ocorridos durante os ensaios de filtração para os distintos lodos, concentrações de sólidos e pressões transmembranas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Com vistas a cumprir com os objetivos propostos para o desenvolvimento deste trabalho, será apresentada uma breve abordagem dos principais elementos teóricos, sustentados com base em revisões de bibliografias técnicas e científicas que fundamentam o tema em questão. Inicia-se como uma breve descrição do que são as membranas e como se operacionaliza sua utilização para fins de tratamento de efluentes. Após, são abordados alguns aspectos relacionados aos principais parâmetros de controle das operações de filtração com membranas e com os processos envolvidos, identificando os principais fatores limitantes e perturbadores das condições ótimas de operação. Por fim, apresentam-se as principais modelagens e estudos hidrodinâmicos sobre estes, como subsídio para os procedimentos metodológicos e para a análise dos resultados.

3.1 FILTRAÇÃO ATRAVÉS DE MEMBRANAS

As operações de separação utilizando membranas caracterizam-se como aquelas que utilizam uma barreira seletiva que sob a ação de uma força motriz podem promover a separação de determinados componentes de uma solução ou suspensão (NOBLE e STERN, 1995; SCHNEIDER, 2001). Esta barreira seletiva é exatamente a função da membrana em si, sendo que as forças motrizes podem ser gradientes de pressão, de concentração, de potencial químico ou de potencial elétrico.

Dentre as operações de separação, as que utilizam membranas têm se desenvolvido muito nos últimos anos por apresentarem características únicas em relação a outras operações convencionais de separação, destacando-se as seguintes:

- não necessitam de mudança de fase para efetuar a separação, contribuindo para a economia de energia;
- na maioria dos casos, não necessitam de adição de produtos químicos durante a separação;
- permitem o processamento de substâncias termolábeis, pois podem operar à temperatura ambiente;

- apresentam maior seletividade, permitindo separação de micro a nano partículas de forma escalonada;
- relativa facilidade de mudança de escalas, e conseqüentemente de ampliações nos processos, pelo fato de poderem ser implantadas de forma modular.

Dadas estas características, a filtração através de membranas tem se difundido por diferentes setores industriais: químico, alimentício, farmacêutico, médica e de biotecnologia. Típicos exemplos de aplicação são a dessalinização de águas, o tratamento de efluentes industriais, a concentração e purificação de produtos farmacêuticos e alimentícios. São ainda componentes presentes em órgãos humanos artificiais, instrumentos para a dosagem controlada de medicamentos e em sistemas conversores de energia. Em conjunto com os processos convencionais, são capazes de gerar novas rotas de produção gerando produtos de excelente qualidade (HABERT *et al.*, 2006; STRATHMANN, 2001).

As membranas podem ser classificadas como densas ou porosas. A separação por membranas densas ocorre através de interações físico-químicas entre o permeado e o material da membrana, resultando em processos de alta seletividade. Exemplos destes processos incluem osmose inversa (OI) e pervaporação. As operações de separação por membranas porosas, tais como microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF), se baseiam principalmente na exclusão por tamanho das espécies presentes pelos poros da membrana.

As membranas também podem ser classificadas quanto à composição do material: orgânicas (poliméricas) ou inorgânicas (cerâmicas, metálicas ou vidros) e quanto à morfologia: isotrópicas (simétricas) ou anisotrópicas (assimétricas).

As membranas isotrópicas porosas possuem uma estrutura rígida com poros aleatoriamente distribuídos. As membranas isotrópicas densas constituem-se de um filme denso através do qual o permeado é transportado por difusão. As membranas anisotrópicas apresentam uma camada superior mais fechada e fina, denominada de pele, com a presença ou não de poros em sua estrutura (NOBLE e STERN, 1995; HABERT *et al.*, 2006). A Tabela 1 resume algumas das principais características para cada tipo de filtração através de membranas.

Tabela 1 - Algumas características da filtração através de membranas que utilizam ΔP como força motriz.

PROCESSO	FORÇA MOTRIZ	MATERIAL RETIDO	MATERIAL QUE PERMEIA	APLICAÇÕES
MICROFILTRAÇÃO (MF)	ΔP (0,5 - 2 atm)	Material em suspensão, bactérias	Água e sólidos dissolvidos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Esterilização bacteriana ▪ Clarificação vinho ▪ Conc. de células ▪ Oxigenação do sangue
ULTRAFILTRAÇÃO (UF)	ΔP (2 - 7 atm)	Colóides, macromoléculas	Água, sais solúveis e compostos de massa molar média	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fracionamento e conc. de proteínas ▪ Recuperação de pigmentos ▪ Recuperação de óleos
NANOFILTRAÇÃO (NF)	ΔP (7 - 20 atm)	500 < PM < 2000 (PM: peso molecular)	Água, sais monovalentes e moléculas de baixa massa molar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Purificação de enzimas ▪ Dessulfatação de água do mar
OSMOSE INVERSA (OI)	ΔP (20- 80 atm)	Todo material solúvel ou em suspensão	Água (solvente)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dessalinização de águas ▪ Concentração de suco de frutas ▪ Desmineralização de águas

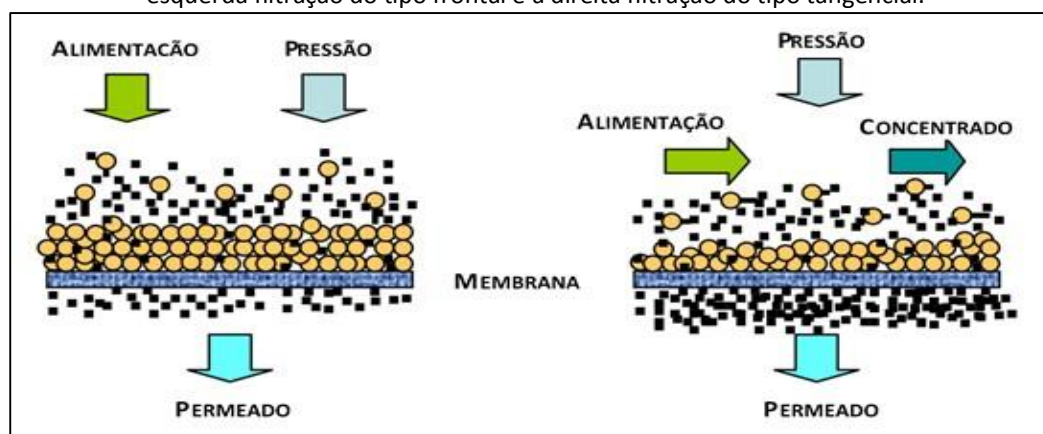
(Habert et al, 2006)

A filtração com membranas de microfiltração (MF) é uma operação de separação intermediária entre a filtração através de membranas de ultrafiltração (UF) e a filtração convencional de partículas em meios granulares. Atualmente apresenta-se como um processo bem estabelecido e disseminado para a retenção de sólidos em suspensão, bactérias e moléculas com massa molar média superior a 500.000 Dalton, tamanho equivalente a 0,01 μm . A força motriz na MF é o gradiente de pressão e o diâmetro de poro na região seletiva da membrana varia de 0,1 a 10 μm (MULDER, 1996, HABERT *et al.*, 2006).

Em operações com membranas de MF, o mecanismo de filtração pode se dar por duas formas distintas: filtração com escoamento tangencial à superfície da membrana (*cross-flow filtration*) ou filtração frontal (*dead-end filtration*). Na filtração frontal há somente uma direção para as correntes, sendo que a alimentação e o permeado têm o mesmo sentido. Neste tipo de operação, toda a alimentação é forçada através da membrana, o que acarreta uma grande tendência à formação de torta junto à superfície da membrana, ocasionando uma drástica queda no fluxo de permeado. A Figura 1 apresenta uma representação das configurações de escoamento possíveis para a operação da filtração com membranas.

Na MF com escoamento da alimentação tangencial à superfície da membrana, a direção do fluxo da alimentação não é a mesma do permeado, fator que contribui significativamente para a redução dos efeitos de polarização por concentração.

Figura 1 – Representação das possibilidades de configurações nas operações de filtração com membranas: à esquerda filtração do tipo frontal e à direita filtração do tipo tangencial.



Fonte: adaptado de Sombatsompop, 2007

Nas operações de separação envolvendo membranas, fluxo é o volume de solvente que permeia por unidade de área da superfície da membrana transversal a sua espessura em unidade de tempo (IUPAC, 1996). A Equação que apresenta esta relação está dada por

$$J = \frac{V}{t A}, \quad (1)$$

onde

J : fluxo de permeado em condições operacionais ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

V : volume de permeado (m^3),

t : tempo de operação (s),

A : área filtrante (m^2).

Sabendo-se que a viscosidade do permeado interfere no fluxo e que esta é função da temperatura, é usual que se normalize o fluxo da temperatura de operação para 20°C , conforme apresenta a relação:

$$J_{20} = \left(\frac{\mu_T}{\mu_{20}} \right) \left(\frac{V}{t A} \right), \quad (2)$$

onde

J_{20} : fluxo de permeado normalizado à 20°C ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

μ_T : viscosidade dinâmica do permeado na temperatura de operação ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$),

μ_{20} : viscosidade dinâmica do permeado a 20°C ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$).

No que se refere aos processos de manufatura de membranas de MF, várias técnicas podem ser empregadas para o seu preparo a partir de materiais poliméricos. Para a obtenção de membranas isotrópicas são utilizadas as técnicas de sinterização, estiramento, gravação (*track-etching*) e inversão de fase. Para as anisotrópicas utiliza-se a

precipitação térmica, precipitação por evaporação de solvente, precipitação pela presença de não solvente e precipitação por imersão (MULDER, 1996).

A fabricação de membranas busca dar ao produto propriedades relacionadas a uma razoável resistência mecânica, capaz de manter um elevado fluxo de permeado e um elevado grau de seletividade. Este elevado grau de seletividade relaciona-se à síntese de membranas com poros pequenos, resultando em baixa permeabilidade. A permeabilidade pode aumentar com o aumento da densidade e ou do diâmetro dos poros. De acordo com a relação de Hagen-Poiseuille, a resistência global da membrana é proporcional a sua espessura ou inversamente ao tamanho dos poros, e a seletividade será comprometida pela distribuição de poros maiores. Portanto, uma estrutura física ótima para qualquer material de membrana é baseada em uma fina camada do material responsável pela seletividade suportada em um material de alta porosidade, atribuindo maior permeabilidade. Entretanto não há um material de membrana perfeito para a maioria das aplicações, uma vez que certo material de membrana pode ser bom candidato a uma aplicação, mas não ser aplicável a outro processo (KRUIP e BORNEFALK, 1998 *apud* AMARAL, 2009).

O fluxo de permeado é diretamente proporcional à área de membrana disponível para esta permeação, sendo assim, a configuração do módulo de membranas apresenta-se como um importante parâmetro para o desempenho da filtração através de membranas. Para a aplicação de membranas em grande escala são necessárias elevadas áreas de membranas. Uma forma de resolver este problema de escalas é configurar a membrana em módulos. Segundo Mulder (1996) e Stephenson *et al.* (2000), a geometria ou configuração ótima dos módulos de membranas deve apresentar as seguintes características:

- elevada densidade de empacotamento (área de permeação por volume total ocupado pelo módulo);
- possibilitar elevado grau de turbulência para facilitar a transferência de massa no lado da alimentação;
- baixa demanda de energia por volume de permeado;
- projeto que facilite a limpeza;
- projeto que facilite a inserção de novos módulos.

Dentre estas características, algumas são conflitantes, como, por exemplo, a promoção de turbulência que, em geral, resulta no aumento de requisitos energéticos; e a limpeza pode danificar parte da membrana, reduzindo a área de membrana por volume de módulo. Assim, a escolha do módulo acaba sendo determinada pelo cotejo entre considerações econômicas e operacionais.

Os mais frequentes usos de módulos de fibras ocas com membranas de MF para o caso do tratamento de efluentes se dão pelas suas características mais otimizadas para este tipo de efluente. Ao contrário das membranas planas, as fibras ocas são autos suportadas, podendo ser submetidas a processos de retrolavagem mais vigorosos, e a fabricação dos feixes e módulos é relativamente mais econômica (CHERYAN, 1998).

3.2 BIORREATORES ASSOCIADOS À MEMBRANAS

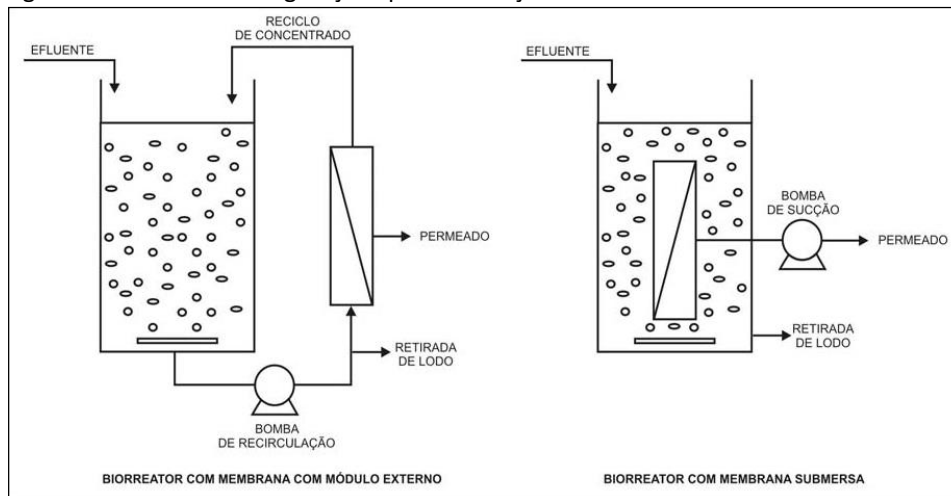
Os biorreatores associados a membranas, tipicamente são designados pela sua sigla com origem na língua inglesa: MBR – *Membrane Bioreactors*.

Brindle e Stephenson (1996) descrevem os MBR como o resultado da combinação dos processos de tratamento biológico de efluentes e de separação por membranas. As membranas, com a função de reter a biomassa, substituem os decantadores das estações de tratamento biológico convencionais. Em comparação com os processos de lodos ativados convencionais, os MBR apresentam vantagens operacionais como a independência entre o tempo de retenção de sólidos e o tempo de retenção hidráulica, com a utilização de concentrações mais elevadas de biomassa, o que permite a redução do tamanho das unidades de tratamento, podendo reduzir a geração de lodo. Além dessa vantagem, em comparação com as estações de tratamento convencional, as unidades com MBR permitem a produção de um efluente livre de micro-organismos e, por substituírem os tanques de sedimentação, ocupam áreas muito menores, operando com concentrações de sólidos de 3 até 6 vezes maiores.

Neste contexto, dois tipos de configurações têm sido as mais exploradas: a primeira com os módulos de membrana instalados externamente e a segunda com estes módulos submersos no interior do próprio reator. As instaladas externamente podem ainda ser encapsuladas e pressurizadas, bem como também podem ser submersas em uma unidade de menor volume, normalmente denominada de tanque de membranas. Alguns autores

apresentam a abreviatura para os biorreatores com membranas submersas como sendo SMBR. A Figura 1 apresenta esquematicamente estas possibilidades de instalação.

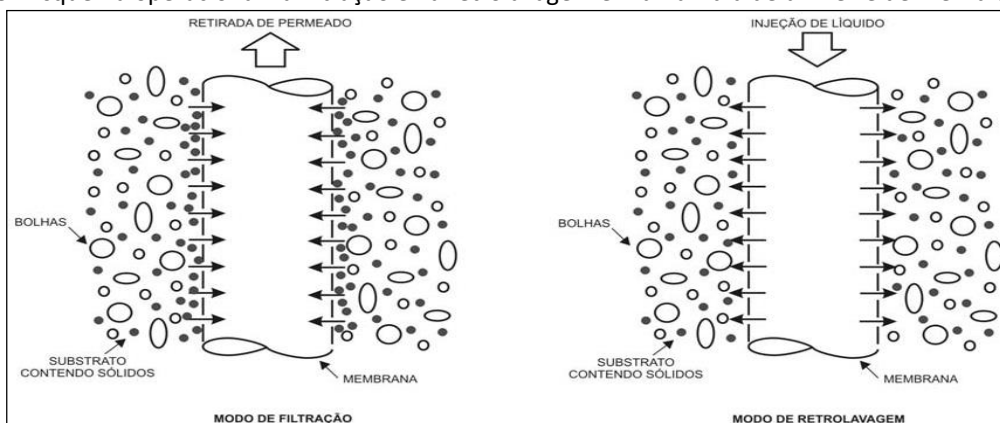
Figura 2 - Diferentes configurações para instalação dos módulos de membranas em MBR.



Fonte: Viero, 2006

Os MBR com membranas submersas são produzidos com a utilização de arranjos de fibras sem uma carcaça envoltória, e são assim denominados de feixes de membranas. Para aplicações industriais, as fibras são arranjadas de modo que ambas as extremidades de cada fibra fiquem presas e seladas em uma resina sólida, para evitar a contaminação do permeado extraído pelo interior das membranas. A técnica de operação empregada normalmente para manutenção de fluxo permeado estável consiste de permeação, obtida por sucção, alternada com retrolavagem, em que uma porção do permeado é bombeada no sentido inverso ao da permeação. Na Figura 3 está representado este esquema operacional, permitindo melhor visualizar de que forma o sistema de permeação e de retrolavagem atua em uma fibra de um feixe de membranas.

Figura 3 - Esquema operacional na filtração e na retrolavagem em uma fibra de um feixe de membranas.



Fonte: Viero, 2006

Segundo Bouhabila *et al.* (1998), a turbulência existente no tanque aerado e o efeito das bolhas devem ser suficientes para produzir condições de operação satisfatórias para manter o fluxo praticamente constante e a taxa de aumento da pressão transmembrana relativamente baixa. O fluxo permeado geralmente é baixo ($15-30 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$), porém, relativamente constante. O borbulhamento de ar cria um fluxo cruzado na superfície da membrana, induzindo tensões de cisalhamento moderadas que são responsáveis pelo desprendimento das partículas de lodo depositadas na superfície da membrana.

A energia necessária para produzir vácuo nos biorreatores com membranas submersas é normalmente menor do que a energia necessária para os módulos pressurizados, que utilizam bombas de recirculação, pois nestes casos a pressão fornecida é maior, fato que faz com que os sistemas submersos sejam economicamente mais atrativos. As membranas dos MBR com módulo externo podem utilizar pressões transmembrana mais elevadas, quando comparadas com as utilizadas em SMBR, associadas a altos números de Reynolds, para produzir fluxos permeados maiores do que os obtidos para MBR com membranas submersas. Além disto, normalmente, no caso de MBR com módulos externos, pode ser necessária uma bomba adicional para promover a recirculação de permeado. Ainda, os altos fluxos permeados implicam em maior propensão à redução de fluxo causada pela incrustação das membranas de reatores com módulo externo, o que causa um aumento na resistência ao transporte (THOMAS *et al.*, 2000).

Dentre os maiores desafios de otimização dos projetos de MBR e da sua operação, estão exatamente o de se encontrar estratégias para reduzir as interações de ordem física, química e biológicas entre a membrana em si e o conteúdo do reator. Estas interações caracterizam-se pela polarização de concentração, formação de camada gel e o *fouling*, que ocorrem em todas as operações de filtração através de membranas. Como consequência, em termos operacionais, tem-se a redução gradativa do fluxo de permeado, e em termos de projeto, se tem a necessidade de prever uma área de membrana filtrante maior.

O reator biológico, ou biorreator, associado a membranas (MBR) tem como vantagem, além da elevada qualidade efluente, uma menor produção de lodo quando comparado com o processo de Lodos Ativados convencional. Laera *et al.* (2005) citam as seguintes vantagens de um MBR como principais, quando comparadas a lodos ativados convencionais: elevado θ_c (idade do lodo), independentemente de θ_h (tempo de detenção

hidráulico); completa remoção de sólidos e praticamente completa remoção de micro-organismos; elevadas remoções de diversos poluentes; reduzida produção de lodo; e rápida partida do reator. Segundo esses mesmos autores, a operação de um MBR realizada com concentração de biomassa entre 15.000 mg/L e 25.000 mg/L minimizará o crescimento bacteriano, identificado como um dos fatores causadores do surgimento de *fouling*.

Davies *et al.* (1998) observaram que, em uma unidade SMBR piloto empregando membranas com tamanho de poro de 0,4 μm , processando esgoto doméstico, o teor de sólidos suspensos do reator cresceu rapidamente atingindo 39.000 mg/L, momento em que o reator começou a produzir espuma em excesso e foi necessário substituir o lodo. Para reduzir os custos de descarte da biomassa, o ideal é que a produção de lodo seja a menor possível. Apesar disso, a produção de lodo foi de 0,26 $\text{kg}_{\text{SS}}/\text{kg}_{\text{DBOremovida}}$, considerada baixa comparativamente com as obtidas em processos convencionais de lodos ativados, que, segundo os autores, têm valores típicos da ordem de 0,48 $\text{kg}_{\text{SS}}/\text{kg}_{\text{DBOremovida}}$. Os autores estimaram que o MBR submerso produziu apenas cerca de 30% da quantidade de lodo gerada em processos convencionais de lodos ativados.

Porém, diversos fatores influenciam no desempenho hidráulico do conjunto reator-membrana colaborando para o surgimento do fenômeno de *fouling*. Dentre esses destacam-se: a característica do efluente (substrato), pH, concentração de OD, concentração de biomassa, compostos inibidores da atividade microbiana e produtos gerados por essa atividade, como EPS (Substâncias Poliméricas Extracelulares) e SMP (Produtos Microbianos Solúveis).

Chang e Lee (1998) afirmam que quanto mais elevada for a concentração de SMP, mais rápido o *fouling* se estabelece. Silva e Urbain (1999) estabeleceram um modelo para prever SMP em MBR. Foi assumido que SMP resulta da lise celular e o modelo estabelecido foi para prever a mudança na concentração de nitrogênio amoniacal e na concentração de nitrato no MBR com ciclo aeróbio-anóxico. Já Nagaoka *et al.* (1998) construíram um modelo simples para prever a produção de SMP e *fouling* da membrana. Eles assumiram que todo o SMP gerado a partir da lise celular tende a se acumular sobre a superfície causando *fouling* na membrana.

Lee *et al.* (2002) modificaram o modelo pré-existente para descrever as diferentes características do SMBR que utiliza o modelo em série para descrever o efeito do *fouling*.

As seguintes hipóteses foram estabelecidas. A quantidade de SMP não é significativa quando comparada a SST (Sólidos Suspensos Totais). Assim, sua contribuição pode ser ignorada na massa de torta. Já, quanto à resistência específica, a qual depende das propriedades físico-químicas dos sólidos suspensos, os SMP têm uma grande influência.

Segundo Wingender et al. (1999), Geesey (1982) teria sido o primeiro a adotar a expressão substâncias poliméricas extracelulares. As EPS denominam um conjunto de materiais poliméricos biossintetizados em culturas microbianas compostas por polissacarídeos, proteínas, ácidos nucléicos (BROWN, et al., 1979), lipídios, ácidos húmicos e urônicos (FROLUND, et al., 1996), secretadas ou liberadas após o rompimento das membranas celulares (lise) e que permitem a agregação desses micro-organismos.

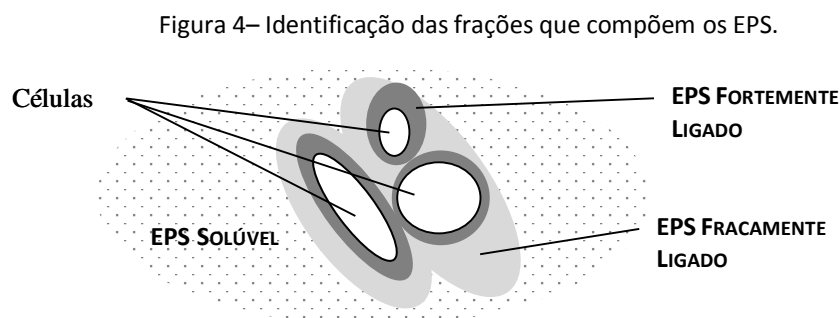
Embora inerentes e fundamentais ao metabolismo e à estruturação de biofilmes ou flocos microbianos, as EPS associadas a outros compostos presentes no lodo ativo, promovem interações físicas e químicas com a superfície das membranas seletivas nos MBRs que resultam em redução da capacidade de permeação. Quando essa redução é definitiva, estabelecem-se as incrustações ou fenômeno denominado *fouling* (DREWS, et al., 2006).

Segundo Lesjean et al. (2005), grandes moléculas orgânicas presentes nos lodos ativos e originadas da atividade microbiana conhecidas como EPS foram identificadas como sendo as maiores responsáveis pelo *biofouling* observado em membranas de MBR tratando esgotos domésticos, quando comparado com a concentração de sólidos suspensos. O *biofouling*, termo que, segundo Liao et al. (2004) tem sido empregado de forma mais ampla do que *fouling*, pois abrange diversos fenômenos decorrentes do contato com os micro-organismos, tem representado o “Tendão de Aquiles” (FLEMMING, et al., 1997) para a viabilidade econômica dos MBR.

As EPS exercem influência crítica na taxa de escoamento em membranas utilizadas em sistemas de lodos ativados e ainda não estão sendo incluídas na descrição de processos de biotransformação. Sua geração é creditada a ser fortemente dependente do estágio metabólico, o qual se correlaciona com a carga orgânica do sistema de tratamento biológico.

A presença das EPS é universal onde há culturas microbianas. Como a própria denominação define, as EPS se localizam fora das células, porém podem estar ligadas a elas formando as frações de EPS fortemente (EPS_{fo}) e fracamente ligadas (EPS_{fr}), ou ainda

difundirem-se no meio como uma solução viscosa amorfa, denominada fração solúvel do EPS (EPS_s). A Figura 4 ilustra esta composição das distintas frações de EPS.



Fonte: adaptado de Wingender *et al.* (1999)

Segundo Lapidou e Rittmann (2002), sob o ponto de vista do metabolismo celular, a principal diferença entre EPS_s , EPS_{fr} e EPS_{fo} é que as duas primeiras são passíveis de serem hidrolisadas por ação enzimática e servir de substrato à biomassa, enquanto que EPS_{fo} permanece aderida à parcela inerte da biomassa mesmo após a lise celular.

De acordo com Lovatel (2011), ao longo do tempo pesquisadores dividiram os produtos resultantes do metabolismo microbiano em quatro classes: EPS, produtos microbianos solúveis (SMP), produtos associados à utilização do substrato (UAP) e produtos associados à biomassa (BAP), porém diversos estudos revelaram que essas classes eram constituídas pelos mesmos grupos funcionais orgânicos, diferindo apenas na forma como estavam relacionados com a biomassa. Com base nesses estudos, Lapidou e Rittmann (2002) concluíram que EPS e SMP eram UAP e BAP, cuja diferença residia na relação entre essas substâncias e a biomassa. Enquanto SMP permaneciam em solução ao redor do floco, EPS mantinham-se aderidas às células. Dessa forma propuseram modelo unificado pelo qual os SMP são constituintes da fração solúvel das EPS.

Ainda segundo Lovatel (2011) há diversas metodologias analíticas empregadas para extração e caracterização das frações de EPS (solúvel, fraco e forte) sem que uma normalização tenha sido estabelecida, porém alguns cuidados relativos à amostragem são recomendados. Em seu trabalho apresenta metodologia adaptada a partir de vários outros autores, apresentando detalhes e cuidados relativos a amostragem e análise das frações de EPS para o caso de MBR.

Wintgens *et al.* (2003), analisaram uma estação de tratamento de efluentes, em Röedingen, Alemanha, operando com MBR cujo processo podia nitrificar e desnitrificar. Foi

verificado que a respiração endógena dos micro-organismos heterotróficos era muito significativa como é de se esperar em MBR operando com elevada concentração de biomassa e baixo fator A/M (Alimento/Micro-organismos). Segundo Harper *et al.* (2006), os MBR podem operar com θ_c elevado para manter elevadas concentrações de biomassa e propiciar a nitrificação. Porém um elevado θ_c pode produzir SMP os quais podem causar *fouling* e dar cor ao efluente.

Outra causa que pode colaborar para a redução do fluxo de permeado é a elevada concentração de micro-organismos filamentosos. O processo de lodos ativados pode ser suscetível a um crescimento descontrolado de micro-organismos filamentosos que poderão ocasionar dois tipos de fenômenos que prejudicam o desempenho do sistema de lodos ativados bem como a sedimentação deste lodo biológico no sedimentador secundário que são o *bulking* e o *foaming*. Tchobanoglous *et al.* (2003) listam diversas causas do surgimento desses fenômenos tais como: variações na vazão de alimentação, variações na composição, pH, temperatura, septicidade, balanço de nutrientes, natureza dos componentes do efluente, suprimento limitado de oxigênio, mistura insuficiente, curto circuito, projeto do sedimentador secundário, capacidade limitada do reciclo de lodo, baixa concentração de oxigênio dissolvido, baixo fator A/M e DBO₅ solúvel insuficiente.

Apesar de todos os fatores listados acima, em alguns casos, outros elementos ainda podem interferir no processo. Pernelle *et al.* (2000) afirmam que o surgimento de micro-organismos filamentosos deve-se a uma soma de diversos fatores. Somente uma variação na carga orgânica afluenta ou uma deficiência de oxigênio dissolvido não é condição suficiente, porém a existência dos dois fatores conjuntamente irá favorecer este fenômeno. Jenkins *et al.* (1993), citam que esses micro-organismos podem se estabelecer de forma oportunista quando alguns dos seguintes aspectos são contemplados:

- presença de sulfetos no efluente de alimentação;
- presença de Óleos e Graxas em efluente doméstico favorecendo o surgimento do *foaming*;
- desequilíbrio ou ausência de nutrientes;
- baixa ou nula concentração de oxigênio;
- cargas orgânicas variáveis e
- vazões de alimentação variável.

3.3 COMPORTAMENTO E ESTUDOS HIDRODINÂMICOS

Wintgens *et al.* (2003) apresentam uma correlação entre as forças de cisalhamento criadas por um escoamento lento ao longo das fibras de membranas com os coeficientes de transferência de massa na superfície da membrana. O desempenho da filtração, destacando a permeabilidade e sua evolução de longos períodos de tempo, é o principal foco de interesse devido a sua crucial importância para tornar factível e economicamente atraente os processos de MBR. Diversos são os fatores que podem influenciar o fluxo de permeado, tais como compostos que se aderem na superfície e nos poros da membrana.

Para diminuir a ação desses compostos, algumas estratégias são utilizadas, como pulsar ar no lado da alimentação resultando um escoamento multifase induzindo um aumento nas forças de cisalhamento e aumentando a transferência de massa.

O escoamento em duas fases entre fibras ocas capilares, consistindo de ar e uma suspensão, foi descrito como regime de escoamento lento. Devido ao fato de que a difusividade de partículas e macromoléculas, encontradas em membranas de sistemas de lodos ativados, é baixa, o transporte da superfície da membrana para o meio do líquido pode ser somente induzido por cisalhamento. Segundo Yükseler (2007) foram a partir dos trabalhos de Ruth *et al.* (1933) e Ruth (1935) que surgiu a teoria clássica de filtração, baseada em uma analogia com a teoria da resistência apresentada pelas Leis de Ohm, no qual a taxa de filtração é relacionada com as forças que a provocam. Desta teoria inicial desenvolveram-se diversos outros detalhamentos partindo sempre desse pressuposto. Assim, consolidou-se o modelo das resistências para caracterizar o fluxo de permeado J através das membranas, dado pela equação:

$$J = \frac{\Delta P}{(R_m + R_c + R_f)\mu} \quad (3)$$

onde

J : fluxo de permeado ($L.m^{-2}.h^{-1}$),

ΔP : Pressão transmembrana – PTM (Pa),

R_m : Resistência intrínseca da membrana (membrana limpa) (m^{-1}),

R_c : Resistência da camada de torta (m^{-1}),

R_f : Resistência do *fouling* (m^{-1}),

μ : Viscosidade dinâmica do permeado ($N.s.m^{-2}$).

A soma de R_m , R_c e R_f é denominada resistência total, R_t .

A pressão transmembrana pode ser desmembrada em:

$$\Delta P = P_{hidro} + P_{bomba} - \Delta P_{ax}, \quad (4)$$

onde

P_{hidro} : Pressão exercida pela coluna de água, no qual o módulo é submerso,

P_{bomba} : Pressão de sucção,

ΔP_{ax} : Perda de pressão axial causada pelo fluxo de permeado através das fibras ocas.

Outro fator que pode afetar o fluxo é o tamanho da partícula, no caso dos flocos. Há um senso comum de que a retirada de água é afetada pelo tamanho dessas partículas, pois quanto menor, mais difícil é a desaguabilidade, isto devido à elevada área específica que aumenta a resistência à fricção. Jin e Lant (2004) mostraram que para tamanhos de flocos entre 50 e 200 μm a remoção de água foi mais difícil devido a maior quantidade de água ligada. Baseado nestes resultados e conduzindo outros, Harper *et al.* (2006) postularam que as partículas menores que 50 μm afetam negativamente a remoção de água. Torna-se assim um importante fator, avaliar para cada tipo de efluente a ser testado, quais os tamanhos médios das partículas de biossólidos presentes no efluente.

Jin *et al.* (2005) operaram MBR com concentrações de OD de 0,5 mg/L e 3,0 mg/L. Com concentração de OD de 0,5 mg/L foi observado que o tamanho dos flocos era menor, afetando a filtrabilidade. Para uma concentração de OD de 0,5 mg/L o tamanho médio dos flocos foi de 2,07 μm , enquanto que para uma concentração de OD de 3,0 mg/L o tamanho médio foi de 5,28 μm . Para flocos maiores, a velocidade em torno da superfície da membrana para o meio líquido é maior e a porosidade é maior, o que favorece a filtrabilidade. Os autores não analisaram o EPS. Provavelmente a concentração de EPS nos flocos com concentração de OD de 0,5 mg/L tenha sido maior do que nos flocos com OD de 3,0 mg/L.

Rosenberger *et al.* (2006) avaliaram o impacto de substâncias coloidais sobre o fluxo de permeado. Os autores confirmaram os resultados obtidos por Barker e Stuckey (1999) que a quantidade de substâncias produzidas pelas bactérias é influenciada pela idade do lodo, fator A/M (Alimento / Micro-organismos) e temperatura. Foi observado que em 17°C houve um acúmulo de polissacarídeos, o que é explicado pela cinética de degradação. Já,

em 23°C e θ_c (idade do lodo) igual a 15 dias a concentração de polissacarídeos manteve-se baixa. Assim, a influência da temperatura no *fouling* pode ser explicada de duas formas: pela redução tanto da viscosidade, quanto da concentração de polissacarídeos quando há uma elevação da temperatura e o efeito contrário quando ocorre a diminuição da temperatura. Quanto à θ_c , foi observada uma boa correlação entre concentração de polissacarídeos e *fouling* para θ_c de 8 dias, e simplesmente não houve correlação entre esses parâmetros para θ_c de 15 dias. Porém, outros fatores podem influenciar o aumento da concentração de polissacarídeos, tais como: estresse dos micro-organismos devido a compostos tóxicos, aumento abrupto da relação A/M e baixa concentração de oxigênio dissolvido.

No que se refere aos fluxos através das membranas em operações de filtração, Bachin *et al.* (2006) apresentam uma síntese sobre estudos a respeito dos denominados Fluxo Crítico e Sustentável. Descrevem teoricamente as causas da redução de fluxo em processos de separação por membranas, que podem ser divididas em duas partes: polarização de concentração e *fouling*.

A polarização da concentração é descrita como sendo uma consequência natural da seletividade da membrana frente às propriedades da solução de alimentação, conduzindo a um acúmulo de partículas ou solutos por transferência de massa entre camada limite e a superfície da membrana. Moléculas se acumulando na superfície reduzem a atividade do solvente e isto reduz o fluxo do solvente através da membrana. Este fenômeno é inevitável, porém reversível com a redução da PTM e conseqüentemente do fluxo.

O *fouling*, caracterizado como um acúmulo de material na membrana, se dá através dos seguintes mecanismos: adsorção (interação entre a membrana e o soluto); bloqueio dos poros (efeito físico de interrupção da passagem de fluxo por entupimento de poros); deposição (sobre a superfície da membrana, relacionado à resistência da torta); e camada gel (dependente do nível de polarização da concentração).

Para o denominado fluxo crítico, independentemente dos mecanismos causadores da redução de fluxo, este conceito tem sido utilizado de dois modos principais: um como sendo aquele no qual a curva de pressão versus fluxo transmembrana começa a divergir da linearidade; e o outro como sendo o primeiro fluxo de permeado no qual surge o *fouling* irreversível. Estas definições são consideradas a partir de diferentes concepções. Algumas são tomadas puramente sob um ponto de vista físico (determinístico), tipicamente

referindo-se ao processo de coagulação e aglomeração de soluto sobre a membrana; enquanto outras apresentam o enfoque experimental (naturalista), referindo-se ao primeiro ponto de divergência da curva com relação à variação linear esperada para o fluxo versus a PTM. Estas considerações ponderam sobre a necessidade de se consolidar métodos e formas para o tratamento dos resultados das pesquisas a respeito do tema, mas sem uma definição conclusiva, tendo em vista a grande variabilidade de processos, de membranas, de efluentes possíveis de serem submetidos à filtração.

Cho e Fane (2002) acoplaram um sistema de membrana de microfiltração, provido de uma membrana plana com tamanho de poro de $0,22\mu\text{m}$ (*Millipore*) a um reator de leito móvel ascendente e avaliaram a operação abaixo do fluxo crítico, concluindo que MBR podem ser operados por períodos longos a fluxo constante, desde que o fluxo esteja substancialmente abaixo do fluxo crítico. Entretanto, observaram que, mesmo operando abaixo do fluxo crítico, a PTM tende a aumentar em duas etapas distintas; a primeira foi atribuída à incrustação gerada por EPS, em que há um aumento gradual da PTM que é tanto mais rápido quanto maior for o fluxo e, a segunda, foi associada à incrustação produzida pela biomassa. Nesta fase, há uma elevação rápida na taxa de aumento da PTM que, logo, leva à necessidade de limpeza.

Nuengjamnong *et al.* (2005) testaram dois MBR submersos utilizando membranas planas com a finalidade de identificar os efeitos dos EPS na incrustação das membranas. Os autores utilizaram TRH entre 4,5 e 5,0 h e θ_c de 25 e 250 dias. A razão A/M utilizada foi relativamente baixa, entre 0,02 e 0,04 $\text{kg}_{\text{DQO}}/\text{kg}_{\text{SS}}\cdot\text{dia}$ e o efluente sintético apresentava DQO de 300 mg/L. Com essa carga de alimentação, o período de adaptação foi de cerca de 21 a 63 dias e, após este período, as concentrações de sólidos nos reatores mantiveram-se estáveis: 4.950 mg/L, para θ_c de 25 dias e 8.880 mg/L, para o θ_c de 250 dias. Foi observado que comparando-se os resultados da operação com θ_c maior, há uma redução significativa nas concentrações de EPS e proteínas. Isso indica que os micro-organismos liberam menores quantidades de EPS no reator quando θ_c é alto. Concluíram que os teores de proteínas e EPS estão vinculados à resistência específica da torta, ou seja, possivelmente a torta foi produzida pela maior quantidade de EPS no meio reacional, tornando-a mais coesiva e menos permeável.

Para a limpeza das membranas, os autores sugerem uma combinação de retrolavagem com água durante 10 min, seguida de um período de molho de 3 h em solução de NaOCl a

5.000 ppm, com base na recuperação de fluxo permeado e nas fotomicrografias das membranas para as condições de limpeza testadas.

De acordo com Ng e Hermanowicz (2005) é provável que a estrutura e a composição da biomassa nos MBR sejam consideravelmente diferentes daquelas observadas em unidades de tratamento convencional. No processo de lodos ativados, os micro-organismos não floculantes não são retidos no sistema, ao contrário do que ocorre nos MBR. Na operação com baixos θ_c , as diferenças entre a biomassa dos processos com lodos ativados e a dos MBR devem ser ainda maiores, considerando que a fração de não floculantes provavelmente aumenta. Eles atribuem o melhor desempenho do MBR à presença desses micro-organismos que proliferam e, ao mesmo tempo, contribuem para a degradação do substrato. Foram avaliadas as quantidades de EPS extraídas de um sistema de lodo ativado convencional e de um MBR submerso, operados nas mesmas condições processando efluente sintético com θ_c variando de 0,25 a 5 dias, verificando-se que a concentração de EPS aumenta com o θ_c . Os autores assim sugerem que a operação com θ_c extremamente baixos ou altíssimas relações A/M, quando os micro-organismos crescem rapidamente, faz com que a taxa de crescimento de biomassa exceda a produção de EPS.

Os autores observaram ainda que a concentração de proteína é sempre maior do que a de carboidratos na biomassa e que os polissacarídeos têm um papel mais importante do que as proteínas na incrustação das membranas, uma vez que os íons cálcio, presentes em biorreatores, produzem a gelificação e agregação das moléculas de polissacarídeos, tornando-as mais compactas e coesivas e produzindo melhor biofloculação. Embora o mecanismo de biofloculação não tenha sido desvendado, é geralmente aceito que os EPS são fundamentais à agregação de bactérias aos flocos. De fato, os autores relacionaram o IVL (índice volumétrico de lodo) à quantidade de EPS totais (proteínas e polissacarídeos) e verificaram que a sedimentação é melhor quando há teores mais altos de EPS na biomassa.

Segundo Bowen *et al.* (1995), os mecanismos de bloqueio na filtração foram primeiramente estudados por Hermans e Bredre (1935), Gonsalves (1950) e Graça (1956), conduzindo estudos em modelos físicos para obter as leis que caracterizassem este processo. Em 1982 Hermia (*apud* BOWEN, 1995) apresenta um trabalho sobre modelagem do fenômeno de filtração com as leis resultantes para pressões constantes e considerando o fluido não-newtoniano. Até então, as leis de filtração consideravam mecanismos de

bloqueio baseado na obstrução dos poros e consequente aumento da resistência à filtração, baseado somente na maior ou menor restrição.

Com a modelagem de Hermia considera-se que a formação da torta, com suas propriedades de compressibilidade e de se caracterizar como um fluido não-newtoniano, apresenta outras possibilidades de bloqueio, ou seja, de mecanismos que fazem com que haja a redução de fluxo ao longo do tempo, mesmo com pressões constantes. Considerando as causas físicas destes mecanismos de bloqueio, surgem designações mais significativas para estes mecanismos de bloqueio:

- bloqueio do poro ou bloqueio completo;
- bloqueio padrão ou por adsorção direta;
- bloqueio intermediário ou de adsorção de longo período; e
- bloqueio por formação de torta ou pela resistência da camada limite.

Normalmente, nos estudos que se sucederam, um destes mecanismos de bloqueio tem sido assumido ao se estudar o fenômeno da filtração. Entretanto este fenômeno pode ser dinâmico e complexo, contando com a possibilidade sucessiva e ou simultânea dos vários mecanismos. Nesta linha, Tanny (1978 *apud* BOWEN, 1995) teoriza sobre três tipos diferentes de processos que podem se apresentar: tipo I, tipo II ou tipo III.

O tipo I corresponde aquele com a presença de um tamanho médio de soluto (r_s) maior do que o diâmetro médio dos poros da membrana (r), caso onde pode-se afirmar que não haveria dinâmica alguma no processo de filtração e a polarização de concentração corresponderia a uma retenção total instantaneamente estabelecida. Já para o tipo III, haveria uma compatibilidade entre os diâmetros médios do soluto e dos poros da membrana, conduzindo para um decréscimo exponencial do fluxo. Quando $r \gg r_s$ e ou $r < r_s$ ocorre a dinâmica do tipo II. Nesta linha, Meireles *et al.* (1991) apresentam trabalho avaliando a dependência entre o declínio do fluxo sobre um diâmetro médio de poros e o tamanho médio e variação granulométrica presente.

Bacchin *et al.* (2002) apresentam um modelo unificado para tratar a polarização da concentração, formação da camada gel e a deposição de partículas na filtração com fluxo tangencial. Os autores abordam o fluxo crítico e o fluxo limite, considerando os efeitos da polarização da concentração e da formação da camada gel. Boerlage *et al.* (2002) apresentam um trabalho sobre o Índice Modificado de *Fouling* aplicado a Ultrafiltração, incluindo assim os efeitos da presença de partículas coloidais de menor dimensão, ou seja,

considerando outros efeitos de bloqueio. Apontam o IMF – Índice Modificado de *Fouling*, como parâmetro para caracterizar o bloqueio por *fouling* na filtração, considerando especialmente o mecanismo de filtração por torta relacionado com o tamanho de partícula, que se dá através da equação de *Carman-Kozeny* para a resistência específica da torta (SCHIPPERS e VERDOUWN, 1980 *apud* BOERLAGE, 2002). Como resultado deste fenômeno, o IMF é definido como o gradiente da região linear encontrada na relação entre o tempo de filtração e o volume percolado contra o volume percolado ($t/V \times V$). A partir de ensaios à pressão constante, apresentam a seguinte equação dimensionalmente homogênea:

$$\frac{t}{V} = \frac{\eta R_m}{\Delta P A} + \frac{\eta I}{2\Delta P A^2} V, \quad (5)$$

onde

ΔP : pressão transmembrana,

η : viscosidade dinâmica,

A: área superficial de filtração,

V: volume de percolado na unidade de tempo t,

R_m : resistência intrínseca da membrana,

I: representa o produto entre a resistência específica da torta e a concentração de sólidos no efluente.

Desta relação, o IMF é representado pelo coeficiente angular da relação linearizada de t/V versus V , dado então por

$$IMF = \frac{\eta I}{2\Delta P A^2}. \quad (6)$$

A resistência intrínseca da membrana R_m , assumida ser constante no IMF, é uma função de propriedades da membrana, como a sua espessura (Δx), porosidade superficial (ε), raio do poro (r_p) e tortuosidade (τ), podendo ser definida segundo a partir da lei de *Poiseuille*, resultando em:

$$R_m = \frac{8\Delta x \tau}{\varepsilon r_p^2}. \quad (7)$$

Ainda na equação do IMF, a variável I refere-se ao índice de *fouling* que representa a medida do potencial de *fouling* de um afluente, sendo definido como o produto da

resistência específica da torta (α) depositada sobre a membrana pela concentração de partículas neste afluente (C_b), ou seja:

$$I = \alpha \cdot C_b . \quad (8)$$

O uso deste índice de *fouling* se dá pelo fato de que em grande parte dos casos, é impossível medir precisamente as variáveis C_b e α . No IMF, assume-se que a retenção de partículas é constante e que α apresenta uma permeabilidade constante e uma porosidade de torta uniforme através de toda sua espessura, ou seja, assume-se que a torta é incompressível. Alguns estudos têm ainda demonstrado que o conceito de IMF pode ser aplicado para o caso de tortas compressíveis (BOERLAGE *et al.*, 2002). A resistência específica da torta pode ser calculada de acordo com a relação de *Carman-Kozeny* para partículas esféricas, da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{180 \cdot (1 - \varepsilon)}{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot \varepsilon^3} , \quad (9)$$

onde ρ_p representa a massa específica das partículas que forma a torta. Um decréscimo na porosidade da torta (ε) ou no diâmetro médio de partícula (d_p) conduz ao um aumento significativo de α . Substituindo a relação de *Carman-Kozeny* na relação de α e normalizando a relação de IMF a condições padrão de referência, resulta que:

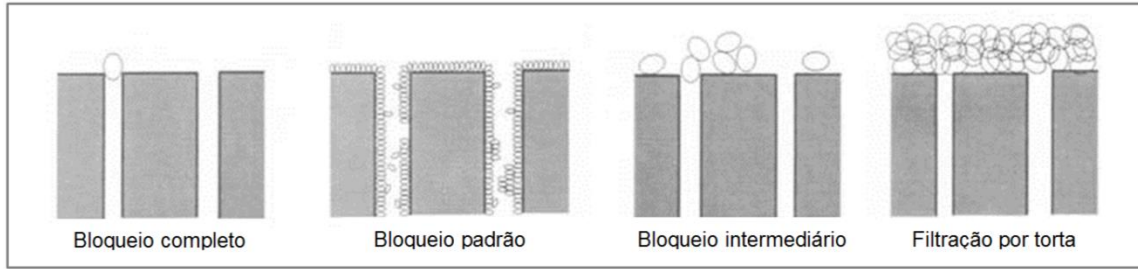
$$IMF = \frac{\eta_{20^\circ C} \cdot 90 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot C_b}{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot \varepsilon^3 \cdot \Delta P_0 \cdot A_0^2} . \quad (10)$$

Assim, o IMF resulta como uma função da dimensão e natureza das partículas formando a torta na membrana e diretamente correlacionada com a concentração de partículas no efluente.

Boerlage (2003) apresenta alguns resultados para o IMF avaliado para águas, encontrando valores da ordem de $1,8 \times 10^3$ até $1,64 \times 10^4$. Ognier (2002) apresenta resultados de IMF para amostras de suspensões centrifugadas de MBR e de uma solução de proteína (1 g/L), encontrando respectivamente valores de $2,76 \times 10^6$ e $2,40 \times 10^6$.

Ainda no trabalho de Owen *et al.* (1995), com base nos trabalhos de Hermia (1982) sobre a modelagem do bloqueio das membranas e o declínio do fluxo durante a microfiltração, são apresentados sob a forma de quatro mecanismos distintos, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5– Representação esquemática dos mecanismos de formação do *fouling*.



Fonte: adaptado de BOWEN *et al.* (1995)

Assumindo estas possibilidades de mecanismos de bloqueio durante a filtração, os autores descrevem que para todas as equações representativas de cada tipo de bloqueio, apresenta-se certo padrão característico, dado por:

$$\frac{d^2t}{dV^2} = \alpha \left(\frac{dt}{dV} \right)^\beta, \quad (11)$$

sendo que α e β variam de acordo com o tipo de bloqueio, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2– Coeficientes α e β para os diferentes tipos de bloqueio, segundo Bowen *et al.* (1995).

Tipo de bloqueio	α	β
Completo	$K_A \cdot u_0$	2
Padrão	$(2K_B / A_0^{1/2}) \cdot u_0^{1/2}$	3/2
Intermediário	K_A / A_0	1
Por Torta	$(R_r K_c / A_0^2) \cdot u_0^{-1}$	0

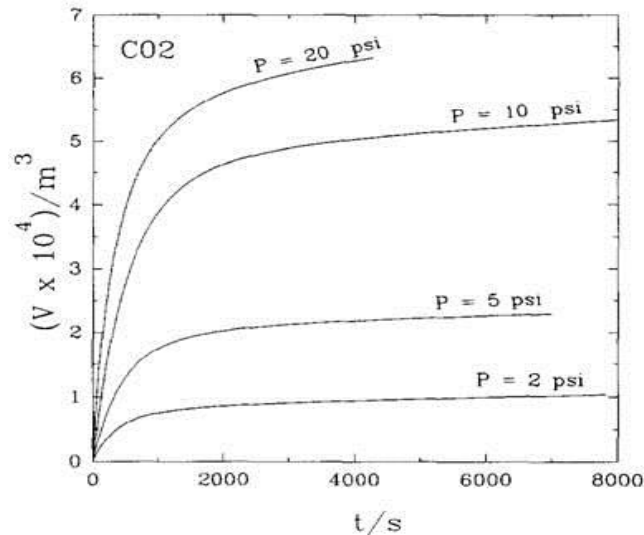
Na Tabela 2:

- K_A : superfície de membrana bloqueada, por unidade de volume total permeado;
- $u_0 = J_V(0)/A_0$: velocidade inicial média de permeado;
- A_0 : superfície porosa da membrana, ou área inicial da membrana;
- K_B : decréscimo na área da seção transversal dos poros da membrana por unidade total de volume permeado, devido a efeitos adsortivos no interior destes poros;
- $1/K_c$: volume total permeado por unidade de área da membrana, coincidente com a área total de deposição da torta;
- R_r : resistência inicial da membrana limpa, denominada resistência intrínseca.

Com base nesta teoria para os diferentes mecanismos de bloqueio, Bowen *et al.* (1995) realizam um procedimento experimental ideal, com uma membrana de microfiltração,

sujeita a uma solução de albumina bovina, o que permitiu encontrar o comportamento das relações entre o tempo de filtração, volume de permeado e variação de pressão, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6– Curvas tempo X Volume X Pressão transmembrana, obtidas por Bowen *et al.* (1995), a partir de uma solução ideal em uma membrana de microfiltração.

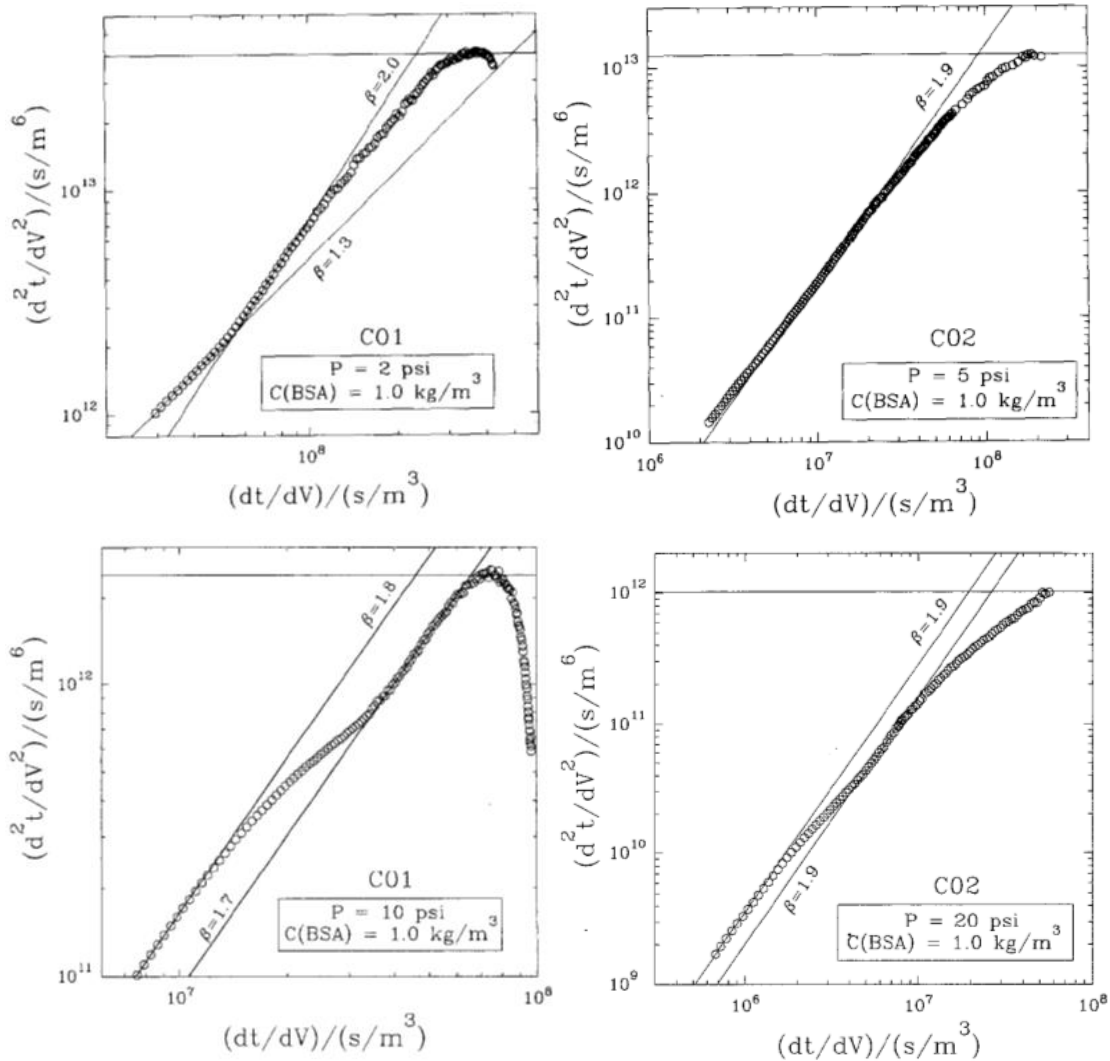


Fonte: Bowen *et al.* (1995)

Para esta situação de filtração com condições controladas, observa-se a variação do volume filtrado diretamente proporcional à pressão transmembrana aplicada, assim como um comportamento de curva de declínio deste volume filtrado também se comportando de forma regular através de uma função do tipo potência, característica destes sistemas de filtração.

Na busca da identificação do tipo de mecanismo de bloqueio presente, Bowen *et al.* (1995) aplicam as derivações de primeira e segunda ordens apresentadas na equação 14, para cada uma das pressões ensaiadas, conforme pode ser visto na Figura 7. Assim, analisando o comportamento gráfico da relação $(d^2t/dV^2) \times (dt/dV)$, foi possível observar o comportamento característico para cada mecanismo de bloqueio, de acordo com o comportamento dos valores de α e β , conforme apresentado na Tabela 2.

Figura 7 – Curvas $(d^2t/dV^2) \times (dt/dV)$, permitindo analisar as tendência de comportamento para β e α , inferindo-se o mecanismo de bloqueio preponderante (BOWEN *et al.*, 1995)



Ho e Sung (2009) discutem a aplicação da modelagem de Hermia, relatando que em algumas situações têm se encontrado valores de d^2t/dV^2 negativas, sem uma explicação concisa sobre o fato. Apresentam quatro equações distintas para representar cada um dos mecanismos de bloqueio possíveis, linearizadas a partir da aplicação de equações diferenciais sobre a equação 14, conforme descritas a seguir.

- Para bloqueio completo, ou seja, com $\beta=2$:

$$Q = Q_0 - k_b \cdot V \quad (12)$$

- Para bloqueio padrão, ou seja, com $\beta=3/2$:

$$\frac{t}{V} = \frac{k_s}{2} \cdot t + \frac{1}{Q_0} \quad (13)$$

- Para bloqueio intermediário, ou seja, com $\beta=1$:

$$\frac{1}{Q} = k_i \cdot t + \frac{1}{Q_0} \quad (14)$$

- Para filtração por torta, ou seja, com $\beta=0$:

$$\frac{t}{V} = \frac{k_c}{2} \cdot V + \frac{1}{Q_0} \quad (15)$$

onde:

Q: vazão no tempo t (L/h);

Q₀: vazão no tempo inicial (L/h);

V: volume permeado (L);

t: tempo de filtração (h);

k_b: coeficiente de bloqueio completo (s⁻¹);

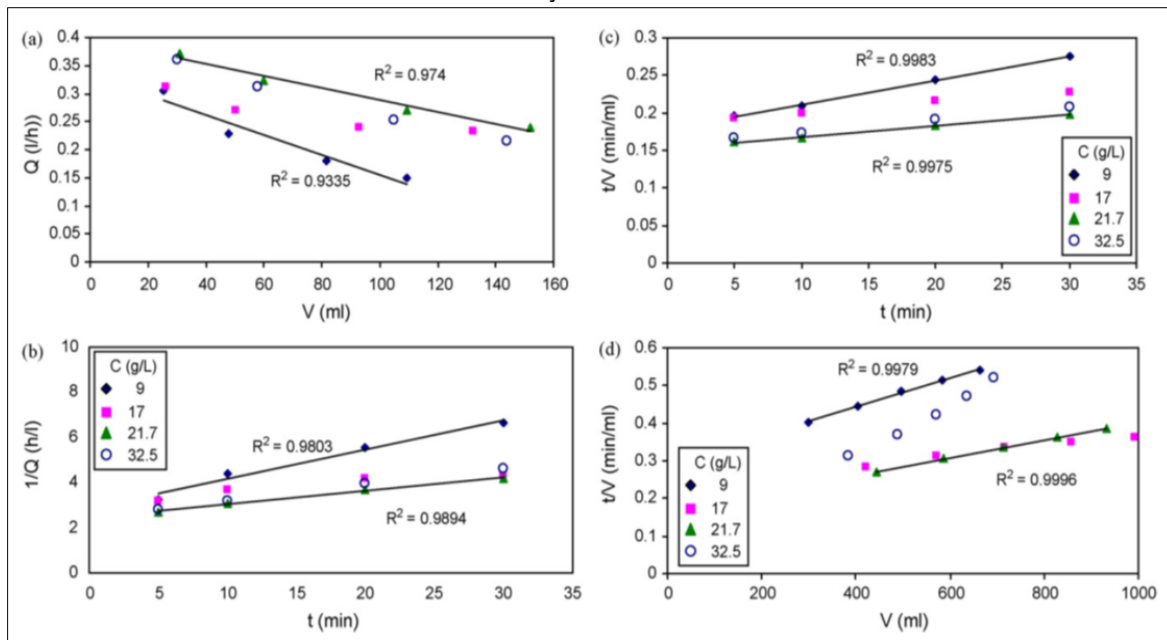
k_s: coeficiente de bloqueio padrão (m⁻³);

k_i: coeficiente de bloqueio intermediário (m⁻³); e

k_c: coeficiente de filtração por torta (s.m⁻².m⁻³).

A partir desta modelagem Ho e Sung (2009) realizaram experimento de filtração com membranas tubulares de microfiltração com área superficial de 0,015m². Nos ensaios foi utilizado lodo anaeróbio proveniente de um digestor anaeróbio tratando efluentes domésticos, posteriormente diluídos em concentrações de sólidos totais variando entre 2 a 36 g/L. A temperatura durante os ensaios foi controlada e mantida a 25°C e a pressão transmembrana em 6,2 kPa. Considerando cada uma das quatro possibilidades de mecanismos de bloqueio, apresentam os gráficos das equações de 15 a 18, conforme podem ser vistos na Figura 8.

Figura 8– Dados obtidos a partir dos resultados do declínio do fluxo ao longo do tempo para diferentes concentrações de biomassa.



(a) filtração com bloqueio completo, (b) filtração com bloqueio intermediário, (c) filtração com bloqueio padrão, e (d) filtração por torta (HO e SUNG, 2009)

A partir destes resultados, concluem que o mecanismo de bloqueio do tipo padrão é o preponderante nos momentos iniciais dos ensaios, e a filtração por torta prepondera posteriormente até o final. Estas conclusões advêm da análise do ajuste da curva a uma reta, ou seja, com o maior R^2 de cada tipo de mecanismo para intervalos de tempos distintos.

A partir destas análises, com os ensaios propostos, conforme descrito no capítulo a seguir, foi possível identificar além dos comportamentos da filtração para diferentes pressões e diferentes concentrações, também o tipo de mecanismo de bloqueio preponderante durante os ensaios.

Há ainda diversos trabalhos sobre o tema membranas, processos de filtração e MBR que foram avaliados como potenciais para serem utilizados de subsídio para as pesquisas, entretanto aqui se deteve aos que foram entendidos como fundamentais para a condução das atividades e posterior análise dos resultados. Percebe-se ainda que estudos deste tipo aqui propostos, com módulos de fibras ocas, submersas em biorreatores, e com efluentes reais, ainda existe necessidade de maiores estudos para a sua compreensão.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Com foco sobre os objetivos descritos e tomando por base a revisão teórica, foram realizados ensaios para avaliar as condições de filtração de três tipos de lodos distintos (mistura biomassa mais efluente dentro do reator), com diferentes concentrações de sólidos suspensos totais, e diferentes pressões transmembranas. Não foram identificados estudos prévios que propusessem este tipo de simulação e análise utilizando módulos com membranas do tipo fibras ocas, tampouco em condições operacionais de MBR.

Como parâmetros de controle e de análise, durante os ensaios foram monitorados: temperatura, viscosidade, massa específica, diâmetro de partícula e EPS. A inter-relação destes, com resultados do comportamento da queda de fluxo ao longo do tempo, permitem análises relativas aos mecanismos de bloqueio preponderante e suas principais causas. O tipo de bloqueio presente foi avaliado utilizando a metodologia de tratamento apresentado por Ho e Sung (2009), que advém dos estudos de Hermia (1982), também explorados por Bowen *et al.* (1995).

Nas seções seguintes são detalhadas as condições de ensaio e as metodologias aplicadas.

4.1 LODOS A SEREM FILTRADOS

Os ensaios foram realizados para três lodos distintos, originados em processos de lodos ativados tratando os seguintes efluentes:

- de refinaria de petróleo;
- lixiviado de aterro sanitário; e
- de origem hospitalar.

Convencionalmente adotou-se a seguinte nomenclatura para identificar cada um destes lodos durante o tratamento dos dados e análise dos resultados: E1-Petroquímico, E2-Lixiviado e E3-Hospitalar.

Estes três tipos de lodos foram ocasionalmente selecionados pela variabilidade entre si, com a expectativa de encontrar relações causa-efeito que sejam comuns entre eles, tendo em vista as condições similares de ensaio. Outro fator que corrobora com a decisão de se utilizarem estes lodos em particular, são as pesquisas ora já existentes e crescentes

no sentido de se utilizar os processos com membranas para o tratamento destes efluentes, com foco em: reduzir o espaço ocupado pelas estações de tratamento; buscar condições operacionais com a necessidade mínima de paradas para manutenção; propiciar a remoção seletiva de compostos tóxicos dos efluentes.

A seguir uma descrição da origem de cada um dos lodos e efluentes utilizados para os ensaios de filtração.

- E1–PETROQUÍMICO: o efluente utilizado foi disponibilizada pela PETROBRAS, provenientes da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) localizada no município de Araucária no estado do Paraná. Esta unidade processa petróleo para produção de subprodutos tais como: GLP, gasolina, óleo diesel, gás de cozinha, óleos combustíveis, querosene de aviação, nafta, asfaltos, dentre outros. Possui um sistema de tratamento de efluentes com lodos ativados. O efluente utilizado foi coletado na unidade denominada Tanque Dreineiro. Já o lodo foi coletado no reator aeróbio do processo de lodos ativados.
- E2–LIXIVIADO: o efluente bruto foi coletado no aterro sanitário São Giácomo, do município de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul. Já o lodo foi originalmente coletado de uma unidade de lodos ativados de uma indústria do setor de embalagens de papelão, sendo então aclimatada durante dois meses em laboratório antes de se procederem aos ensaios. Esta aclimação se deu com a manutenção constante da aeração e com a alimentação diária deste lodo com efluente de aterro sanitário.
- E3–HOSPITALAR: este efluente foi coletado em um complexo hospitalar localizado no município de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, que conta com uma unidade de tratamento de efluentes com lodos ativados. O lodo foi coletado no reator aeróbio deste processo.

No que se refere ao transporte e armazenamento destes efluentes, todos chegaram às condições de laboratório em menos de 24 horas, com suas amostras de lodo ativo sendo imediatamente postos em aeração e alimentação diária com o efluente bruto. O lodo era mantido em uma recipiente plástico de 100 litros com aeração constante e uma vez a cada dois dias esta aeração era interrompida por alguns minutos para promover a separação do biossólido por sedimentação, o sobrenadante era descartado e o volume total era completado com efluente bruto da mesma origem. Este efluente era armazenado em

condições refrigeradas para evitar a degradação da matéria orgânica, alimento para o lodo ativo destinado aos ensaios.

4.2 CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS TOTAIS CONTROLADAS EM CADA ENSAIO

Para cada lodo foram avaliadas diferentes concentrações de sólidos suspensos totais (SST):

- 8.000 mg/L;
- 17.000 mg/L; e
- 23.000 mg/L.

O objetivo de proceder a ensaios de filtração com estas concentrações é o de cobrir uma faixa de valores usualmente utilizadas.

Partindo das concentrações dos lodos mantidos em laboratório, estas concentrações eram obtidas para cada um dos efluentes em cada ensaio a ser encaminhado. Para tal, antes de cada ensaio eram realizadas análises de SST conferindo a concentração do lodo naquele momento. A partir desta medição inicial, se fazia ou a diluição ou a concentração do lodo para alcançar o valor necessário. Quando necessário proceder a diluição, foi utilizado efluente bruto da mesma origem, sendo que neste também era analisado SST, o que permitia uma diluição mais ajustada possível. Quando necessário a concentração, procedia-se uma pré-filtração até extrair permeado suficiente para garantir que a amostra estava na concentração necessária para o ensaio.

Durante os ensaios de filtração, a redução do volume da amostra devido à saída do percolado, era compensada com a inserção de efluente bruto da mesma origem, mantendo-se o volume inicial constante, garantindo-se assim uma concentração o mais constante possível durante o transcurso de todo o ensaio.

4.3 PRESSÕES TRANSMEMBRANAS CONTROLADAS EM CADA ENSAIO

Também como o objetivo de cobrir uma faixa operacional mais usual em termos de pressões transmembranas (PTM), para cada lodo e concentração foram avaliadas três pressões distintas:

- 180 mbar;
- 240 mbar; e
- 300 mbar.

O controle destas pressões durante os ensaios foi realizado com o uso de pressostatos na linha de entrada para as bombas peristálticas que faziam a filtração do lodo, promovendo a sucção do percolado pelas membranas. No subcapítulo 4.7 sobre os ensaios de filtração, é possível observar com maiores detalhes este sistema de controle operacional da pressão.

4.4 CONSTRUÇÃO DOS MÓDULOS DE MEMBRANAS

Para uma maior versatilidade quanto à utilização de diferentes áreas de membranas por módulo, bem como para uma maior adaptabilidade em termos de condução dos procedimentos experimentais, optou-se pela construção dos módulos. Assim, para os ensaios de filtração, foram construídos módulos de membranas com áreas de 0,01 m², adequados em dimensões tanto com o tamanho das estruturas para os ensaios em bancadas, quanto com as vazões médias esperados de percolação. As duas fotografias na Figura 9 apresentam a construção de um módulo de 0,01 m².

Figura 9 – Fotografias ilustrando parte do processo de construção dos módulos de membranas.



As membranas utilizadas foram do tipo fibras ocas produzidas pela PAM® Membranas. Conforme informações do fabricante, as membranas utilizadas possuem as seguintes especificações:

- Membranas na geometria cilíndrica, do tipo fibras ocas;
- Material das fibras ocas: poli(eterimida);

- Diâmetro externo das fibras: entre 0,9 e 1,0 mm;
- Fibras com camada seletiva externa;
- Tamanho médio dos poros na superfície externa das fibras: 0,4 μm
- Retenção de 99,99% dos micro-organismos e dos sólidos suspensos presentes no extrato a ser processado;
- A filtração ocorre do lado externo para o interno das fibras;
- O microfiltrado escoar pelo interior das fibras;
- Pressão máxima de operação: 0,5 bar;
- Temperatura máxima de operação: até 55,0 °C;
- pH: 2,0 a 13,0.

Foram construídos para estes ensaios um total de cinco módulos onde se procurou manter as mesmas condições e características construtivas: quantidade de fibras, altura do módulo, distribuição das fibras no módulo, quantidade e distribuição dos pontos de aeração. Mantidas as características construtivas de cada módulo, a densidade de empacotamento resultou em 247 m^2/m^3

4.5 CARACTERIZAÇÕES DOS LODOS E EFLUENTES

Para cada lodo submetido aos ensaios de filtração, procederam-se caracterizações com a medição de parâmetros físico-químicos e físicos. Estes parâmetros auxiliaram tanto para a comparação entre os diferentes ensaios, quanto para a parametrização de alguns dados em função destas características medidas. Como exemplo, cita-se a viscosidade utilizada para normalizar o fluxo de permeado ao longo dos experimentos, a 20 °C.

4.5.1 Parâmetros Físicos e Químicos

As análises destes parâmetros foram executadas de acordo com procedimentos padronizados, especialmente seguindo metodologias consolidadas descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2008). A Tabela 3 apresenta a lista de parâmetros que foram medidos para cada efluente e que serviram de base para as análises dos resultados.

Tabela 3 – Parâmetros analisados para cada um dos efluentes.

PARÂMETROS ANALISADOS	MÉTODO	FONTE
Nitrogênio Total Kjeldahl	Micro-Kjeldahl (titulometria)	APHA (2008)
Nitrogênio Amoniacal	Micro-Kjeldahl (titulometria)	
Nitrito	Cromatografia iônica	
Nitrato	Cromatografia iônica	
Demanda Química de Oxigênio	Refluxo fechado (titulometria)	
Sólidos Suspensos Voláteis	Método Gravimétrico (estufa à 105°C)	
Sólidos Suspensos Totais	Método Gravimétrico (estufa à 105°C)	
Alcalinidade total	Titulometria	
Sulfeto	Kit CHEMetrics	-

4.5.2 Viscosidade

Para as medições de viscosidades foi utilizado um viscosímetro rotativo, da marca *Brookfield*, modelo “DV-I +”, com o uso de seu aparato acessório para medição de ultra baixas viscosidades.

Ainda durante estes procedimentos de medição da viscosidade, em um período de falhas no equipamento do tipo rotativo, utilizou-se outro viscosímetro, do tipo *Hoeppler*. Esse se trata de um aparato para inferência da viscosidade a partir da relação de *Stokes*, onde se mede o tempo de queda de uma esfera através de um líquido em uma dada distância. Este equipamento, para as viscosidades na faixa do 1 cP (1 mPa·s), foi conferido e testado, alcançando-se resultados com erros na faixa de 4% a 8%, comparado com viscosidades padrão e com outras medidas realizadas em viscosímetros rotativos. As fotografias da Figura 10 mostram os equipamentos utilizados para as medições de viscosidade.

Figura 10 – Viscosímetros rotativo (esquerda) e de *Hoeppler* (direita), utilizados para as medições das viscosidades dos lodos e permeados.



As medições de viscosidade foram realizadas em triplicata com cada um dos lodos e permeados para as concentrações ensaiadas. Estes procedimentos foram realizados quando os ensaios de filtração estavam ocorrendo, retirando-se amostras de 10 a 30 mL, que posteriormente eram devolvidas ao sistema em ensaio de filtração.

4.5.3 Massa Específica

As medições de massa foram realizadas através de métodos gravimétricos, utilizando-se conjuntos de picnômetros, dois de 10 mL e três de 30 mL, o que permitiu realizar as análises com repetições. Além dos picnômetros e demais vidraria de apoio também se utilizou uma balança analítica eletrônica marca BEL, Mark M254-A1, com precisão de 0,0001 g. As fotografias da Figura 11 mostram os equipamentos utilizados.

Figura 11 – Conjunto de picnômetros (esquerda) e balança analítica (direita), utilizados para a medição das massas específicas dos lodos e permeados.



Para medição da massa específica utilizando a técnica da picnometria foram aplicados os procedimentos descritos no Apêndice C.

Estes procedimentos foram realizados para um conjunto de cinco picnômetros, sendo então adotada a média dos resultados como o valor de massa específica de cada lodo e permeado para cada concentração ensaiada.

4.5.4 Caracterização Física dos Biossólidos

Para a caracterização física dos biossólidos foi utilizado um equipamento analítico medidor de tamanho de partícula, da marca Horiba, chamado *Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950*. Este equipamento permite medir quantidades e diâmetros correspondentes, em uma faixa de 0,01 µm a 3 mm. O resultado gerado por este equipamento, tratado através de um programa computacional que o acompanha, apresenta a curva de variação granulométrica, de onde podem ser extraídos: o diâmetro mediano, o diâmetro médio e o desvio padrão. A fotografia da Figura 12 mostra o equipamento utilizado.

Figura 12 – Fotografia do equipamento utilizado para caracterização física dos biossólido, um analisador de tamanho de partícula por dispersão a laser, Horiba LA-950.



Para cada lodo foram extraídas amostras para serem caracterizadas fisicamente com este equipamento. Os resultados apresentam os percentuais presentes para diferentes faixas granulométricas, permitindo a determinação do diâmetro efetivo (d_{10}), coeficiente de uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c). Tipicamente estes três parâmetros são utilizados pela área de mecânica dos solos para caracterizar a extensão granulométrica presente num meio, classificando o comportamento de distribuição dos tamanhos das partículas como: contínuos, descontínuos, uniformes ou não uniformes (PINTO, 2006).

Os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c), convencionalmente são determinados a partir das seguintes equações:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (16)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \times d_{60}} \quad (17)$$

onde:

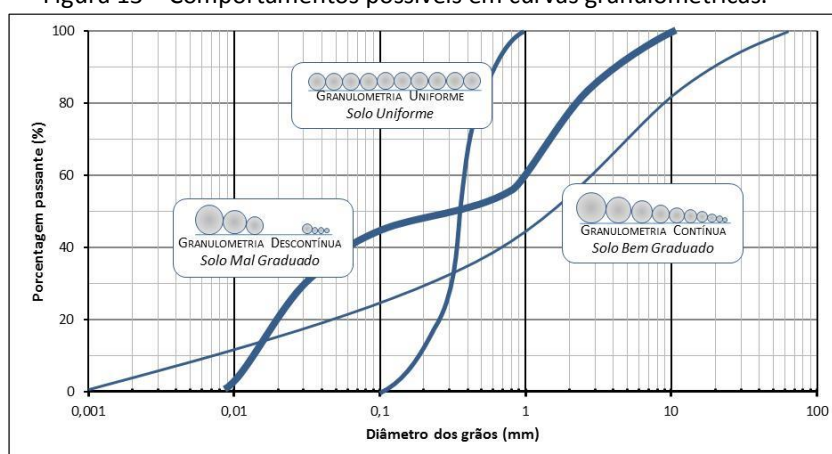
d_{10} : diâmetro correspondente ao ponto de 10% da curva granulométrica, indicando que somente 10% das partículas presentes possuem diâmetro menor do que este, ou seja, que 90% da amostra possui diâmetros maiores que este e, assim, é comumente denominado de “diâmetro efetivo” da amostra;

d_{30} : diâmetro correspondente ao ponto de 30% da curva granulométrica, indicando que somente 30% das partículas presentes possuem diâmetro menor do que este; e

d_{60} : diâmetro correspondente ao ponto de 60% da curva granulométrica, indicando que somente 60% das partículas presentes possuem diâmetro menor do que este.

A curva apresentada na Figura 13 tipicamente representa os tipos de comportamentos possíveis para curvas granulométricas.

Figura 13 – Comportamentos possíveis em curvas granulométricas.



Fonte: adaptado de Pinto (2006).

O Coeficiente de Uniformidade fornece um indicativo da distribuição do tamanho das partículas presentes na amostra. Para valores próximos de um, indicam curva granulométrica quase vertical, com os diâmetros variando em um intervalo pequeno; enquanto que para valores maiores a curva granulométrica irá se abatendo e aumentando o intervalo de variação dos diâmetros.

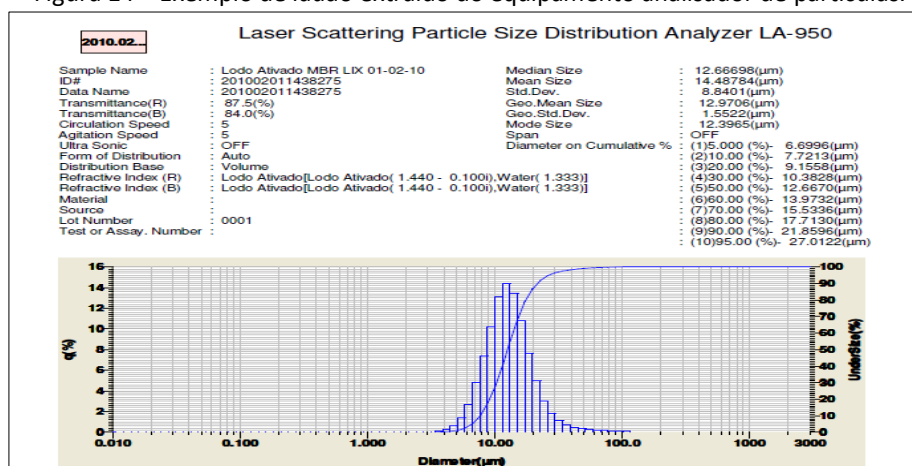
Para esta classificação os seguintes critérios usualmente são adotados:

- $C_u < 5$: amostra com partículas uniformes, ou seja, solo mal graduado;
- $5 < C_u < 15$: amostra com partículas medianamente uniformes; e
- $C_u > 15$: amostra com partículas não uniforme, ou seja, solo bem graduado.

O Coeficiente de Curvatura fornece uma medida da forma e da simetria da curva granulométrica. Para uma amostra bem graduada, o valor do coeficiente de curvatura, deverá estar entre 1 e 3. Quando C_c é menor que 1, a curva tende a ser descontínua, indicando a provável falta de grãos com certo diâmetro. Quando C_c é maior que 3, a curva tende a ser muito uniforme na sua parte central. Já quando C_c está entre 1 e 3, com a curva granulométrica se desenvolvendo suavemente, indica que a distribuição do tamanho de partículas é proporcional, de forma que os espaços deixados pelas partículas maiores sejam ocupados pelas menores (CAPUTO, 1988). Se o coeficiente de uniformidade indica a amplitude dos tamanhos de grãos, o coeficiente de curvatura detecta melhor o formato da curva granulométrica e permite identificar eventuais descontinuidades ou concentração muito elevada de grãos mais grossos no conjunto.

Tipicamente, a Figura 14 apresenta o resultado gráfico e o relatório de dados gerados pelo equipamento analisador de partícula. A partir deste relatório foram extraídos os dados referentes ao diâmetro mediano, o diâmetro efetivo, e os diâmetros correspondentes aos pontos 10%, 30% e 60% da distribuição granulométrica, utilizados nos cálculos dos coeficientes de Uniformidade e de Curvatura.

Figura 14 – Exemplo de laudo extraído do equipamento analisador de partículas.



Para cada concentração, as análises com o equipamento *Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950* da Horiba, foram feitas em triplicata, adotando-se o resultado médio entre elas como válido.

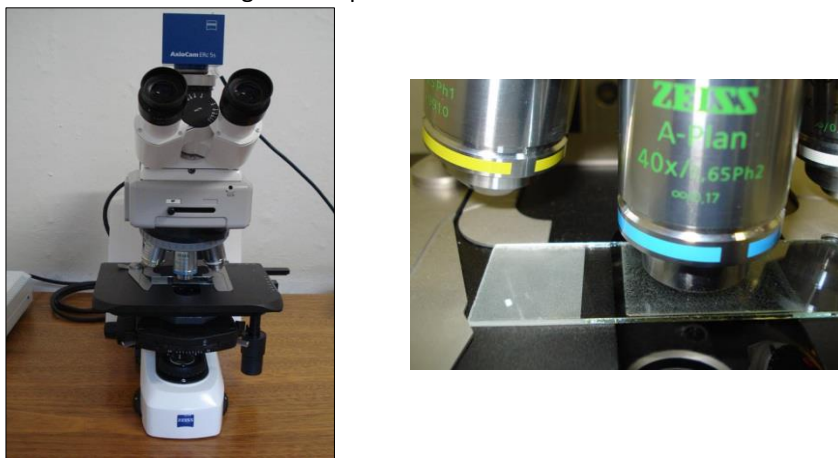
Nesta linha, comparativamente com as típicas análises feitas para solos, determinaram-se o comportamento do Coeficiente de Uniformidade e o de Curvatura para os biossólidos das amostras de cada um dos lodos. Com isso, buscou-se uma análise e indicativo de condições favoráveis ou desfavoráveis à colmatção de sólidos junto à superfície da

membrana. Assim, além de identificar os diâmetros médio e mediano das partículas presentes, levantou-se a hipótese de que em condições de amostras com a presença de sólidos com granulometria mais uniforme e bem graduada haveria uma situação mais favorável para a manutenção do fluxo.

4.5.5 Avaliação de Micro-organismos

A visualização dos micro-organismos presentes no meio foi feita para cada lodo utilizando um microscópio binocular da marca Carl Zeiss, modelo Scope A1 Axiolab, com lentes oculares de aumento 10x e com as seguintes lentes objetivas: 10x (0,25CP-ACHROMAT), 20x (0,45A-PLAN), 40x (0,65 ACHROPLAN) e 100x (1,25Oil Ph3). O equipamento é acoplado a um computador através do acessório Axio Cam ERc 5s, permitindo a captura de fotografias e vídeos dos micro-organismos. As fotografias da Figura 15 mostram o equipamento utilizado.

Figura 15 – Fotografias mostrando uma vista geral e um detalhe do microscópio utilizado para a visualização dos biossólidos e micro-organismos presentes em cada amostra de lodo ensaiado.



Foram realizadas visualizações de amostras de cada lodo ensaiado. Estas visualizações permitiram avaliar o surgimento de formações que pudessem ser adversas para as operações de filtração.

4.5.6 Substâncias Poliméricas Extracelulares - EPS

Para cada concentração ensaiada, foram extraídas amostras para análises das frações de EPS presentes.

Em síntese, os métodos aplicados para as análises de EPS, foram os seguintes:

1. Extração das EPS – centrifugação e agitação com resina catiônica adaptado de Frolund *et al.* (1996);
2. Proteínas e ácidos húmicos – Lowry *et al.* (1951) modificado por Frolund *et al.* (1995) seguindo recomendações de Pomory (2008);
Carboidratos – Dubois *et al.* (1956).

Estas metodologias bem como suas adaptações estão descritas por Lovatel (2011). Especificamente com relação à fase de extração que se dá com a centrifugação, a mesma era realizada duas vezes. Na primeira, com rotação e tempos padronizados, servia para a extração da fração solúvel, EPS_s, considerada como sendo o sobrenadante resultante deste processo. Após esta extração, o restante da amostra era ressuspensionado, em condições padronizadas, e novamente levado à centrifugação. Desta segunda fase de centrifugação o sobrenadante extraído servia para a caracterização da fração fracamente ligada, EPS_{fr}, e a parcela restante centrifugada representava a fração fortemente ligada, EPS_{fo}.

Para cada lodo e concentração de SST ensaiada foram coletadas amostras em triplicata para a análise de EPS, sendo encaminhadas para a determinação das concentrações de proteínas, ácidos húmicos e carboidratos para cada uma das frações de EPS: solúvel (EPS_s), fraco (EPS_{fr}) e fortemente ligado (EPS_{fo}). O total de EPS nas amostras foi considerado como a soma das concentrações destes ácidos húmicos, proteínas e carboidratos nos extratos de EPS_s, EPS_{fr} e EPS_{fo}.

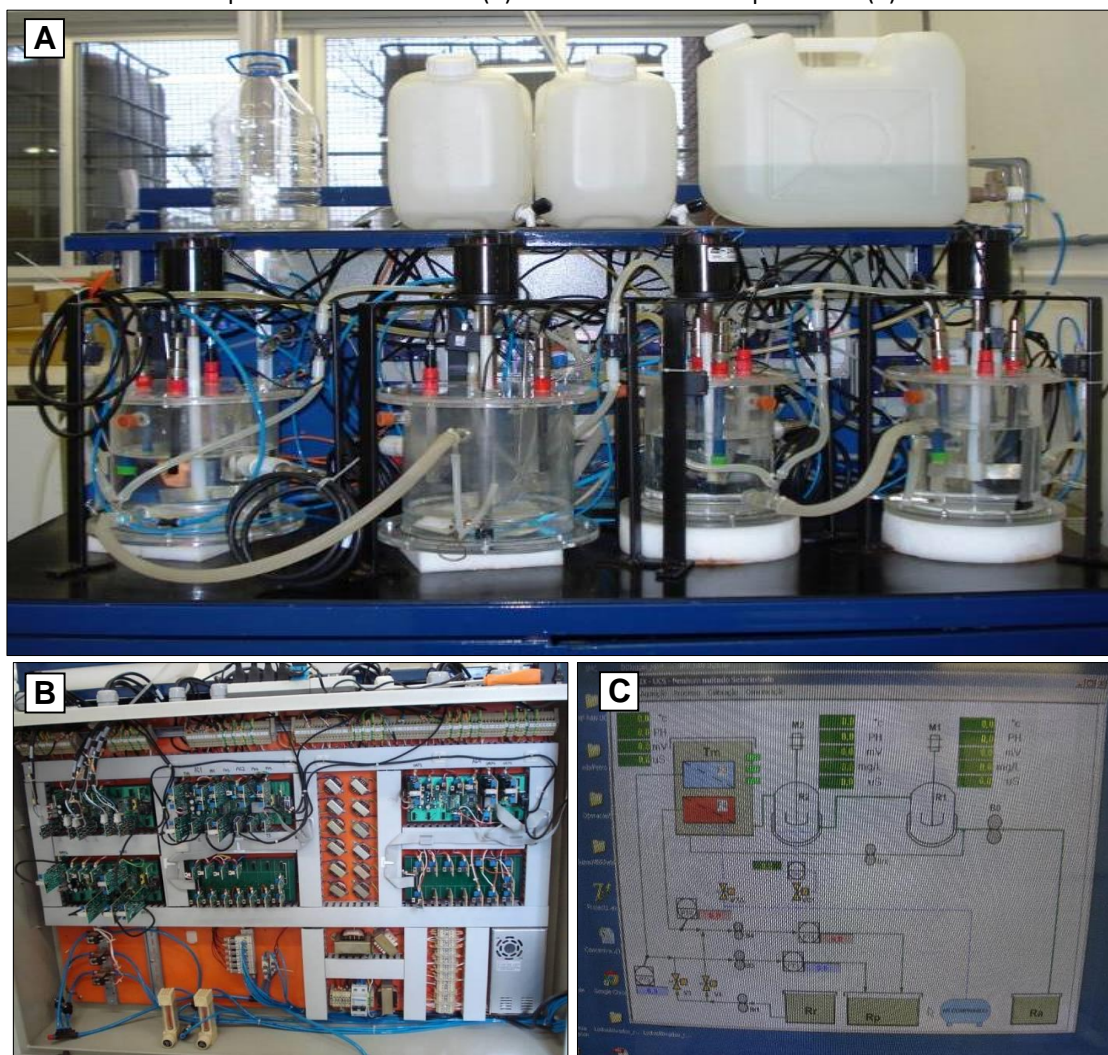
4.6 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO – PROCEDIMENTOS

Para os ensaios de filtração foi utilizado um módulo de bancada desenvolvido na Universidade de Caxias do Sul – UCS, identificado como uma Unidade Experimental para Tratamento de Águas Residuárias (UETAR). A UETAR alocada no Laboratório de Tecnologia Ambiental (LATAM) na sala 101, Bloco V do Campus Central da Universidade de Caxias do Sul (UCS) foi concebida, instalada e aprimorada em ação conjunta dos pesquisadores do

LATAM e dos técnicos da Trendtech Tecnologia Biomédica Ltda. com recursos provenientes de convênio técnico-científico firmado entre a UCS e a PETROBRAS (LOVATEL, 2011).

A UETAR pode operar com até cinco unidades de reatores, instalados em série e ou em paralelo, permitindo configurações diversas, e com atuação e controle sobre parâmetros específicos tais como: vazão, pressão, temperatura, agitação, aeração, pH, dentre outros. Estes sistemas são monitorados e controlados por um sistema supervisorio, que permite a gravação contínua e seletiva de dados. Para tal atuação, há um sistema controlador, através de um painel eletroeletrônico, que faz a transdução e transmissão destes dados para um computador. As fotografias da Figura 16 mostram uma visão geral da bancada, o painel eletroeletrônico e uma vista da tela do sistema supervisorio computadorizado.

Figura 16 – Fotografias mostrando a UETAR utilizada para os ensaios de filtração, com sua vista geral (A), painel eletroeletrônico (B) e a tela do sistema supervisorio computadorizado (C).



Para os ensaios desenvolvidos para este trabalho, foi utilizado somente um dos reatores da unidade de bancada, bem como uma das bombas peristálticas, seguida de

controle de vazão e pressão. Para submeter os módulos de membranas à filtração dos efluentes, a pressão foi mantida constante e se efetuava a leitura das vazões a cada instante de 30 segundos. O desenho na Figura 17 demonstra o esquema utilizado para estes experimentos de filtração e a fotografia da Figura 18 mostra o reator montado junto a UETAR para a realização de um dos ensaios.

Figura 17 – Ilustração com o esquema do aparato aplicado para os ensaios de filtração.

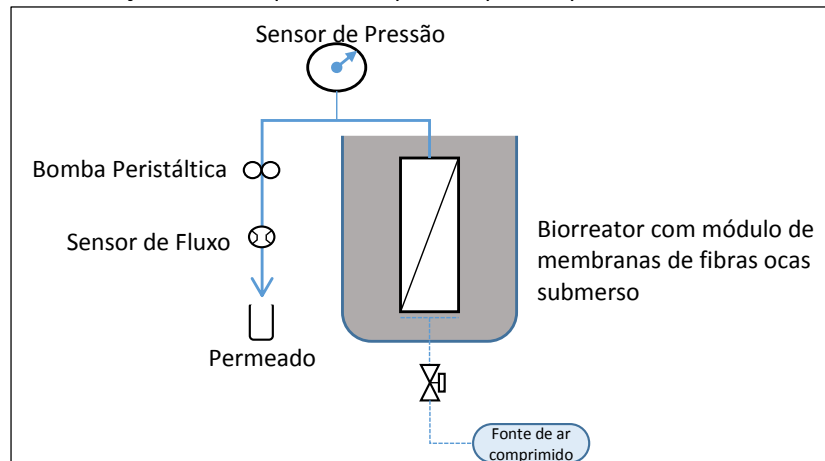
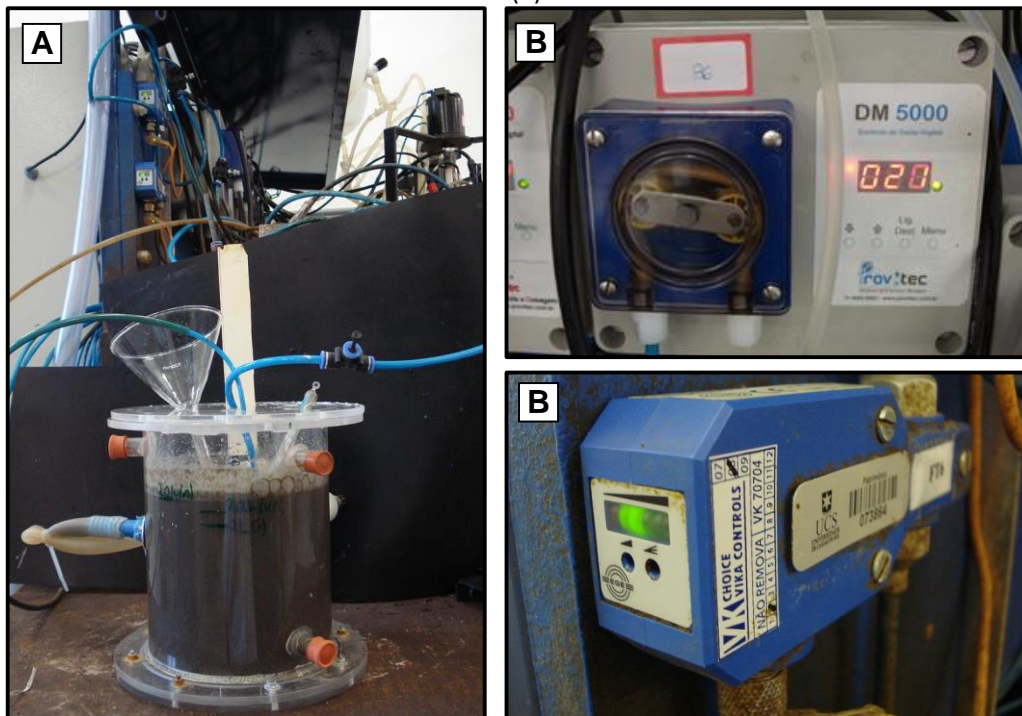


Figura 18 – Fotografias mostrando o reator montado junto a UETAR durante um dos ensaios de filtração, com uma vista geral (A) e um detalhe da bomba peristáltica utilizada para a filtração (B) e do medidor de vazão (C).



Para a realização de cada ensaio, as membranas eram submersas no reator com o lodo já com a concentração ajustada para cada ensaio. A pressão era estabelecida como constante no sistema supervisor e era então acionada a bomba peristáltica (marca

Provitec, modelo DM 5000) que promovia a sucção do permeado através das membranas. A pressão, monitorada pelo pressostato que, na medida em que efetuava uma leitura acima da pressão estabelecida, indicava para o sistema reduzir a rotação da bomba peristáltica, bem como na medida em que fazia a leitura de uma pressão abaixo da estabelecida, enviava o comando para aumentar a rotação da bomba. Assim, durante todo o percurso dos ensaios, estabelecidos em 4 horas, o sistema ficava controlando e atuando sobre a filtração, a fim de manter a pressão constante e gravando os valores de tempo e vazão, em intervalos sucessivos de 30 segundos. A vazão era medida pelo controlador de fluxo mostrado na fotografia da Figura 18, da marca EGE, modelo SDN 503 GA.

O tempo de ensaio estabelecido em 4 horas foi definido a partir de pré-ensaios onde se observou que a partir de tempos de 2 a 3 horas o decaimento das curvas de fluxo eram bem menores, gerando uma tendência de estabilização destes valores de fluxo.

O nível do reator com membranas era mantido constante através da reposição de efluente bruto. Esta reposição se dava com efluente bruto da mesma origem do lodo que estava sendo ensaiado, para garantir a menor interferência possível na composição do mesmo e ou alteração da concentração de cada ensaio. Apesar do relativo tempo curto de ensaio, esta condição de reinserção do efluente bruto também contribuía para manter estável as condições microbiológicas do sistema em filtração, evitando condições de estresse ao meio que pudessem interferir na filtração.

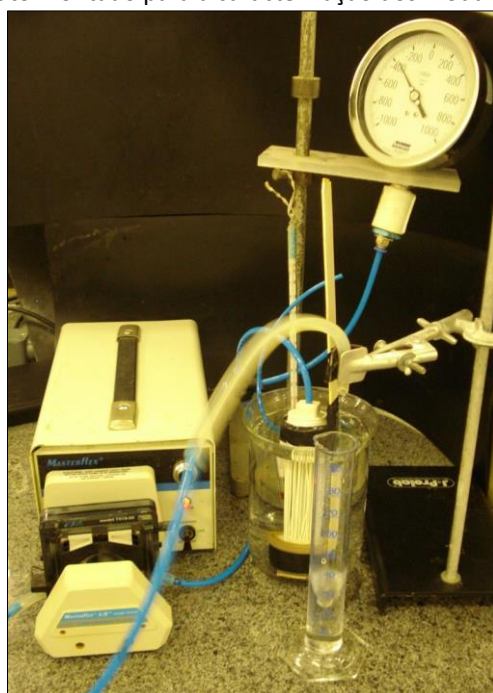
Na medida em que ocorre o surgimento dos fenômenos de bloqueio, há uma tendência de queda do valor do fluxo e aumento da resistência. Ainda no intuito de expor esta filtração às condições mais próximas de uma operação de um sistema em escala real e também padronizar os ensaios, promoveu-se o borbulhamento de ar no meio, como elemento promotor de turbulência, retardando o início das ocorrências dos mecanismos de bloqueio junto às membranas. Ao longo de todos os ensaios, a vazão de ar foi mantida fixa, em 450 L/h. Esta vazão foi previamente definida em ensaios com água limpa e analisando visualmente o comportamento da distribuição e tamanho de bolhas que os módulos construídos permitiam obter. Adotou-se este valor considerando que nesta configuração do reator, decorria uma boa condição de promoção de turbulência, distribuição e tamanho das bolhas.

4.6.1 Procedimentos Pré e Pós-Ensaio de Filtração

Uma das informações importantes para se parametrizar os resultados no que se refere ao comportamento do fluxo, é a determinação da resistência intrínseca da membrana. Esta resistência corresponde àquela em que a membrana se mantém em operação sem a sujeição de quaisquer efeitos ou fenômenos de colmatação. Nesta situação diz-se que a permeabilidade da membrana é plena. Este valor de permeabilidade, no tratamento dos dados da filtração, foi considerado como o primeiro valor de fluxo, no tempo zero, subentendendo-se que, em um momento muito próximo de zero, o fluxo do efluente com a presença de sólidos ainda não teria decorrido em efeitos sobre a membrana.

Assim, antes de cada ensaio os módulos eram submetidos a ensaios de permeabilidade, permitindo calcular o valor da resistência intrínseca das membranas. Para estes procedimentos foi montado um aparato com uma configuração muito similar ao já apresentado na Figura 17, porém sem o sistema de aeração e sem o sensor de fluxo. A fotografia da Figura 19 mostra o aparato montado para as caracterizações.

Figura 19 – Aparato montado para a caracterização dos módulos de membranas.



As seguintes etapas eram realizadas para a determinação da permeabilidade das membranas:

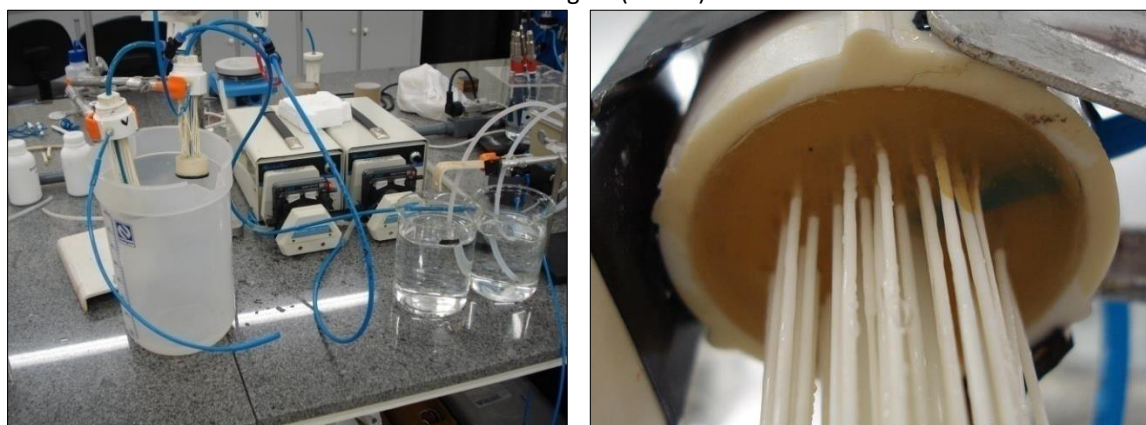
- a) Conexão do módulo de membranas em série com um manovacuômetro e bomba peristáltica, estando as membranas submersas em água destilada;
- b) acionamento da bomba em sucção, elevando-se gradualmente a potência aplicada, resultando em incrementos de 50 mbar a cada cinco minutos até que fosse atingida e mantida sucção em 450 mbar constantes por trinta minutos, com o volume de submersão do módulo sendo mantido constante com a reposição da água destilada, na medida em que ocorria a redução desta devido ao fluxo de permeado;
- c) com uma proveta graduada eram feitas tomadas sucessivas do volume permeado em tempos constantes, até que os valores se repetissem em três tomadas consecutivas, indicando estabilidade de vazões, quando então valores de pressão, volume, tempo e temperatura do permeado eram anotados;
- d) redução da potência aplicada até estabilização em um patamar 50 mbar de pressão de sucção inferior ao da tomada anterior, seguido daí de novas tomadas sucessivas de volume permeado em tempos cronometrados até repetição de três valores de vazões consecutivas anotando-se pressão, volume, tempo e temperatura;
- e) os incrementos de redução de pressão de sucção se repetiam até que a pressão aplicada não resultasse mais em vazão de permeado;
- f) com os valores de volume, tempo e temperatura de cada ponto e, com o auxílio de uma planilha eletrônica, calcula-se o fluxo normalizado a 20°C (J_{20}) e elabora-se um gráfico $J_{20} \times PTM$, com origem no ponto (0,0), cujo coeficiente angular para a faixa de tendência linear corresponde à permeabilidade do módulo com água limpa;
- g) sempre que o número de pontos na faixa linear era inferior a 80% do total de pontos em um ensaio, o mesmo foi repetido, considerando que teria ocorrido alguma instabilidade que impedia que o fluxo fosse diretamente proporcional à pressão aplicada.

Após cada ensaio com os lodos, as membranas retiradas dos recipientes e submetidas a uma limpeza antes de serem caracterizadas novamente, ou seja, antes da repetição dos procedimentos para determinação da permeabilidade. Primeiramente era feita uma lavagem manual com o uso de jatos de água propelidos por pissetas. Após, os módulos eram submetidos à limpeza química e retrolavagem, de acordo com os seguintes procedimentos:

- a) submersão do módulo em solução aquosa de hipoclorito de sódio com concentração inicial de 200 ppm de cloro livre por duas horas;
- b) retirada do módulo da solução de hipoclorito e descarte dessa solução;
- c) conexão do módulo em série com um manovacuômetro e bomba peristáltica e posicionamento desse módulo acima de um recipiente de volume útil suficiente para receber a solução de retrolavagem;
- d) promoção de retrolavagem por trinta minutos a pressões entre 400 mbar e 500 mbar com nova solução de hipoclorito de sódio a 200 ppm de cloro livre;
- e) findo esse tempo, a retrolavagem foi mantida na mesma faixa de pressão por sessenta minutos com água destilada.

As fotografias apresentadas na Figura 20 mostram o aparato montado para a condução da limpeza química e retrolavagem. O esquema do aparato é bastante similar ao já demonstrando na Figura 17, mas sem o fornecimento de ar comprimido, sem o medidor de vazão, e com a bomba peristáltica agora sendo acionada em sentido contrário para fazer com que o fluxo ocorra da parte interna para a parte externa das membranas, conforme também pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Fotografias dos procedimentos de limpeza química e retrolavagem dos módulos de membranas, mostrando de forma geral o aparato montado (esquerda) e um detalhe das membranas em processo de retrolavagem (direita).



Ainda cabe salientar que entre cada procedimento de retrolavagem e a caracterização, bem como entre cada caracterização e os ensaios de filtração, submetiam-se os módulos de membranas a testes de estanqueidade. Estes testes eram realizados submergindo-se os módulos em água limpa e exercendo-se uma pressão positiva através das membranas.

Assim, o eventual borbulhamento indica uma falha do módulo que deve ser sanada antes de submeter-se aos ensaios de filtração. Estas falhas podem estar localizadas nas conexões e vedações do sistema montado, bem como pode também ser originada pelo rompimento de uma ou mais unidades de feixe de membranas que compunham o módulo. Detectadas estas eventuais falhas, procedia-se a vedação com o uso de resinas adesivas do tipo epoxídicas.

4.6.2 Tratamento e Análise dos Dados das Filtrações

Os dados coletados a partir dos ensaios de filtração foram tabulados em uma planilha eletrônica, *Excel*[®] versão 2007 da *Microsoft*[®]. Cada informação foi organizada em colunas, com os dados dispostos em linha. Com este recurso foram elaborados gráficos destes resultados brutos, a partir dos quais foi possível analisar pontos com tendências distorcidas (*out layers*) das curvas, representativos de possíveis falhas na coleta de dados. Estes dados foram desconsiderados para elaboração dos gráficos finais. Esta supressão seletiva de dados teve como premissa o fato de que o comportamento esperado para este tipo de pressão se dá através de uma equação do tipo potência. Claramente percebiam-se dados ou agrupamentos de dados que se desviavam desta tendência, provavelmente correspondentes a alguma falha durante o processo de aquisição dos dados e ou dos procedimentos de ensaio.

Após esta fase, ajustou-se a curva vazão versus tempo a uma equação potencial do tipo: $y = a \cdot x^b$. Esta curva ajustada foi considerada como sendo representativa do fenômeno observado e, a partir dela, derivam-se todos os demais cálculos dos parâmetros de filtração em membranas, como o valor do fluxo de permeado e o valor da resistência ao processo de filtração, o comportamento do Índice Modificado de Fouling – IMF e a identificação dos mecanismos de bloqueio.

Ao todo, considerando todos os lodos submetidos à filtração, para cada uma das três pressões e para cada uma das três concentrações, foram coletados cerca de 13.000 dados. Contabilizando-se também os ensaios de caracterização, estes totais atingem valores da ordem de cerca de 16.000 dados brutos coletados.

4.6.2.1. Análises dos fluxos de permeados e das resistências totais

Considerando os três diferentes tipos de lodos, as três diferentes concentrações de SST, obtidas conforme descrito no capítulo 4.2, e as três pressões transmembranas (PTM), os resultados dos ensaios contemplaram as possibilidades de cruzamentos apresentadas nas tabelas a seguir. Nestas tabelas, na forma de uma matriz, cada cruzamento entre um elemento de linha e outro de coluna representa a geração de um gráfico com três curvas cujos comportamentos foram analisados.

A partir do Tabela 4, tem-se que para cada lodo serão gerados três cruzamentos e análises para a variação de pressões em diferentes concentrações. Assim, será apresentado no resultado um total de nove gráficos para expressar estas inter-relações.

Tabela 4 – Cruzamentos dos dados: Concentrações X Efluentes

CONCENTRAÇÕES X EFLUENTES	C1	C2	C3
	8.000 mg/L	17.000 mg/L	23.000 mg/L
E1-PETROQUÍMICO	P1-P2-P3	P1-P2-P3	P1-P2-P3
E2-LIXIVIADO	P1-P2-P3	P1-P2-P3	P1-P2-P3
E3-HOSPITALAR	P1-P2-P3	P1-P2-P3	P1-P2-P3

Considerando: P1=180 mbar, P2=240 mbar e P3=300 mbar.

Na mesma linha de raciocínio, a partir do Tabela 5 tem-se que para cada lodo, serão gerados três cruzamentos e análises para a variação de concentrações em diferentes pressões. Assim, serão apresentados mais nove gráficos para expressar estas inter-relações.

Tabela 5 – Cruzamentos dos dados: Pressões X Efluentes

PRESSÕES X EFLUENTES	P1	P2	P3
	180 mbar	240 mbar	300 mbar
E1-PETROQUÍMICO	C1-C2-C3	C1-C2-C3	C1-C2-C3
E2-LIXIVIADO	C1-C2-C3	C1-C2-C3	C1-C2-C3
E3-HOSPITALAR	C1-C2-C3	C1-C2-C3	C1-C2-C3

Considerando: C1= 8.000 mg/L, C2=17.000 mg/L e C3= 23.000mg/L.

Destas possibilidades totais de cruzamentos foi possível avaliar ao longo do tempo o comportamento da filtração em termos de volume, de vazão e de fluxo de permeado; tanto para uma mesma concentração e para diferentes pressões, quanto para uma mesma pressão e diferentes concentrações de biomassa.

Além destes cruzamentos e análises, ainda foi possível para cada uma das concentrações e para cada uma das pressões de ensaios, cruzar e analisar o

comportamento resultante para cada um dos lodos. A Tabela 6 apresenta estas possibilidades de cruzamentos.

Tabela 6 – Cruzamentos dos dados: Pressões X Concentrações

CONCENTRAÇÕES X PRESSÕES	C1 8.000 mg/L	C2 17.000 mg/L	C3 23.000 mg/L
P1 – 180 mbar	E1-E2-E3	E1-E2-E3	E1-E2-E3
P2 – 240 mbar	E1-E2-E3	E1-E2-E3	E1-E2-E3
P3 – 300 mbar	E1-E2-E3	E1-E2-E3	E1-E2-E3

Considerando: E1 = E1-Petroquímico; E2 = E2-Lixiviado; e E3 = E3-Hospitalar.

A partir desta tabela, verifica-se que com o cruzamento tanto para uma pressão fixa, quanto para uma concentração fixa, foi possível analisar o comportamento diferencial para cada um dos três tipos de lodos ensaiados. Os gráficos gerados para estas análises contemplaram ao longo do tempo total de ensaio de 240 min, a queda do fluxo de permeado normalizado, J_{20} , dado pela Equação 2, além do aumento da resistência total, R_t , dada pela Equação 3.

Para cada ensaio eram coletados mais de 700 dados ao longo do tempo total de quatro horas. Assim, ainda optou-se por apresentar um extrato dos dados em intervalos de tempo desde o tempo inicial (0 min) até o tempo final (240 min). Neste extrato são apresentados os resultados de J_{20} e R_t , bem como o incremento percentual entre os intervalos, ou seja, entre um tempo definido e o imediatamente anterior. Assim foi possível analisar os incrementos de queda do J_{20} e os de aumento da R_t entre cada intervalo de tempo.

Especificamente com relação à análise das resistências, pode-se afirmar que o valor da R_t no tempo inicial corresponde muito proximamente ao valor da resistência intrínseca da membrana (R_m), conforme Equação 3. Assim, ao se analisar a diferença entre o valor da resistência no tempo final (240 min) e no tempo inicial, resulta a contribuição efetiva dos mecanismos de bloqueio na formação da R_t . Assim, efetuaram-se os cálculos referentes a esta diferença percentual entre os tempos final e inicial, permitindo a análise da contribuição dos mecanismos de bloqueio como fator de formação da R_t , e como se dá a correlação destes com as PTM e com as concentrações de SST. Estes resultados denominados de incremento percentual da R_t final sobre a R_t inicial foram apresentados para cada um dos lodos ensaiados, seguidos da análise de suas médias e desvios padrão, bem como do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson.

O coeficiente de correlação de Pearson trata-se de um método de análise estatística que indica o grau de correlação entre dados de duas séries de dados, a partir da análise dos seus resultados de média, desvio padrão e covariância. O seu resultado pode variar de -1 a +1. O resultado do coeficiente de Pearson igual à unidade, indica uma correlação ótima, sendo que -1 indica que esta é uma correlação do tipo inversamente proporcional e +1 indica que é diretamente proporcional. Resultados entre -0,3 e +0,3 indicam uma correlação fraca, entre 0,3 e 0,7, positivo ou negativo, indicam uma correlação moderada; e entre 0,7 e 1, positivo ou negativo, indicam uma correlação forte. Esta correlação de Pearson também foi utilizada para analisar os resultados referentes ao IMF.

4.6.2.2. Análises dos IMF

Ainda com os dados coletados foi possível analisar o comportamento do IMF (Índice Modificado de Fouling) para cada ensaio realizado. O procedimento foi conduzido com a plotagem do gráfico tv^{-1} versus V , de onde, a partir da região linear se fez um ajuste de curva para extrair o coeficiente angular, representativo do valor do IMF, conforme expresso pela equação 5.

Ainda se analisou o comportamento estatístico comparativo dentre os diferentes ensaios para cada um dos efluentes, através da análise do coeficiente de Pearson, que permite inferir uma fraca, moderada ou forte correlação direta ou inversamente proporcional entre os dados de uma amostra.

4.6.2.3. Análises dos mecanismos de bloqueio

Além dos cruzamentos dos dados referentes ao J_{20} e à R_t , que já permitiram uma análise do comportamento da filtração sob as diferentes condições ensaiadas, também foi analisado o tipo de mecanismo de bloqueio preponderante através da metodologia proposta por Ho e Sung (2009) que advém da teoria de Hermia para caracterizar estes mecanismos. Estas análises foram realizadas na expectativa de avaliar qual o tipo de mecanismo preponderante durante o ensaio, e durante certos intervalos do ensaio, bem como também avaliando se houve e quando houve alterações destes mecanismos durante o tempo de ensaio.

Os dados foram tratados para serem plotados os gráficos das funções linearizadas, conforme equações de 12 a 15, associando-se a identificação de cada um dos mecanismos de bloqueio conforme indicado na Tabela 2 e na Figura 5. Considerando o tempo total dos ensaios em 240 min, plotaram-se os pontos correspondentes a cada uma destas equações, em intervalos de 30 minutos. Assim, para cada um dos lodos submetidos à filtração, para cada concentração de SST e para cada PTM, foram elaborados quatro gráficos, correspondentes à identificação dos seus respectivos mecanismos de bloqueio:

- Completo: $Q \text{ (L/h)} \times V \text{ (mL)}$
- Intermediário: $Q^{-1} \text{ (h/L)} \times t \text{ (min)}$
- Padrão: $t/V \text{ (min/mL)} \times t \text{ (min)}$
- Por torta: $t/V \text{ (min/mL)} \times V \text{ (mL)}$

Para identificação destes mecanismos de bloqueio, sobre estes gráficos, foram ajustadas curvas do tipo linear, extraindo-se os correspondente fatores de correlação R^2 . Quanto mais próximo de 1 este coeficiente, indica que o mecanismo correspondente à curva que foi ajustada é o mais preponderante.

Para o tempo total de ensaio (240 min) se fez estas análises em intervalos específicos: 0-30, 30-60, 60-120, 120-180 e 180-240. Os dois primeiros intervalos consideraram uma distância de 30 minutos um do outro, pois nesta primeira hora inicial verificam-se as maiores influências da ação destes mecanismos para o incremento da R_t .

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para organizar a apresentação dos resultados, primeiramente apresentam-se as caracterizações dos efluentes ensaiados, massas específicas e viscosidades, características físicas dimensionais, EPS e microscopia. Posteriormente são apresentados os resultados dos ensaios de filtração, considerando as possibilidades de cruzamentos para cada um dos lodos separadamente, analisando o comportamento da filtração pressões transmembrana (PTM) fixas e com a variação das concentrações de SST, bem como analisando o comportamento da filtração para concentrações de SST fixas versus as distintas PTM.

Em sequência, apresenta-se o cruzamento dos resultados dos ensaios de filtração entre os diferentes lodos ensaiados, analisando o comportamento tanto das concentrações de SST, quanto das PTM. Por fim, segue-se com a análise do Índice Modificado de Fouling – IMF e da identificação dos mecanismos de bloqueio preponderantes.

5.1 CARACTERIZAÇÕES DOS EFLUENTES

A Tabela 7 apresenta os resultados das análises realizadas para caracterizar cada um dos efluentes utilizados nos ensaios.

Tabela 7 – Resultado das caracterizações dos efluentes brutos submetidos aos ensaios

PARÂMETROS ANALISADOS	RESULTADOS PARA CADA UM DOS EFLUENTES (mg/L)		
	E1 – Petroquímico	E2 – Lixiviado	E3 – Hospitalar
Nitrogênio Total Kjeldahl	80	1.543	88,0
Nitrogênio Amoniacal	73,2	1.354,5	50,4
Nitrito	43,5	ND	ND
Nitrato	ND	ND	ND
Demanda Química de Oxigênio	450	1.684	585
Sólidos Suspensos Voláteis	50	60	129
Sólidos Suspensos Totais	86	360	155
Alcalinidade total	650	3.347	286
Sulfeto	<0,1	-	-

Analisando os resultados apresentados na Tabela 7, verifica-se que os efluentes são distintos na sua composição e, portanto, cada um colabora para uma diversidade microbiana única nos lodos biológicos que participam do processo de tratamento destes. Desta forma, fica caracterizada a importância de trabalhar com lodos distintos e verificar os efeitos das concentrações e pressões sobre a operação de filtração por membrana.

5.1.1 Massa Específica e Viscosidade

Para cada uma das três concentrações dos lodos foram medidas as viscosidades dinâmicas e as massas específicas. Com estes resultados foi possível também determinar o valor da viscosidade cinemática, sabendo-se que esta é dada pela relação entre a viscosidade dinâmica e a massa específica. Estes resultados podem ser visto na Tabela 8.

Tabela 8 – Massa Específica e Viscosidades para cada um dos lodos e concentrações ensaiadas.

EFLUENTES	CONCENTRAÇÕES SST (mg/L)	MASSA ESPECÍFICA (g/mL)	VISCOSIDADE DINÂMICA (N.s/m ²)	VISCOSIDADE CINEMÁTICA (m ² /s)
E1 - Petroquímico	8.000	1,000	1,21E-03	1,21E-06
	17.000	1,003	1,98E-03	1,98E-06
	23.000	1,007	2,70E-03	2,68E-06
E2 - Lixiviado	8.000	1,010	1,16E-03	1,15E-06
	17.000	1,013	1,91E-03	1,89E-06
	23.000	1,018	4,27E-03	4,20E-06
E3 - Hospitalar	8.000	0,999	1,17E-03	1,17E-06
	17.000	1,002	1,59E-03	1,59E-06
	23.000	1,006	1,98E-03	1,97E-06

Os resultados da Tabela 8 são também apresentados de forma gráfica nas figuras em sequência (Figura 21, Figura 22 e Figura 23), onde é possível analisar a tendência do comportamento apresentado para cada um dos lodos. Em termos de massa específica houve uma variação conforme o esperado com uma tendência crescente de massa por unidade de volume com o respectivo aumento da concentração. Da mesma forma, mas com uma tendência distinta, também a viscosidade apresenta esta variação, com valores de maior viscosidade correspondente aos valores de maiores concentrações de sólidos.

Figura 21 – Resultado gráfico da variação da viscosidade dinâmica e da massa específica para diferentes concentrações de SST do lodo de indústria petroquímica.

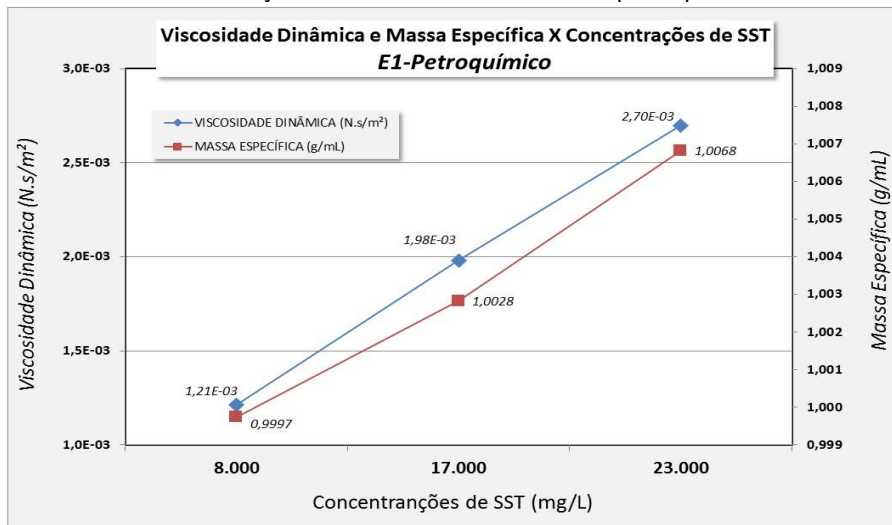


Figura 22 – Resultado gráfico da variação da viscosidade dinâmica e da massa específica para diferentes concentrações de SST do lodo de aterro sanitário.

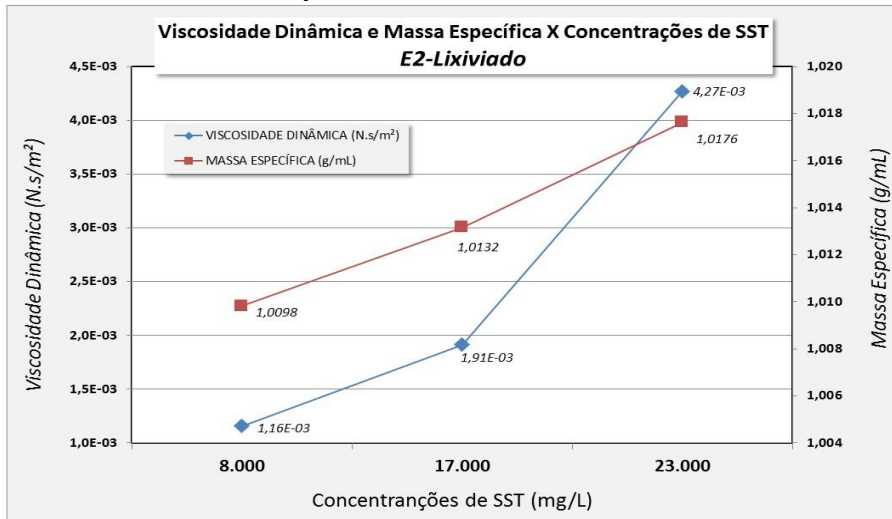
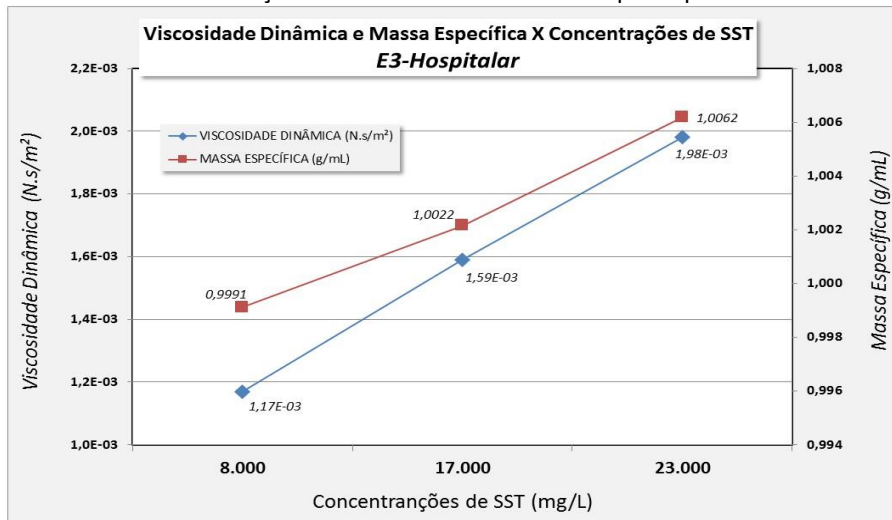


Figura 23 – Resultado gráfico da variação da viscosidade dinâmica e da massa específica para diferentes concentrações de SST do lodo de indústria petroquímica.



Da Tabela 8 também é possível avaliar o comportamento da massa específica e da viscosidade variando com a concentração para cada tipo de lodo. Através da Figura 24 é possível analisar este comportamento da massa específica comparada com cada um dos lodos ensaiados. A mesma análise é apresentada para a viscosidade na Figura 25.

Figura 24 – Resultado gráfico da variação da massa específica para cada um dos lodos e para cada uma das concentrações de SST.

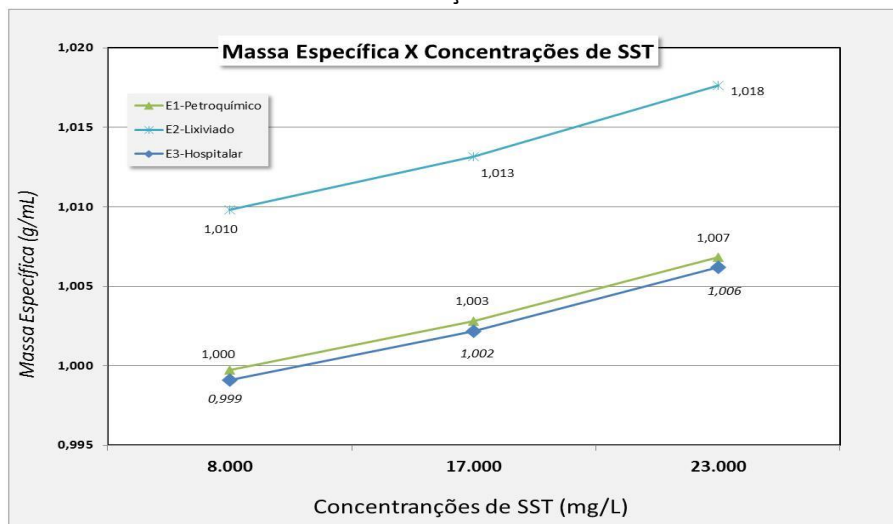
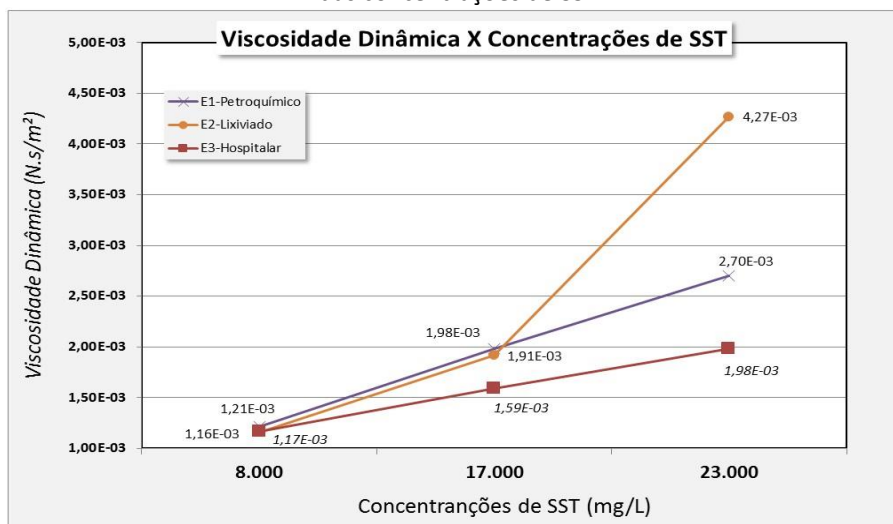


Figura 25 – Resultado gráfico da variação da viscosidade dinâmica para cada um dos lodos e para cada uma das concentrações de SST.

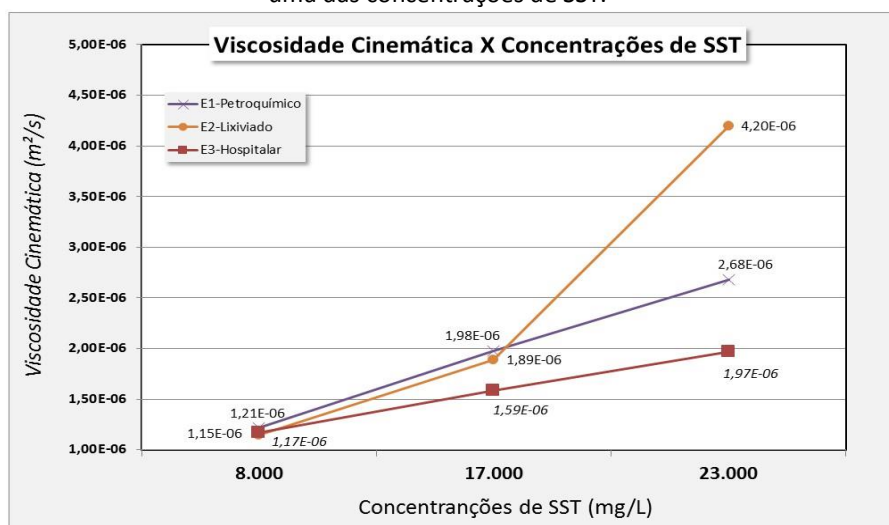


Da análise comparativa das massas específicas em função das concentrações para cada lodo, percebe-se que para esta faixa analisada há um comportamento bastante similar em termos de crescimento. Verifica-se que o lodo E3-Hospitalar é o que apresenta sempre as menores massas específicas, mas bastante similares ao lodo E1-Petroquímico. Já o lodo E2-Lixiviado apresentou as maiores massas específicas para todas as concentrações.

Na análise do comportamento das viscosidades percebe-se que E3-Hospitalar é o que apresentou os menores valores absolutos para todas as concentrações, bem como também a menor taxa de crescimento da relação viscosidade versus SST. O lodo de E1-Petroquímico apresentou, assim como E3-Hospitalar, uma relação entre viscosidade e SST praticamente linear. Já E2-Lixiviado apresentou um comportamento diferenciado, com uma tendência de incremento relativamente semelhantes aos outros lodos para a faixa entre 8.000 e 17.000 mg/L, mas significativamente diferente e muito maior para o trecho 17.000 e 23.000 mg/L, também apresentando os maiores valores absolutos.

Comumente em modelos no campo da hidráulica, especialmente nos de transporte de fluidos em condutos forçados, utiliza-se a viscosidade cinemática como parâmetro representativo, sabendo-se que esta considera a relação entre a viscosidade dinâmica e a massa específica do fluido. Para também avaliar estes resultados foram apresentados os dados na tabela anterior e a Figura 26 ilustra graficamente estas relações.

Figura 26 – Resultado gráfico da variação da viscosidade cinemática para cada um dos lodos e para cada uma das concentrações de SST.



Dada a proximidade dos valores de massa específica a 1 mg/L, verifica-se que a viscosidade cinemática pouco diferiu dos valores já apontados para a viscosidade dinâmica. Destaca-se que nos modelos de fluxo de permeado na filtração em membranas, utiliza-se a viscosidade dinâmica do permeado como representativa do fenômeno. Porém, nestes estudos envolvendo a filtração de lodos com distintas características de concentração de SST, a viscosidade dinâmica dos distintos lodos poderá servir para estabelecer correlações, pelo menos qualitativas, para condições mais favoráveis ou menos favoráveis à redução de fluxo de permeado e aumento da resistência total.

Também foi medida a viscosidade dos permeados resultantes da filtração de cada um dos lodos. Estas medições foram feitas em triplicata em tempos distintos, por volta da primeira meia hora e na última meia hora de ensaio. Constatou-se assim, como esperado, que não havia uma diferença média significativa entre os resultados tomados do início e no fim dos ensaios, ou seja, que a viscosidade do permeado não se altera durante os ensaios, nem com a variação da concentração de SST nem com a variação da PTM. Assim, adotou-se trabalhar com a média destes resultados. Também se observou que os resultados para cada um dos lodos foram muito similares.

As viscosidades encontradas para os lodos E1-Petroquímico, E2-Lixiviado e E3-Hospitalar foram, respectivamente, 0,95, 0,99 e 0,95 N·s/m², com uma média de 0,96 N·s/m² e desvio padrão de 0,02, correspondente a um coeficiente de variação de 2,1 %. Confirma-se que não há uma diferença significativa a ponto de interferir na análise dos dados de filtração que dependem deste fator. Destaca-se também que estes resultados foram muito similares à viscosidade dinâmica da água em temperaturas entre 20 e 25°C.

5.1.2 Caracterização Física dos Biossólidos

Para cada lodo e para cada concentração ensaiados foram analisadas as características físicas dos biossólidos, o que permitiu avaliar o comportamento granulométrico das partículas presentes no meio. Com o uso do equipamento analisador de tamanho de partículas, foi possível extrair os diâmetro médio, mediano e efetivo para cada lodo, bem como, também foi possível calcular seus respectivos Coeficientes de Uniformidade (C_u) e de Curvatura (C_c), representativos da distribuição granulométrica das amostras analisadas.

Os resultados para as diferentes concentrações para um mesmo lodo mostraram que não havia uma diferença significativa no comportamento granulométrico das amostras. Independente do momento em que se conduziu o efluente para os ensaios, constatou-se que os grânulos de biossólidos se mantiveram com relativa uniformidade, provavelmente devido à alimentação e aeração regulares sob as quais eram mantidas estas biomassas. Assim, optou-se por trabalhar os resultados de cada amostra somente por tipo de lodo, sem estratificar por concentrações, utilizando-se a média dos valores obtidos para cada concentração como sendo representativa. Para cada concentração, as análises foram em triplicata, garantindo assim a representatividade estatística destes resultados médios.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos. D_{30} e d_{60} apresentados são utilizados para a determinação dos coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c), calculados de acordo com as equações 16 e 17, respectivamente. A Figura 27 e a Figura 28 apresentam o resultado gráfico para as principais características físicas dos biossólidos para cada um

Tabela 9 – Resultados da caracterização física dos biossólidos para cada um dos efluentes.

	E1–Petroquímico	E2–Lixiviado	E3–Hospitalar
DIÂMETRO MÉDIO (μm)	40,92	15,61	40,32
DESVIO PADRÃO (μm)	23,28	13,85	44,91
d_{10} - DIÂMETRO EFETIVO (μm)	16,07	7,85	9,87
d_{30} (μm)	27,32	10,25	19,22
d_{50} - DIÂMETRO MEDIANO (μm)	36,95	12,32	26,95
d_{60} (μm)	36,95	12,32	26,99
COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE - C_u	2,30	1,57	2,73
COEFICIENTE DE CURVATURA - C_c	1,26	1,09	1,39

Figura 27 – Resultado gráfico da caracterização física dos biossólidos para cada lodo: diâmetro efetivo, diâmetro mediano e diâmetro médio.

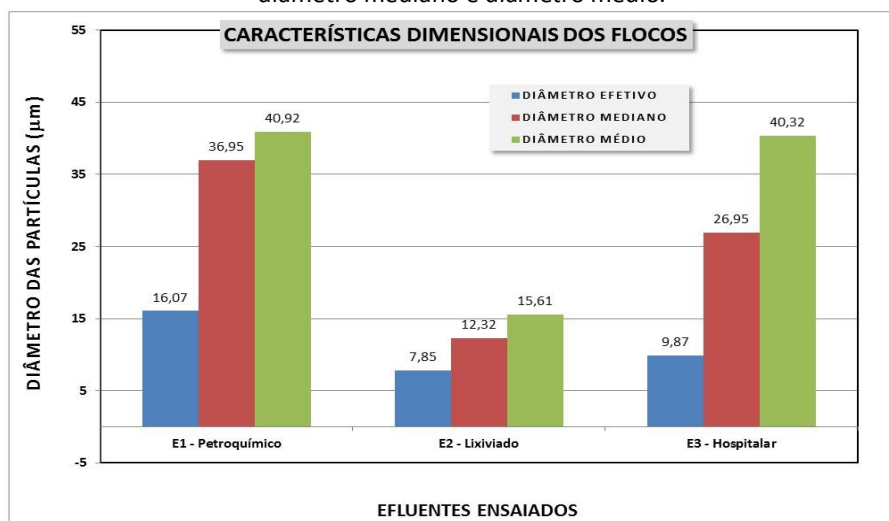
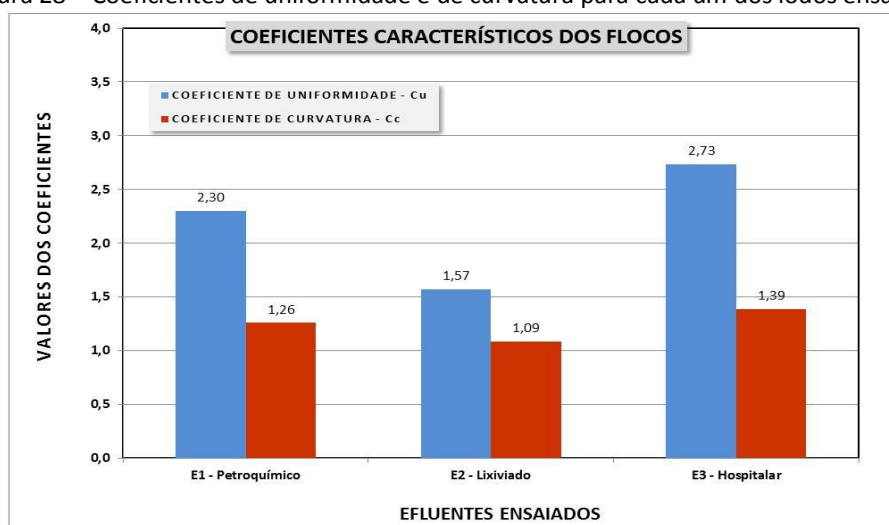


Figura 28 – Coeficientes de uniformidade e de curvatura para cada um dos lodos ensaiados.



A partir dos resultados apresentados na tabela e nos gráficos percebe-se que os maiores diâmetros de partícula corresponderam ao lodo E1-Petroquímico, seguido de E3-Hospitalar, enquanto que os menores diâmetros foram do lodo E2-Lixiviado. Por outro lado, mesmo com as menores faixas de diâmetro, verifica-se que o E2-Lixiviado é o que apresentou os maiores valores médios para massa específica.

Já com relação aos coeficientes de uniformidade, verifica-se que todos os lodos apresentaram valores absolutos menores do que 5 e, assim, ficam classificados como amostras com partículas uniformes, ou seja, um indicativo de que o diâmetro médio dos grânulos não se apresentam com grandes diferenças dimensionais. Quanto mais próximo de 1 é este resultado, mais uniforme é a distribuição granulométrica, ou seja, também se pode inferir comparativamente que o E2-Lixiviado, é o que se apresenta com a maior uniformidade dimensional dentre os efluentes ensaiados.

Com relação ao coeficiente de curvatura todos apresentaram valores entre 1 e 3, o que indica uma curva granulométrica bem graduada, ou seja, não há uma concentração maior de grãos em uma ou outra faixa granulométrica, correspondendo a uma curva com um desenvolvimento suave e sem falhas. Ainda assim, quando C_c é menor do que 1, a curva tende a ser irregular ou descontínua, indicando a provável ausência de algumas faixas de diâmetros. Sob este ponto de vista, percebe-se que mesmo que para todos os lodos os valores tenham ficado entre 1 e 3, todos estão mais para próximo de 1 e que o menor deles é de 1,09 para o E2-Lixiviado. Assim, comparativamente temos que este lodo é o que teria as maiores condições comparativas de ser classificado como *mal graduado*.

Cabe ressaltar que estas análises buscaram resultados comparativos aos que são realizados para solos com partículas granulares, não correspondendo ao caso de biossólidos, compostos por partículas microscópicas. Assim, esta seria uma tentativa de posteriormente com os resultados dos ensaios de filtração buscar-se alguma correlação, o que já se espera que tenha pouca contribuição neste caso, pois todos os lodos ficaram classificados como uniformes e bem graduados.

Outro resultado possível de se extrair destes dados, na tentativa de se buscar correlações com os resultados da filtração, é o coeficiente de variação entre os valores médios e os desvios padrão das amostras. Com os dados da Tabela 9, encontram-se os seguintes resultados para os coeficientes de variação: 56,9, 88,7 e 111,4 %, respectivamente para E1-Petroquímico, E2-Lixiviado e E3-Hospitalar. Desta análise da

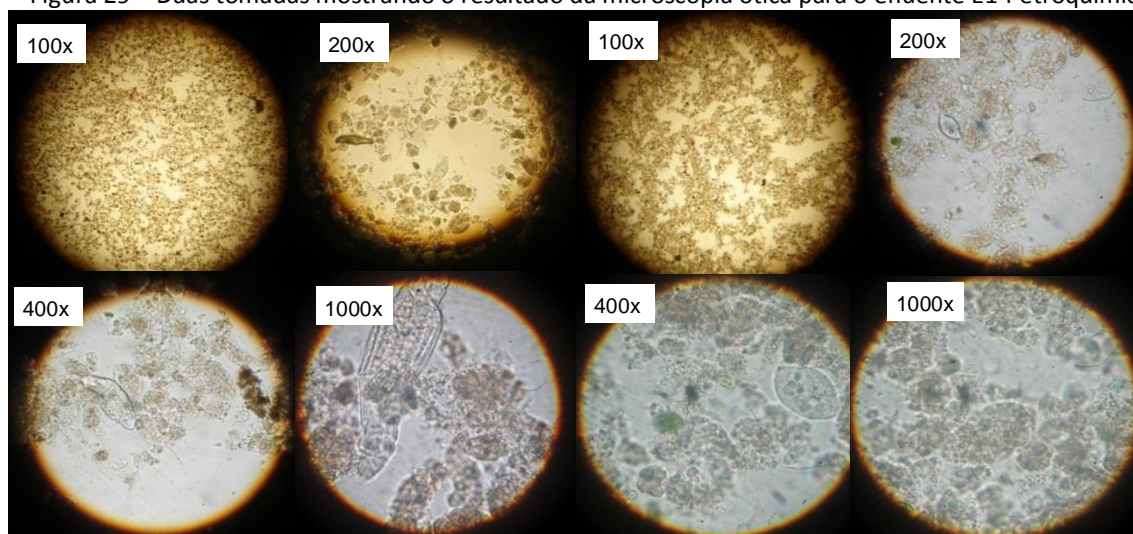
dispersão no entorno da média, verifica-se que todos apresentam-se com uma variação significativa, maiores do que 50%, sendo que E3-Hospitalar é o que se apresenta com a maior variação, seguido por E2-Lixiviado e, com a menor variação, por E1-Petroquímico.

5.1.3 Visualização da Biomassa

Amostras dos lodos ensaiados foram conduzidas a análises de microscopia ótica com objetivo de caracterizar a biomassa presente e com o principal foco em identificar a presença eventual de espécies que pudessem potencializar a ocorrência de colmatção junto à superfície da membrana.

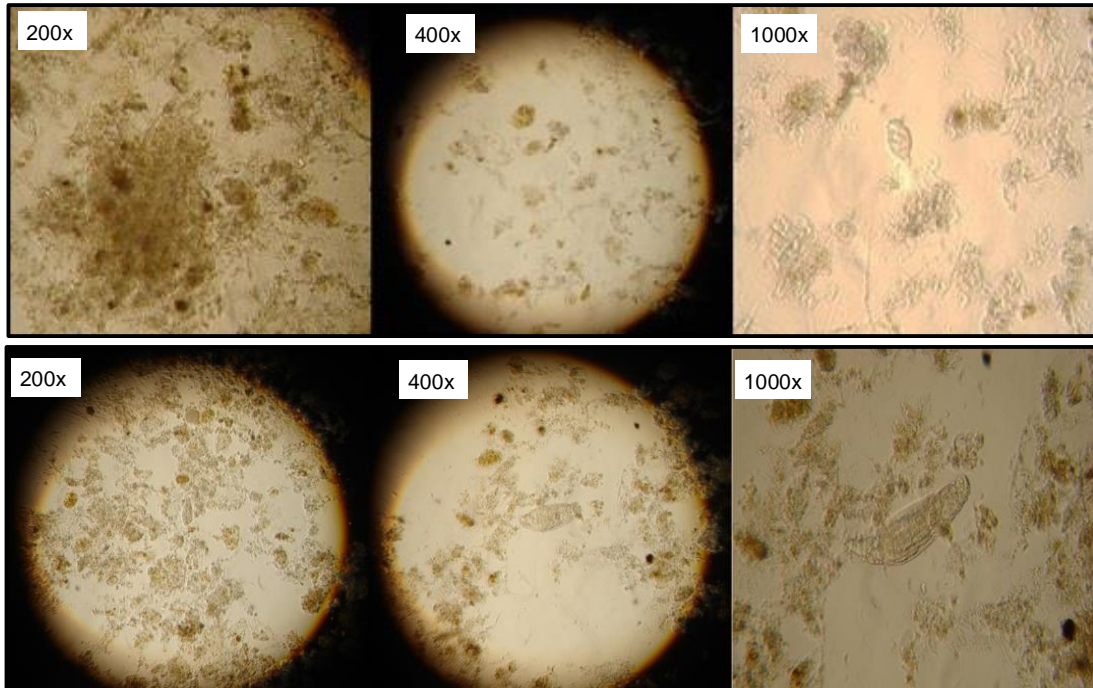
A Figura 29 apresenta o resultado da visualização do E1-Petroquímico. São dispostas duas tomadas, cada uma com quatro imagens, com a visualização de amostras coletadas em dois dias distintos, o primeiro no início dos procedimentos de filtração do lodo E1-Petroquímico, ou seja, juntamente com a primeira concentração ensaiada; e o segundo realizado com a terceira concentração ensaiada.

Figura 29 – Duas tomadas mostrando o resultado da microscopia ótica para o efluente E1-Petroquímico.



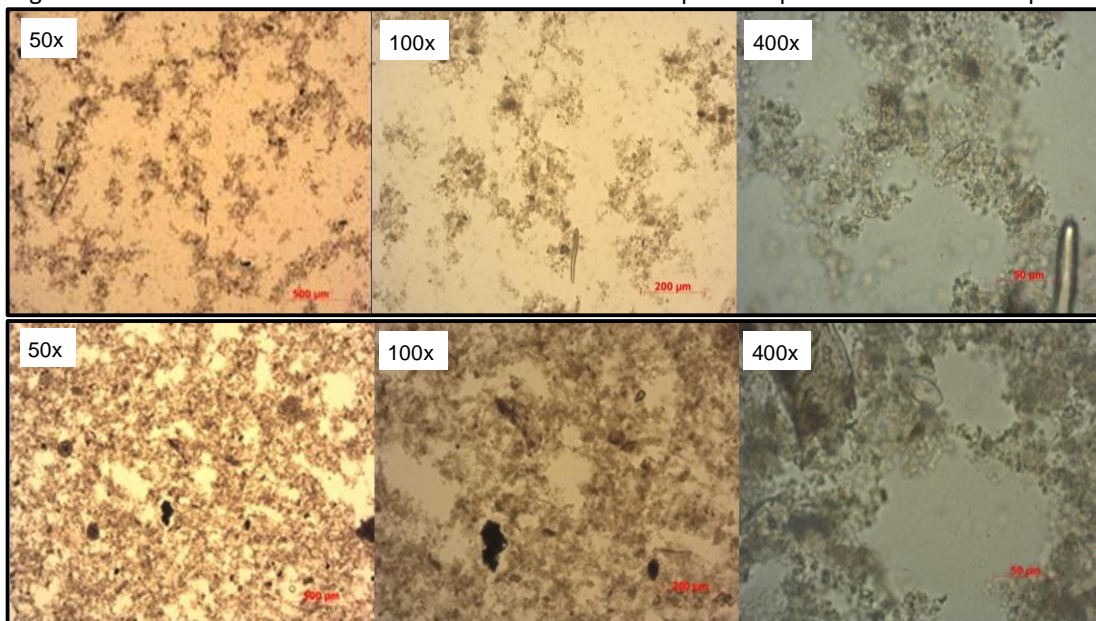
A Figura 30 apresenta o resultado da visualização do E2-Lixiviado. São dispostas duas tomadas, cada uma com três imagens, com a visualização de amostras coletadas em dois dias distintos, o primeiro no início dos procedimentos de filtração e o segundo realizado com a terceira pressão ensaiada. Cada uma das imagens está utilizando um distinto aumento ótico, conforme indicado na figura.

Figura 30 – Duas tomadas mostrando o resultado da microscopia ótica para o efluente E2-Lixiviado.



A Figura 31 apresenta o resultado da visualização do E3-Hospitalar. São dispostas duas tomadas, cada uma com três imagens, com a visualização de amostras coletadas em dois dias distintos, o primeiro no início dos procedimentos de filtração do lodo E1-Petroquímico, ou seja, juntamente com a primeira pressão ensaiada; e o segundo realizado com a terceira pressão ensaiada.

Figura 31 – Duas tomadas mostrando o resultado da microscopia ótica para o efluente E3-Hospitalar.



Estas imagens apresentadas são amostras características de todas as realizadas durante os procedimentos de filtração, que serviram de controle para a detecção da presença flocos de lodos com a presença de organismos filamentosos que pudessem ocasionar um comportamento diferenciado nas filtrações.

Em todas as análises de imagens realizadas, as características morfológicas dos flocos biológicos mantidos em aeração e alimentação frequentes, qualitativamente evidenciaram condições de estabilidade biológica, verificando-se comportamentos típico em termos de distribuição dos biossólidos, bem como pela presença também comum de espécies como os rotíferos e protozoários.

Segundo Pujol e Canler (1992) e Jenkins et al. (2003), as formações de flocos visualizadas podem ser consideradas como ideais. Flocos ideais são classificados como sendo predominantemente de médio e grande tamanhos, além de firmes, redondos e com aspecto compacto. Segundo estes mesmos autores, a presença de formações de flocos do tipo filamentoso, são representados por espécies de bactérias que interferem na sedimentação e compactação do lodo biológico, pela produção de um floco difuso e irregular. Da mesma forma, em processos de filtração, como já dito anteriormente, este tipo de formação seria também prejudicial, pois tenderia a acelerar o processo de colmatação junto à superfície das estruturas de filtração.

5.1.4 Substâncias Poliméricas Extracelulares - EPS

A quantificação das concentrações das distintas frações de EPS configuram-se como um importante resultado especialmente para se fazer a comparação do comportamento da queda de fluxo de permeado e do aumento da resistência total à filtração, quando da comparação de um lodo com o outro. Estas características da presença e da quantificação das substâncias poliméricas extracelulares estão associadas à condições de redução do fluxo de permeado ao longo da filtração. Destaca-se que especialmente a fração de EPS fortemente ligada (EPS_{fo}) tem sido apontada como a mais relacionada à condições operacionais desfavoráveis em MBR.

Amostras dos lodos nas diferentes concentrações foram conduzidas para a determinação das concentrações de proteínas, ácidos húmicos e carboidratos, presentes nos distintos extratos de EPS: solúvel (EPS_s), fracamente ligado (EPS_{fr}) e fortemente ligado

(EPS_{fo}). Os resultados aqui apresentados referem-se à soma das concentrações totais de proteínas, ácidos húmicos e carboidratos para cada uma das frações de EPS. A Tabela 10 apresenta o resultado das concentrações totais de EPS para cada uma de suas frações representativas, para cada um dos lodos e para cada uma de suas respectivas concentrações de SST ensaiadas.

Tabela 10 – Resultados das concentrações de cada fração de EPS para cada lodo e suas respectivas concentrações de SST ensaiadas.

LODOS ENSAIADOS	SST (mg/L)	FRAÇÕES DE EPS (mg/L)		
		EPS _s	EPS _{fr}	EPS _{fo}
E1-Petroquímico	8000	18,65	17,05	76,04
	17000	43,96	19,22	374,18
	23000	143,38	24,34	317,24
	<i>Média</i>	<i>68,66</i>	<i>20,20</i>	<i>255,82</i>
E2-Lixiviado	8000	270,78	31,40	221,34
	17000	360,74	63,14	307,82
	23000	433,12	102,20	750,59
	<i>Média</i>	<i>354,88</i>	<i>65,58</i>	<i>426,58</i>
E3-Hospitalar	8000	177,54	44,44	187,90
	17000	163,05	28,48	303,97
	23000	155,45	134,36	868,89
	<i>Média</i>	<i>165,35</i>	<i>69,09</i>	<i>453,59</i>

Dos resultados da tabela é possível verificar que, em média, os lodos com maiores concentrações de EPS foram E2-Lixiviado e E3-Hospitalar, seguido então de E1-Petroquímico que apresentou as menores concentrações médias de EPS. Salvo a fração de EPS_{fr} de E2-Lixiviado que quando comparada com E3-Hospitalar, tiveram valores relativamente similares, para as demais parcelas o E2-Lixiviado foi o que apresentou os maiores valores absolutos. Verifica-se também que para todos os lodos, as frações de EPS_{fr} são as que, em média possuem os menores valores, enquanto que as frações de EPS_{fo} caracterizam-se por apresentar os maiores valores médios. Já, em termos de análise comparativa dentre as distintas concentrações e para cada lodo, verifica-se que com o aumento da concentração de SST houve, em grande parte dos resultados, um correspondente aumento das concentrações das distintas frações de EPS. Somente houve uma inversão nesta tendência para o EPS_s e EPS_{fr} de E3-Hospitalar, entre as concentrações 17.000 mg/L para 23.000 mg/L de SST; e para o EPS_{fo} de E1-Petroquímico, também entre as concentrações de 17.000 mg/L para 23.000 mg/L de SST.

Os gráficos da Figura 32 apresentam estes mesmos resultados, permitindo a análise da relação proporcional entre cada parcela de EPS e as concentrações de SST para cada lodo. Já na Figura 33 estes mesmos resultados são apresentados de forma percentual relativa,

permitindo uma análise sobre a preponderância dentre cada uma das frações de EPS, bem como dentre as concentrações e efluentes ensaiados.

Figura 32 – Resultados das concentrações totais de EPS_s, EPS_{fr} e EPS_{fo} para cada concentração de SST ensaiada e para cada um dos lodos.

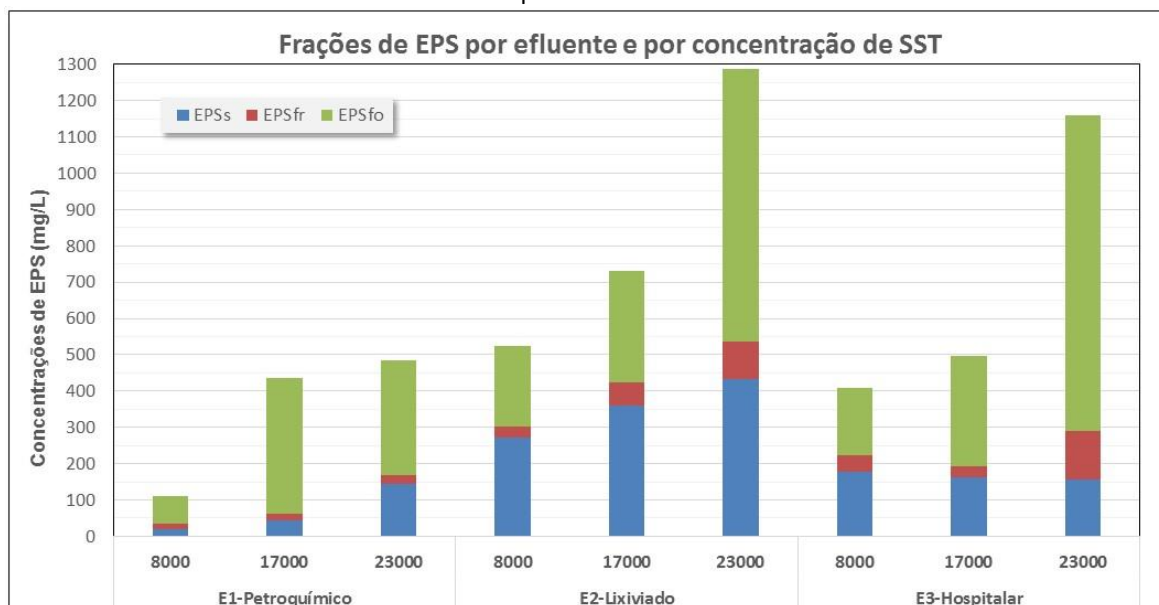
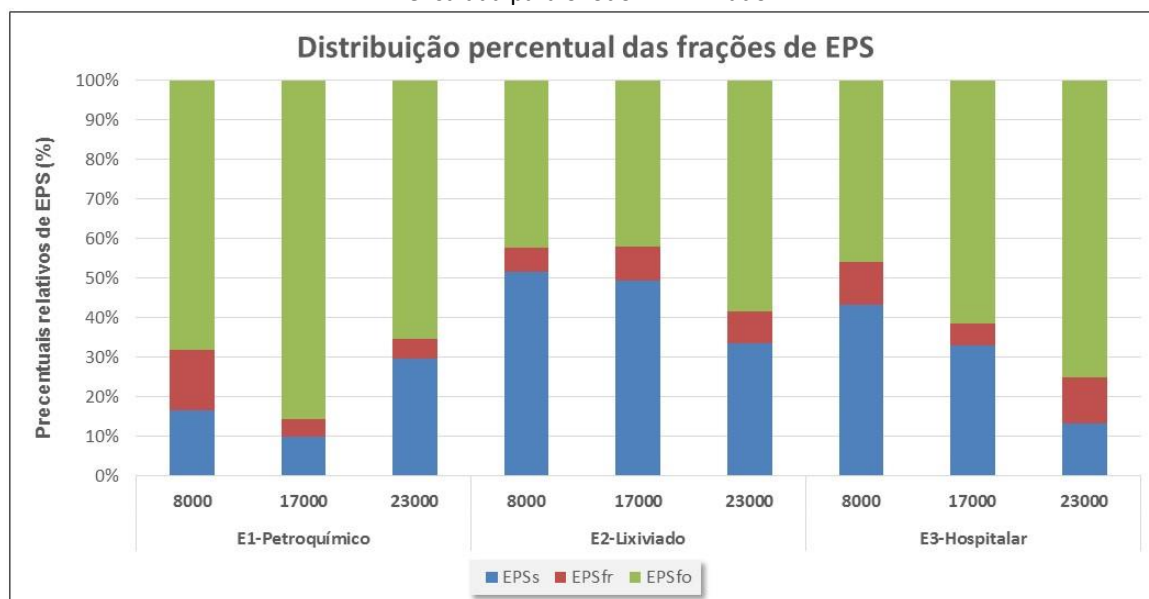


Figura 33 – Resultados das concentrações totais de EPS_s, EPS_{fr} e EPS_{fo} para cada concentração de SST ensaiada para o lodo E2-Lixiviado.



Para o E1-Petroquímico, conforme já analisado nos resultados tabelados, verifica-se o aumento dos valores totais de EPS com o aumento da concentração de SST. Entretanto, esta proporcionalidade direta não se evidencia para as frações separadas de EPS. Em termos de valores absolutos, a fração de EPS_{fr} apresenta valores de concentração relativamente próximos, com uma média de cerca de 20 mg/L. Já analisando

percentualmente cada uma das concentrações de SST, verifica-se que este valor de EPS_{fr} teve uma representatividade muito próxima para as concentrações de 17.000 e 23.000 mg/L, no entorno de 4 %, bem inferiores da representatividade percentual para a concentração de 8.000 mg/L, que ficou no entorno de 14 %. Para todas as concentrações a parcela de EPS_{fo} foi a mais significativa em termos absolutos e conseqüentemente em termos percentuais, com destaque para a concentração de 17.000 mg/L, que apresentou os maiores valores para esta fração de EPS (85 %). Para a concentração de 8.000 mg/L a representatividade de EPS_s e EPS_{fr} ficaram bem próximas, no entorno de 15% do total. Já, na concentração de 17.000 mg/L a representatividade do EPS_s ficou por volta de 10 % e do EPS_{fr} somente de 5 %, ou seja, na soma destas duas frações, EPS_s e EPS_{fr} , a representatividade percentual resultou na metade (15 %), quando comparada com o mesmo resultado para a concentração de 8.000 mg/L (30 %). Para a concentração de 23.000 mg/L a fração de EPS_s representou cerca de 30 % do total das frações, já EPS_{fr} nesta concentração representou cerca de 4 % somente.

O E2-Lixiviado comparado com os demais lodos foi o que apresentou os maiores valores absolutos para as concentrações de EPS em suas distintas frações. Da mesma forma que os demais lodos e conforme já analisado nos resultados tabelados, verifica-se o aumento dos valores totais de EPS com o aumento da concentração de SST. Em números absolutos, verifica-se que esta tendência de aumento das concentrações de EPS com a concentração de SST, se mantém diretamente proporcional também quando se analisam as frações separadas de EPS. Analisando a representatividade percentual, verifica-se que há uma redução dos valores de EPS_s com o aumento da concentração de SST, passando de 52 % para 49 % e para 34 %, para as concentrações de SST em 8.000, 17.000 e 23.000 mg/L, respectivamente. Já estes mesmos valores para a fração de EPS_{fr} mantiveram-se semelhantes dentre as concentrações, variando entre 5 a 9 %. Com isto, a fração de EPS_{fo} para as concentrações de 8.000 e 17.000 mg/L de SST ficaram praticamente iguais (42 %), enquanto que para a concentração de 23.000 mg/L este resultado foi de cerca de 68 %.

Para o E3-Hospitalar tem-se os resultados absolutos intermediários entre o E1-Petroquímico, com os menores valores, e o E2-Lixiviado, com os maiores valores. Da mesma forma que os demais lodos e conforme já analisado nos resultados tabelados, verifica-se o aumento dos valores totais de EPS com o aumento da concentração de SST. Já em números absolutos, verifica-se que esta tendência de aumento das concentrações

de EPS com a concentração de SST não se mantem da mesma forma, ou seja, a representatividade percentual quando se analisam as distintas frações de EPS para cada concentração de SST, se apresentam de forma não tão direta quanto os demais lodos. Neste caso do E3-Hospitalar, verifica-se que a representatividade percentual da fração de EPS_s tem uma queda relativamente proporcional com o aumento da concentração, passando de 42 para 32 e para 13 %, para as concentrações de SST de 8.000, 17.000 e 23.000 mg/L, respectivamente. Já estes mesmos valores para a fração de EPS_{fo} tem-se este comportamento invertido, ou seja, com o aumento da concentração de SST tem-se o aumento de representatividade percentual desta fração do EPS, passando de 45 % para 61 % e para 74 %, para as concentrações de SST de 8.000, 17.000 e 23.000 mg/L, respectivamente. A fração de EPS_{fr} para as concentrações de SST de 8.000, 17.000 e 23.000 mg/L, resultaram em cerca de 10 %, 5 % e 10 %, respectivamente.

5.2 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

Os ensaios de filtração realizados com cada um dos lodos, nas distintas concentrações e nas distintas pressões, foram conduzidos conforme exposto nos procedimentos metodológicos. Para fins de apresentação dos resultados e posterior análise, foram elaborados gráficos representativos dos possíveis cruzamentos, conforme explanado no subcapítulo 4.6.2, dos procedimentos metodológicos.

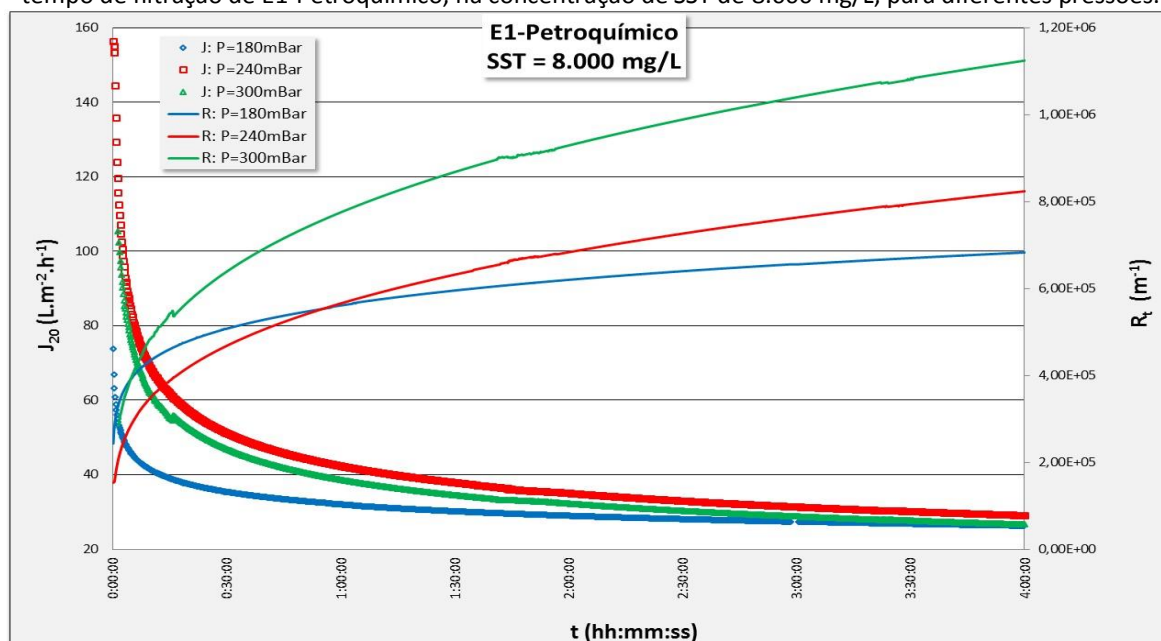
Para as análises dos resultados foi considerado o fluxo de permeado normalizado (J_{20}), dado pela Equação 2 e a resistência total (R_t), determinada pela Equação 3. A apresentação dos resultados e análises foi realizada para cada um dos lodos independentemente e, após, foram realizadas análises comparativas entre todos os lodos ensaiados.

5.2.1 Filtração do Lodo E1-Petroquímico

Os dados obtidos dos ensaios realizados com o lodo E1-Petroquímico foram tratados possibilitando a geração dos gráficos apresentados nas figuras em sequência (Figura 34, Figura 35 e Figura 36). Isso permitiu analisar o comportamento do J_{20} e da R_t para cada uma das PTM e para cada uma das concentrações de SST ao longo do tempo total de ensaio de quatro horas. Estes correspondem aos cruzamentos previstos pela Tabela 4, na linha E1-

Petroquímico, apresentado no subcapítulo 4.6.2.

Figura 34 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E1-Petroquímico, na concentração de SST de 8.000 mg/L, para diferentes pressões.



Da Figura 34 percebe-se o típico comportamento da variação do fluxo ao longo do tempo, como uma curva decrescente no formato de uma função potência. Em um momento inicial, a redução do J_{20} é mais intensa, justificada pela formação dos mecanismos de bloqueio junto à membrana, resultando no consequente aumento da R_t . Para analisar melhor estes resultados se fez um extrato dos valores de J_{20} e de R_t em tempos de ensaio de 30 a 240 minutos, com intervalos de 30 minutos, calculando-se o percentual relativo para cada intervalo de tempo comparado com o imediatamente antecedente, para cada uma das PTM ensaiadas, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J_{20}) e resistência total (R_t) da filtração de E1-Petroquímico, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 8.000 mg/L

TEMPO DE ENSAIO (min)	PTM = 180 mbar		PTM = 240 mbar		PTM = 300 mbar	
	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_T ($\times 10^5 m^{-1}$)	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_T ($\times 10^5 m^{-1}$)	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_T ($\times 10^5 m^{-1}$)
inicial	73,87	-	156,35	-	165,81	-
30	35,46	-52,0%	51,30	-67,2%	46,92	-71,7%
60	32,06	-9,6%	42,43	-17,3%	38,67	-17,6%
90	30,20	-5,8%	37,95	-10,5%	34,53	-10,7%
120	29,01	-4,0%	35,10	-7,5%	32,26	-6,6%
150	28,11	-3,1%	33,02	-5,9%	30,32	-6,0%
180	27,43	-2,4%	31,42	-4,8%	28,82	-4,9%
210	26,85	-2,1%	30,19	-3,9%	27,74	-3,7%
240	26,34	-1,9%	29,12	-3,6%	26,66	-3,9%

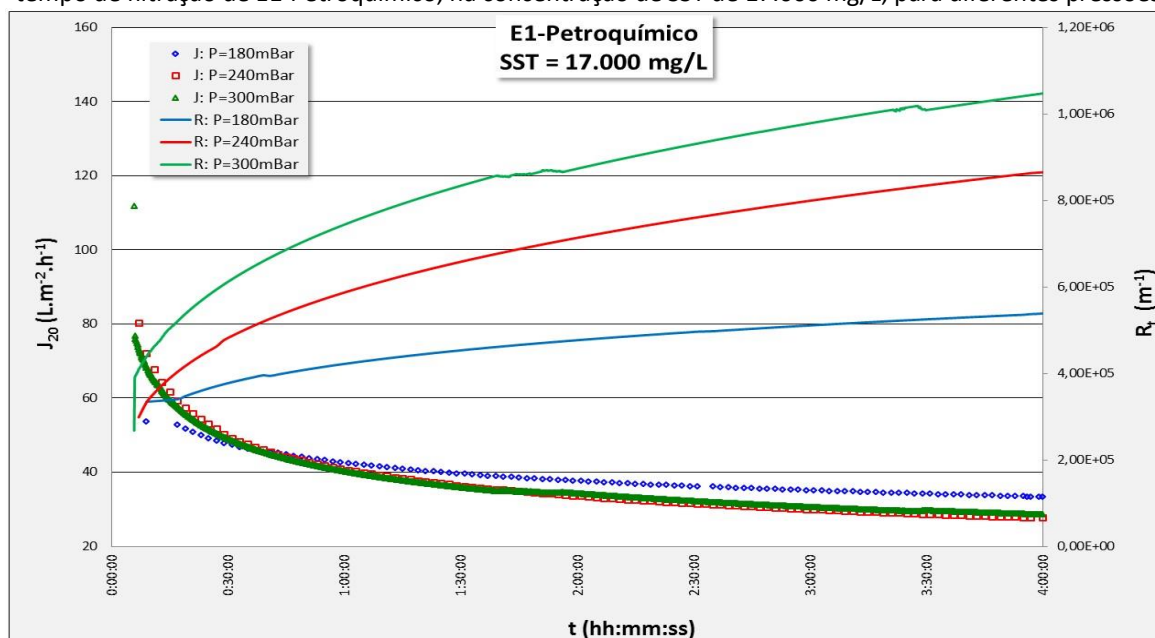
Analisando os dados da tabela fica mais evidente a redução significativa do fluxo na primeira meia hora de ensaio, sendo que percentualmente os módulos destes valores foram de: 52,0, 67,2 e 71,7 %, respectivamente para cada uma das PTM, em ordem crescente. Na mesma linha de análise, percebe-se que o aumento da R_t na primeira meia hora de ensaio também apresentou valores muito superiores aos demais intervalos de tempo, resultando em: 108,3, 204,8 e 253,4 %, para as respectivas PTM. Percebe-se que quanto maior a PTM, maior foi a queda percentual relativa do J_{20} e também maior foi o incremento sobre a R_t . Verifica-se ainda que, na comparação de um tempo com o outro, a partir da primeira hora de ensaio, os percentuais de redução de fluxo e de aumento da resistência, em módulo, foram cada vez menores.

Outro resultado possível de se depreender do gráfico e da tabela, é que os valores absolutos de J_{20} nos momentos iniciais são diretamente proporcionais aos maiores valores de PTM, mas que ao final das quatro horas de ensaio estes valores se reduziram a patamares muito similares. Ao final, no tempo de 240 min, J_{20} se estabilizou nos valores: 26,34, 29,12 e 26,66 $L.m^{-2}.h^{-1}$, respectivamente para cada uma das PTM, em ordem crescente. Ou seja, com uma média de 27,37 $L.m^{-2}.h^{-1}$ e com um desvio padrão de 1,52, valor de desvio este que representa 5,6 % sobre a média. Fazendo a mesma comparação com os valores correspondentes aos fluxos no tempo denominado inicial, a média resulta em 132,01 $L.m^{-2}.h^{-1}$ com um desvio padrão de 50,57, o que corresponde a um valor de 38,3 % de desvio padrão sobre a média. Com isto, conclui-se que houve a tendência de que com o transcorrer do tempo, o incremento da PTM passou a não influenciar significativamente J_{20} .

Com relação ao aumento de R_t , verifica-se que transcorridos os momentos iniciais, o comportamento desta variável tem uma tendência esperada. Ou seja, para uma concentração fixa, quanto menor a PTM, menor a R_t , devido a menor intensidade de atuação dos mecanismos de bloqueio junto à membrana. Assim, percebe-se também que os valores absolutos finais para R_t são distintos entre si e crescentes com o aumento das pressões. Ao se analisar os valores absolutos no tempo inicial, a média resulta em $1,92 \times 10^5 m^{-1}$, com um desvio padrão de $4,61 \times 10^4$, ou seja, com um coeficiente de variação correspondente à 23,9 %. A mesma análise para os valores absolutos finais indicam uma média de $5,40 \times 10^5 m^{-1}$, com um desvio padrão de $3,77 \times 10^5$, ou seja, com um coeficiente de variação correspondente à 69,9 %. Assim, distintamente do comportamento do J_{20} que

tende a certa estabilização com o decorrer do tempo, o valor da R_t tende a ter valores mais distintos entre si, e, nesse caso, correspondentes ao aumento das pressões.

Figura 35 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E1-Petroquímico, na concentração de SST de 17.000 mg/L, para diferentes pressões.



Na Figura 35 também se percebe o típico comportamento da variação do fluxo ao longo do tempo como uma curva decrescente no formato de uma função potência. O momento inicial demonstrou-se como significativo para a redução de J_{20} , com uma redução mais acentuada, justificada pela formação dos mecanismos de bloqueio junto à membrana, decorrendo em aumento da resistência total à filtração. A Tabela 12 apresenta os extratos feitos de J_{20} e R_t em tempos sucessivos a cada 30 minutos, desde o tempo inicial até o final, permitindo uma análise dos valores absolutos e das suas respectivas variações percentuais.

Tabela 12 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J_{20}) e resistência total (R_t) da filtração de E1-Petroquímico, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 17.000 mg/L

TEMPO DE ENSAIO (min)	PTM = 180 mbar		PTM = 240 mbar		PTM = 300 mbar							
	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_T ($\times 10^5 m^{-1}$)	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_T ($\times 10^5 m^{-1}$)	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_T ($\times 10^5 m^{-1}$)						
inicial	53,76	-	3,35	-	95,75	2,50	111,85	-	2,68	-		
30	47,36	-11,9%	3,80	13,5%	49,29	-48,5%	4,86	94,2%	48,99	-56,2%	6,12	128,3%
60	42,48	-10,3%	4,23	11,5%	40,65	-17,5%	5,90	21,3%	40,28	-17,8%	7,44	21,6%
90	39,74	-6,4%	4,53	6,9%	36,32	-10,7%	6,60	11,9%	35,94	-10,8%	8,34	12,1%
120	37,77	-5,0%	4,76	5,2%	33,53	-7,7%	7,15	8,3%	34,32	-4,5%	8,73	4,7%
150	36,22	-4,1%	4,97	4,3%	31,51	-6,0%	7,61	6,4%	32,24	-6,1%	9,30	6,5%
180	35,16	-2,9%	5,12	3,0%	29,95	-4,9%	8,01	5,2%	30,64	-5,0%	9,78	5,2%
210	34,28	-2,5%	5,25	2,6%	28,70	-4,2%	8,36	4,4%	29,71	-3,0%	10,1	3,1%
240	33,33	-2,8%	5,40	2,8%	27,72	-3,4%	8,65	3,5%	28,62	-3,7%	10,5	3,8%

Não tão acentuado quanto para a concentração de 8.000 mg/L de SST, para esta concentração de 17.000 mg/L também se evidencia que na primeira meia hora houve uma queda mais significativa do J_{20} e um conseqüente maior aumento da R_t . Respectivamente para cada PTM a diferença percentual relativa entre os intervalos de tempo, para a queda de J_{20} , resultou em: 11,9, 48,5 e 56,2 %; já para o aumento de R_t resultou em: 13,5, 94,2 e 128,3 %. Assim como na concentração anterior, percebe que com o aumento da PTM houve um maior incremento sobre a queda do J_{20} e sobre o aumento da R_t . Também se verifica que estes valores percentuais representativos dos incrementos entre um tempo e outro vão decaindo ao longo do ensaio.

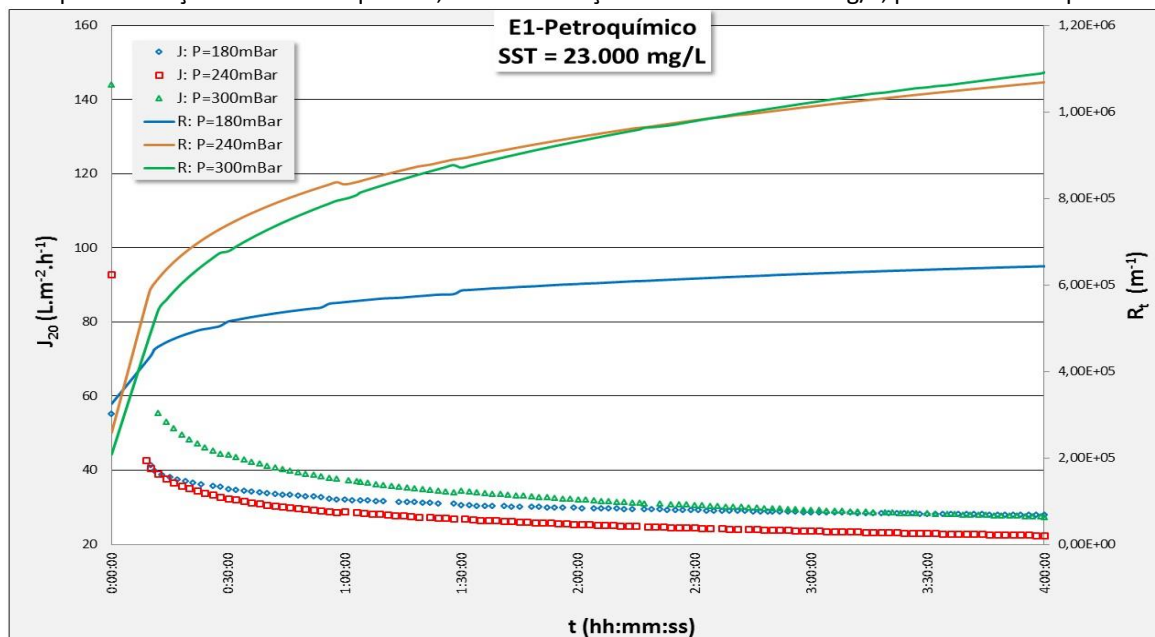
Nesta concentração, especialmente para a PTM de 180 mbar, percebe-se que os efeitos de queda do J_{20} e de aumento da R_t ainda se prolongaram até os primeiros 60 min de ensaio. Cabe lembrar que com o sistema de aeração forçada como promotor de turbulência, não é possível se ter pleno controle de uma atuação e eficiência uniformes, pois as bolhas distribuídas no meio são aleatórias em seu caminhar até a superfície, podendo passar mais intensamente ou não junto às membranas, contribuindo com a redução dos efeitos de formação dos mecanismos de bloqueio. Este pode ser um dos fatores a levantar-se como justificativa para este comportamento não exatamente regular para a PTM de 180 mbar.

Analisando a evolução da curva da R_t , fica evidenciado o comportamento de que para uma mesma concentração, o aumento da PTM implica em aumento da R_t . Ao final dos ensaios verificaram-se as maiores diferenças absolutas nos valores de R_t , enquanto os valores de J_{20} estão relativamente similares. Para R_t verifica-se que no tempo de 240 min resultou em valores absolutos crescentes e diretamente proporcionais às PTM.

Para os valores de J_{20} nos tempos de 240 min, houve uma variação entre 27,72 e 33,38 $L.m^{-2}.h^{-1}$, com uma média de 29,89 $L.m^{-2}.h^{-1}$ e um desvio padrão de 3,06, ou seja, com um coeficiente de variação de 10,2 %. Os valores no tempo inicial se apresentaram com variação diretamente proporcional ao aumento da PTM, porém com uma média de 97,43 $L.m^{-2}.h^{-1}$ e um desvio padrão de 44,56, ou seja, com um coeficiente de variação de 45,7 %. Já para os valores absolutos de R_t no tempo inicial resultou uma média de $2,84 \times 10^5 m^{-1}$, com um desvio padrão de $4,5 \times 10^{-4}$, e com um coeficiente de variação de 15,8 %; enquanto que para o tempo de 240 min a média foi de $8,2 \times 10^5 m^{-1}$, com um desvio padrão de $2,6 \times 10^{-4}$, e com um coeficiente de variação de 31,5 %. Assim, similarmente ao observado

para a concentração de SST de 8.000 mg/L, nesta de 17.000 mg/L, mesmo com o comportamento distinto da PTM de 180 mbar, confirma-se que houve uma certa estabilização dos valores do J_{20} com o transcorrer do tempo, ao mesmo tempo que a R_t apresentou a tendência de se distinguir quanto maior o tempo de ensaio.

Figura 36 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E1-Petroquímico, na concentração de SST de 23.000 mg/L, para diferentes pressões.



O comportamento da queda de fluxo e do aumento da resistência visualizado no gráfico da Figura 36 também se apresenta da forma esperada, assim como nas duas concentrações de SST anteriormente analisadas. É perceptível a maior queda nos valores do J_{20} e de aumento da R_t nos momentos iniciais da filtração. Na Tabela 13, assim como nas duas anteriores, se apresenta o extrato dos resultados agora para SST em 23.000 mg/L.

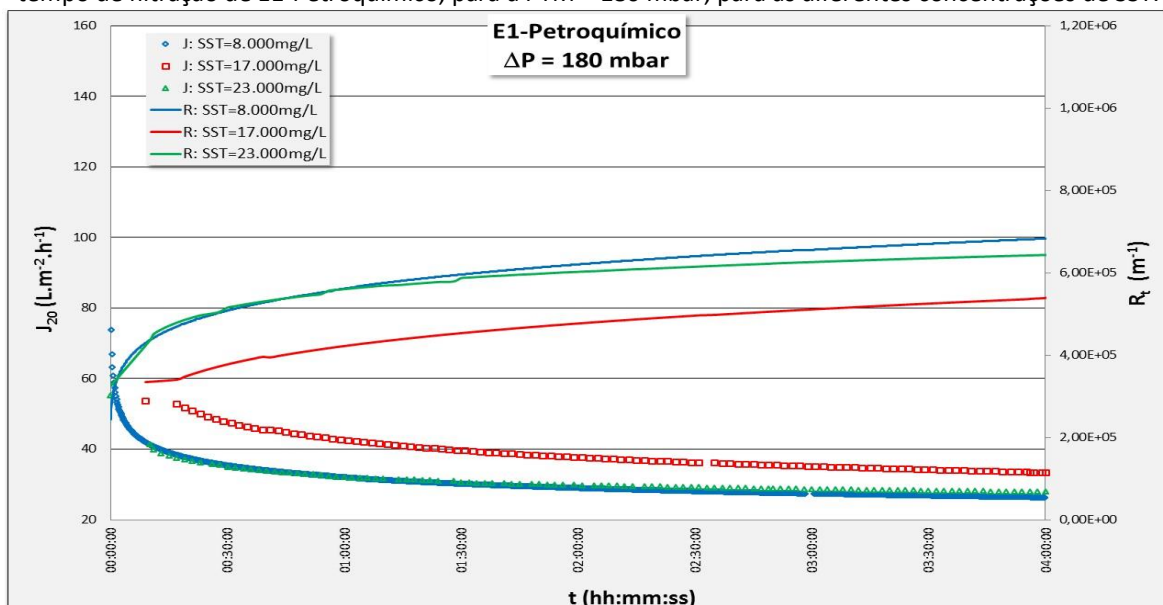
Tabela 13 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J_{20}) e resistência total (R_t) da filtração de E1-Petroquímico, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 23.000 mg/L

TEMPO DE ENSAIO (min)	PTM = 180 mbar				PTM = 240 mbar				PTM = 300 mbar			
	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)		RESISTÊNCIA TOTAL R_t ($\times 10^5 m^{-1}$)		FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)		RESISTÊNCIA TOTAL R_t ($\times 10^5 m^{-1}$)		FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)		RESISTÊNCIA TOTAL R_t ($\times 10^5 m^{-1}$)	
inicial	55,32	-	3,25	-	92,88	-	2,58	-	144,10	-	2,08	-
30	34,89	-36,9%	5,15	58,5%	32,43	-65,1%	7,39	186,4%	44,46	-69,1%	6,74	224,1%
60	32,20	-7,7%	5,58	8,4%	28,80	-11,2%	8,33	12,6%	37,72	-15,2%	7,95	17,9%
90	30,63	-4,9%	5,87	5,1%	26,95	-6,4%	8,90	6,9%	34,41	-8,8%	8,71	9,6%
120	29,89	-2,4%	6,02	2,5%	25,50	-5,3%	9,40	5,7%	32,16	-6,5%	9,32	7,0%
150	29,28	-2,0%	6,14	2,1%	24,52	-3,9%	9,78	4,0%	30,72	-4,5%	9,76	4,7%
180	28,73	-1,9%	6,26	1,9%	23,68	-3,4%	1,01	3,5%	29,34	-4,5%	10,2	4,7%
210	28,31	-1,5%	6,35	1,5%	23,01	-2,9%	1,04	2,9%	28,36	-3,3%	10,6	3,5%
240	27,96	-1,2%	6,43	1,3%	22,44	-2,5%	1,07	2,5%	27,48	-3,1%	10,9	3,2%

Verifica-se que na primeira meia hora, em termos percentuais relativos, a queda do fluxo, resultou em: 36,9, 65,1 e 69,1 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas, em ordem crescente. Apesar desta variação inicial diferenciada, verifica-se que os valores absolutos para os fluxos no tempo 240 min ficaram também relativamente próximos, entre 22,44 a 27,96 L.m⁻².h⁻¹, com uma média de 25,96 L.m⁻².h⁻¹ e com um desvio padrão de 3,06, ou seja, com um coeficiente de variação de 11,8 %. Nesta mesma análise para os valores do J₂₀ no tempo inicial, encontrou-se uma média de 97,43 L.m⁻².h⁻¹, com um desvio padrão de 44,6, ou seja, com um coeficiente de variação de 45,7 %, o que denota que do tempo inicial até o final houve uma atenuação das diferenças entre os valores absolutos de fluxo, tendendo a se aproximarem no transcorrer do tempo. Já para o caso de R_t, verifica-se que para as PTM de 240 e 300 mbar resultaram valores finais e um comportamento evolutivo semelhantes, enquanto que a PTM de 180 mbar resultou em valores bem distintos e inferiores das outras duas. Somente com estes resultados não é possível concluir qual das PTM não seguiu uma tendência esperada, pois tanto pode ter ocorrido distorção para a PTM de 180 mbar, quanto para qualquer uma das outras duas.

A partir dos resultados tomados de fluxo no tempo para pressões constantes, derivaram-se ainda análises do comportamento para J₂₀ e para R_t considerando também a variação das concentrações de SST para PTM fixa. Assim, os gráficos apresentados a seguir (Figura 37, Figura 38 e Figura 39) correspondem à linha E1-Petroquímico da Tabela 5, apresentado no subcapítulo 4.6.2 dos procedimentos metodológicos.

Figura 37 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J₂₀) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E1-Petroquímico, para a PTM = 180 mbar, para as diferentes concentrações de SST.



A partir do gráfico apresentado na Figura 37 pode-se analisar o comportamento da queda de J_{20} e do aumento de R_t no módulo de membranas submetida à filtração nas diferentes concentrações ensaiadas e para a PTM fixa em 180 mbar. Os gráficos para as demais PTM e variações de SST foram feitos na mesma escala, tanto para J_{20} quanto para R_t , permitindo a comparação visual das tendências de cada curva. Verifica-se que para a PTM de 180 mbar, tanto a queda do J_{20} quanto o aumento da R_t , apresentaram os menores valores absolutos, quando comparada às demais PTM.

Em termos absolutos e percentuais relativos é possível analisar os resultados também a partir da análise cruzada das três tabelas anteriores, onde se tem o extrato de dados coletados durante os ensaios. Destas tabelas, analisando somente os dados para a PTM de 180 mbar, verifica-se que o percentual relativo da queda de J_{20} , do tempo inicial até os primeiros 30 min, foi de: 52,0, 11,9 e 36,9 %, para cada concentração de SST de 8.000, 17.000 e 23.000 mg/L, respectivamente. Para esta PTM de 180 mbar, em média, J_{20} se reduziu em 33,6% na primeira meia hora. Seguindo a mesma análise verifica-se que os resultados percentuais relativos para o aumento de R_t na primeira meia hora foram de: 108,3, 13,5 e 58,5 %, também respectivamente para cada uma das concentrações de SST ensaiadas. O que se depreende destes resultados, bem como também é possível visualizar no gráfico, é que a concentração de 17.000 mg/L apresentou um resultado distinto e não esperado em termos de tendências comparadas com as demais concentrações de SST.

Sob um ponto de vista de filtração ideal, a expectativa seria a de que para uma mesma PTM, com o aumento da concentração de SST houvesse uma maior queda de J_{20} e um correspondente aumento de R_t . Neste caso, para os ensaios com PTM fixa em 180 mbar, estas tendências não foram observadas de forma ideal. Houve um comportamento relativamente similar tanto para J_{20} quanto para R_t nas concentrações de 8.000 e 23.000 mg/L, enquanto que a concentração de 17.000 mg/L se comportou relativamente de forma distinta das demais.

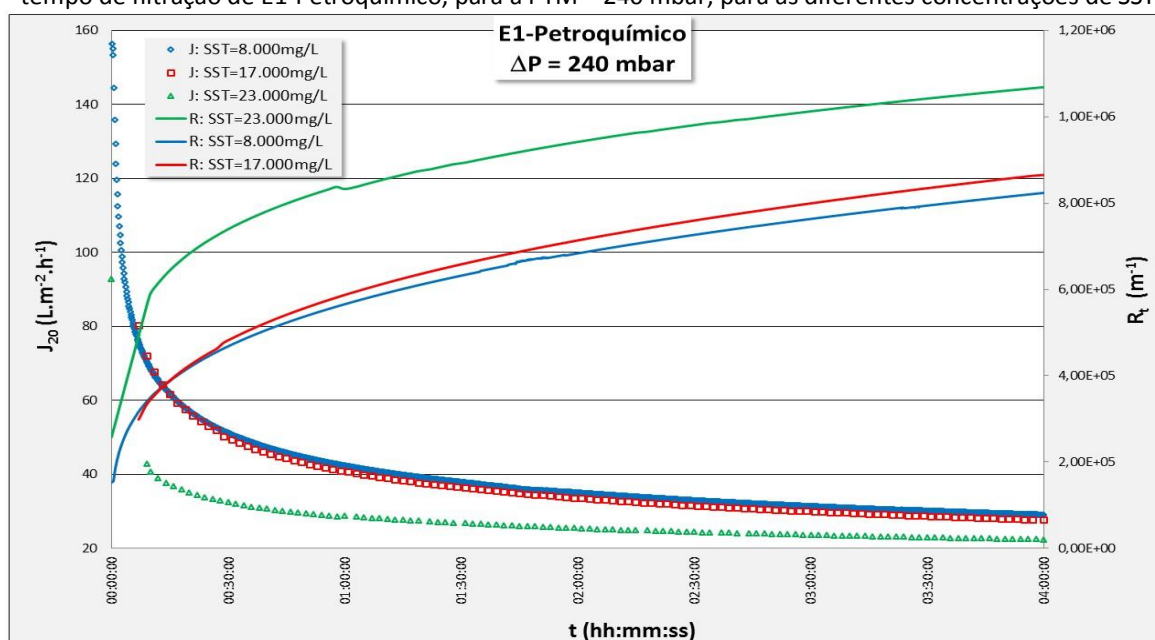
Uma das possibilidades a ser apontada como causa para esta divergência das tendências nas curvas encontradas, seriam os resultados de EPS, especialmente para a fração de EPS_{f_0} , que tipicamente é relacionada como fator indutor no incremento da resistência à filtração e conseqüentemente na redução do fluxo. Entretanto, ao se analisar o gráfico da Figura 32, verifica-se que para a concentração de 17.000 mg/L foram detectados as maiores frações de EPS_{f_0} , comparadas com as demais concentrações. Desta

forma, não é possível afirmar que houve uma interferência direta dos resultados de EPS sobre os resultados da filtração. Provavelmente estas divergências estejam mais relacionadas com as questões hidrodinâmicas dos procedimentos de filtração, como já explanado anteriormente.

Quanto aos valores absolutos finais, verifica-se nas tabelas anteriores que para o tempo 240 min estes resultados foram de: 26,34, 33,33 e 27,96 L.m⁻².h⁻¹, para cada um das concentrações de SST ensaiadas, em ordem crescente, respectivamente. Ou seja, confirma-se que houve uma tendência de resultado de J₂₀ relativamente similar para as concentrações de 8.000 e 23.000 mg/L, mas distinta para a concentração de 17.000 mg/L.

Analisando o comportamento dos valores absolutos durante todo o ensaio, tanto pelas tabelas anteriores, quanto pelo gráfico anterior, verifica-se que para a menor concentração, de 8.000 mg/L, é que corresponderam aos menores valores de J₂₀, enquanto que os maiores valores de J₂₀ corresponderam à concentração intermediária, de 17.000 mg/L. Isoladamente, é difícil estabelecer uma justificativa para tal comportamento, salvo pelas condições de ensaio que, com a busca de situarem-se de forma mais próxima à realidade de um MBR, contemplam parâmetros que podem variar durante a filtração, tais como o direcionamento das bolhas promotoras de turbulência e o próprio movimento relativo de um feixe de membrana com relação ao outro. Talvez esta relativa baixa PTM também tenha favorecido para que estes efeitos fossem potencializados no meio.

Figura 38 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J₂₀) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E1-Petroquímico, para a PTM = 240 mbar, para as diferentes concentrações de SST.

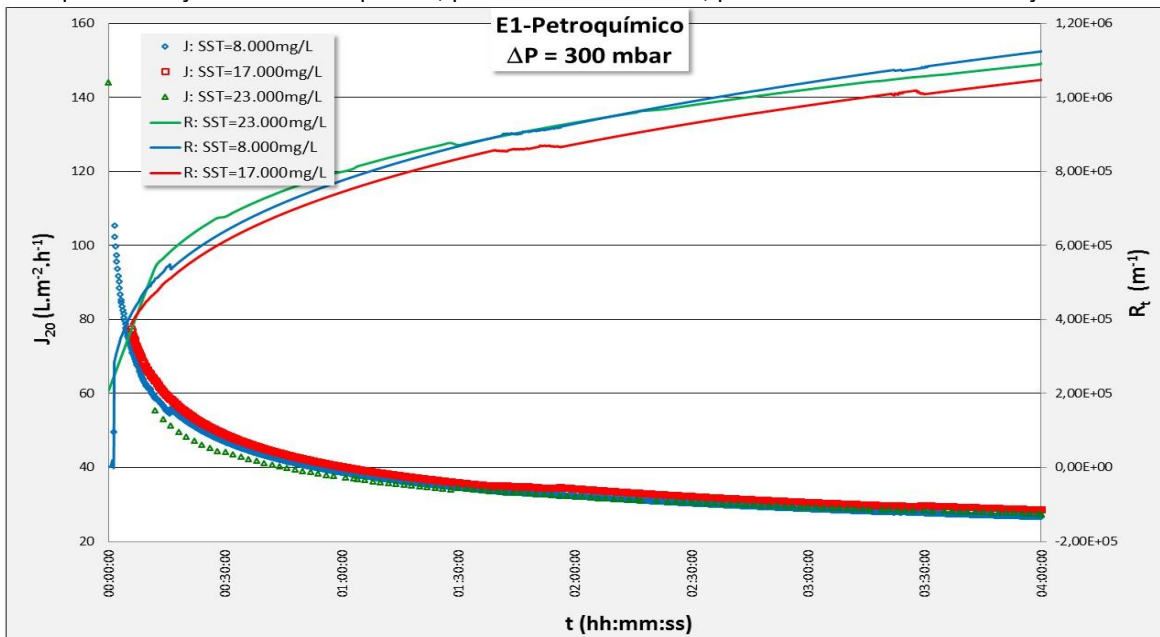


O gráfico apresentado na Figura 38 representa o comportamento de J_{20} e de R_t para as três diferentes concentrações de SST ensaiadas, para PTM fixa em 240 mbar. Nesta análise comparativa, foi evidenciada a expectativa de que para maiores concentrações de SST haja uma maior R_t e conseqüentemente haja menores valores de J_{20} . Houve uma relativa similaridade entre as concentrações 8.000 e de 17.000 mg/L de SST, enquanto que a concentração de 23.000 mg/L apresentou um comportamento distinto das demais.

Os percentuais relativos calculados para a redução de J_{20} na primeira meia hora, assim como nas análises anteriores, são os que apresentam os maiores valores. Das três tabelas anteriores, observa-se que estes resultados foram de: 67,2, 48,5 e 65,1 %, com uma média de 60,3%. Ou seja, maiores em média do que os mesmos resultados para a PTM de 180 mbar, evidenciando que para esta maior PTM (240 mbar) resultou em efeitos relacionados à formação dos mecanismos de bloqueio de forma mais intensa. Esta mesma extração de dados das tabelas anteriores, mas agora para R_t , resulta em percentuais relativos para a primeira meia hora de ensaio de: 204,8, 94,2 e 224,1%, para cada uma das concentrações ensaiadas, em ordem crescente, respectivamente. Ou seja, também comparando com a menor PTM (180 mbar), houve um maior efeito no incremento da R_t para esta maior PTM de 240 mbar.

Os valores absolutos encontrados ao final dos ensaios para J_{20} também foram relativamente similares, resultando em: 29,12, 27,72 e 22,44 $L.m^{-2}.h^{-1}$. Neste caso, o resultado mais destacado dos demais se deu para a concentração de 23.000 mg/L, conforme pode se verificar também no gráfico. Também se percebe que estes resultados absolutos, em média, são da mesma ordem de grandeza e relativamente semelhantes aos mesmos encontrados para a PTM de 180 mbar. Já para os valores de R_t , pode-se depreender dos dois gráficos anteriores que esta similaridade de resultados não ocorre. O que se depreende é que o aumento da PTM elevou a média dos resultados de resistência total à filtração, como esperado pelos modelos deste tipo de comportamento.

Figura 39 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E1-Petroquímico, para a PTM = 300 mbar, para as diferentes concentrações de SST.



O gráfico da Figura 39 representa o comportamento de J_{20} e da R_t para as três diferentes concentrações de SST ensaiadas, agora para PTM fixa em 300 mbar. Nesta análise comparativa, assim como para PTM de 240 mbar, também foi evidenciada a expectativa de que para maiores concentrações de SST haja uma maior R_t . Já os valores de J_{20} não tiveram exatamente esta mesma tendência de comportamento proporcional, pois a curva com os maiores valores correspondeu à concentração de 17.000 mg/L de SST. Entretanto, pode-se perceber graficamente que esta diferença é pouco significativa quando comparada às demais curvas, pois os resultados de fluxo para as diferentes concentrações de SST e para esta PTM de 300 mbar foram bem semelhantes.

Os percentuais relativos calculados para a redução de J_{20} na primeira meia hora, assim como nas análises anteriores, são os que apresentam os maiores valores. Das três tabelas anteriores, observa-se que estes resultados foram de: 71,7, 56,2 e 69,1 %, com uma média de 65,7%. Ou seja maiores em média do que os mesmos resultados para as PTM de 180 e de 240 mbar, evidenciando que, quanto maior a PTM maiores são os efeitos sobre a queda de fluxo no momento inicial da filtração, relacionado à formação dos mecanismos de bloqueio de forma mais intensa nesta situação. Esta mesma extração de dados das tabelas anteriores, mas agora para R_t , resulta em percentuais relativos para a primeira meia hora de ensaio de: 253,4, 128,3 e 224,1 %, também para cada uma das concentrações ensaiadas,

em ordem crescente, respectivamente. Ou seja, também comparando com as outras duas menores PTM ensaiadas, houve um maior efeito no incremento da R_t para esta maior PTM.

Os valores absolutos encontrados ao final dos ensaios para J_{20} nesta PTM de 300 mbar foram ainda mais similares quando comparados com as demais PTM ensaiadas. Estes resultados absolutos de J_{20} para o tempo 240 min foram: 26,66, 28,62 e 27,48 $L.m^{-2}.h^{-1}$, respectivamente para cada uma das concentrações de SST em ordem crescente. Também para os valores de R_t , a visualização do gráfico já permite evidenciar que, em média, os resultados absolutos para esta PTM são mais semelhantes entre si quando comparados com as demais PTM ensaiadas.

Com isto, se depreende que, para E1-Petroquímico, com o aumento da PTM, o aumento da concentração de SST fez com que os mecanismos de bloqueio se processassem mais rapidamente sobre a membrana, ou seja, a redução do fluxo de permeado e o aumento da resistência total à filtração na primeira meia hora de ensaio teve uma maior intensidade quanto maior a concentração de SST. Ainda ao se analisar os valores absolutos encontrados nos tempos finais do ensaio, este aumento da concentração de SST apresentou uma tendência de estabilização e de não perturbação nos valores de fluxo de permeado.

Ainda com relação à análise das resistências, pode-se afirmar que o valor da R_t no tempo inicial corresponde muito proximamente ao valor da resistência intrínseca da membrana (R_m), conforme Equação 3. Assim, ao se analisar a diferença entre o valor da resistência no tempo final (240 min) e no tempo inicial, resulta a contribuição efetiva dos mecanismos de bloqueio na formação da R_t . Assim, a partir dos extratos das três tabelas anteriormente apresentadas (Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13) efetuaram-se os cálculos referentes a esta diferença percentual entre os tempos final e inicial, permitindo a análise da contribuição dos mecanismos de bloqueio como fator de formação da R_t , e como se dá a correlação destes com as PTM e com as concentrações de SST. Estes resultados são apresentados na Tabela 14, juntamente com suas médias e desvios padrão, seguidos ainda de uma análise do coeficiente de correlação de Pearson.

Tabela 14 – Síntese dos resultados da variação percentual entre a R_t final e a R_t inicial dos ensaios de filtração de E1-Petroquímico, para as diferentes concentrações de SST e PTM ensaiadas.

		Variação percentual da R_t fina e R_t inicial (%)					Correlação Pearson (% R_t X PTM)
PTM	SST	180 mbar	240 mbar	300 mbar	Média	Desvio Padrão	
	8.000 mg/L	180,5	437,0	521,9	379,80	177,74	0,960
	17.000 mg/L	61,3	245,5	290,8	199,20	121,55	0,944
	23.000 mg/L	97,9	313,9	424,5	278,77	166,11	0,983
	Média	113,23	332,13	412,40			
	Desvio Padrão	61,06	97,04	116,02			
	Correlação Pearson (% R_t X SST)	-0,756	-0,719	-0,521			

A partir desta tabela pode-se constatar o comportamento evolutivo da R_t para uma mesma concentração de SST e com o aumento das PTM. O aumento da PTM corresponde ao aumento dos efeitos da R_t ao longo dos 240 min de ensaios para o E1-Petroquímico, ou seja, da contribuição dos mecanismos de bloqueio como fator para caracterizar o aumento da R_t e a redução do J_{20} . Os valores encontrados para os coeficientes de correlação (0,960, 0,944 e 0,983) indicam uma forte correlação para estes resultados da variação percentual da R_t versus o aumento da PTM.

Por outro lado, analisando a evolução da R_t para uma PTM fixa e com o aumento da concentração de SST, constata-se que houve uma tendência de redução do incremento da R_t ao longo dos 240 min quanto maior foi a concentração de SST, apesar de que para a concentração de 23.000 mg/L os resultados foram maiores do que os para a concentração de 17.000 mg/L. Dessa forma o coeficiente de Pearson indica correlações inversamente proporcionais, de moderada, -0,521 para a PTM de 300 mbar, a fortes, -0,756 e -0,719 para as PTM de 180 e de 240 mbar, respectivamente. É possível também verificar que o aumento da PTM correspondeu à redução da força de correlação, talvez indicando uma correlação fraca entre SST e variação da R_t , caso houvesse PTM maiores.

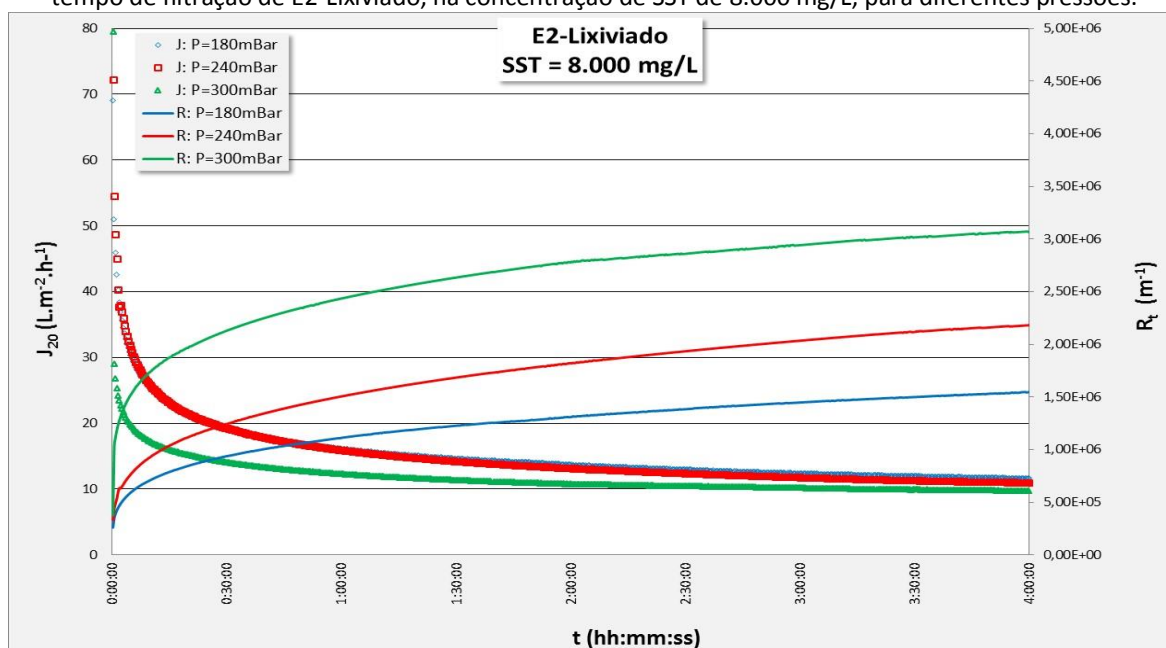
Cabe destacar que analisando-se os valores absolutos da R_t , verifica-se que esta tem uma tendência média de aumento com o aumento da concentração de SST, conforme já analisado. Estes resultados da Tabela 14 demonstram porém, que o incremento sobre a R_t inicial tende a se reduzir com o aumento da concentração de SST, caracterizando, de certa forma, a contribuição dos mecanismos de bloqueio na formação da R_t . Esta relação vincula-se ao fato de que para as maiores concentrações de SST correspondem R_t iniciais também

maiores, mas que o incremento sobre esta R_t inicial para formar a R_t final, se dá de forma inversamente proporcional com o aumento da concentração de SST.

5.2.2 Filtração do Lodo E2-Lixiviado

A partir dos ensaios com o lodo E2-Lixiviado, os dados foram tratados e possibilitaram a geração dos gráficos apresentados nas figuras em sequência (Figura 40, Figura 41 e Figura 42), permitindo analisar ao longo do tempo de ensaio o comportamento da queda do J_{20} e do aumento da R_t para cada relação PTM e concentração de SST ensaiada. Estes gráficos correspondem aos cruzamentos previstos pela Tabela 4, na linha E2-Lixiviado, apresentado no subcapítulo 4.6.2 nos procedimentos metodológicos.

Figura 40 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E2-Lixiviado, na concentração de SST de 8.000 mg/L, para diferentes pressões.



Do gráfico na Figura 40 percebe-se o típico comportamento da variação do fluxo ao longo do tempo como uma curva decrescente no formato de uma função potência, assim como o correspondente aumento da resistência. Em um momento inicial a redução do J_{20} é mais intensa, justificada pela formação dos mecanismos de bloqueio junto à membrana, resultando no conseqüente aumento da R_t . Para analisar melhor estes resultados é apresentada a Tabela 15 com um extrato dos valores de J_{20} e da R_t em intervalos sucessivos de 30 minutos, do tempo inicial até o tempo final de ensaio, calculando-se ainda o percentual relativo entre cada intervalo de tempo, para cada uma das PTM ensaiadas.

Tabela 15 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J_{20}) e resistência total (R_T) da filtração de E2-Lixiviado, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 8.000 mg/L

TEMPO DE ENSAIO (min)	PTM = 180 mbar				PTM = 240 mbar				PTM = 300 mbar			
	FLUXO DE PERMEADO J_{20} (L.m ⁻² .h ⁻¹)		RESISTÊNCIA TOTAL R_T (x10 ⁵ m ⁻¹)		FLUXO DE PERMEADO J_{20} (L.m ⁻² .h ⁻¹)		RESISTÊNCIA TOTAL R_T (x10 ⁵ m ⁻¹)		FLUXO DE PERMEADO J_{20} (L.m ⁻² .h ⁻¹)		RESISTÊNCIA TOTAL R_T (x10 ⁵ m ⁻¹)	
inicial	69,02	-	2,61	-	72,17	-	3,32	-	79,57	-	3,77	-
30	19,18	-72,2%	9,38	259,8%	19,32	-73,2%	12,4	273,5%	14,11	-82,3%	21,2	463,8%
60	16,17	-15,7%	11,1	18,6%	15,96	-17,4%	15,0	21,1%	12,32	-12,7%	24,3	14,5%
90	14,66	-9,4%	12,3	10,3%	14,24	-10,8%	16,8	12,1%	11,38	-7,7%	26,3	8,3%
120	13,74	-6,3%	13,1	6,7%	13,17	-7,5%	18,2	8,1%	10,77	-5,3%	27,8	5,6%
150	13,00	-5,4%	13,8	5,7%	12,41	-5,8%	19,3	6,2%	10,49	-2,7%	28,6	2,7%
180	12,42	-4,4%	14,5	4,6%	11,79	-5,0%	20,3	5,3%	10,19	-2,8%	29,4	2,9%
210	12,00	-3,4%	15,0	3,6%	11,32	-3,9%	21,2	4,1%	9,94	-2,4%	30,1	2,5%
240	11,64	-3,0%	15,5	3,1%	10,99	-2,9%	21,8	3,0%	9,76	-1,9%	30,7	1,9%

Analisando os dados da tabela fica mais evidente a redução significativa do J_{20} na primeira meia hora de ensaio, sendo que percentualmente estes valores foram de: 72,2, 73,2 e 82,3 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas, em ordem crescente. Na mesma linha de análise, também para o aumento da R_t na primeira meia hora de ensaio, os resultados demonstraram-se muito superiores em termos comparativos, com valores de: 259,8, 273,5 e 463,8 %, para as respectivas PTM.

Verifica-se ainda que na comparação de um tempo com o outro, a partir da primeira meia hora de ensaio, os percentuais de redução de fluxo e de aumento da resistência, em módulo, foram cada vez menores. Comparado com a análise já realizada para o lodo E1-Petroquímico, verifica-se que para este lodo E2-Lixiviado, a primeira meia hora nesta PTM, resultou em queda do J_{20} e uma aumento da R_t mais acentuados.

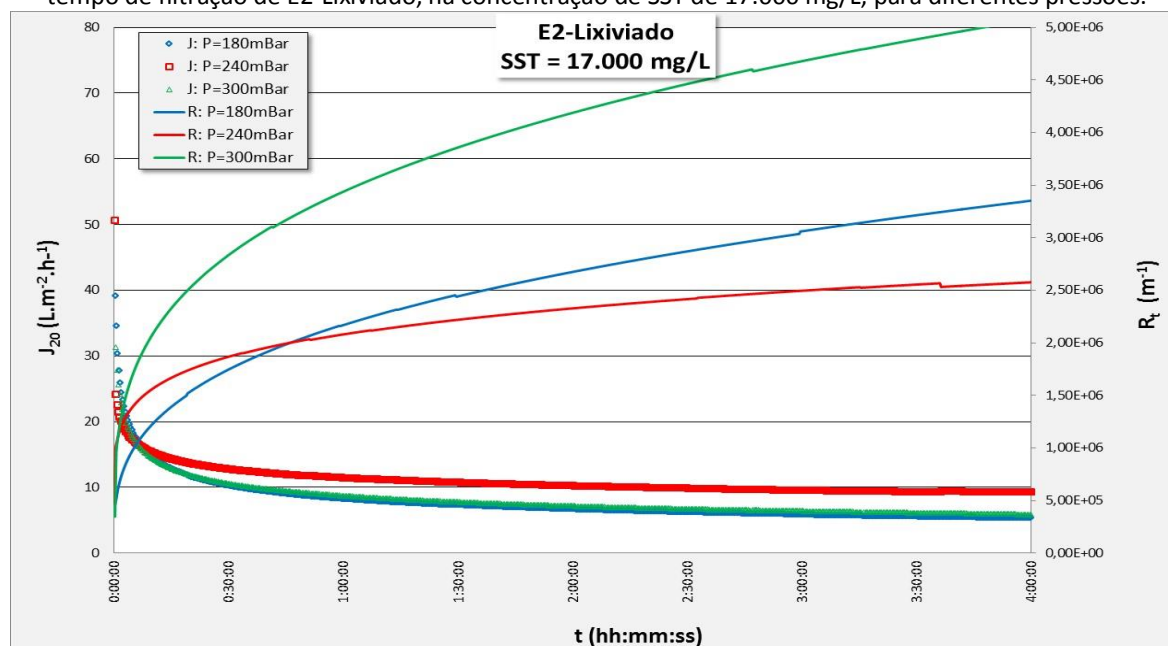
Outro resultado possível de se depreender do gráfico e da tabela, é que os valores absolutos para J_{20} nos momentos iniciais são diretamente proporcionais aos maiores valores de PTM, mas que ao final das quatro horas de ensaio estes valores se reduziram a patamares muito similares. Ao final, J_{20} se estabilizou nos valores de: 11,64, 10,99 e 9,76 L.m⁻².h⁻¹, respectivamente para cada uma das PTM, em ordem crescente. Ou seja, com uma média de 10,80 L.m⁻².h⁻¹, com um desvio padrão de 0,95 e com um coeficiente de variação de 8,8 %. Fazendo a mesma comparação com os valores correspondentes ao fluxos no tempo denominado inicial, a média resulta em 73,59 L.m⁻².h⁻¹ com um desvio padrão de 5,42, ou seja, com um coeficiente de variação de 7,37 %. Assim, é possível perceber que os resultados foram relativamente estáveis durante todo o ensaio, com uma baixa dispersão dos valores no entorno da média, independentemente da PTM crescente.

Comparativamente ao E1-Petroquímico, este resultado foi diferenciado, pois não se observou para o E2-Lixiviado, a atenuação da dispersão ao longo do tempo de ensaio.

Com relação ao aumento da R_t , transcorridos os momentos iniciais, o comportamento desta variável tem uma tendência esperada. Ou seja, para uma concentração fixa, quanto menor a PTM, menor a R_t , devido a menor ação dos mecanismos de bloqueio junto à membrana. Assim, resulta que os valores absolutos finais para a resistência total são distintos entre si e crescentes com o crescimento das pressões.

Comparando com os mesmos resultados para o lodo E1-Petroquímico, verifica-se que para E2-Lixiviado os mecanismos de bloqueio se evidenciaram de forma bem mais intensas, reduzindo os valores absolutos de J_{20} e aumentando os valores das R_t . As contribuições dos mecanismos de bloqueio também foram mais intensas, quando comparadas com os resultados obtidos para o lodo E1-Petroquímico. Estes resultados distintos relacionam-se às diferenças destes lodos, que podem ser constatadas pelas caracterizações realizadas.

Figura 41 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E2-Lixiviado, na concentração de SST de 17.000 mg/L, para diferentes pressões.



Do gráfico na Figura 41 também percebe-se o típico comportamento da variação do fluxo ao longo do tempo. O momento inicial demonstrou-se também como significativo para a redução do J_{20} e para o aumento da R_t . A Tabela 16 apresenta os extratos feitos de J_{20} e R_t em tempos sucessivos a cada 30 minutos, desde o tempo inicial até o final, permitindo a análise dos valores absolutos e das respectivas variações percentuais.

Tabela 16 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J_{20}) e resistência total (R_T) da filtração de E2-Lixiviado, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 17.000 mg/L

TEMPO DE ENSAIO (min)	PTM = 180 mbar				PTM = 240 mbar				PTM = 300 mbar			
	FLUXO DE PERMEADO J_{20} (L.m ⁻² .h ⁻¹)		RESISTÊNCIA TOTAL R_T (x10 ⁵ m ⁻¹)		FLUXO DE PERMEADO J_{20} (L.m ⁻² .h ⁻¹)		RESISTÊNCIA TOTAL R_T (x10 ⁵ m ⁻¹)		FLUXO DE PERMEADO J_{20} (L.m ⁻² .h ⁻¹)		RESISTÊNCIA TOTAL R_T (x10 ⁵ m ⁻¹)	
inicial	39,14	-	4,60	-	50,64	-	4,74	-	86,42	-	3,47	-
30	10,34	-73,6%	17,4	278,5%	12,85	-74,6%	18,7	294,0%	10,61	-87,7%	28,2	714,3%
60	8,30	-19,8%	21,7	24,6%	11,53	-10,3%	20,8	11,4%	8,72	-17,8%	34,4	21,7%
90	7,37	-11,1%	24,4	12,5%	10,81	-6,3%	22,2	6,7%	7,77	-10,9%	38,6	12,2%
120	6,73	-8,7%	26,7	9,5%	10,30	-4,7%	23,3	4,9%	7,16	-7,9%	41,9	8,5%
150	6,27	-6,8%	28,7	7,3%	9,93	-3,6%	24,2	3,8%	6,72	-6,2%	44,6	6,6%
180	5,88	-6,3%	30,6	6,7%	9,61	-3,2%	25,0	3,3%	6,41	-4,6%	46,8	4,9%
210	5,60	-4,8%	32,1	5,0%	9,39	-2,3%	25,5	2,4%	6,13	-4,3%	48,9	4,4%
240	5,37	-4,1%	33,5	4,3%	9,31	-0,8%	25,8	0,8%	5,88	-4,2%	51,0	4,4%

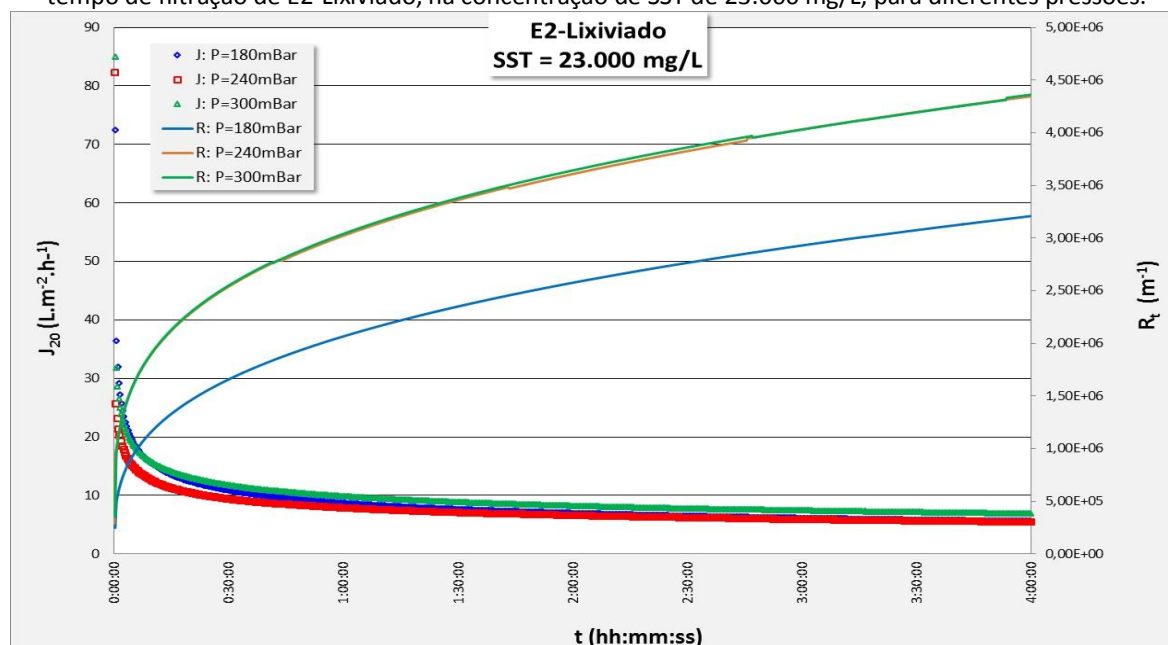
Similarmente ao evidenciado para a concentração de 8.000 mg/L de SST, nesta concentração de 17.000 mg/L também se verifica que na primeira meia hora houve uma queda mais significativa do J_{20} e um conseqüente maior aumento da R_t . A diferença percentual relativa entre os intervalos de tempo, respectivamente para cada PTM em ordem crescente, para a queda de J_{20} resultou em: 73,6, 74,6 e 87,7 %; já para o aumento da R_t , na mesma ordem, os resultados foram de: 278,5, 294,0 e 714,3 %.

Nesta concentração ocorreram algumas instabilidades nas tendências, especialmente nas curvas de aumento da R_t . Para a PTM de 300 mbar houve um aumento da R_t bem mais acentuado do que para as demais PTM. Ainda verifica-se que a curva da R_t para a PTM de 180 mbar, em determinado momento cruzou e superou em valores a curva da R_t para a PTM de 240 mbar. Aparentemente não se tem uma justificativa evidenciada, a não ser devido às possibilidades de variações inerentes ao sistema de filtração submetidas nos testes, que, por sua vez, são similares às possibilidades de ocorrência também em um reator MBR em escala real.

Com relação aos valores absolutos finais, verifica-se que para J_{20} os resultados foram os seguintes: 5,37, 9,31 e 5,88 L.m⁻².h⁻¹, com uma média de 6,85 L.m⁻².h⁻¹ e um desvio padrão de 2,14, ou seja, com um coeficiente de variação de 31,24 %. Os valores absolutos no tempo inicial variaram de forma diretamente proporcional ao aumento da PTM, porém com uma média de 58,73 L.m⁻².h⁻¹ e um desvio padrão de 24,66, ou seja, com um coeficiente de variação de 42,0 %. Assim, denota-se que para esta PTM, a dispersão dos valores em torno da média foi mais significativa, quando comparada com a PTM anterior. Ainda, apesar desta dispersão ter se reduzido com o tempo de ensaio, percebe-se que a

redução foi relativamente baixa, quando se compara com os mesmos resultados obtidos para o lodo E1-Petroquímico. O mesmo não ocorre com a R_t , que notadamente aumenta sua dispersão ao longo do tempo de ensaio.

Figura 42 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E2-Lixiviado, na concentração de SST de 23.000 mg/L, para diferentes pressões.



O comportamento da queda de J_{20} e do aumento da R_t visualizado no gráfico da Figura 42, também se apresenta da forma esperada, assim como nas duas concentrações de SST anteriormente analisadas. É perceptível a maior queda nos valores de J_{20} e de aumento da R_t nos momentos iniciais da filtração. Na Tabela 17, assim como nas duas anteriores, se apresenta o extrato dos resultados agora para a concentração de SST em 23.000 mg/L.

Tabela 17 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J_{20}) e resistência total (R_t) da filtração de E2-Lixiviado, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 23.000 mg/L

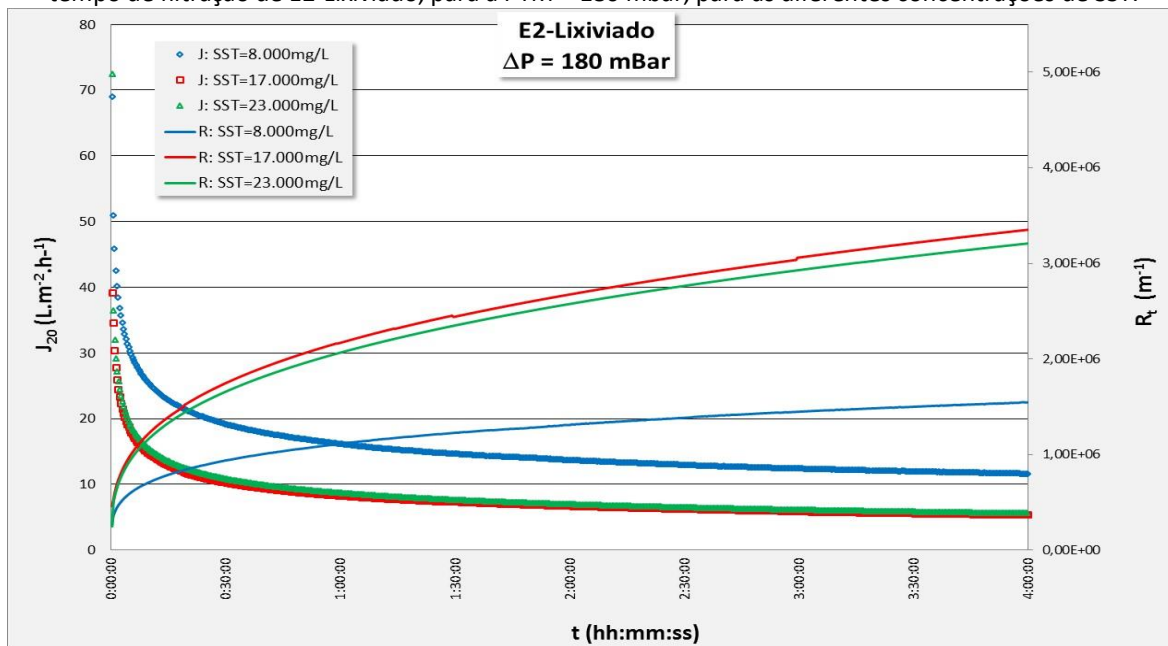
TEMPO DE ENSAIO (min)	PTM = 180 mbar		PTM = 240 mbar		PTM = 300 mbar	
	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L.m^{-2}.h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_t (m^{-1})	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L.m^{-2}.h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_t (m^{-1})	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L.m^{-2}.h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_t (m^{-1})
inicial	72,51	-	82,41	-	85,07	-
30	10,89	-85,0%	9,46	-88,5%	11,80	-86,1%
60	8,72	-19,9%	7,94	-16,1%	9,86	-16,4%
90	7,66	-12,1%	7,14	-10,1%	8,87	-10,0%
120	6,99	-8,8%	6,65	-6,9%	8,23	-7,2%
150	6,51	-6,9%	6,27	-5,7%	7,77	-5,7%
180	6,14	-5,6%	5,95	-5,1%	7,44	-4,2%
210	5,85	-4,7%	5,72	-3,9%	7,15	-3,9%
240	5,61	-4,2%	5,52	-3,5%	6,87	-3,9%

Verifica-se que na primeira meia hora, em termos percentuais relativos, a queda do fluxo resultou em: 85,0, 88,5 e 86,1 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas, em ordem crescente. Apesar desta variação inicial diferenciada, verifica-se que os valores absolutos para os fluxos no tempo 240 min ficaram também relativamente próximos: 5,61, 5,52 e 6,87 L.m⁻².h⁻¹, com uma média de 6,00 L.m⁻².h⁻¹ e com um desvio padrão de 0,75, ou seja com um coeficiente de variação de 12,5 %. A mesma análise para os valores iniciais, resulta numa média de valores absolutos de 80,00 L.m⁻².h⁻¹ e com um desvio padrão de 6,62, ou seja com um coeficiente de variação de 8,3 %. Assim, neste caso, como para as outras duas PTM do E2-Lixiviado, verifica-se uma tendência distinta do E1-Petroquímico, pois houve um comportamento mais estável quando se compara a dispersão no entorno dos valores médios no tempo inicial e final para J₂₀.

Já para o caso das R_t verifica-se que para as PTM de 240 e 300 mbar, resultaram valores finais e até um comportamento evolutivo bem semelhantes, enquanto que a PTM de 180 mbar resultou em valores bem distintos e inferiores as outras duas. Este mesmo comportamento também ocorreu para a filtração do lodo E1-Petroquímico, para esta mesma concentração de SST, aparentemente sem uma justificativa comum. Somente com estes resultados não é possível concluir qual das PTM não seguiu uma tendência esperada, pois tanto pode ter ocorrido alguma distorção para a PTM de 180 mbar, quanto para qualquer uma das outras duas. O que se reafirma nos resultados, em termos de fluxo, é que passados os momentos iniciais da filtração, há uma tendência de que os valores absolutos sejam relativamente similares.

A partir destes resultados tomados de fluxo e de resistência no tempo para pressões constantes, derivaram-se análises do comportamento do J₂₀ e da R_t considerando também a variação das concentrações para PTM fixas. Assim, os gráficos apresentados a seguir (Figura 43, Figura 44 e Figura 45) correspondem à linha E2-Lixiviado da Tabela 5, apresentado no subcapítulo 4.6.2 dos procedimentos metodológicos.

Figura 43 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E2-Lixiviado, para a PTM = 180 mbar, para as diferentes concentrações de SST.



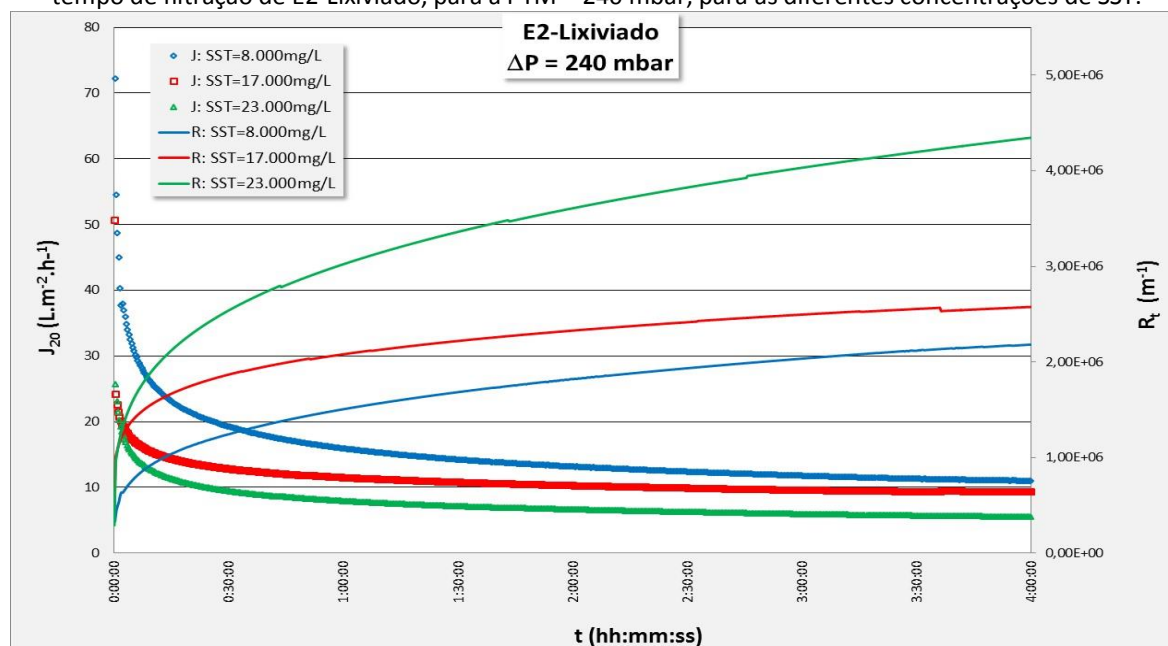
A partir do gráfico apresentado na Figura 43 pode-se analisar o comportamento de queda do J_{20} e de aumento da R_t no módulo de membranas submetida à filtração nas diferentes concentrações de SST ensaiadas e para a PTM fixa em 180 mbar. Os gráficos para as demais PTM e variações de concentrações de SST foram feitos na mesma escala, tanto para J_{20} quanto para R_t , permitindo a comparação visual das tendências de cada curva. Em termos absolutos e percentuais relativos é possível analisar os resultados também a partir da análise cruzada das três tabelas anteriores correspondentes aos extratos de dados dos ensaios para o E2-Lixiviado.

Analisando os resultados das três tabelas anteriores somente para a PTM de 180 mbar, verifica-se que os percentuais relativos da queda do J_{20} no intervalo correspondente aos primeiros 30 min, foram de: 72,2, 73,6 e 85,0 %, para cada uma das concentrações de SST de 8.000, 17.000 e 23.000 mg/L, respectivamente. Para esta PTM de 180 mbar, em média o J_{20} se reduziu em 76,9% nesta primeira meia hora. Seguindo a mesma análise verifica-se que os resultados percentuais relativos para o aumento da resistência na primeira meia hora foram de: 259,8, 278,5 e 234,3 %, também respectivamente para cada uma das concentração de SST ensaiadas; o que resultou numa média de aumento da resistência na primeira meia hora de ensaio em 257,5%. O que se depreende destes resultados é que para esta PTM houve, nesta primeira meia hora houve uma certa regularidade quanto a

formação da R_t , ou seja, que o aumento da concentração não implicou em uma diferença significativa para os resultados do incremento de R_t nesta primeira meia hora.

Quanto aos valores absolutos finais, verifica-se nas tabelas anteriores que para o tempo 240 min estes resultados foram de: 11,64, 5,37 e 5,61 L.m⁻².h⁻¹, para cada um das concentrações de SST ensaiadas, respectivamente em ordem crescente. Estes resultados resultam em uma média de 7,54 L.m⁻².h⁻¹ com um desvio padrão de 3,55, ou seja, com um coeficiente de variação de 47,1 %. Pode-se visualizar no gráfico que para esta PTM houve um comportamento significativamente diferenciado para a concentração de 8.000 mg/L de SST, enquanto que para as concentrações de 17.000 e 23.000 mg/L os resultados finais e também os comportamentos evolutivos, tanto de J_{20} , quanto de R_t , foram bastante similares. Em uma primeira análise não é possível afirmar o motivo deste comportamento diferenciado para a concentração de SST de 8.000 mg/L, com relação as demais.

Figura 44 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E2-Lixiviado, para a PTM = 240 mbar, para as diferentes concentrações de SST.



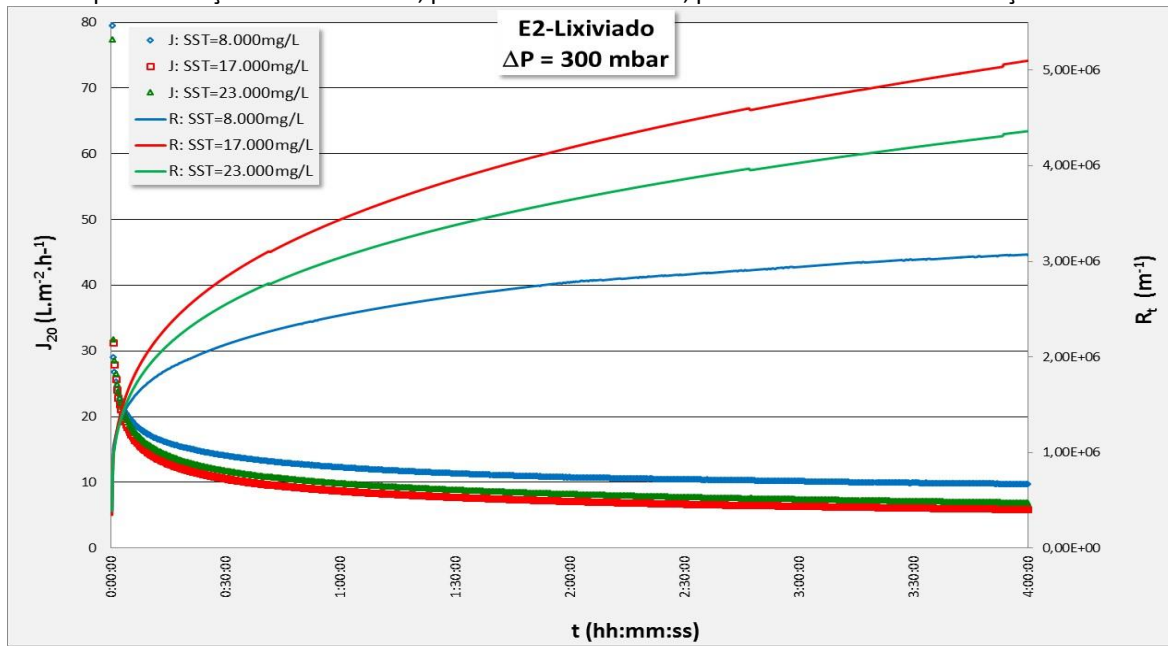
O gráfico apresentado na Figura 44 representa o comportamento do J_{20} e da R_t para as três diferentes concentrações de SST ensaiadas, para PTM fixa em 240 mbar. Nesta análise comparativa foi evidenciada a expectativa de que para maiores concentrações de SST haja uma maior R_t e conseqüentemente haja menores valores de J_{20} .

Os percentuais relativos calculados para a redução de J_{20} na primeira meia hora, assim como nas análises anteriores, são os que apresentam os maiores valores. Das três tabelas

anteriores, observa-se que estes resultados foram de: 73,2, 74,6 e 88,5 %, com uma média de 78,8%. Ou seja, maiores em média do que os mesmos resultados para a PTM de 180 mbar, evidenciando que para esta maior PTM (240 mbar) resultou em efeitos mais intensos relacionados à formação dos mecanismos de bloqueio nos momentos iniciais da filtração. Esta mesma extração de dados das tabelas anteriores, mas agora para a R_t nas diferentes concentrações de SST, resultou em percentuais relativos para a primeira meia hora de ensaio de: 273,5, 294,0 e 172,1 %, para cada uma das concentrações ensaiadas, em ordem crescente, respectivamente, correspondente a uma média de 246,5%. Ou seja, também comparando com a PTM de 180 mbar, percebe que para esta primeira meia hora os incrementos médios para a formação da R_t foram relativamente semelhantes.

Os valores absolutos encontrados ao final dos ensaios para J_{20} , para cada uma das concentrações de SST, respectivamente em ordem crescente, ficaram em: 10,99, 9,31 e 5,52 $L.m^{-2}.h^{-1}$, o que resulta numa média de 8,6 $L.m^{-2}.h^{-1}$ com um desvio padrão de 2,8 e com um coeficiente de variação de 32,6 %. Apesar de não tão similares, com estes resultados se verifica uma proporcionalidade inversa com o aumento das concentrações de SST, ou seja, para as concentrações menores, maiores são os resultados de fluxo. É também possível evidenciar que, em média, estes valores absolutos de J_{20} resultaram maiores do que os encontrados para a PTM de 180 mbar, denotando uma tendência de que para este lodo E2-Lixiviado, um maior aumento de PTM se relaciona com um maior aumento de J_{20} . Quanto aos valores da R_t , comparando-se os dois gráficos anteriores, correspondentes às PTM de 180 e de 240 mbar, verifica-se que houve um aumento médio dos valores para a PTM maior.

Figura 45 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E2-Lixiviado, para a PTM = 300 mbar, para as diferentes concentrações de SST.



O gráfico da Figura 45 representa o comportamento do J_{20} e da R_t para as três diferentes concentrações de SST ensaiadas, agora para PTM fixa em 300 mbar. Nesta análise comparativa, verifica-se que os resultados da R_t indicaram que houve uma inversão entre as curvas de SST de 17.000 e de 23.000 mg/L, pois a tendência esperada seria a de que a concentração de 23.000 mg/L resultasse nas maiores R_t , o que não ocorreu. De forma mais tênue também se percebe este mesmo resultado invertido e para as mesmas concentrações, nas curvas de queda do J_{20} , onde os menores fluxos ocorreram para a concentração de SST de 17.000 mg/L e não para a concentração de 23.000 mg/L de SST. Entretanto, para este caso do fluxo, as curvas tiveram um comportamento bastante similar, tanto no decaimento das curvas, quanto de valores absolutos.

Os percentuais calculados para a redução do J_{20} na primeira meia hora, assim como nas análises anteriores, são os que apresentam os maiores valores. Das três tabelas anteriores, observa-se que estes resultados foram de: 82,3, 87,7 e 86,1 %, com uma média de 85,4%. Ou seja, uma média maior do que as encontradas para as PTM anteriores, confirmando-se que para as maiores PTM, maior foi a queda do J_{20} nos momento iniciais dos ensaios de filtração. Esta mesma extração de dados das tabelas anteriores, mas agora para a R_t , resulta em percentuais relativos para a primeira meia hora de ensaio de: 463,8, 714,3 e 169,3 %, também para cada uma das concentrações ensaiadas, respectivamente em ordem crescente, correspondente a uma média de 449,1 %. Ou seja, comparando com as outras

duas menores PTM ensaiadas, para este caso houve um aumento médio significativo para a contribuição da R_t nesta primeira meia hora de ensaio.

Os valores absolutos encontrados ao final dos ensaios para o J_{20} nesta PTM de 300 mbar foram: 9,76, 5,88 e 6,87 $L.m^{-2}.h^{-1}$, para cada uma das concentrações de SST, respectivamente em ordem crescente; resultando em uma média de 7,50 $L.m^{-2}.h^{-1}$, desvio padrão de 2,0, com um coeficiente de variação de 26,7 %. Neste caso, comparado com as duas PTM anteriores, o esperado seria de um aumento de J_{20} , o que não se confirmou, havendo sim uma redução chegando a uma média bem similar a encontrada para a PTM de 180 mbar. Além disso, o coeficiente de variação menor comparado com os encontrados para as outras duas PTM, denota uma tendência a uma maior atenuação da variação de J_{20} com o tempo e com o aumento da PTM. Com relação à R_t , verifica-se em uma análise comparativa dos valores absolutos finais que houve um aumento médio nos resultados, correspondente ao aumento da PTM.

Esta situação de redução do fluxo e aumento da resistência para a PTM de 300 mbar pode ser correlacionada aos resultados de EPS, especialmente da fração fortemente ligada, EPS_{fo} , que, comparada com os valores encontrados para E1-Petroquímico, resultaram bem superiores, conforme pode ser visto na Tabela 10. Além disto, também verifica-se que para E2-Lixiviado ao se analisar os resultados de massa específica e características físicas dos biossólidos, quando comparados com E1-Petroquímico, este lodo foi o que apresentou os menores diâmetros de partículas mas com as maiores massas específicas. No que se refere a formação dos mecanismos de bloqueio, pode ser apontada uma possível tendência de que esta característica possa estar contribuindo com esta redução de fluxo nesta pressão, devido a maior densidade das partículas favorecerem a um maior efeito de colmatação junto à membrana.

Similarmente ao que se verificou também para o E1-Lixiviado, se depreende que para o E2-Lixiviado, com o aumento da PTM, o aumento da concentração de SST fez com que os mecanismos de bloqueio se processassem mais rapidamente sobre a membrana, ou seja, a redução do J_{20} e o aumento da R_t na primeira meia hora de ensaio teve uma maior intensidade quanto maior a concentração de SST. Entretanto, verificou-se que os valores de J_{20} ao final dos 240 min de ensaio não resultaram tão semelhantes em média, quando comparados com a tendência observada para o E1-Petroquímico, assim como resultaram em valores absolutos bem inferiores. Ainda analisando os valores evolutivos da queda de

J_{20} nas três tabelas correspondentes aos extratos feitos dos ensaios para E2-Lixiviado, verifica-se tanto pelos valores absolutos, mas principalmente pelos percentuais relativos, que com o passar do tempo, estes valores tendem a se reduzir, permitindo induzir que se houvesse um maior tempo de ensaio para este efluente, poderiam ser observados valores mais similares entre si. Dessa forma, também é possível afirmar que com o decorrer do tempo há a tendência que os efeitos do aumento da PTM não contribuem para incrementar J_{20} , mas que, por outro lado, incrementam os valores de R_t .

Assim como para E1-Petroquímico, estes resultados para E2-Lixiviado denotam que o aumento da PTM para compensar uma maior concentração de SST não é uma estratégia operacional efetiva, pois eleva o consumo energético sem gerar ganhos em termos de aumento de fluxo de permeado.

Ainda como forma de analisar a contribuição dos mecanismos de bloqueio para a formação da R_t , analisaram-se as diferenças percentuais entre as R_t dos tempos inicial e final. Com o pressuposto de que a R_t no tempo inicial é muito similar a R_m , este resultado permite inferir a contribuição dos mecanismos de bloqueio para a formação da R_t final para cada concentração de SST e PTM ensaiadas. A Tabela 18 apresenta estes resultados do percentual de incremento de resistência para E2-Lixiviado, seguido das respectivas médias, desvios padrão e os coeficientes de correlação de Pearson.

Tabela 18 – Síntese dos resultados da variação percentual entre a R_t final e a R_t inicial dos ensaios de filtração de E2-Lixiviado, para as diferentes concentrações de SST e PTM ensaiadas.

PTM SST	Variação percentual da R_t fina e R_t inicial (%)					Correlação Pearson (% R_t X PTM)
	180 mbar	240 mbar	300 mbar	Média	Desvio Padrão	
8.000 mg/L	492,9	556,4	715,4	588,23	114,61	0,971
17.000 mg/L	692,2	443,9	1370,3	835,47	479,53	0,707
23.000 mg/L	1193,1	1393,5	1138,0	1241,53	134,46	-0,205
Média	792,73	797,93	1074,57			
Desvio Padrão	360,76	518,83	332,03			
Correlação Pearson (%R_t X SST)	0,936	0,734	0,721			

Destes resultados da tabela pode-se constatar o comportamento evolutivo da R_t para uma concentração de SST fixa e com o aumento das PTM. Neste caso, distintamente do E1-Petroquímico, com o aumento da PTM não se observou um comportamento tão constante e correlacionável com o aumento do incremento da R_t . Ou melhor, se analisadas as médias dos resultados, verifica-se que houve uma correlação diretamente proporcional, mas

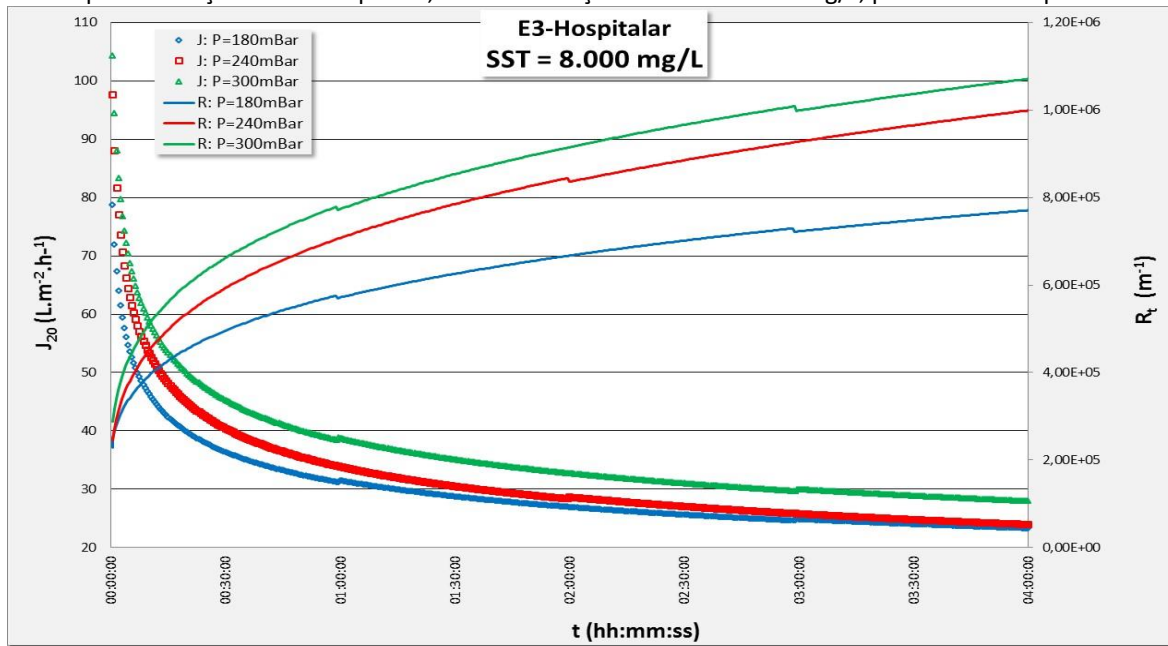
analisando os coeficiente de correlação para cada uma das concentrações de SST, contra a variação das PTM, verifica-se resultados muito distintos: 0,971, 0,707 e -0,205, respectivamente para cada uma das concentrações de SST ensaiadas em ordem crescente. Ou seja, correlações passando de forte e diretamente proporcional para fraca e inversamente proporcional. Ainda verifica-se que com o aumento da concentração de SST correspondeu a redução do coeficiente de correlação. Dessa forma, não é possível afirmar que houve uma correlação confiável neste caso.

A tabela permite também uma melhor análise dos resultado evolutivo da R_t para uma PTM fixa e com o aumento da concentração de SST. Nesta linha de análise, constata-se de forma completamente inversa ao observado para E1-Petroquímico, que, em média, houve um aumento do incremento da R_t ao longo dos 240 min quanto maior foi a concentração de SST. Dessa forma o coeficiente de Pearson indica uma correlações fortes e diretamente proporcionais: 0,936, 0,734 e 0,721, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente. Ainda assim, é possível também verificar que o aumento da PTM correspondeu à redução da força de correlação, talvez indicando que se houvesse ensaios para PTM maiores, essa correlação não seria tão forte.

5.2.3 Filtração do Lodo E3-Hospitalar

A partir dos ensaios com o lodo E3-Hospitalar, os dados foram tratados e possibilitaram a geração dos gráficos apresentados nas figuras em sequência (Figura 46, Figura 47 e Figura 48), permitindo analisar o comportamento de J_{20} e da R_t para cada relação PTM e concentrações de SST ensaiadas, ao longo do tempo total de ensaio de 240 min. Estes gráficos correspondem aos cruzamentos previstos pela Tabela 4, na linha E3-Hospitalar, apresentado no subcapítulo 4.6.2 nos procedimentos metodológicos.

Figura 46 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E3-Hospitalar, na concentração de SST de 8.000 mg/L, para diferentes pressões.



Da Figura 46 percebe-se o típico comportamento da variação do fluxo ao longo do tempo, como uma curva decrescente no formato de uma função potência. Em um momento inicial a redução do fluxo é mais intensa, justificada pela formação dos mecanismos de bloqueio junto à membrana, resultando no conseqüente aumento da resistência total à filtração. Para analisar melhor estes resultados se fez um extrato dos valores de J_{20} e da R_t em intervalos de 30 minutos desde um tempo inicial até os 240 min totais de ensaio, calculando-se o percentual relativo entre cada intervalo de tempo comparado com o imediatamente antecedente, para cada uma das PTM ensaiadas, conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J_{20}) e resistência total (R_T) da filtração de E3-Hospitalar, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 8.000 mg/L

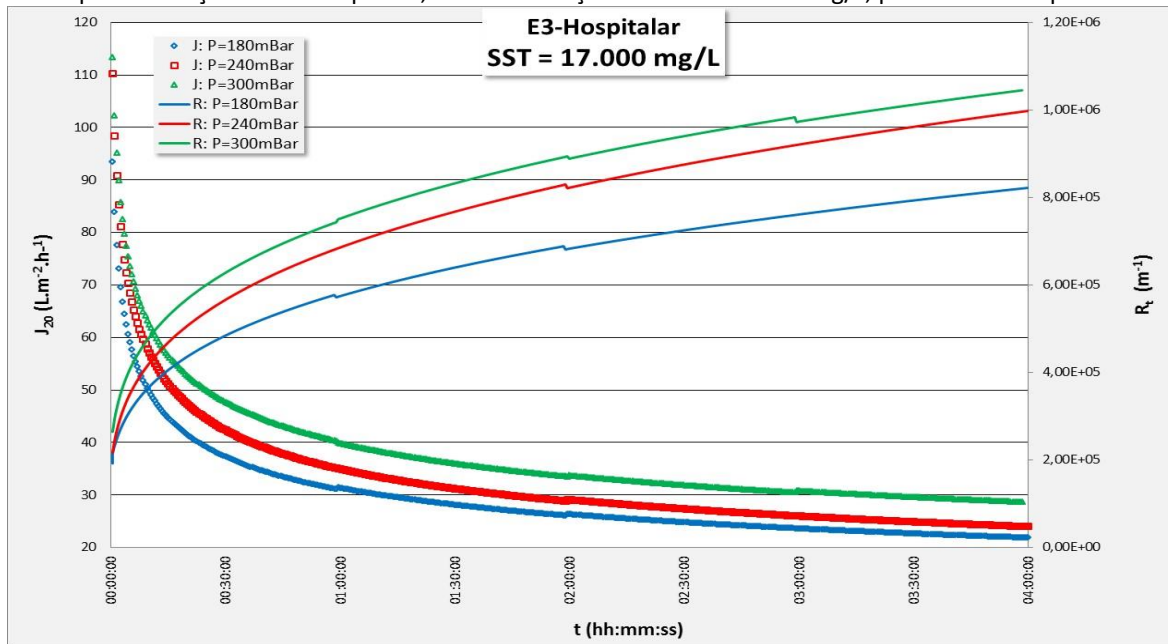
TEMPO DE ENSAIO (min)	PTM = 180 mbar		PTM = 240 mbar		PTM = 300 mbar	
	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_T ($\times 10^5 m^{-1}$)	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_T ($\times 10^5 m^{-1}$)	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_T ($\times 10^5 m^{-1}$)
inicial	175,09	-	202,03	-	291,81	-
30	36,54	-79,1%	40,63	-79,9%	45,31	-84,5%
60	31,24	-14,5%	33,98	-16,4%	38,76	-14,4%
90	28,79	-7,9%	30,56	-10,1%	35,14	-9,4%
120	27,01	-6,2%	28,41	-7,0%	32,76	-6,7%
150	25,68	-4,9%	27,12	-4,5%	31,03	-5,3%
180	24,93	-3,0%	25,86	-4,7%	30,02	-3,3%
210	24,06	-3,5%	24,87	-3,8%	28,92	-3,7%
240	23,36	-2,9%	24,02	-3,4%	27,99	-3,2%

Analisando os dados da tabela fica mais evidente a redução significativa do J_{20} na primeira meia hora de ensaio, sendo que percentualmente o módulo destes valores foram de 79,1, 79,9 e 84,5 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente. Para o aumento da R_t , a primeira meia hora de ensaio também apresentou resultados muito superiores aos demais intervalos de tempo, com valores de: 379,1, 397,2 e 544,1 %, para as respectivas PTM ensaiadas. Verifica-se ainda que na comparação de um tempo com o outro, a partir da primeira hora de ensaio, estes percentuais de redução de fluxo e de aumento da resistência, em módulo, foram cada vez menores.

Outro resultado possível de se depreender do gráfico e da tabela, é que os valores absolutos de J_{20} para os momentos iniciais são diretamente proporcionais ao aumento da PTM, mas que ao final das quatro horas de ensaio estes valores se reduziram a patamares muito similares. Ao final dos 240 min, J_{20} se estabilizou nos valores de: 23,36, 24,02 e 27,99 $L.m^{-2}.h^{-1}$, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente. Ou seja, com uma média de 25,12 $L.m^{-2}.h^{-1}$ e com um desvio padrão de 2,5, correspondente a um coeficiente de variação de 9,9 %. Fazendo a mesma comparação com os valores de J_{20} no tempo denominado inicial, a média resulta em 222,98 $L.m^{-2}.h^{-1}$ com um desvio padrão de 61,11, correspondente a um coeficiente de variação de 27,4%. Com isto, conclui-se que houve a tendência de que com o transcorrer do tempo, o aumento da PTM tende a não corresponder em ganhos significativos nos valores de J_{20} . Estas mesmas tendências já foram observadas para o E1-Petroquímico, diferentemente dos resultados obtidos para o E2-Lixiviado.

Com relação ao aumento da R_t , verifica-se que transcorridos os momentos iniciais, o comportamento deste parâmetro teve uma tendência esperada. Ou seja, para uma concentração de SST fixa, quanto menor a PTM, menor a R_t devido, devido a menor incidência dos mecanismos de bloqueio junto à membrana. Assim, se percebe também que os valores absolutos finais para a R_t são distintos entre si e crescentes com o crescimento das pressões.

Figura 47 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E3-Hospitalar, na concentração de SST de 17.000 mg/L, para diferentes pressões.



Na Figura 47, assim como na Figura 46, também se percebe o comportamento típico da variação do J_{20} e da R_t ao longo do tempo. O momento inicial demonstrou-se também como significativo para a redução de J_{20} bem como para o aumento da R_t , com uma variação mais acentuada, justificada pela formação da torta junto à membrana e ao surgimento dos mecanismos de bloqueio. A Tabela 20 apresenta os extratos feitos para J_{20} e R_t em tempos sucessivos a cada 30 minutos, desde o tempo inicial até os 240 min totais de ensaios, permitindo uma análise dos valores absolutos e das suas variações percentuais.

Tabela 20 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J_{20}) e resistência total (R_t) da filtração de E3-Hospitalar, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 17.000 mg/L

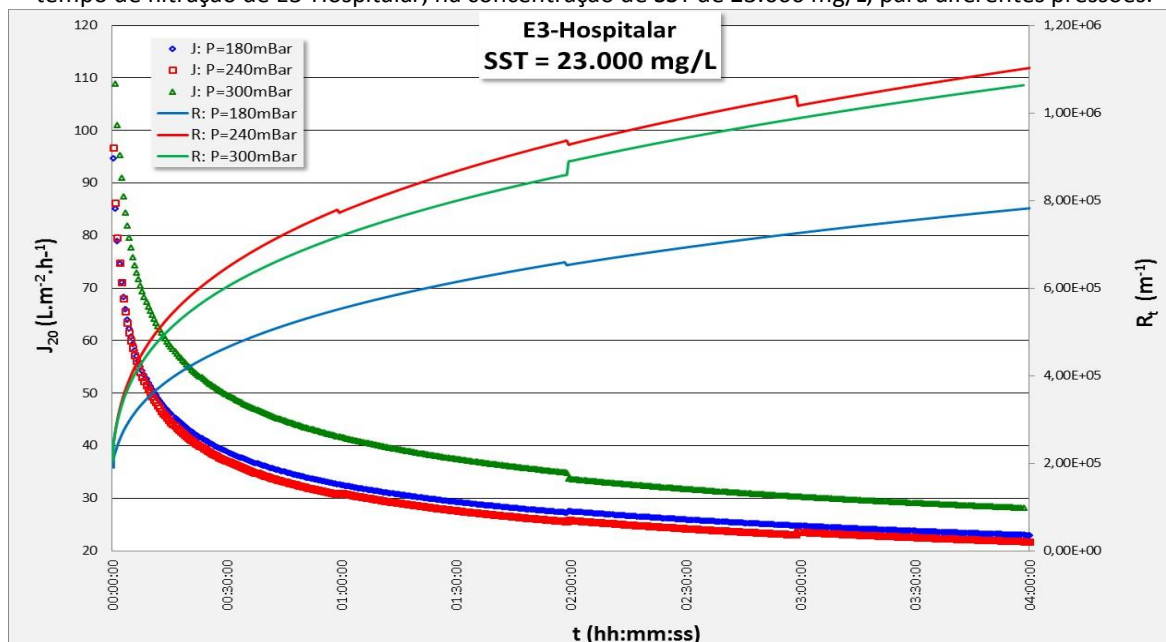
TEMPO DE ENSAIO (min)	PTM = 180 mbar		PTM = 240 mbar		PTM = 300 mbar	
	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_T ($\times 10^5 m^{-1}$)	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_T ($\times 10^5 m^{-1}$)	FLUXO DE PERMEADO J_{20} ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	RESISTÊNCIA TOTAL R_T ($\times 10^5 m^{-1}$)
inicial	184,81	-	192,41	1,25	265,57	1,13
30	37,48	-79,7%	42,38	5,66	47,95	6,25
60	31,45	-16,1%	35,06	6,84	39,97	7,50
90	28,16	-10,5%	31,25	7,67	36,02	8,32
120	26,40	-6,3%	29,16	8,22	33,54	8,94
150	24,86	-5,8%	27,43	8,74	31,91	9,39
180	23,65	-4,9%	26,04	9,21	30,80	9,73
210	22,71	-4,0%	24,95	9,61	29,64	10,1
240	21,91	-3,5%	24,05	9,97	28,69	10,4

Através destes resultados é confirmado que para esta concentração de SST em 17.000 mg/L, na primeira meia hora também houve uma queda mais significativa de J_{20} e

um conseqüente maior aumento da R_t . A diferença percentual relativa entre os intervalos de tempo, respectivamente para cada PTM, para a queda de J_{20} , resultou em: 79,7, 78,0 e 81,9 %; já para o aumento da R_t , na mesma ordem, resultou em: 393,1, 354,0 e 453,8 %.

Em termos da evolução das curvas de J_{20} e da R_t , observa-se que para uma mesma concentração, o aumento da PTM implica em queda do J_{20} e aumento da R_t . Ao final dos ensaios também foram evidenciadas diferenças nos valores absolutos da R_t , enquanto que os valores de J_{20} se comportaram de forma mais similar. Para os valores absolutos de J_{20} nos tempos de 240 min, os resultados variaram entre 21,91 e 28,68 $L.m^{-2}.h^{-1}$, com uma média de 24,88 $L.m^{-2}.h^{-1}$ e um desvio padrão de 3,46, ou seja com um coeficiente de variação de 13,9%. No tempo inicial, estes valores absolutos também resultaram com uma variação diretamente proporcional ao aumento da PTM, porém com uma média de 214,26 $L.m^{-2}.h^{-1}$ e um desvio padrão de 44,6, ou seja, com um coeficiente de variação de 20,8 %. Assim, novamente houve a tendência de atenuação dos valores de variação do J_{20} ao longo do tempo, fazendo com que os valores absolutos deste parâmetro sejam convergentes com o decorrer do tempo. Para a R_t verifica-se que no tempo de 240 min resultou em valores absolutos crescentes e diretamente proporcionais às PTM.

Figura 48 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E3-Hospitalar, na concentração de SST de 23.000 mg/L, para diferentes pressões.



O comportamento da queda de J_{20} e do aumento da R_t visualizado na Figura 48, também se apresenta da forma esperada, assim como nas duas outras concentrações de

SST já analisadas. É perceptível a maior queda nos valores de J_{20} e de aumento da R_t nos momentos iniciais da filtração. Na Tabela 13, assim como nas duas anteriores, se apresenta o extrato dos resultados agora para a concentração de SST de 23.000 mg/L.

Tabela 21 – Extrato de valores absolutos e respectivos percentuais relativos, para fluxo de permeado (J_{20}) e resistência total (R_t) da filtração de E3-Hospitalar, para cada pressão transmembrana, resultantes dos ensaios na concentração de SST de 23.000 mg/L

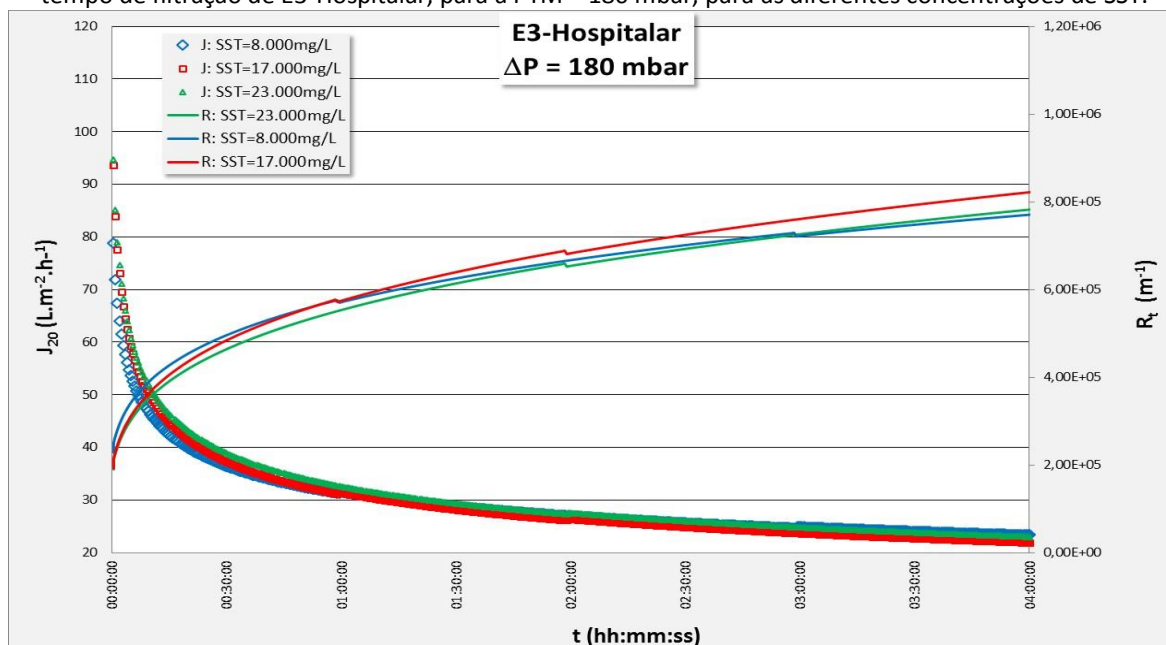
TEMPO DE ENSAIO (min)	PTM = 180 mbar		PTM = 240 mbar		PTM = 300 mbar	
	FLUXO DE PERMEADO J_{20} (L.m ⁻² .h ⁻¹)	RESISTÊNCIA TOTAL R_t (m ⁻¹)	FLUXO DE PERMEADO J_{20} (L.m ⁻² .h ⁻¹)	RESISTÊNCIA TOTAL R_t (m ⁻¹)	FLUXO DE PERMEADO J_{20} (L.m ⁻² .h ⁻¹)	RESISTÊNCIA TOTAL R_t (m ⁻¹)
inicial	113,35 -	1,59 -	186,29 -	1,29 -	233,76 -	1,28 -
30	39,09 -65,5%	4,60 189,9%	37,30 -80,0%	6,43 399,5%	49,77 -78,7%	6,02 369,7%
60	32,65 -16,5%	5,51 19,7%	31,04 -16,8%	7,72 20,1%	41,65 -16,3%	7,20 19,5%
90	29,34 -10,1%	6,13 11,3%	27,67 -10,9%	8,67 12,2%	37,51 -9,9%	7,99 11,0%
120	27,56 -6,1%	6,53 6,5%	25,85 -6,6%	9,28 7,1%	33,68 -10,2%	8,90 11,4%
150	26,00 -5,6%	6,92 6,0%	24,28 -6,1%	9,88 6,4%	31,79 -5,6%	9,43 6,0%
180	24,78 -4,7%	7,26 4,9%	23,56 -2,9%	10,2 3,0%	30,32 -4,6%	9,89 4,8%
210	23,83 -3,9%	7,55 4,0%	22,59 -4,1%	10,6 4,3%	29,13 -3,9%	10,3 4,1%
240	23,01 -3,4%	7,82 3,5%	21,76 -3,7%	11,0 3,8%	28,18 -3,2%	10,6 3,4%

Dos dados da tabela fica confirmado que na primeira meia hora, a queda do J_{20} e o aumento da R_t ocorrem de forma mais intensa que nos demais intervalos de tempo. A queda de J_{20} em valores percentuais relativos, resultou em: 65,5, 80,0 e 78,7 %, respectivamente, para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente. Já o aumento da R_t , também em valores percentuais relativos, resultou em: 189,9, 399,5 e 369,7 %, respectivamente para cada PTM. Apesar desta variação inicial diferenciada, verifica-se que os valores absolutos para os fluxos no tempo 240 min ficaram também relativamente próximos, entre 21,76 e 28,18 L.m⁻².h⁻¹, com uma média de 24,32 L.m⁻².h⁻¹ e com um desvio padrão de 3,40, ou seja, com um coeficiente de variação de 14,0%. Analisando estes mesmos resultados para os valores nos tempos iniciais, encontra-se uma média de 177,65 L.m⁻².h⁻¹ e com um desvio padrão de 60,65, ou seja, com um coeficiente de variação de 34,1%. Assim, também denota-se a tendência de atenuação na variação dos valores de J_{20} ao longo do tempo de filtração. Para as R_t , têm-se ainda que para a PTM de 240 mbar, resultou um comportamento não esperado quando comparada com as tendências observadas para as demais. Não é possível uma análise conclusiva de sua causa, mas provavelmente esteja associado às condicionantes hidrodinâmicas dos ensaios.

A partir dos resultados tomados de fluxo no tempo para pressões constantes, foram realizadas também análises do comportamento do J_{20} e da R_t considerando a variação das concentrações para uma PTM fixa. Assim, os gráficos apresentados a seguir (Figura 49,

Figura 50 e Figura 51) correspondem a linha E3-Hospitalar da Tabela 5, apresentado no subcapítulo 4.6.2 dos procedimentos metodológicos.

Figura 49 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E3-Hospitalar, para a PTM = 180 mbar, para as diferentes concentrações de SST.



A partir do gráfico da Figura 49 pode-se analisar o comportamento da queda do J_{20} e do aumento da R_t no módulo de membranas submetida à filtração nas diferentes concentrações de SST ensaiadas e para a PTM fixa em 180 mbar. Os gráficos para as demais PTM e variações de concentrações de SST foram feitos na mesma escala, tanto para J_{20} quanto para R_t , permitindo a comparação visual das tendências de cada curva. Para esta PTM fixa em 180 mbar se verifica que tanto para os valores iniciais de J_{20} , quanto para os finais de R_t , ocorreram os menores resultados quando comparada às demais PTM.

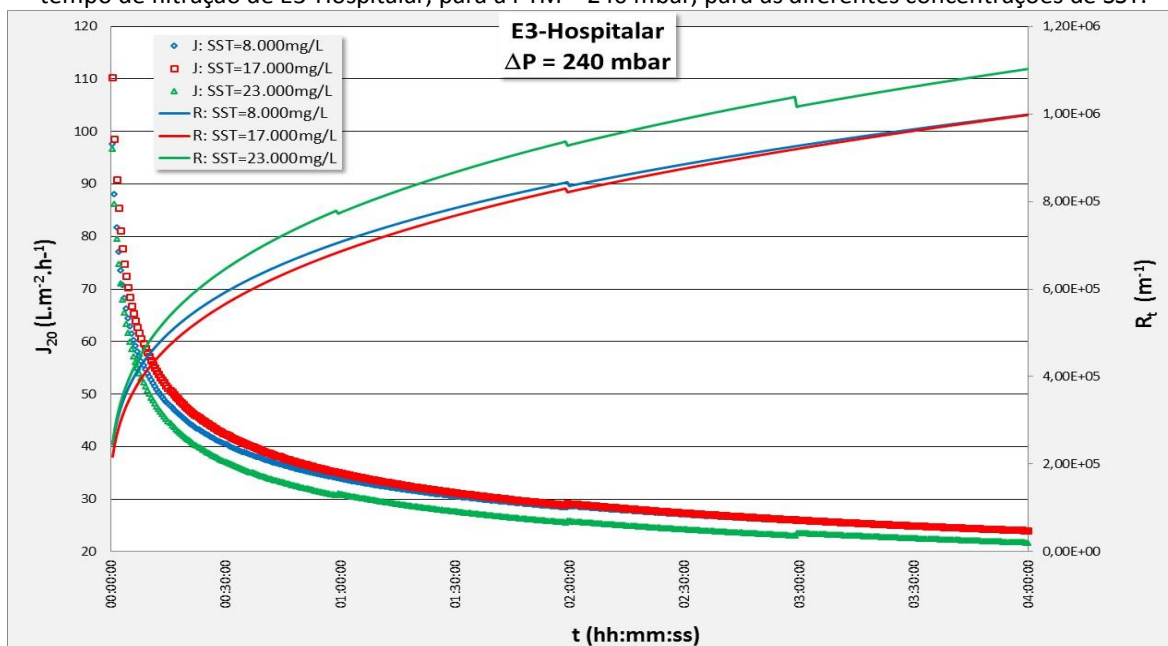
Em termos absolutos e percentuais é possível analisar os resultados também a partir da análise cruzada das três tabelas anteriores, onde se tem o extrato de dados coletados. Destas tabelas, analisando somente os dados para a PTM de 180 mbar, verifica-se que os percentuais de queda do J_{20} do tempo inicial até os primeiros 30 min, foram de: 79,1, 79,7 e 65,5 %, respectivamente para cada uma das concentrações de SST de 8.000, 17.000 e 23.000 mg/L. Para esta PTM, J_{20} em média se reduziu em 74,8% na primeira meia hora.

Seguindo a mesma análise verifica-se que os resultados percentuais relativos para o aumento da R_t na primeira meia hora foram de: 379,1, 393,1 e 189,9 %, também respectivamente para cada uma das concentração de SST ensaiadas, o que resulta numa média de 320,7 %. O que se depreende destes resultados é que a concentração de

23.000 mg/L teve um valor mais distinto quando comparada com as demais concentrações de SST, com uma menor ação dos mecanismos de bloqueio nos primeiros 30 min, resultado este aparentemente sem uma explicação mais concreta, tendo em vista que o esperado seria o contrário desta tendência. Para uma concentração de SST maior, o esperado seria que houvesse uma maior contribuição dos mecanismos de bloqueio para incrementar a R_t . Mesmo com esta situação, é possível verificar no pelo gráfico que todos os resultados foram relativamente similares em termos de comportamento evolutivo e também de valores absolutos.

Quanto aos valores absolutos finais para o J_{20} , verifica-se nas tabelas anteriores que para o tempo 240 min estes resultados foram de: 23,36, 21,91 e 23,01 $L.m^{-2}.h^{-1}$, para cada um das concentrações de SST ensaiadas, respectivamente em ordem crescente; resultando numa média de 22,76 $L.m^{-2}.h^{-1}$ com um desvio padrão de 0,76, variando somente em 3,3% sobre a média. Para os valores de R_t , esta mesma análise indica uma média de $7,9 \times 10^5 m^{-1}$ com um desvio padrão de $2,7 \times 10^4$, variando somente 3,4% sobre a média. Ou seja, confirma-se que os valores de J_{20} e de R_t se apresentaram com um comportamento muito similar para as distintas concentrações de SST nesta PTM fixa em 180 mbar. Estas faixas de valores de J_{20} são bem semelhantes às encontradas para o lodo E1-Petroquímico.

Figura 50 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E3-Hospitalar, para a PTM = 240 mbar, para as diferentes concentrações de SST.



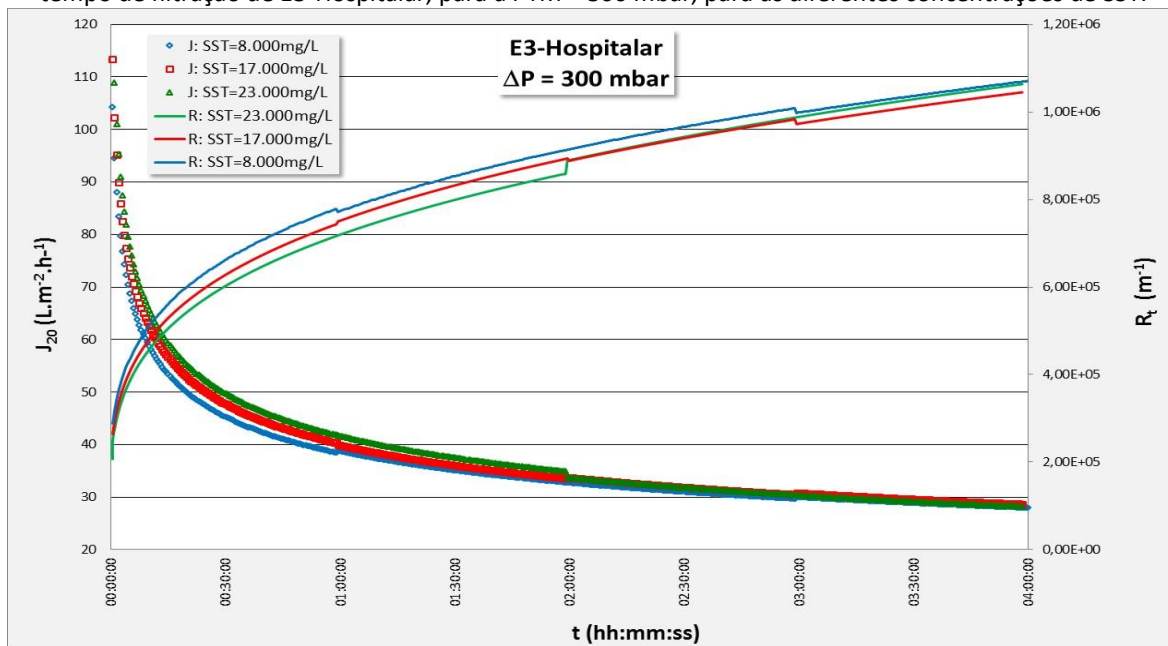
O gráfico apresentado na Figura 50 representa o comportamento do J_{20} e da R_t para as três diferentes concentrações de SST ensaiadas, na PTM fixa em 240 mbar. Assim como na

análise para a PTM de 180 mbar, verifica-se também que o comportamento das curvas e valores absolutos resultaram bastante similares. Destaca-se nesta PTM que a concentração de 23.000 mg/L apresentou um valor um pouco mais diferenciado, mas ainda de acordo com as tendências esperadas de que uma maior concentração de SST corresponda a uma maior R_t e também a um menor J_{20} .

Os percentuais relativos calculados para a redução de J_{20} na primeira meia hora, assim como nas análises anteriores, são os que apresentam os maiores valores. Das três tabelas anteriores, observa-se que estes resultados foram de: 79,9, 78,0 e 80,0 %, com uma média de 79,3%. Ou seja maiores em média do que os mesmos resultados para a PTM de 180 mbar (74,8 %), evidenciando que, quanto maior a PTM, maiores são os efeitos sobre a queda do J_{20} no momento inicial da filtração, relacionado à formação dos mecanismos de bloqueio de forma mais intensa nestes instantes. Esta mesma extração de dados das tabelas anteriores, mas agora para a R_t , resultam em percentuais relativos para a primeira meia hora de ensaio de: 397,2, 354,0 e 399,5 %, também para cada uma das concentrações ensaiadas, respectivamente em ordem crescente, o que resulta em uma média de 383,6 %. Ou seja, também comparando com o mesmo resultado obtido para a PTM de 180 mbar (320,7 %), houve um maior efeito no incremento da R_t para esta maior PTM.

Quanto aos valores absolutos para J_{20} , das três tabelas anteriores, os resultados foram de: 24,02, 24,05 e 21,76 $L.m^{-2}.h^{-1}$, para cada um das concentrações de SST ensaiadas, respectivamente em ordem crescente; resultando numa média de 23,28 $L.m^{-2}.h^{-1}$ com um desvio padrão de 1,31, variando somente em 5,6% sobre a média. Ou seja, se verifica que mesmo com a diferença apresentada para a concentração de 23.000 mg/L, ainda assim os resultados podem ser considerado muito similares. A mesma análise feita para os resultados da R_t resultaram numa média de $1,03 \times 10^6 m^{-1}$ e um desvio padrão de $5,91 \times 10^4$, ou seja, um coeficiente de variação de 5,7%, confirmando também a proximidade entre os resultados.

Figura 51 – Comportamento do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) e da resistência total (R_t) ao longo do tempo de filtração de E3-Hospitalar, para a PTM = 300 mbar, para as diferentes concentrações de SST.



O gráfico da Figura 51 representa o comportamento J_{20} e da R_t para as três diferentes concentrações de SST ensaiadas, agora com a PTM fixa em 300 mbar. Da visualização deste gráfico se percebe que assim como verificado para as outras duas PTM ensaiadas, também houve um comportamento bastante similar em termos de evolução e de valores absolutos tanto para J_{20} , quanto para R_t .

Os percentuais relativos calculados para a redução do J_{20} na primeira meia hora, assim como nas análises anteriores, são os que apresentam os maiores valores. Das três tabelas anteriores, observa-se que estes resultados foram de: 84,5, 81,9 e 78,7 %, com uma média de 81,7%. Ou seja, maiores em média do que os mesmos resultados para as PTM de 180 e de 240 mbar, evidenciando que, quanto maior a PTM, maiores são os efeitos sobre a queda do J_{20} no momento inicial da filtração, relacionado à formação dos mecanismos de bloqueio de forma mais intensa nestes instantes. Esta mesma extração de dados das tabelas anteriores, mas agora para a R_t , resulta em percentuais relativos para a primeira meia hora de ensaio de: 544,1, 453,8 e 369,7 %, também para cada uma das concentrações ensaiadas, respectivamente em ordem crescente; o que resulta em uma média de 455,9%. Ou seja, também comparando com as outras duas menores PTM ensaiadas, houve uma maior efeito no incremento da R_t para esta maior PTM.

Os valores absolutos encontrados ao final dos ensaios para o fluxo de permeado para esta PTM de 300 mbar foram ainda mais similares entre si, quando comparados com as

demais PTM ensaiadas. Estes resultados absolutos de fluxo de permeado para o tempo 240 min foram: 27,99, 28,69 e 28,18 L.m⁻².h⁻¹, para cada uma das concentrações de SST, respectivamente em ordem crescente; resultando numa média de 28,29 L.m⁻².h⁻¹ com um desvio padrão de 0,36, variando somente em 1,3 % sobre a média. A mesma análise feita para os resultados da R_t resultaram numa média de 1,06x10⁶ m⁻¹ e um desvio padrão de 1,52x10⁴, ou seja, um coeficiente de variação de 1,4 %, confirmando também a proximidade entre os resultados.

Ainda da análise destas relações, com a variação das concentrações de SST e para PTM fixas, verifica-se que os resultados finais para o J₂₀ se mantiveram em média relativamente semelhantes, porém com um leve crescimento com o aumento da PTM. Para as resistências se verifica que também houve um aumento dos valores médios com o aumento das PTM.

Em termos absolutos, os valores finais de J₂₀ para o E3-Hospitalar resultaram ligeiramente menores do que para o E1-Petroquímico, mas pode-se afirmar que estão em uma mesma ordem de grandeza. Os valores médios de J₂₀ no tempo 240 min encontrados para o E1-Petroquímico, foram de: 27,37, 29,89 e 25,96 L.m⁻².h⁻¹, respectivamente para cada uma das concentrações de SST ensaiadas, em ordem crescente. Para E2-Lixiviado estes mesmos resultados foram, respectivamente: 10,80, 6,85 e 6,00 L.m⁻².h⁻¹. Já para E3-Hospitalar foram 25,12, 24,88 e 24,32 L.m⁻².h⁻¹.

Verifica-se que para o lodo E3-Hospitalar, com o aumento da PTM atuando sobre as distintas concentrações de SST ensaiadas, os mecanismos de bloqueio se processaram mais rapidamente sobre a membrana, ou seja, a redução do J₂₀ e o aumento da R_t à filtração na primeira meia hora de ensaio teve uma maior intensidade quanto maior foi a PTM aplicada. Ainda ao se analisar os valores absolutos encontrados nos tempos finais do ensaio, verifica-se que o aumento da concentração de SST apresentou uma tendência de leve redução nos valores médios de J₂₀, podendo-se afirmar que são pouco significativas. Já quanto aos valores de R_t, verifica-se que houve o esperado acréscimo com o aumento da PTM.

Como realizado para os lodos E1-Petroquímico e E2-Lixiviado, verificou-se o incremento da R_t final sobre a R_t inicial, correlacionando-se com a ação dos mecanismos de bloqueio para a formação da R_t. A Tabela 22 apresenta estes resultados dos incrementos percentuais para E3-Hospitalar, seguidos das médias, desvios padrão e os coeficientes de correlação de Pearson.

Tabela 22 – Síntese dos resultados da variação percentual entre a R_t final e a R_t inicial dos ensaios de filtração de E3-Hospitalar, para as diferentes concentrações de SST e PTM ensaiadas.

		Variação percentual da R_t fina e R_t inicial (%)					Correlação Pearson (% R_t X PTM)
		180 mbar	240 mbar	300 mbar	Média	Desvio Padrão	
SST	PTM						
		8.000 mg/L	86,7	88,1	90,4	88,40	1,87
	17.000 mg/L	88,1	87,5	89,2	88,27	0,86	0,638
	23.000 mg/L	79,7	88,3	87,9	85,30	4,85	0,845
	Média	84,83	87,97	89,17			
	Desvio Padrão	4,50	0,42	1,25			
	Correlação Pearson (% R_t X SST)	-0,700	0,127	-0,990			

A partir desta tabela pode-se constatar o comportamento evolutivo da R_t para uma concentração de SST fixa e com o aumento das PTM. Mesmo com valores absolutos menores, houve um comportamento evolutivo muito similar ao observado para o E1-Petroquímico, onde com o aumento das PTM, em média, correspondeu a um aumento do incremento da ação dos mecanismos de bloqueio sobre a R_t inicial. Analisando-se os resultados encontrados para a correlação de Pearson (0,990, 0,638 e 0,845), confirma-se esta relação variando de moderada a forte e sendo diretamente proporcional.

Percebe-se assim, que a contribuição dos mecanismos de bloqueio como fator de formação da R_t , aumentou com o aumento das PTM. Entretanto, comparando estes mesmos resultados para os lodos E1-Petroquímico e E2-Lixiviado, estes valores para o E3-Hospitalar foram menores e mais regulares entre si, ou seja, como uma variação em torno da média pouco significativa.

A tabela permite também uma melhor análise do resultado evolutivo da R_t para uma PTM fixa e com o aumento das concentrações de SST. Nesta linha de análise, ao verificarem-se os resultados médios (88,40, 88,27 e 85,30) há uma tendência de uma correlação forte e inversamente proporcional, similar ao também encontrado para E1-Petroquímico. Porém, ao analisarem-se os coeficientes de correlação encontrados para cada uma das PTM, encontram-se resultados bem distintos: -0,700, 0,127 e -0,990. Ou seja, duas correlações fortes e inversamente proporcionais e uma fraca diretamente proporcional. Em uma primeira análise, não há uma justificativa mais imediata para este resultado, salvo pelas condições hidrodinâmicas dos ensaios, bem como pelas distintas características dos lodos ensaiados.

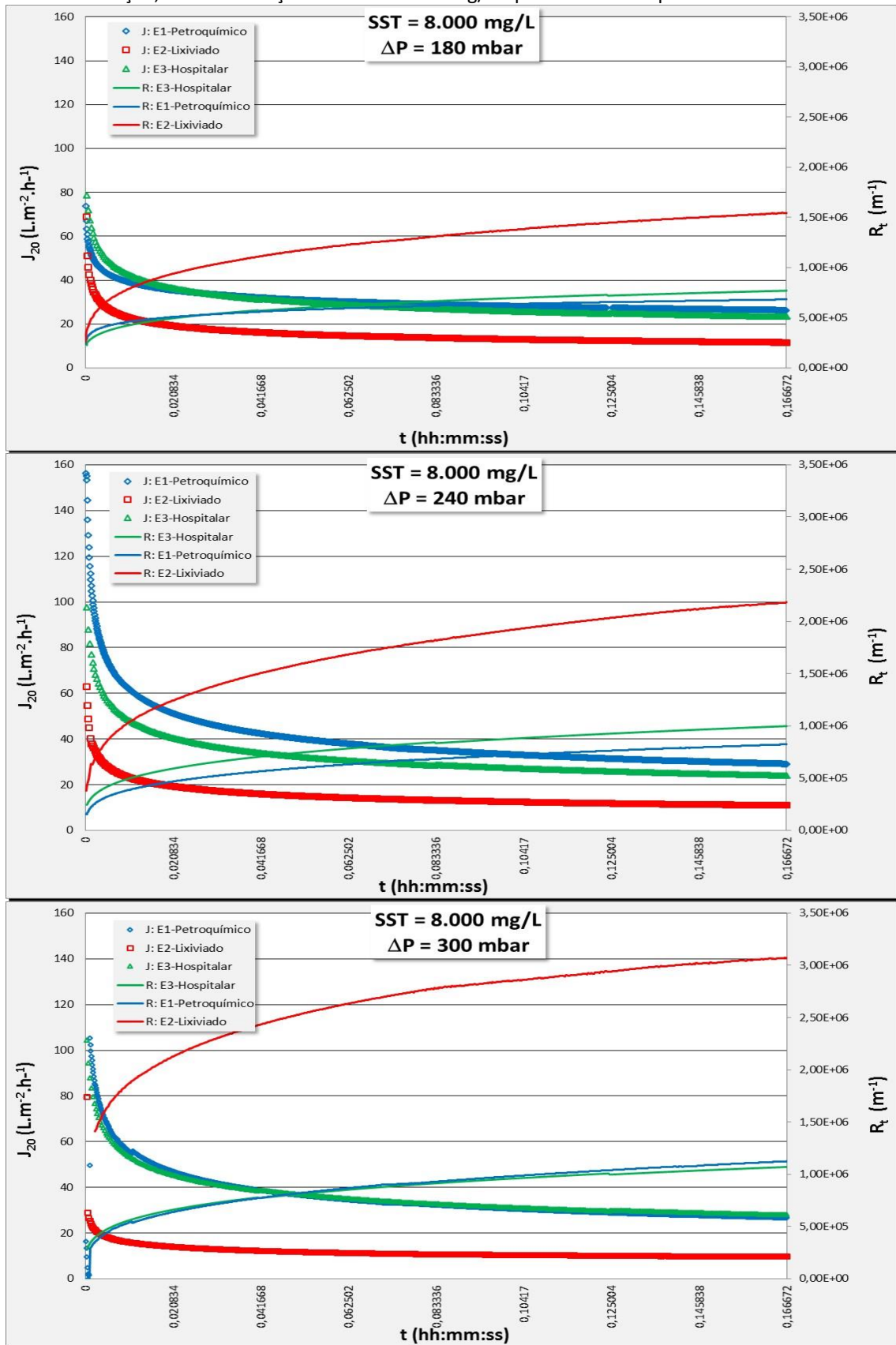
Estes resultados permitem também considerar a similaridade de comportamento observada entre E1-Petroquímico e E3-Hospitalar, e o distinto comportamento de E2-Lixiviado. Entretanto, para E3-Hospitalar foi observado que a contribuição dos mecanismos de bloqueio sobre a resistência intrínseca das membranas (R_m), para a formação da R_t , comportou-se forma mais regular do que para os demais lodos. Analisando somente as médias correspondentes ao incremento da R_t sobre a R_m , para cada uma das concentrações de SST, encontra-se uma média de 87,3% e um desvio padrão de 3,0. Ou seja, o coeficiente de variação resultante de 3,5 % denota que variação foi realmente pouco significativa, inclusive ao se comparar estes resultados com os demais lodos ensaiados. Esta mesma análise para E1-Petroquímico resulta numa média de 285,9 %, desvio padrão de 157,0, ou seja, o coeficiente de variação foi de 54,9 %; já para o E2-Lixiviado a média foi de 881,6 %, desvio padrão de 387,9, resultando num coeficiente de variação de 44,0 %. Além da ação dos mecanismos de bloqueio se apresentarem mais uniformes para o E3-Hospitalar, também para este lodo foi a que apresentou as menores contribuições em termos percentuais.

5.2.4 Análise Cruzada entre os Distintos Lodos

Com objetivo de fazer uma análise comparativa entre os distintos lodos ensaiados, após serem realizadas as análises para cada um destes lodos independentemente, foram realizados os cruzamentos dos resultados para cada uma das concentrações de SST e para cada uma das PTM, conforme previstos na Tabela 6, do capítulo 4.6.2. Para estas análises, considerando uma concentração de SST fixa, verificou-se como se deu o comportamento à filtração para as distintas PTM.

Para estas análises optou-se por ordenar os gráficos previstos em cada linha e coluna da Tabela 6, permitindo a visualização agrupada destes resultados. Assim, na Figura 52 apresentam-se os três gráficos de resultados dos cruzamentos de cada um dos lodos, conforme a coluna C1 da Tabela 6, ou seja para a concentração de SST em 8.000 mg/L. Na Figura 53 são apresentados os três gráficos com os cruzamentos previstos na coluna C2 (SST em 17.000 mg/L) da mesma tabela e, na Figura 54, os três gráficos agrupados representam a coluna C3 (SST em 23.000 mg/L).

Figura 52 – Agrupamento de gráficos para fins de análise comparativa entre os distintos lodos submetidos à filtração, na concentração de SST de 8.000 mg/L e para as distintas pressões ensaiadas.



Os gráficos apresentados na Figura 52 apresentam os resultados obtidos a partir dos ensaios de filtração para a queda de J_{20} e o crescimento da R_t para cada um dos lodos ensaiados (E1-Petroquímico, E2-Lixiviado e E3-Hospitalar), todos na concentração de SST fixa em 8.000 mg/L, e cada um dos gráficos para cada uma das PTM ensaiadas: 180, 240 e 300 mbar.

Estes resultados assim apresentados permitem analisar que o comportamento tanto de J_{20} quanto da R_t para E1-Petroquímico e E3-Hospitalar, nesta condição de concentração de SST fixa em 8.000 mg/L e para cada uma das PTM, tiveram um comportamento evolutivo e valores absolutos bem próximos, enquanto que E2-Lixiviado apresentou resultados mais distintos. Para a PTM de 240 mbar houve uma menor similaridade de comportamento das curvas de J_{20} e da R_t para o E1-Petroquímico e para E3-Hospitalar.

Analisando os dados apresentados nas tabelas anteriores, é possível extrair que os valores finais de J_{20} na concentração de SST em 8.000 mg/L e na PTM fixa em 180 mbar, foram: 26,34, 11,64 e 23,36 $L.m^{-2}.h^{-1}$, respectivamente para E1-Petroquímico, E2-Lixiviado e E3-Hospitalar. Estes mesmos resultados para a PTM fixa em 240 mbar, resultaram em: 29,12, 10,99 e 24,02 $L.m^{-2}.h^{-1}$; e para a PTM fixa em 300 mbar foram de: 26,66, 9,76 e 27,99 $L.m^{-2}.h^{-1}$. Confirma-se assim que realmente o E2-Lixiviado foi o que mais se distinguiu em resultados, enquanto E1-Petroquímico e E3-Hospitalar apresentaram resultados em uma mesma ordem de grandeza, mas com E1-Petroquímico com valores mais altos do que E3-Hospitalar para as PTM de 180 e 240 mbar, enquanto que na PTM de 300 mbar esta tendência se inverteu, porém com valores absolutos muito aproximados.

Estas diferenças dos resultados relacionam-se principalmente com as distintas características de cada um dos lodos ensaiados, bem como também são associadas às condicionantes hidrodinâmicas dos procedimentos de ensaio. Analisando os resultados de EPS, verifica-se que para esta concentração de SST em 8.000 mg/L, E2-Lixiviado foi o que apresentou os valores maiores para a fração de EPS_{f_0} (221,34 mg/L), conforme pode ser visto na Tabela 10 e nos gráficos correspondentes. E1-Petroquímico apresentou o valor menor dentre todos os lodos (76,04 mg/L), enquanto E3-Hospitalar apresentou um valor intermediário entre os demais (187,90 mg/L). Isoladamente este parâmetro caracteriza a tendência de que E2-Lixiviado tenha um menor J_{20} e uma maior R_t , comparativamente aos demais, assim como também que E3-Hospitalar tenha ainda uma menor J_{20} quando comparado com E1-Petroquímico, correspondente ao fato de que esta fração do EPS atua

de forma a incrementar os mecanismos de bloqueio. Ainda assim, os resultados de EPS isoladamente não respondem à maior semelhança entre os resultados de J_{20} e R_t para E1-Petroquímico e E3-Hospitalar, e não para E2-Lixiviado e E3-Hospitalar.

Em termos de viscosidade e massa específica dos lodos, analisado no capítulo 5.1.1, verifica-se que os resultados para a viscosidade dinâmica foram muito próximos para todos os lodos (Figura 25), enquanto que para a massa específica E1-Petroquímico e E3-Hospitalar apresentaram resultados mais próximos e E2-Lixiviado apresentou resultados maiores (Figura 24). Pelos dados apresentados na Tabela 8, as viscosidades dinâmicas encontradas para cada um dos lodos E1-Petroquímico, E2-Lixiviado e E3-Hospitalar, na concentração de SST em 8.000 mg/L, foram de: $1,21 \times 10^{-3}$, $1,16 \times 10^{-3}$ e $1,17 \times 10^{-3}$ N.s.m⁻², respectivamente, o que resultou em uma média de $1,18 \times 10^{-3}$ N.s.m⁻² e um desvio padrão de $2,6 \times 10^{-5}$, ou seja, um coeficiente de variação de 2,2 %, confirmando a proximidade entre os resultados.

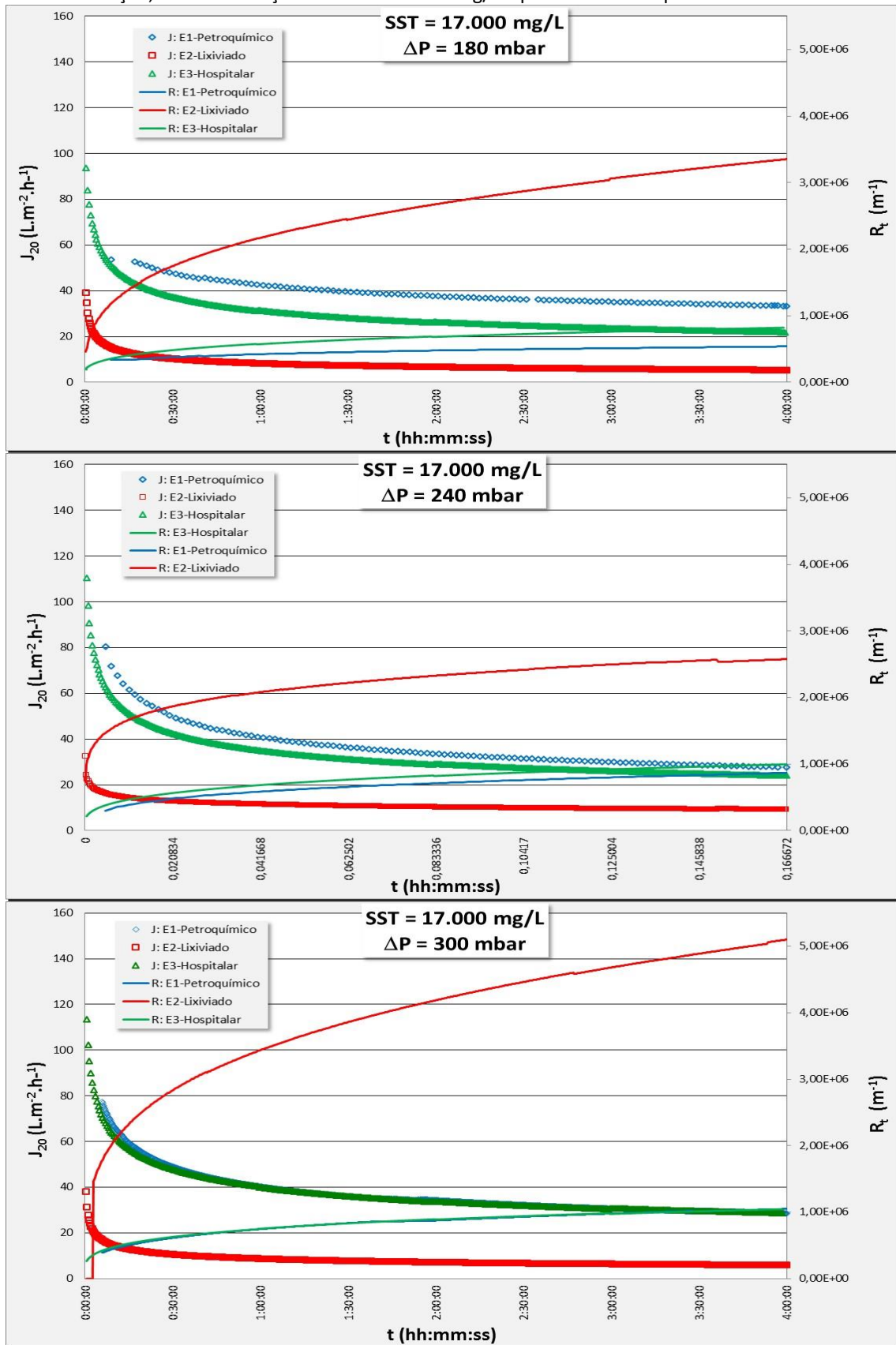
Dessa forma, isoladamente a viscosidade dos lodos ensaiados não poderia ser correlacionada diretamente a variação do comportamento do J_{20} e da R_t na filtração. Com relação à massa específica, o gráfico apresentado na Figura 24 destaca que E2-Lixiviado resultou em valores superiores ao demais lodos. Entretanto, analisando-se estatisticamente as médias, desvio padrão e coeficiente de variação destes resultados, verifica-se uma variação bastante baixa em torno da média. A média resulta em $1,003 \text{ g.mL}^{-1}$, com um desvio padrão de 0,006, correspondendo a um coeficiente de variação de 0,6 %. Dessa forma, mesmo com E2-Lixiviado apresentando resultados superiores aos demais lodos, infere-se que pouco provavelmente essa variação entre as massas específicas interferem sobre os resultados encontrados para a filtração.

Com relação às características físicas dos biossólidos, com os resultados apresentados no capítulo 5.1.2, verifica-se que em termos de diâmetro médio E1-Petroquímico e E3-Hospitalar são bem similares, com valores de 40,92 e 40,32 μm , respectivamente; enquanto que E2-Lixiviado tem um diâmetro médio de 15,61 μm (Tabela 9 e Figura 27). Apesar desta similaridade entre os lodos E1-Petroquímico e E3-Hospitalar, verifica-se ainda que eles diferem em termos de distribuição granulométrica, com valores distintos para o coeficiente de variação destas distribuições. Para E1-Petroquímico estes coeficiente resultou em 56,9 % e para E3-Hospitalar foi de 111,4 %, indicando que E3-Hospitalar tem um comportamento de dispersão dos diâmetros em torno da média maior do que E1-

Petroquímico. Esta relação pode estar vinculada a uma melhor distribuição granulométrica o que, associando-se ao mesmo raciocínio tomado para a caracterização de solos granulares, indicaria uma maior tendência de compactidade, ou seja, de que grãos menores completem mais eficientemente os espaços vazios de uma amostra. Esta pode ser uma relação a ser apontada para caracterizar a formação de uma torta mais compacta, ou seja, gerando um efeito de maior R_t e conseqüentemente de menor J_{20} . Para E2-Lixiviado, este coeficiente de variação resultou em 88,7 %, valor intermediário aos outros dois lodos, ou seja, mesmo com os menores diâmetros, também apresentou uma variação em torno da média bem significativa.

Fazendo-se uma síntese destas análises do comportamento comparativo à filtração dos distintos lodos ensaiados, para concentração de SST fixa em 8.000 mg/L, infere-se que a fração de EPS_{f_0} mais alta dentre os lodos, correspondeu ao E2-Lixiviado, que também é o que se apresentou com os menores e mais densos diâmetros de partículas. Para este E2-Lixiviado os resultados da R_t são os mais altos e conseqüentemente do J_{20} são os menores. Já com relação ao E1-Petroquímico e E3-Hospitalar, o que se verifica é que apesar da fração EPS_{f_0} ser bem distinta entre eles, sendo maior para o E3-Hospitalar, as demais características de viscosidade, massa específica e diâmetro médio são bem semelhantes, distinguindo-se somente a distribuição dos diâmetros em torno da média, com E3-Hospitalar apresentando um comportamento bem mais disperso. Estas relações podem contribuir com as respostas dadas pelos ensaios de filtração, com a R_t e o J_{20} apresentando resultados muito similares entre estes dois lodos.

Figura 53 – Agrupamento de gráficos para fins de análise comparativa entre os distintos lodos submetidos à filtração, na concentração de SST de 17.000 mg/L e para as distintas pressões ensaiadas.



Os gráficos apresentados na Figura 53 apresentam os resultados obtidos para a queda de J_{20} e o aumento da R_t nos ensaios de filtração, para cada um dos lodos (E1-Petroquímico, E2-Lixiviado e E3-Hospitalar), todos na concentração de SST fixa em 17.000 mg/L, sendo que cada um dos gráficos da figura corresponde, em ordem, a cada uma das PTM ensaiadas: 180, 240 e 300 mbar.

De forma similar à análise dos resultados realizados para a concentração de 8.000 mg/L (Figura 52), o comportamento do J_{20} e da R_t apresentou uma maior tendência de similaridade para E1-Petroquímico e E3-Hospitalar, enquanto E2-Lixiviado também se demonstrou mais distinto, com valores de J_{20} menores e R_t maiores. Entretanto, para esta concentração de SST em 17.000 mg/L, na PTM de 180 mbar esta similaridade não foi tão evidente. O que se percebe qualitativamente observando os gráficos é que o aumento da PTM correspondeu diretamente com a maior similaridade de resultados entre E1-Petroquímico e E3-Hospitalar.

Analisando os dados apresentados nas tabelas anteriores, é possível extrair que os valores finais de J_{20} na concentração de SST em 17.000 mg/L e na PTM fixa em 180 mbar, foram: 33,33, 5,37 e 21,91 $L.m^{-2}.h^{-1}$, respectivamente para E1-Petroquímico, E2-Lixiviado e E3-Hospitalar. Estes mesmos resultados para a PTM fixa em 240 mbar, resultou em: 27,72, 9,31 e 28,69 $L.m^{-2}.h^{-1}$; e para a PTM fixa em 300 mbar resultou em: 28,62, 5,88 e 28,69 $L.m^{-2}.h^{-1}$. Confirma-se assim que realmente o E2-Lixiviado foi o que mais se distinguiu em resultados, enquanto E1-Petroquímico e E3-Hospitalar apresentaram resultados em uma mesma ordem de grandeza, aproximando-se mais em valores absolutos finais quanto maior a PTM.

Analisando os resultados de EPS, verifica-se que para esta concentração de SST em 17.000 mg/L, E1-Petroquímico foi o que apresentou os valores maiores para a fração de EPS_{f_0} (374,18 mg/L), conforme pode ser visto na Tabela 10 e nos gráficos correspondentes. E3-Hospitalar apresentou o menor valor dentre os lodos (303,97 mg/L), mas relativamente próximo ao resultado do E2-Lixiviado (307,82 mg/L). Isoladamente este parâmetro caracterizaria a tendência de que E1-Petroquímico apresentasse os menores valores para J_{20} e os maiores para a R_t , fato que não corresponde ao observado. O que se observa ainda destes resultados de EPS_{f_0} para esta concentração de 17.000 mg/L é que eles são mais similares entre si quando comparados com os mesmos resultados para a concentração de 8.000 mg/L.

Em termos de viscosidade e massa específica dos lodos, verifica-se na Tabela 8 que os resultados para a viscosidade dinâmica na concentração de 17.000 mg/L, resultaram em: $1,98 \times 10^{-3}$, $1,91 \times 10^{-3}$ e $1,59 \times 10^{-3}$ N.s.m⁻², respectivamente para E1-Petroquímico, E2-Lixiviado e E3-Hospitalar; correspondente a uma média de $1,83 \times 10^{-3}$ N.s.m⁻² e um desvio padrão de $2,1 \times 10^{-5}$, ou seja, um coeficiente de variação de 11,4 %. Neste caso, distintamente dos resultados obtidos para a concentração de 8.000 mg/L, houve uma diferença maior entre os resultados, entretanto muito similares para E1-Petroquímico e E2-Lixiviado, e mais distinta e menor para E3-Hospitalar. Isoladamente a associação da viscosidade da mistura não é correlacionada diretamente ao fluxo de permeado, pois a viscosidade utilizada no modelo das resistências (Equação 3) refere-se ao permeado, ou seja, àquela do líquido que permeia os poros das membranas. O que se pode inferir é que estas viscosidade da mistura associam-se às condições de turbulência do meio e os consequentes esforços de cisalhamento. Cabe lembrar que os módulos de membranas submetidos aos ensaios de filtração eram submergidos nesta mistura, onde havia a ação de um sistema de aeração constante com objetivo de promover a turbulência e, assim, retardar a ação dos mecanismos de bloqueio. Com isto, ao considerando-se as bolhas de ar deslocando-se no meio líquido ao redor e entremeadas às membranas, é possível inferir que para as maiores viscosidades relacionam-se maiores tensões de cisalhamento, o que pode fazer com que as ações dos mecanismos de bloqueio sejam desfavorecidas e, assim, poderia haver ganhos no J_{20} .

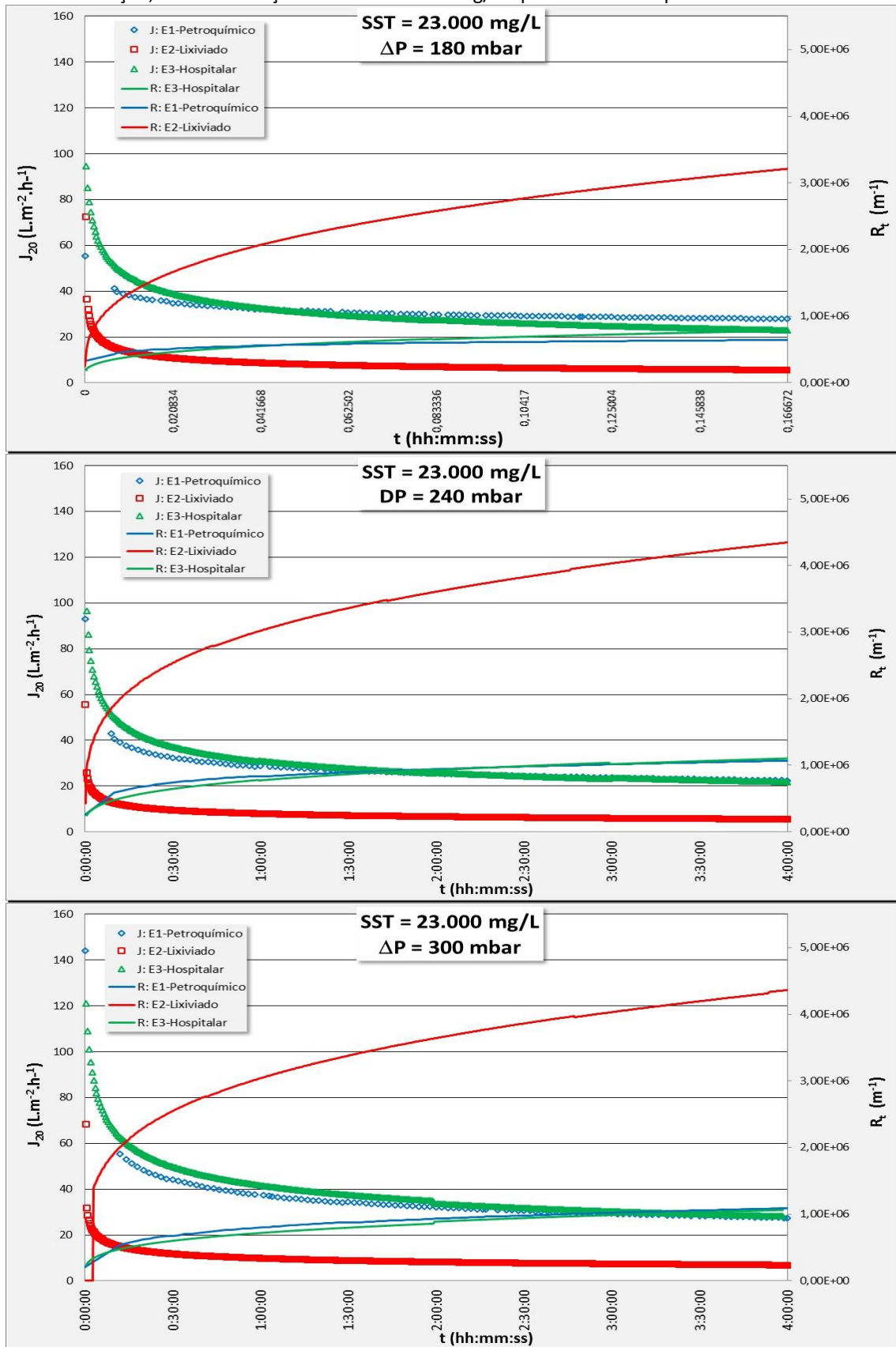
Com relação à massa específica, o gráfico apresentado na Figura 24 mostra que há uma tendência linear de crescimento da relação SST x massa específica. Sendo assim, a análise desta relação é similar a já realizada para a concentração de SST em 8.000 mg/L. E2-Lixiviado resultou em valores superiores aos demais lodos, entretanto estatisticamente estas diferenças são pouco significativas, pois analisando-se as médias, desvio padrão e coeficiente de variação destes resultados, verifica-se uma dispersão baixa em torno da média. A média resultou em $1,006 \text{ g.mL}^{-1}$, com um desvio padrão de 0,006, correspondendo a um coeficiente de variação de 0,6 %, ou seja, com um comportamento de dispersão igual ao encontrado para a concentração de 8.000 mg/L. Dessa forma, mesmo com E2-Lixiviado apresentando resultados superiores aos demais lodos, infere-se que pouco provavelmente essa variação entre as massas específicas interferem sobre os resultados encontrados para a filtração.

Quanto às análises das características físicas dos biossólidos, apresentadas no capítulo 5.1.2, estas foram consideradas como regulares entre todas as concentrações de SST ensaiadas e, assim, trabalhou-se somente com os valores médios resultantes. Dessa forma, a análise é a mesma já explanada anteriormente.

Fazendo uma síntese destes resultados, para analisar o comportamento comparativo à filtração dos distintos lodos ensaiados na concentração de SST fixa em 17.000 mg/L, verifica-se que a fração de EPS_{f_0} mais alta dentre os lodos, correspondeu ao E1-Petroquímico, que é o lodo com os menores diâmetros de partículas, e a mistura com maior viscosidade dinâmica, o que, por sua vez, resultou em valores absolutos de J_{20} maiores. Comparando-se com E3-Hospitalar, este foi o que apresentou os menores valores para a fração de EPS_{f_0} , contém biossólidos com diâmetros médios muito próximos ao E1-Petroquímico, porém resultou com a viscosidade dinâmica menor dentre os demais lodos. Estas condições características podem ser associadas aos motivos que fizeram com que os resultados de J_{20} resultassem bem próximos de E1-Petroquímico, aumentando ainda mais esta semelhança com o aumento da PTM.

E2-Lixiviado resultou com a fração de EPS_{f_0} intermediária entre os demais, mas com a ressalva de ser bastante próxima ao do E3-Hospitalar; os diâmetros médios dos biossólidos são os menores e a viscosidade dinâmica resultante é bem similar a encontrada para E1-Petroquímico. Neste caso, tendo sido encontrados os menores valores de J_{20} para este lodo, o que se pode depreender é que, com estes parâmetros de análise, esta condição estaria associada mais à granulometria dos biossólidos, tanto pelo seu diâmetro médio, quanto pela sua dispersão em torno da média, propiciando uma condição favorável à ação dos mecanismo de bloqueio. Mesmo com os valores de viscosidade semelhantes ao E1-Petroquímico, e mais altas do que para E3-Hospitalar, supõe-se o efeito de cisalhamento sobre estas partículas menores e mais compactadas não teria sido suficiente para corresponder a valores de J_{20} mais altos.

Figura 54 – Agrupamento de gráficos para fins de análise comparativa entre os distintos lodos submetidos à filtração, na concentração de SST de 23.000 mg/L e para as distintas pressões ensaiadas.



Os gráficos apresentados na Figura 54 apresentam os resultados obtidos para a queda de J_{20} e o aumento da R_t nos ensaios de filtração, para cada um dos lodos (E1-Petroquímico, E2-Lixiviado e E3-Hospitalar), agora todos na concentração de SST fixa em 23.000 mg/L, sendo que cada um dos gráficos da figura corresponde, em ordem, a cada uma das PTM ensaiadas: 180, 240 e 300 mbar.

De forma similar às análises dos resultados já realizados para as outras duas concentrações de SST ensaiadas, o comportamento do J_{20} e da R_t apresentou uma maior tendência de similaridade para E1-Petroquímico e E3-Hospitalar, enquanto E2-Lixiviado resultou mais distinto, com valores de J_{20} menores e R_t maiores. Analisando qualitativamente o comportamento das curvas dos gráficos, percebe-se que a concentração de 23.000 mg/L difere das outras duas já analisadas, e que agora a similaridade dos resultados entre E1-Petroquímico e E3-Hospitalar ocorreu em todas as PTM. Assim como nas concentrações anteriores, os valores absolutos de J_{20} para estes dois lodos mais similares são maiores do que para o E2-Lixiviado, que apresenta-se com R_t maiores e conseqüentemente J_{20} menores.

Analisando os dados apresentados nas tabelas anteriores, é possível extrair que os valores finais de J_{20} na concentração de SST em 23.000 mg/L e na PTM fixa em 180 mbar, foram: 27,96, 5,61 e 23,01 $L.m^{-2}.h^{-1}$, respectivamente para E1-Petroquímico, E2-Lixiviado e E3-Hospitalar. Estes mesmos resultados para a PTM fixa em 240 mbar, resultou em: 22,44, 5,52 e 21,76 $L.m^{-2}.h^{-1}$; e para a PTM fixa em 300 mbar resultou em: 27,48, 6,87 e 28,18 $L.m^{-2}.h^{-1}$. Confirma-se assim que o lodo E2-Lixiviado foi o que mais se distinguiu em resultados, enquanto que E1-Petroquímico e E3-Hospitalar apresentaram resultados em uma mesma ordem de grandeza, aproximando-se mais em valores absolutos finais quanto maior a PTM.

Analisando os resultados de EPS, verifica-se que para esta concentração de SST em 23.000 mg/L, E3-Hospitalar foi o que apresentou os valores maiores para a fração de EPS_{f0} (868,89 mg/L), conforme pode ser visto na Tabela 10 e nos gráficos correspondentes. E1-Petroquímico apresentou o menor valor (317,24 mg/L), e E2-Lixiviado apresentou um valor intermediário (750,59 mg/L). Isoladamente este parâmetro caracterizaria a tendência de que E3-Hospitalar apresentasse os menores valores para J_{20} e os maiores para R_t , fato que não corresponde ao observado. E1-Petroquímico apresentaria as maiores tendências de ter um J_{20} mais alto, o que foi constatado nos resultados, enquanto E2-Lixiviado teria uma

condição de valores de J_{20} intermediária, o que não se observou, pois este lodo foi o que apresentou os menores valores de fluxo de permeado.

Em termos de viscosidade e massa específica dos lodos, verifica-se na Tabela 8 que os resultados para a viscosidade dinâmica na concentração de 23.000 mg/L se comportaram de forma bem mais distinta do que para as outras concentrações, resultando em: $2,70 \times 10^{-3}$, $4,27 \times 10^{-3}$ e $1,98 \times 10^{-3}$ N.s.m⁻², respectivamente para E1-Petroquímico, E2-Lixiviado e E3-Hospitalar; correspondente a uma média de $2,98 \times 10^{-3}$ N.s.m⁻² e um desvio padrão de $1,2 \times 10^{-5}$, ou seja, um coeficiente de variação de 39,3 %. A partir do gráfico apresentado na Figura 25, verifica-se que para E1-Petroquímico e E3-Hospitalar, a evolução da viscosidade dinâmica com o aumento da concentração de SST praticamente evolui de forma linear, enquanto que para E2-Lixiviado houve um incremento acentuado para esta última concentração de 23.000 mg/L. Assim, para esta concentração de SST verifica-se que os menores valores de J_{20} corresponderam ao lodo com maior viscosidade na mistura. O que se pode inferir como justificativa para tal comportamento é que com esta concentração maior a promoção da turbulência não tenha sido eficiente para gerar esforços de cisalhamento suficientes para reduzir a ação dos mecanismos de bloqueio.

Com relação à massa específica, o gráfico apresentado na Figura 24 mostra que há uma tendência linear de crescimento da relação SST x massa específica. Sendo assim, a análise desta relação é similar a já realizada para as demais concentrações de SST. A média resultou em $1,010 \text{ g.mL}^{-1}$, com um desvio padrão de 0,007, correspondendo a um coeficiente de variação de 0,7 %. Dessa forma, mesmo com E2-Lixiviado apresentando resultados superiores aos demais lodos, infere-se que pouco provavelmente essa variação entre as massas específicas interferem sobre os resultados encontrados para a filtração.

Quanto às análises das características físicas dos biossólidos, apresentadas no capítulo 5.1.2, estas foram consideradas como regulares entre as todas as concentrações de SST ensaiadas e, assim, trabalhou-se somente com os valores médios resultantes. Dessa forma, a análise é a mesma já explanada anteriormente.

Fazendo uma síntese destes resultados, para analisar o comportamento comparativo à filtração dos distintos lodos ensaiados na concentração de SST fixa em 23.000 mg/L, verifica-se que a fração de EPS_{f_0} mais alta dentre os lodos, correspondeu ao E3-Hospitalar, que é a mistura com menores valores de viscosidade dinâmica, bem como apresenta maiores diâmetros de partícula e bem similares ao E1-Petroquímico. Estes resultados

conduziram a valores de J_{20} mais altos, e muito próximos de E1-Petroquímico. E1-Petroquímico, por sua vez, apresentou os menores valores para a fração de EPS_{f_0} , contém biossólidos com diâmetros médios muito próximos ao E3-Hospitalar, e resultou uma viscosidade dinâmica maior do que E3-Hospitalar. Esta combinação de características contribui para que os valores de J_{20} fossem os mais altos, e muito próximos ao E3-Hospitalar, como dito anteriormente. E2-Lixiviado apresentou valores da fração de EPS_{f_0} intermediários entre os demais, os diâmetros médios dos biossólidos são os menores e a viscosidade dinâmica resultante é a mais alta entre todas as análises realizadas. Neste caso, com os menores valores de J_{20} para este lodo, o que se pode depreender é que, com estes parâmetros de análise, esta condição estaria associada a maior concentração e também às características granulométricas dos biossólidos, tanto pelo seu diâmetro médio, quanto pela sua dispersão em torno da média, propiciando uma condição favorável à ação dos mecanismo de bloqueio.

5.3 ÍNDICE MODIFICADO DE FOULING - IMF

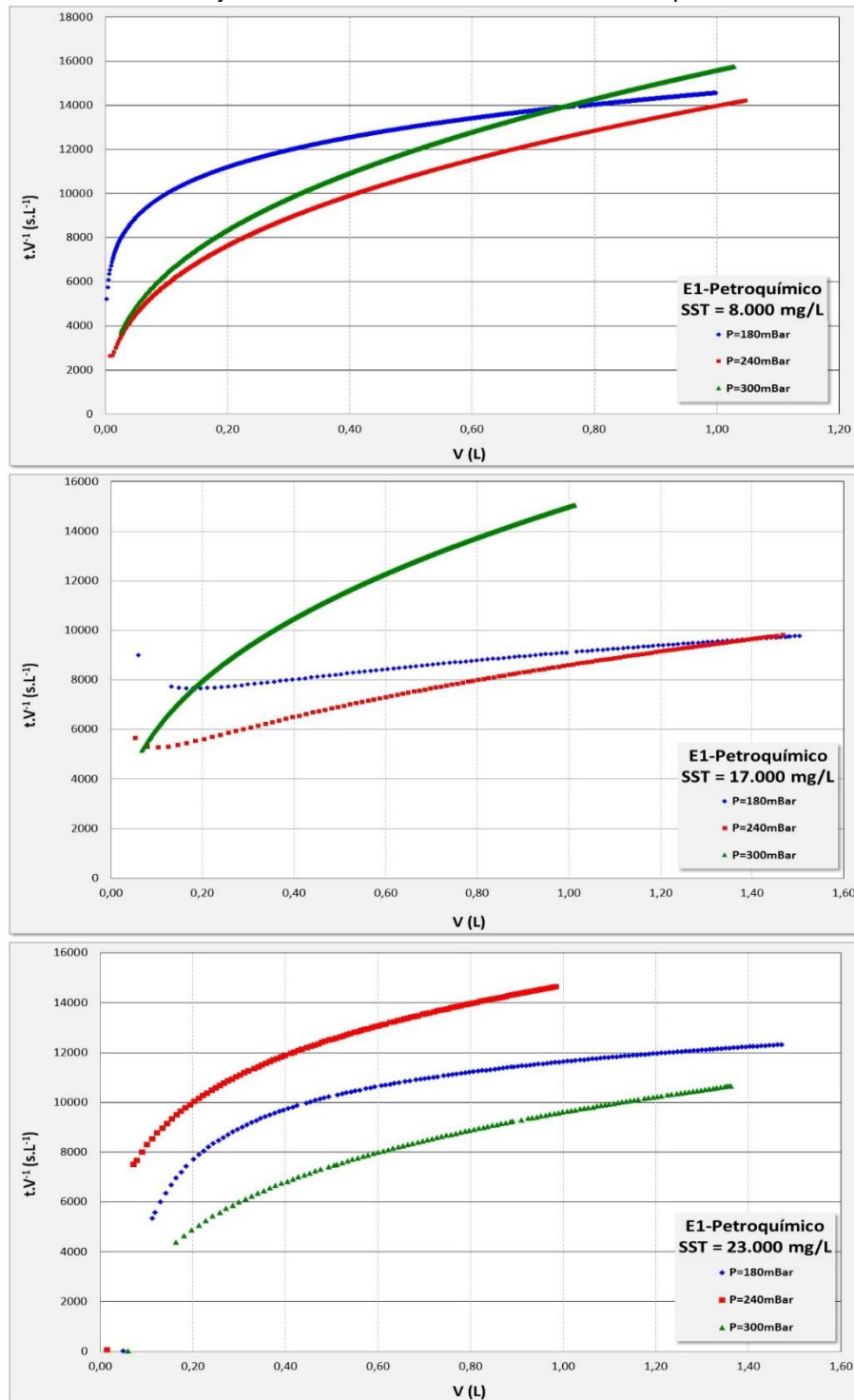
O Índice Modificado de Fouling – IMF tem sido utilizado como um indicador pela bibliografia corrente quando se analisa o comportamento do fluxo na filtração em membranas. Cabe salientar que este indicador foi modelado e proposto considerando membranas em filtração do tipo direta (*dead-end*). Fica a expectativa de analisar como se dará o comportamento deste indicador para esta condição de filtração em feixe de membranas do tipo fibra ocas submetidas à filtração que apresenta características de escoamento mistas, do tipo tangencial e do tipo direta. Outro diferencial foi o de avaliar o IMF num sistema submetido à aeração constante, como recurso para a promoção de turbulência, que acaba retardando a formação da colmatação. A seguir apresentam-se estes resultados e suas análises para cada um dos lodos submetidos aos ensaios de filtração.

5.3.1 IMF para E1-Petroquímico

O agrupamento de gráficos na Figura 55 apresenta os resultado da relação t/V versus V utilizada para a obtenção do valor do IMF. Estes correspondem a filtração de E1-

Petroquímico, sendo que cada um dos três gráficos refere-se a cada uma das concentrações de SST ensaiadas e cada uma das três curvas em cada gráfico corresponde a cada uma das PTM ensaiadas.

Figura 55 – Agrupamento de gráficos da relação t/V versus V para E1-Petroquímico e para cada concentração de SST ensaiada submetidas às distintas pressões.



Nas curvas dos gráficos apresentados da Figura 55, é possível perceber duas zonas com gradientes distintos para o crescimento das curvas, sendo que o segundo trecho normalmente apresenta um comportamento mais linear. Para a determinação do IMF, conforme descrito nos procedimentos metodológicos, subcapítulo 4.6.2, a partir dos gráficos de $t/V \times V$, com o auxílio de uma planilha eletrônica se fez um ajuste do tipo linear para o trecho retilíneo desta curva, permitindo encontrar o valor do seu coeficiente angular, conforme expresso pela equação 5. Para todos os ajustes de curvas, foi adotada a primeira equação de curva correspondente a um R^2 de, no mínimo, 0,99. Este tratamento sobre as curvas, com os ajustes da função linear e suas respectivas equações de ajuste, são apresentados no Apêndice A.

O valor dos coeficientes angulares encontrados nesta condição, correspondem ao IMF para cada ensaio, e esses resultados estão apresentados na Tabela 23 para cada uma das concentrações de SST e para cada uma das pressões transmembrana ensaiadas. Nesta tabela ainda são apresentados os resultados médios e os respectivos desvios padrão, seguidos do coeficiente de correlação de Pearson. Esta análise da correlação foi realizada na expectativa de identificarem-se as possíveis relações das variações das concentrações de SST e das PTM, com os valores correspondentes para o IMF que, por sua vez, estariam relacionados à formação dos mecanismos de bloqueio junto as membranas.

Tabela 23 – Resultados do IMF para os ensaios de filtração de E1-Petroquímico, para diferentes concentrações de SST e pressões transmembranas.

PTM SST	IMF (s/L ²)			Média	Desvio Padrão	Correlação Pearson (IMF X PTM)
	180 mbar	240 mbar	300 mbar			
8.000 mg/L	3,71E+03	6,79E+03	7,92E+03	6,14E+03	2,18E+03	0,966
17.000 mg/L	1,60E+03	3,04E+03	7,68E+03	4,11E+03	3,18E+03	0,957
23.000 mg/L	1,68E+03	4,54E+03	3,24E+03	3,15E+03	1,43E+03	0,543
Média	2,33E+03	4,79E+03	6,28E+03			
Desvio Padrão	1,19E+03	1,89E+03	2,64E+03			
Correlação Pearson (IMF X SST)	-0,903	-0,685	-0,830			

A partir destes resultados do IMF traçaram-se os gráficos apresentados em sequência (Figura 56 e Figura 57), que permitem uma melhor análise da variação deste parâmetro com a variação das concentrações de SST e das PTM.

Figura 56 – Gráfico da variação do IMF com a PTM, para cada uma das concentrações de SST ensaiadas para E1-Petroquímico.

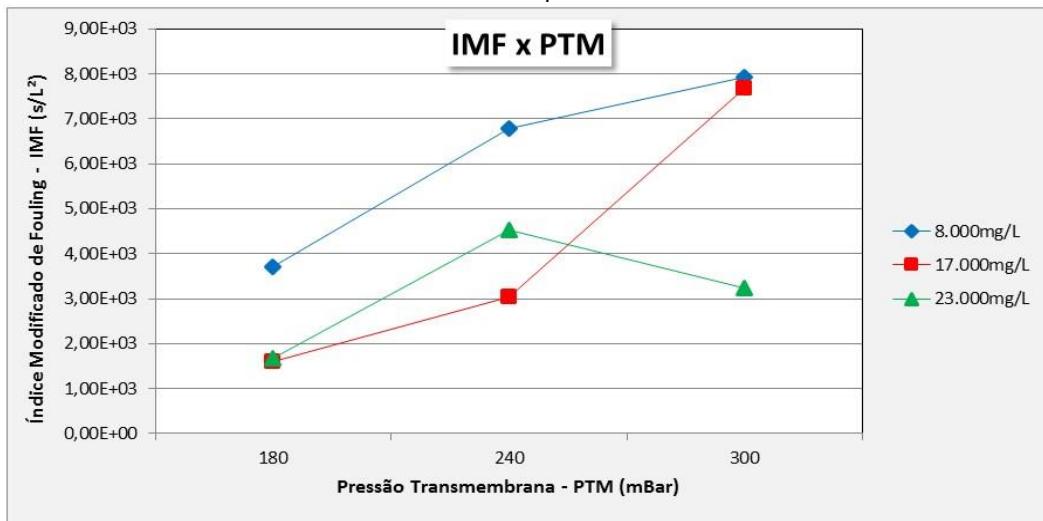
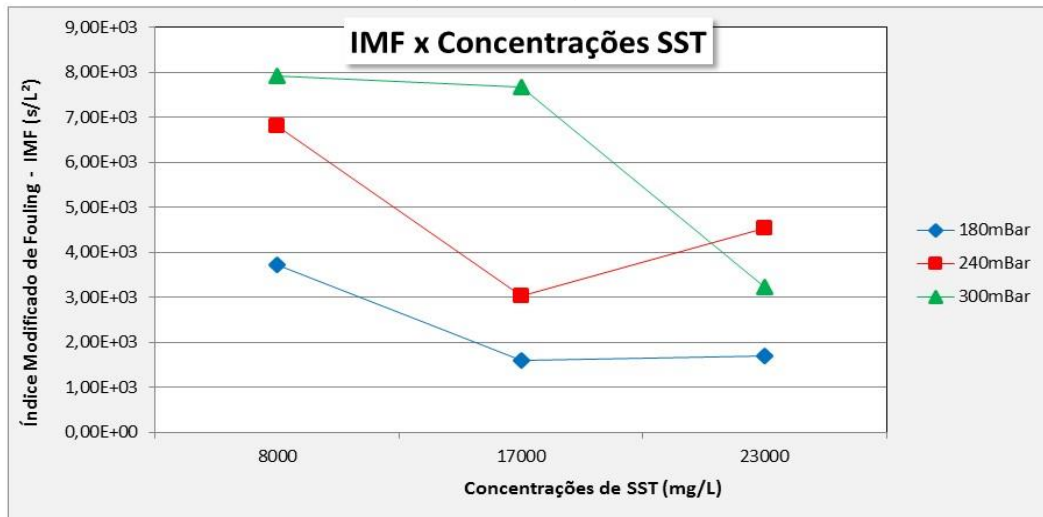


Figura 57 – Gráfico da variação do IMF com as concentrações de SST, para cada uma das PTM ensaiadas para E1-Petroquímico.



Os valores absolutos e conseqüentemente as médias encontram-se dentro de uma ordem de grandeza relativamente esperada, de acordo com os resultados bibliográficos encontrados para este tipo de análise. Outra observação é que todos os desvios padrão resultaram menores do que as médias, indicando a possibilidade de correlação entre as variações de concentração e de pressões com o IMF.

Da análise destes resultados é possível se depreender que, em média, houve um comportamento com maior tendência de proporcionalidade direta da variação do IMF com as PTM, ou seja, para uma concentração SST fixa, o aumento da PTM contribui com o aumento do IMF. A partir da análise dos resultados de correlação através do coeficiente de Pearson, verifica-se tendência de correlação positiva entre IMF x PTM. As correlações

encontradas para as concentrações indicaram uma correlação de moderada ($>0,3$) a forte ($>0,7$). Para as concentrações de SST de 8.000 e 17.000 mg/L a correlação é considerada forte, enquanto que para a concentração de SST em 23.000 mg/L este resultado indica uma correlação moderada. A média destas correlações resulta em 0,822, o que indica uma tendência de correlação forte entre IMF e PTM.

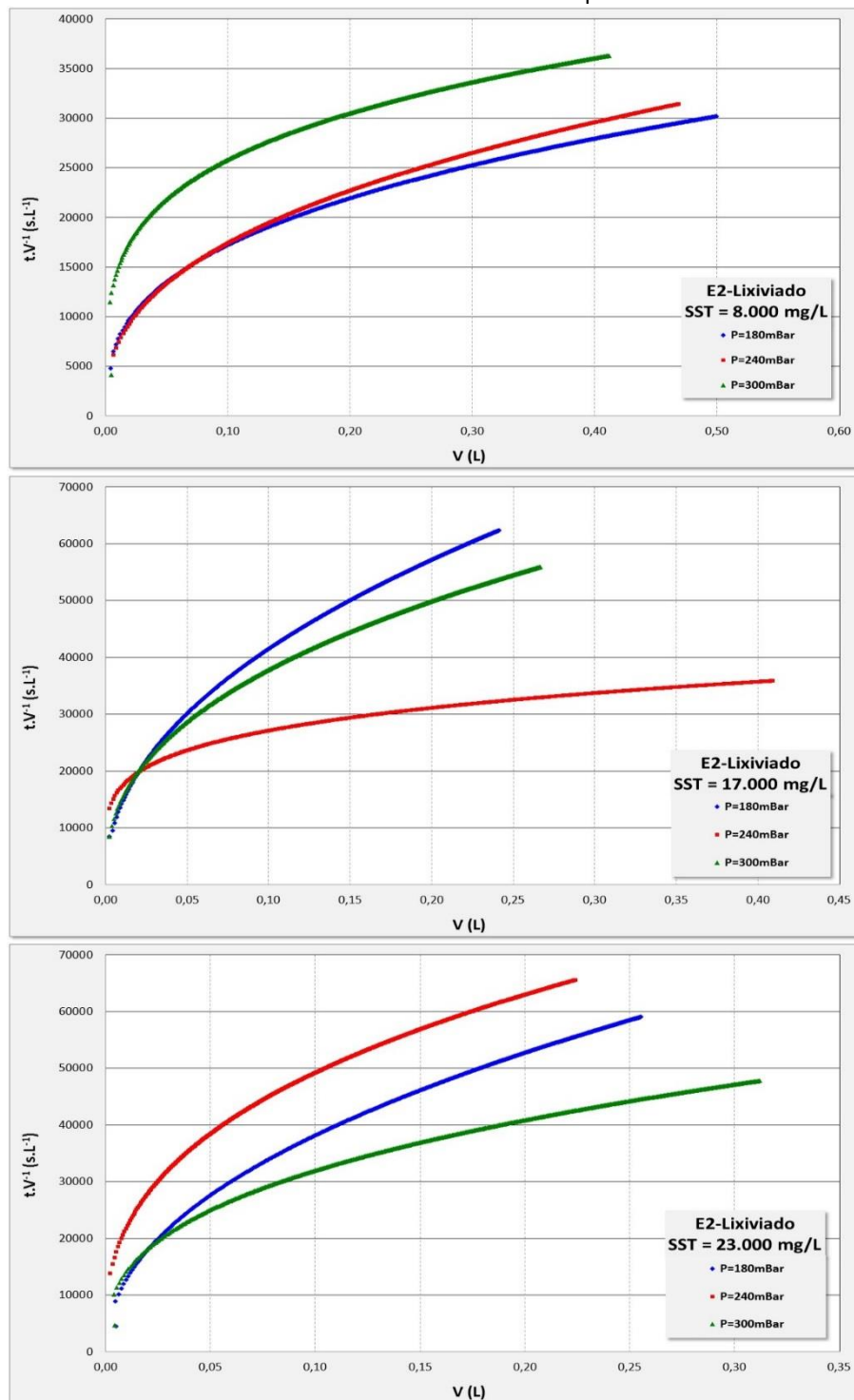
Já, comparando-se as médias dos resultados de IMF com a variação das concentrações de SST, o comportamento aparentemente seguiu uma tendência de proporcionalidade inversa, ou seja, o aumento da concentração de SST, para uma PTM fixa, contribuiria para a redução do IMF. As análises dos resultados das correlações de Pearson demonstram esta proporcionalidade inversa, de moderada a forte. Somente para o resultado da PTM em 240 mbar encontrou-se uma correlação moderada (-0,685), sendo as demais maiores do que -0,7, consideradas como correlação forte. Em média, o resultado destas correlações ficou em -0,806, indicando uma correlação inversa forte entre a concentração de SST e o IMF para uma PTM fixa.

Analisando comparativamente estes resultados do IMF para E1-Petroquímico, com os resultados encontrados para o incremento da R_t final sobre a R_t inicial, apresentada na Tabela 14; verifica-se certa similaridade no comportamento destes dois resultados. Ou seja, tanto o IMF quanto o incremento percentual da R_t final sobre a R_t inicial, respondem da mesma forma no que se refere a proporcionalidade direta encontrada destas relações com o aumento da PTM e com a proporcionalidade inversa encontrada com o aumento da concentração de SST. Dessa forma, pode-se afirmar que o IMF analisado nestas condições de ensaio para o E1-Petroquímico corresponde a uma caracterização da ação dos mecanismos de bloqueio junto as membranas, comparado com o incremento da R_t final sobre a R_t inicial.

5.3.2 IMF para E2-Lixiviado

O agrupamento de gráficos na Figura 58 apresenta os resultados das relações t/V versus V utilizada para a obtenção do valor do IMF. Estes correspondem à filtração de E2-Lixiviado, sendo que cada um dos três gráficos refere-se a cada uma das concentrações de SST ensaiadas e cada uma das três curvas em cada gráfico corresponde a cada uma das PTM ensaiadas.

Figura 58 – Agrupamento de gráficos da relação t/v versus V para E2-Lixiviado e para cada concentração de SST ensaiada submetidas às distintas pressões.



Nas curvas dos gráficos apresentados na Figura 58, é possível perceber duas zonas com gradientes distintos para o crescimento das curvas, com um segundo trecho apresentando um comportamento mais linear. Para a determinação do IMF, seguiram-se os mesmos procedimentos já descritos quando da apresentação dos resultados de E1-Petroquímico.

O valor dos coeficientes angulares encontrados nesta condição de ajuste, corresponde ao IMF para cada ensaio, e esses resultados estão apresentados na Tabela 24 para cada uma das concentrações de SST e para cada uma das PTM ensaiadas. Nesta tabela ainda são apresentados os resultados médios e os respectivos desvios padrão, seguidos do coeficiente de correlação de Pearson, assim como realizado nas análises para E1-Petroquímico.

Tabela 24 – Resultados do IMF para os ensaios de filtração de E1-Petroquímico, para diferentes concentrações de SST e pressões transmembranas.

PTM \ SST	IMF (s/L ²)			Média	Desvio Padrão	Correlação Pearson (IMF X PTM)
	180 mbar	240 mbar	300 mbar			
8.000 mg/L	2,58E+04	3,08E+04	2,73E+04	2,79E+04	2,57E+03	0,288
17.000 mg/L	1,39E+05	2,28E+04	9,95E+04	8,71E+04	5,91E+04	-0,335
23.000 mg/L	1,26E+05	1,25E+05	6,57E+04	1,06E+05	3,46E+04	-0,873
Média	9,70E+04	5,96E+04	6,41E+04			
Desvio Padrão	6,20E+04	5,69E+04	3,61E+04			
Correlação Pearson (IMF X SST)	0,871	0,759	0,625			

A partir destes resultados do IMF traçaram-se os gráficos apresentados em sequência (Figura 59 e Figura 60), que permitem uma melhor análise da variação deste parâmetro com a variação das concentrações de SST e das PTM.

Figura 59 – Gráfico da variação do IMF com a pressão transmembrana, para cada uma das concentrações de SST ensaiadas para E2-Lixiviado.

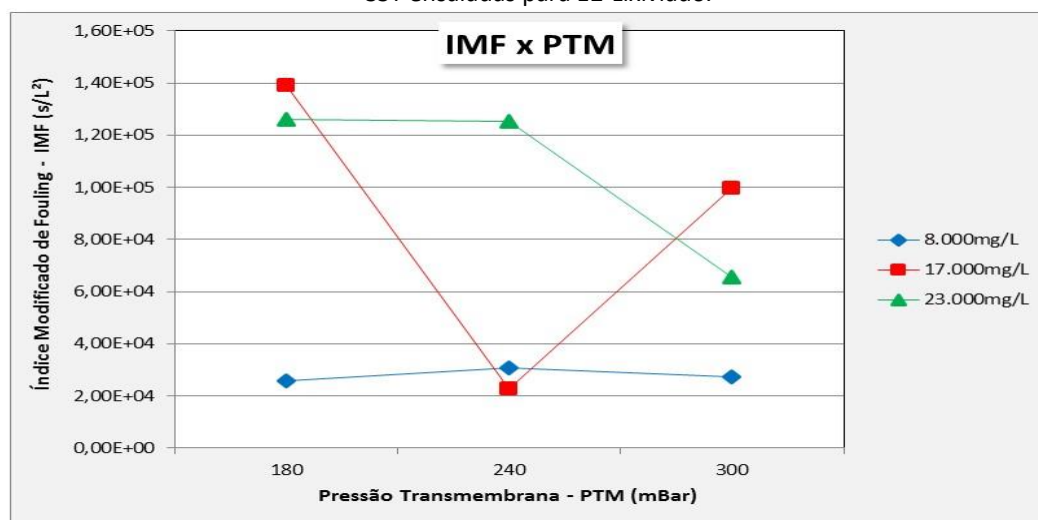
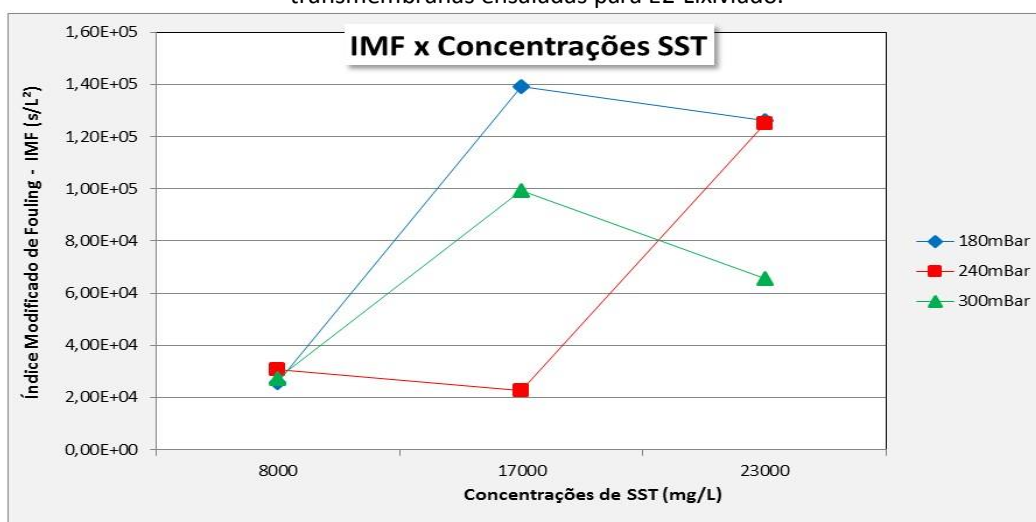


Figura 60 – Gráfico da variação do IMF com as concentrações de SST, para cada uma das pressões transmembranas ensaiadas para E2-Lixiviado.



Para E2-Lixiviado os valores absolutos, em média, são cerca de 16 vezes maiores do que os encontrados para E1-Petroquímico. Observa-se também que todos os desvios padrão resultaram menores do que as médias, indicando a possibilidade de correlação entre as variáveis envolvidas, mas ao mesmo tempo as tendências comparativas entre cada uma das concentrações e entre cada uma das PTM, geraram resultado não tão proporcionais quanto aos observados para E1-Petroquímico.

Analisando os resultados é possível se depreender que, em média, houve um comportamento com maior tendência de proporcionalidade direta da variação do IMF com as concentrações de SST. Ou seja, para cada uma das PTM fixas, o aumento da concentração de SST contribuiu, em média, com o aumento do IMF. A partir da análise dos resultados de correlação através do coeficiente de Pearson, verifica-se tendência de correlação positiva entre IMF x SST, variando de forte a moderada. As correlações encontradas para as concentrações fortes em 0,871 e 0,759, para as PTM de 180 e 240 mbar respectivamente, e moderada em 0,625 para a PTM de 300 mbar. Verifica-se ainda que com o aumento da pressão, correspondeu a redução da força de correlação.

Comparando-se as médias dos resultados de IMF com a variação das PTM, para cada uma das concentrações de SST fixas; o comportamento aparentemente seguiu tendências bem distintas para cada uma delas. Para a concentração de SST em 8.000 mg/L houve uma variação muito baixa em torno da média, o que resultou numa correlação de Pearson fraca, em 0,288, e diretamente proporcional. Para a concentração de SST em 17.000 mg/L resultou uma correlação inversamente proporcional e moderada, em -0,335; e para a

concentração de SST em 23.000 mg/L houve uma correlação também inversamente proporcional, porém forte, em -0,805. Observa-se que ao aumento da concentração de SST, correspondeu o aumento da força de correlação inversamente proporcional.

Comparativamente ao E1-Petroquímico já analisado, verifica-se para o E2-Lixiviado tendências bem distintas, denotando um comportamento de resposta à atuação dos mecanismos de bloqueio bastante distinto entre estes dois lodos ensaiados.

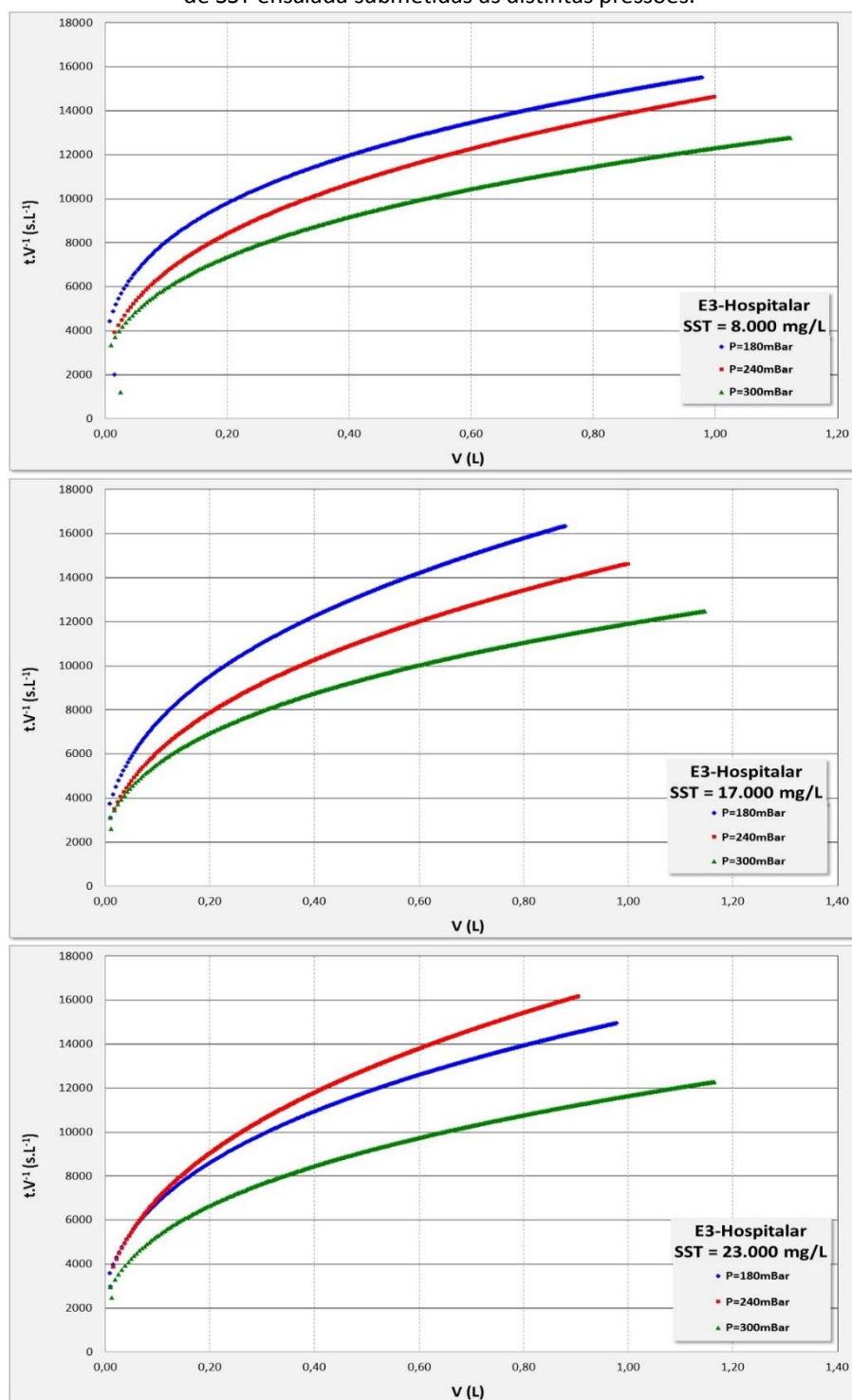
Analisando comparativamente estes resultados do IMF para E2-Lixiviado com os resultados encontrados para o incremento da R_t final sobre a R_t inicial, apresentada na Tabela 18; verifica-se uma similaridade parcial no comportamento destes dois resultados. Para o comportamento do incremento da R_t final sobre a inicial para cada uma das PTM fixas e variando-se as concentrações de SST, o comportamento também se demonstrou diretamente proporcional e com correlação forte, e com a redução desta força de correlação quanto maior a PTM. Já esta mesma análise feita comparando-se os resultados para cada uma das concentrações de SST fixa e variando-se as PTM, o incremento da R_t final sobre a inicial resultou em média com uma correlação mais para diretamente do que para inversamente proporcional. Para as concentrações de SST em 8.000 e 17.000 mg/L a correlação foi forte e diretamente proporcional, de 0,971 e 0,707, respectivamente. Para a concentração 23.000 mg/L a correlação resultou como fraca e inversamente proporcional, de -0,205. Mesmo assim, também como observado para o IMF, constata-se que a força de correlação foi enfraquecendo quanto maior a concentração de SST.

Dessa forma, para E2-Lixiviado, comparando-se as respostas dadas por estes dois indicadores, IMF e o incremento percentual da R_t final sobre a R_t inicial, com o objetivo de caracterizar o surgimento e o comportamento dos mecanismos de bloqueio, conclui-se que somente foi possível encontrar similaridade para a correlação com as concentrações de SST. Para a correlação com as PTM, as respostas foram muito distintas.

5.3.3 IMF para E3-Hospitalar

O agrupamento de gráficos na Figura 61 apresenta os resultados da relação t/V versus V utilizada para obter o valor do IMF para o lodo E3-Hospitalar. Cada figura é composta por três gráficos, cada um correspondente às concentrações de SST ensaiadas. Cada gráfico apresenta três curvas, cada uma correspondendo a cada uma das PTM ensaiadas.

Figura 61 – Agrupamento de gráficos da relação t/v versus V para E3-Hospitalar e para cada concentração de SST ensaiada submetidas às distintas pressões.



Neste gráficos é possível perceber duas zonas com gradientes distintos, com um segundo trecho normalmente com um comportamento mais linear. Para a determinação do IMF, conforme descrito nos procedimentos metodológicos, subcapítulo 4.6.2, a partir dos gráficos de $t/V \times V$, com o auxílio de uma planilha eletrônica se fez um ajuste do tipo linear para o trecho retilíneo desta curva, permitindo encontrar o valor do seu coeficiente

angular, conforme expresso pela equação 5. Para todos os ajustes de curvas, foi adotada a primeira equação de curva correspondente a um R^2 de, no mínimo, 0,99. Estas curvas e seus ajustes correspondentes estão apresentadas no Apêndice A.

O valor dos coeficientes angulares encontrados nesta condição, correspondem ao IMF para cada ensaio. A Tabela 25 apresenta estes resultados para cada uma das concentrações de SST e para cada uma das PTM ensaiadas. Nesta tabela ainda são apresentados os resultados médios e os respectivos desvios padrão, seguidos do coeficiente de correlação de Pearson, assim como realizada para os demais lodos ensaiados.

Tabela 25 – Resultados do IMF para os ensaios de filtração de E1-Petroquímico, para diferentes concentrações de SST e pressões transmembranas.

SST \ PTM	IMF (s/L ²)			Média	Desvio Padrão	Correlação Pearson (IMF X PTM)
	180 mbar	240 mbar	300 mbar			
8.000 mg/L	5,32E+03	5,71E+03	4,13E+03	5,05E+03	8,25E+02	-0,722
17.000 mg/L	7,60E+03	6,31E+03	4,12E+03	6,01E+03	1,76E+03	-0,989
23.000 mg/L	6,01E+03	7,71E+03	4,13E+03	5,95E+03	1,79E+03	-0,526
Média	6,31E+03	6,58E+03	4,13E+03			
Desvio Padrão	1,17E+03	1,03E+03	3,86E+00			
Correlação Pearson (IMF X SST)	0,405	0,942	0,321			

A partir destes resultados do IMF traçaram-se os gráficos apresentados em sequência (Figura 62 e Figura 63), que permitem uma melhor análise da variação deste parâmetro com a variação das concentrações de SST e das PTM.

Figura 62 – Gráfico da variação do IMF com a pressão transmembrana, para cada uma das concentrações de SST ensaiadas para E3-Hospitalar.

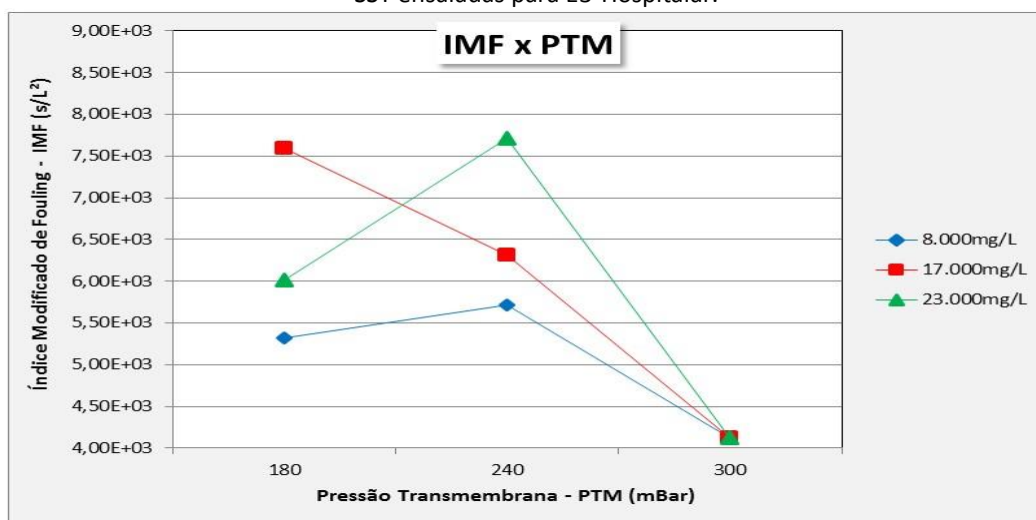
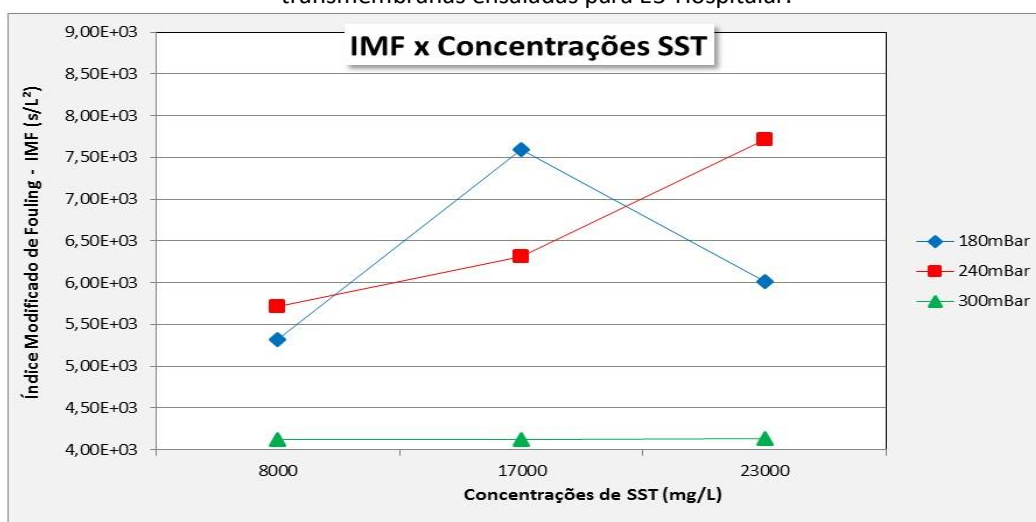


Figura 63 – Gráfico da variação do IMF com as concentrações de SST, para cada uma das pressões transmembranas ensaiadas para E3-Hospitalar.



Assim como para os demais lodos, os valores absolutos e consequentemente as médias encontram-se dentro de uma ordem de grandeza relativamente esperada, bem os desvios padrão resultaram menores do que as médias, indicando a possibilidade de correlação entre as variações de concentração e de pressões com o IMF. Comparado aos demais lodos, verifica-se que os resultados para E3-Hospitalar encontram-se na mesma ordem de grandeza do que os encontrados para E1-Petroquímico, porém com E1-Petroquímico apresentando valores abaixo dos apresentados por E3-Hospitalar.

Distintamente do E1-Petroquímico, da análise destes resultados para E3-Hospitalar é possível se depreender que, em média, houve um comportamento com maior tendência de proporcionalidade inversa da variação do IMF com as PTM, ou seja, para uma concentração SST fixa, o aumento da PTM contribui com a redução do IMF. A partir da análise dos resultados de correlação através do coeficiente de Pearson, verifica-se tendência de correlação negativa entre IMF x PTM. Para as concentrações de SST de 8.000 e 17.000 mg/L a correlação encontrada é considerada forte, de -0,722 e -0,989, respectivamente, enquanto que para a concentração de SST em 23.000 mg/L este resultado indica uma correlação moderada, em -0,526.

Comparando-se as médias dos resultados de IMF com a variação das concentrações de SST, o comportamento aparentemente seguiu uma tendência de proporcionalidade direta, ou seja, o aumento da concentração de SST, para uma PTM fixa, contribuiria para o aumento do IMF. As análises dos resultados das correlações de Pearson demonstram esta proporcionalidade direta, variando de moderada a forte. Somente para o resultado da PTM

em 240 mbar encontrou-se uma correlação forte (0,942), sendo as demais consideradas moderadas (0,405 e 0,321, para PTM de 180 e 300 mbar, respectivamente).

Analisando comparativamente estes resultados do IMF para E3-Hospitalar com os resultados encontrados para o incremento da R_t final sobre a R_t inicial, apresentada na Tabela 22; verifica-se que os resultados foram bastante distintos, diferentemente do que ocorreu com esta mesma análise comparativa para os lodos E1-Petroquímico e E2-Lixiviado. Neste caso, verifica-se que enquanto o IMF versus as PTM respondem com uma correlação inversamente proporcional, as PTM versus o incremento percentual da R_t final sobre a R_t inicial, respondem com uma correlação diretamente proporcional, variando de moderada a forte. Já na relação das R_t com as concentrações de SST para as PTM de 180 e de 300 mbar se obteve uma tendência de correlação inversamente proporcional, enquanto que para a PTM em 240 mbar houve uma correlação fraca diretamente proporcional. Dessa forma, pode-se afirmar que o IMF analisado nestas condições de ensaio para o E3-Hospitalar não correspondeu à caracterização da ação dos mecanismos de bloqueio comparadas com a análise do incremento da R_t final sobre a R_t inicial.

5.4 IDENTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE BLOQUEIO

Estas análises foram realizadas na expectativa de avaliar qual o tipo de mecanismo de bloqueio preponderante durante o ensaio, bem como também se houve e quando houve alterações destes mecanismos durante o tempo de ensaio, em intervalos de tempo definidos. Parte-se da premissa de que estes mecanismos ocorrem de forma concomitante, porém uns podem ser preponderantes sobre os outros, de forma que o comportamento à filtração acaba por se orientar segundo a sua ocorrência.

Assim como já detalhado no capítulo 4.6.2 dos procedimentos metodológicos, os dados coletados foram tratados para serem plotados os gráficos das funções linearizadas, conforme as equações de 12 a 15, relacionadas à identificação dos mecanismos de bloqueio, conforme indicado na Tabela 2 e na Figura 5. A seguir são apresentados e discutidos os resultados encontrados para cada um dos lodos ensaiados. Apresentam-se somente os resultados dos R^2 encontrados para os ajustes das curvas correspondentes a cada mecanismos de bloqueio. As curvas ajustadas para cada intervalo de tempo dos ensaios, seguidas das equações de ajustes e dos respectivos R^2 , são apresentadas no

Apêndice B. Os resultados dos R² são apresentados na forma gráfica e também tabelados, seguidos das médias, desvios padrão e coeficientes de correlação, que auxiliam na visualização e análises de tendências. Como recurso auxiliar na visualização dos resultados, utilizou-se uma formatação condicional por cores, onde o vermelho indica os maiores valores e verde indica o menor valor, por subconjunto de dados selecionados.

5.4.1 Mecanismos de Bloqueio nos ensaios para E1-Petroquímico

As tabelas em sequência (Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28) apresentam os resultados dos R² obtidos para a filtração do E1-Petroquímico, permitindo a análise das médias, desvio padrão e coeficiente de variação. Cada uma das tabelas corresponde a uma das concentrações de SST, estratificadas por PTM e por intervalos de tempo. Em sequência apresentam-se os gráficos agrupados por cada uma das concentrações de SST ensaiadas (Figura 64, Figura 65 e Figura 66), com os resultados dos R² correspondentes a cada um dos mecanismos de bloqueio. Cada uma das figuras corresponde a uma concentração de SST fixa. Cada figura, por sua vez, é composta por uma sequência de três gráficos, onde cada um corresponde a uma PTM distinta.

Tabela 26 – Resultados do coeficiente R² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E1-Petroquímico na concentração de SST de 8.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

SST (mg/L)	PTM (mbar)	Intervalo de Tempo	Mecanismos de Bloqueio				Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
			Completo	Padrão	Intermediário	Torta			
8.000	180	0-30	0,7407	0,884	0,884	0,911	0,8549	0,07721	9,03%
		30-60	0,9921	0,9942	0,9942	0,996	0,9941	0,00159	0,16%
		60-120	0,9921	0,9942	0,9942	0,9959	0,9941	0,00156	0,16%
		120-180	0,997	0,9978	0,9978	0,9984	0,9978	0,00057	0,06%
		180-240	0,9986	0,999	0,999	0,9993	0,9990	0,00029	0,03%
		Média	0,9441	0,97384	0,97384	0,98012	0,9680	0,01619	1,67%
		Desv. Pad.	0,11374	0,05027	0,05027	0,03867			
	Variação	12,05%	5,16%	5,16%	3,95%				
	240	0-30	0,6913	0,9146	0,906	0,961	0,8682	0,12040	13,87%
		30-60	0,9921	0,9959	0,9959	0,9984	0,9956	0,00260	0,26%
		60-120	0,9921	0,9959	0,9959	0,9984	0,9956	0,00260	0,26%
		120-180	0,997	0,9984	0,9984	0,9993	0,9983	0,00095	0,10%
		180-240	0,9986	0,9993	0,9993	0,9997	0,9992	0,00046	0,05%
		Média	0,93422	0,98082	0,9791	0,99136	0,9714	0,02536	2,61%
		Desv. Pad.	0,13583	0,03705	0,04089	0,01698			
	Variação	14,54%	3,78%	4,18%	1,71%				
	300	0-30	0,8766	0,9488	0,9488	0,9784	0,9382	0,04334	4,62%
		30-60	0,992	0,9959	0,9959	0,9984	0,9956	0,00264	0,27%
		60-120	0,9921	0,9959	0,9959	0,9985	0,9956	0,00264	0,26%
		120-180	0,997	0,9984	0,9984	0,9993	0,9983	0,00095	0,10%
		180-240	0,9986	0,9993	0,9993	0,9997	0,9992	0,00046	0,05%
Média		0,97126	0,98766	0,98766	0,99486	0,9854	0,00999	1,01%	
Desv. Pad.		0,05300	0,02178	0,02178	0,00922				
Variação	5,46%	2,20%	2,20%	0,93%					

Tabela 27 – Resultados do coeficiente R² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E1-Petroquímico na concentração de SST de 17.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

SST (mg/L)	PTM (mbar)	Intervalo de Tempo	Mecanismos de Bloqueio				Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
			Completo	Padrão	Intermediário	Torta			
17.000	180	0-30	0,9918	0,9193	0,9946	0,927	0,9582	0,04058	4,24%
		30-60	0,9925	0,813	0,995	0,824	0,9061	0,10129	11,18%
		60-120	0,9915	0,9896	0,9943	0,9863	0,9904	0,00336	0,34%
		120-180	0,9963	0,9997	0,9972	0,9999	0,9983	0,00180	0,18%
		180-240	0,9991	0,9997	0,9993	0,9999	0,9995	0,00037	0,04%
		Média	0,99424	0,94426	0,99608	0,94742	0,9705	0,02851	2,94%
		Desv. Pad.	0,00333	0,08071	0,00213	0,07528			
		Variação	0,33%	8,55%	0,21%	7,95%			
	240	0-30	0,9203	0,9804	0,9648	0,9941	0,9649	0,03205	3,32%
		30-60	0,9925	0,813	0,995	0,824	0,9061	0,10129	11,18%
		60-120	0,9915	0,996	0,9956	0,9985	0,9954	0,00290	0,29%
		120-180	0,9975	0,9988	0,9987	0,9995	0,9986	0,00083	0,08%
		180-240	0,9983	0,9993	0,999	0,9997	0,9991	0,00059	0,06%
		Média	0,98002	0,9575	0,99062	0,96316	0,9728	0,01524	1,57%
		Desv. Pad.	0,03352	0,08115	0,01454	0,07783			
		Variação	3,42%	8,47%	1,47%	8,08%			
	300	0-30	0,954	0,9785	0,9785	0,9912	0,9756	0,01556	1,60%
		30-60	0,992	0,9959	0,9959	0,9984	0,9956	0,00264	0,27%
		60-120	0,9921	0,996	0,996	0,9985	0,9957	0,00264	0,27%
		120-180	0,997	0,998	0,9984	0,9993	0,9982	0,00095	0,10%
		180-240	0,9986	0,9993	0,9993	0,9997	0,9992	0,00046	0,05%
		Média	0,98674	0,99354	0,99362	0,99742	0,9928	0,00445	0,45%
		Desv. Pad.	0,01854	0,00853	0,00858	0,00352			
		Variação	2,14%	0,33%	2,23%	0,94%			

Tabela 28 – Resultados do coeficiente R² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E1-Petroquímico na concentração de SST de 23.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

SST (mg/L)	PTM (mbar)	Intervalo de Tempo	Mecanismos de Bloqueio				Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
			Completo	Padrão	Intermediário	Torta			
23.000	180	0-30	0,9479	0,984	0,955	0,9918	0,9697	0,02148	2,22%
		30-60	0,9909	0,9958	0,9925	0,9968	0,9940	0,00277	0,28%
		60-120	0,9934	0,993	0,9945	0,9942	0,9938	0,00069	0,07%
		120-180	0,9991	0,9982	0,9993	0,9986	0,9988	0,00050	0,05%
		180-240	0,9945	0,9964	0,9957	0,9971	0,9959	0,00111	0,11%
		Média	0,98516	0,99348	0,9874	0,9957	0,9904	0,00497	0,50%
		Desv. Pad.	0,02104	0,00562	0,01828	0,00269			
		Variação	2,14%	0,57%	1,85%	0,27%			
	240	0-30	0,9652	0,9973	0,9745	0,9995	0,9841	0,01694	1,72%
		30-60	0,9926	0,9969	0,996	0,9985	0,9960	0,00249	0,25%
		60-120	0,9939	0,9958	0,9962	0,9975	0,9959	0,00149	0,15%
		120-180	0,9963	0,9982	0,9974	0,9989	0,9977	0,00112	0,11%
		180-240	0,9985	0,9992	0,999	0,9995	0,9991	0,00042	0,04%
		Média	0,9893	0,99748	0,99262	0,99878	0,9945	0,00439	0,44%
		Desv. Pad.	0,01366	0,00129	0,01020	0,00083			
		Variação	1,38%	0,13%	1,03%	0,08%			
	300	0-30	0,9484	0,9911	0,9477	0,9783	0,9664	0,02180	2,26%
		30-60	0,9926	0,9983	0,9957	0,9995	0,9965	0,00306	0,31%
		60-120	0,9894	0,9966	0,9936	0,9986	0,9946	0,00400	0,40%
		120-180	0,998	0,9985	0,9987	0,9993	0,9986	0,00054	0,05%
		180-240	0,9988	0,9992	0,999	0,9996	0,9992	0,00034	0,03%
		Média	0,98544	0,99674	0,98694	0,99506	0,9910	0,00568	0,57%
		Desv. Pad.	0,02107	0,00329	0,02205	0,00938			
		Variação	5,46%	2,20%	2,20%	0,93%			

Figura 64 – Resultado gráfico e tabela com os R² correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E1-Petroquímico, na concentração de SST fixa em 8.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

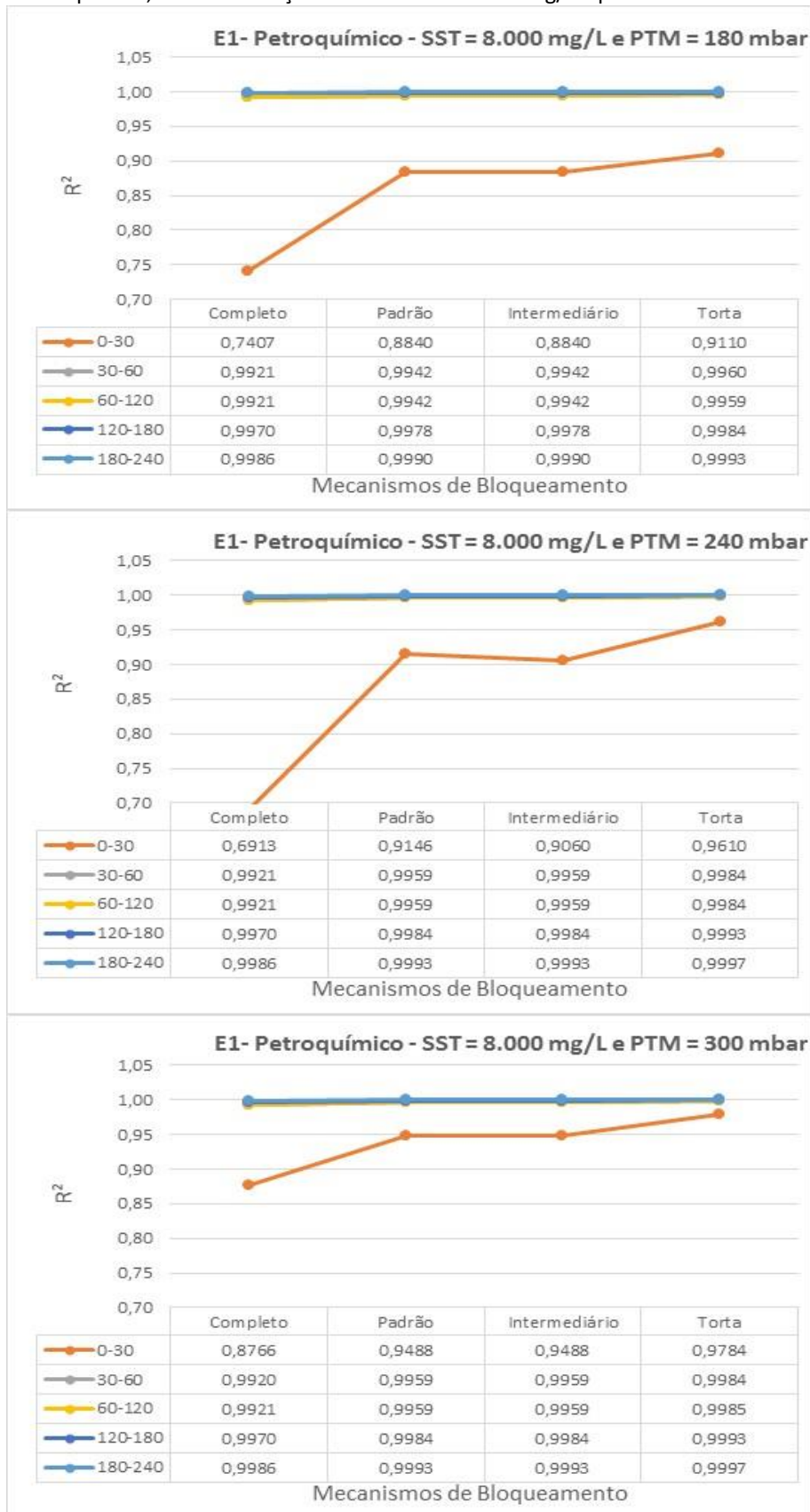


Figura 65 – Resultado gráfico e tabela com os R² correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E1-Petroquímico, na concentração de SST fixa em 17.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

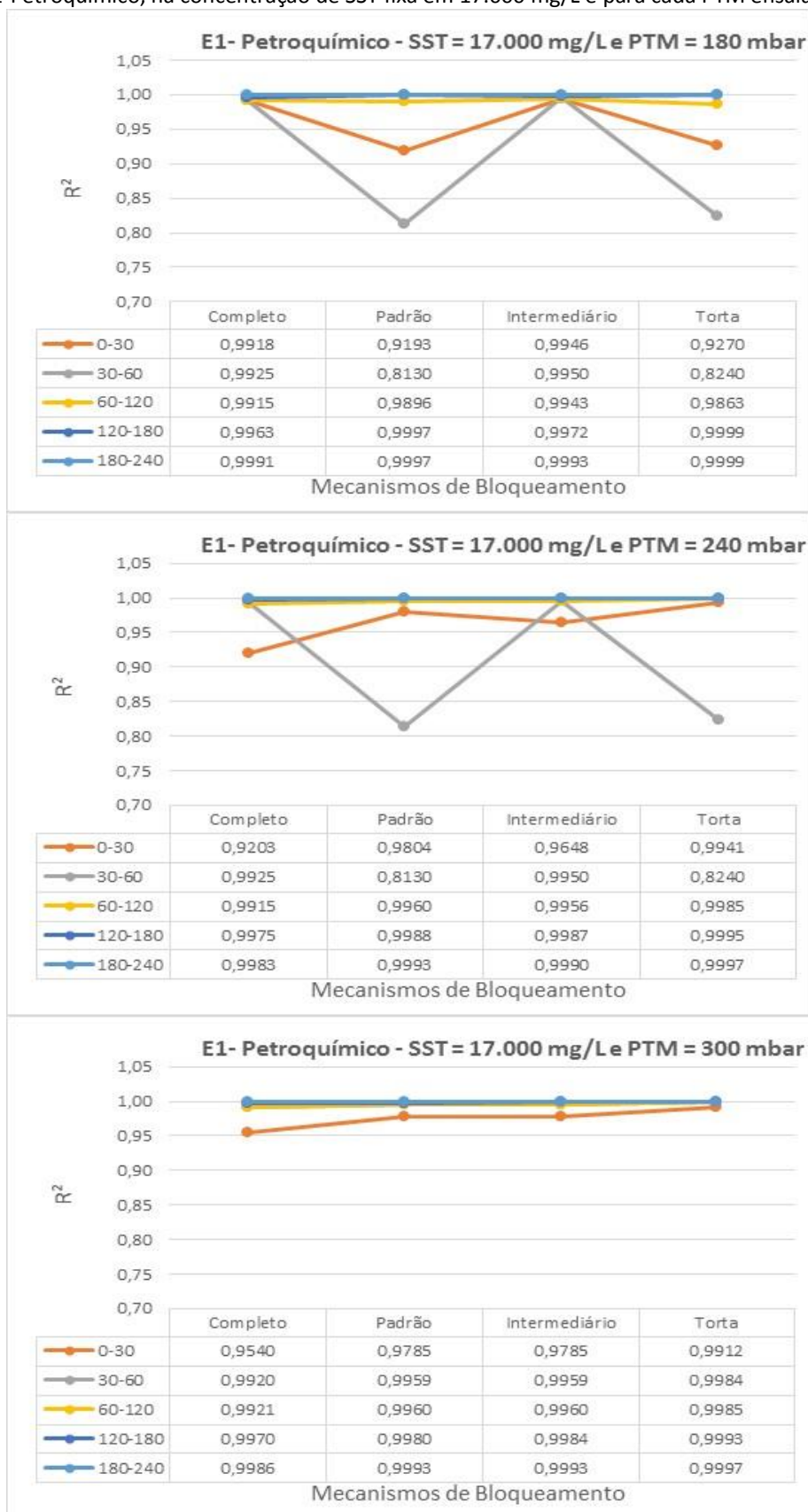
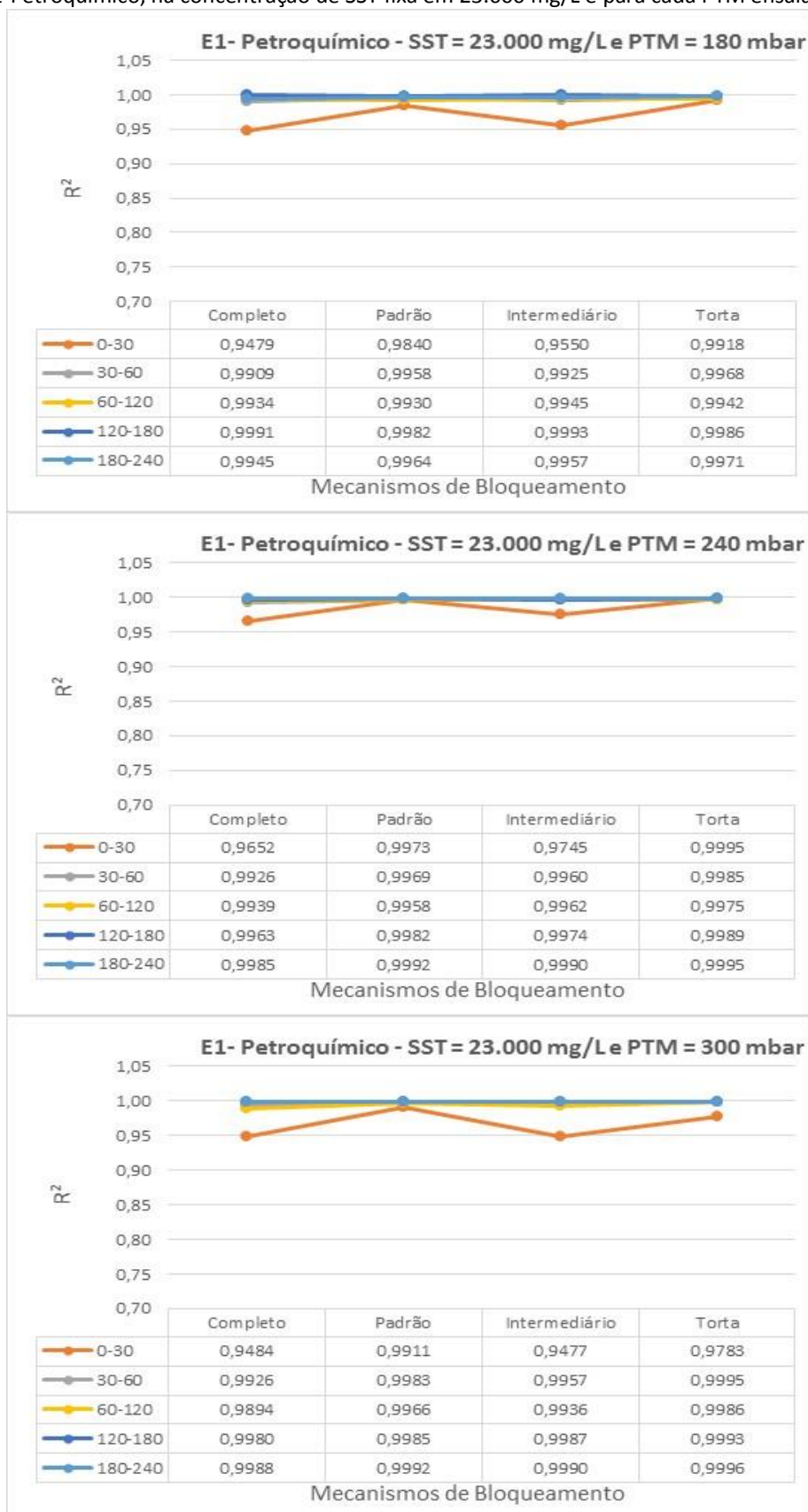


Figura 66 – Resultado gráfico e tabela com os R^2 correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E1-Petroquímico, na concentração de SST fixa em 23.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.



Destes gráficos apresentados referentes ao E1-Petroquímico, observa-se diretamente que para todas as concentrações de SST e as PTM ensaiadas, o intervalo 0-30, representando a primeira meia hora de ensaio, se destaca por apresentar os menores valores de R^2 para os distintos mecanismos de bloqueio. Este é um indicativo de que nestes intervalos, os mecanismos de bloqueio ainda estavam se formando, ao mesmo tempo que também se constata que o mecanismo preponderante foi a filtração por Torta, correspondente aos maiores valores de R^2 . Verifica-se ainda que para os demais tempos, posteriores à primeira meia hora, os mecanismos de bloqueio ocorrem de forma mais concomitante, em sua maioria com valores de R^2 acima de 0,99, resultando em curvas bastante sobrepostas. Somente para o caso dos resultados para a concentração de 17.000 mg/L nas PTM de 180 e 240 mbar, ocorreu uma maior diferenciação para a curva referente ao intervalo 30-60, ou seja, para a segunda meia hora de ensaio. Estes resultados com relativa instabilidade para os mecanismos de bloqueio, podem ser associados às condições hidrodinâmicas dos ensaios, com a presença de bolhas de ar insufladas no meio para promoção de turbulência e ainda às possibilidades de deslocamentos entre um feixe de membrana e outro, fatos que podem ter contribuído para a regressão ou retardo na atuação dos mecanismos de bloqueio nos momentos iniciais e ou para a sua redução durante tempos posteriores. Entretanto, estes são os únicos que diferem tanto para as demais concentrações, quanto para as demais PTM.

Ao se analisar os resultados numéricos, especialmente através das tabelas apresentadas, é possível observar que o mecanismo por Torta é preponderante na maioria dos intervalos de tempo, sendo que em algumas situações os mecanismos do tipo Intermediário ou Padrão foram preponderantes. Por vezes, inclusive estes dois mecanismos, Intermediário e Padrão, resultaram com valores idênticos. Com relação ao mecanismo denominado Completo, o que se verifica é que em nenhum dos intervalos ele se tornou preponderante. Assim, além da filtração por Torta que se demonstrou preponderante em todas as PTM e na maioria dos intervalos de tempo, tem-se que com o aumento da PTM, os mecanismos de bloqueio do tipo Intermediário, Padrão e Completo, começam a também se tornar mais significativos. Esta tendência é possível de ser constatada pela análise do coeficiente de variação, que indica como o desvio padrão variou em torno da média. Das tabelas do E1-Petroquímico, observando-se os resultados dos coeficientes de variação ao longo dos intervalos de tempo, verifica-se que houve a redução

deste valor, ou seja, apresentando uma tendência de que se tornassem cada vez mais próximos um do outro. Exceção a esta condição se observa na tabela correspondente à concentração de 17.000 mg/L, onde o intervalo 30-60, para as PTM de 180 e 240 mbar, não seguiu esta mesma tendência, correspondendo às instabilidades já observados nos resultados gráficos.

Observando-se que o R^2 do mecanismo de bloqueio do tipo Torta foi aumentando ao longo dos intervalos de tempo, conclui-se que houve um maior aumento dos R^2 correspondentes aos outros mecanismos de bloqueio, de modo a aproximarem-se mais do mecanismo por Torta, indicando que os mecanismos de bloqueio tendem a atuar de forma mais equânime e intensa ao longo dos ensaios.

Também é possível analisar pelas médias e pelos coeficientes de variação, por mecanismos de bloqueio, e para cada PTM para uma concentração de SST fixa, que houve uma tendência de que o aumento da PTM resultasse em aumento da incidência dos mecanismos de bloqueio. Observados especialmente as médias dos mecanismos de bloqueio do tipo Torta, que foi o mais preponderante por intervalo de tempo, constata-se esta tendência de aumento do valor médio para cada PTM e, ainda, a redução do coeficiente de variação, indicando a maior regularidade da ação deste mecanismo ao longo dos ensaios. Esta mesma análise pode ser observada com a média total de cada agrupamento de PTM, destacada em negrito nas tabelas. Verifica-se que houve uma tendência de aumento com o aumento das PTM, ou seja, indicando que com o aumento das PTM correspondeu um aumento da atuação de todos os mecanismos de bloqueio. Somente houve uma distorção nesta tendência entre as PTM de 240 e 300 mbar na concentração de 23.000 mg/L, que não correspondeu a um aumento direto.

Ainda comparando-se os resultados absolutos dos R^2 encontrados para todas as concentrações analisadas, percebe-se que os coeficientes apresentaram tendência de aumento com a concentração. Para constatar este fato, a partir dos dados médios por PTM das três tabelas anteriores, foi calculada a média total resultante dos R^2 para cada uma das concentrações de SST, considerando todos os intervalos de tempo e todas as PTM, o que resultou em: 0,9749, 0,9787 e 0,9920, para as concentrações de 8.000 mg/L, 17.000 mg/L e 23.000 mg/L, respectivamente. Estes resultados refletem a influência da concentração no sentido de incrementar a ação dos mecanismos de bloqueio sobre as membranas durante a filtração dos lodos, aumentando os valores da R_t .

Ao se comparar com os resultados obtidos para a filtração, no que se refere ao comportamento do J_{20} e da R_t , constata-se que a primeira meia hora de ensaio foi a mais significativa para a queda do J_{20} e para o aumento da R_t . Estas análises podem ser realizadas a partir das tabelas que apresentaram os extratos de dados dos ensaios (Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13). Com estes dados é possível comparar este comportamento evolutivo da presença e preponderâncias dos mecanismos de bloqueio, com o incremento da R_t também ao longo do tempo.

Através dos dados da Tabela 11, referentes aos resultados para a concentração de SST em 8.000 mg/L, observando-se os incrementos percentuais da R_t a cada intervalo de tempo, constata-se que na primeira meia hora de ensaio (intervalo 0-30), estes resultados são maiores quando comparados com os demais tempos, sendo que resultaram em: 108,3, 204,8 e 253,4 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente. A partir desta primeira meia hora, os incrementos percentuais se reduzem significativamente, entre um tempo e outro, até os 240 min totais dos ensaios. Para a segunda meia hora, o seja, no intervalo 30-60, estes incrementos percentuais para a formação da R_t já se reduzem bastante, resultando em: 10,6, 20,9 e 21,3 %, respectivamente para cada uma das PTM em ordem crescente. Constata-se também que estes incrementos percentuais ocorrem de forma diretamente proporcional ao aumento das PTM, coincidindo com o observado para a formação dos mecanismos de bloqueio. Nos gráficos da Figura 64, comparando-se as curvas da primeira meia hora, percebe-se que com o aumento das PTM elas se aproximam das curvas dos demais intervalos de tempo, evidenciando que para as maiores PTM há uma tendência de que os mecanismos de bloqueio atuem mais rapidamente e se tornem mais equânimes, porém sempre com o mecanismo do tipo Torta sendo o preponderante.

Estes mesmos resultados para a concentração de SST em 17.000 mg/L são apresentados na Tabela 12, permitindo também constatar que os incrementos percentuais de formação da R_t são maiores na primeira meia hora de ensaio (intervalo 0-30) comparada com os demais tempos, sendo que resultaram em: 13,5, 94,2 e 128,3 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente. Comparando-se com os resultados para a concentração de SST em 8.000 mg/L, estes incrementos percentuais da primeira meia hora foram menores para esta concentração de 17.000 mg/L. Percebe-se ainda que a partir desta primeira meia hora, os incrementos percentuais se reduzem entre um tempo

e outro até os 240 min totais dos ensaios, assim como na concentração anteriormente analisada. Entretanto, distintamente da concentração de 8.000 mg/L, a segunda meia hora (intervalo 30-60) apresentou resultados mais próximos ao primeiro intervalo (0-30): 11,15, 21,3 e 21,6 %, respectivamente para cada uma das PTM em ordem crescente. Esta proximidade maior entre os resultados para os intervalos 0-30 e 30-60, ocorreu mais intensamente para as PTM de 180 e 240 mbar. Estes resultados coincidem com instabilizações observadas nas curvas da segunda meia hora para estas mesmas PTM, na Figura 65, assim como também pelas tendências das médias e coeficientes de variação que podem ser vistos na Tabela 27.

Ainda para a concentração de 17.000 mg/L, constata-se também que estes incrementos percentuais ocorrem de forma diretamente proporcional ao aumento das PTM, coincidindo com o observado para a formação dos mecanismos de bloqueio. Nos gráficos da Figura 65, comparando-se as curvas da primeira meia hora, percebe-se que com o aumento das PTM elas se aproximam das curvas dos demais intervalos de tempo, evidenciando que para as maiores PTM há uma tendência de que os mecanismos de bloqueio atuem mais rapidamente e se tornem mais equânimes, e com o mecanismo do tipo Torta sendo mais preponderante.

A Tabela 13 apresenta os resultados para a concentração de SST em 23.000 mg/L. Através desta, constata-se a primeira meia hora de ensaio também com os maiores incrementos percentuais para a R_t , sendo que resultaram em: 58,5, 186,4 e 224,1 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente. Comparando-se com os resultados das concentrações anteriormente analisadas, verifica-se que estes estão mais próximos aos encontrados para a concentração de SST em 8.000 mg/L, e mais distinto da concentração de 17.000 mg/L. Percebe-se ainda que a partir desta primeira meia hora, os incrementos percentuais se reduzem entre um tempo e outro até os 240 min totais dos ensaios, assim como nas concentrações anteriormente analisadas. Para a segunda meia hora, ou seja, no intervalo 30-60, estes incrementos percentuais para a formação da R_t já se reduzem bastante, resultando em: 8,4, 12,6 e 17,9 %, respectivamente para cada uma das PTM em ordem crescente. Constata-se também que estes incrementos percentuais ocorrem de forma diretamente proporcional ao aumento das PTM, coincidindo com o observado para a formação dos mecanismos de bloqueio. Nos gráficos da Figura 66, comparando-se as curvas da primeira meia hora, percebe-se que com o aumento das PTM

elas se aproximam das curvas dos demais intervalos de tempo, evidenciando que para as maiores PTM há uma tendência de que os mecanismos de bloqueio atuem mais rapidamente e se tornem mais equânimes, porém com o mecanismo do tipo Torta sendo o mais preponderante.

5.4.2 Mecanismos de Bloqueio nos ensaios para E2-Lixiviado

As tabelas em sequência (Tabela 29, Tabela 30, Tabela 31) apresentam os resultados dos R² obtidos para a filtração do E1-Petroquímico, permitindo a análise das médias, desvio padrão e coeficiente de variação. Cada uma das tabelas corresponde a uma das concentrações de SST, estratificadas por PTM e por intervalos de tempo. Em sequência apresentam-se os gráficos agrupados por cada uma das concentrações de SST ensaiadas (Figura 67, Figura 68 e Figura 69), com os resultados dos R² correspondentes a cada um dos mecanismos de bloqueio. Cada uma das figuras corresponde a uma concentração de SST fixa. Cada figura, por sua vez, é composta por uma sequência de três gráficos, onde cada um correspondente a uma PTM distinta.

Tabela 29 – Resultados do coeficiente R² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E2-Lixiviado na concentração de SST de 8.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

SST (mg/L)	PTM (mbar)	Intervalo de Tempo	Mecanismos de Bloqueio				Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
			Completo	Padrão	Intermediário	Torta			
8.000	180	0-30	0,6861	0,9015	0,9015	0,947	0,8590	0,11726	13,65%
		30-60	0,9921	0,9957	0,9957	0,9982	0,9954	0,00251	0,25%
		60-120	0,9914	0,9953	0,9953	0,9978	0,9950	0,00264	0,27%
		120-180	0,9973	0,9985	0,9985	0,9994	0,9984	0,00086	0,09%
		180-240	0,9989	0,9994	0,9994	0,9998	0,9994	0,00037	0,04%
		Média	0,93316	0,97808	0,97808	0,98844	0,9694	0,02467	2,55%
		Desv. Pad.	0,13815	0,04285	0,04285	0,02318	-	-	-
	Variação	14,80%	4,38%	4,38%	2,35%	-	-	-	
	240	0-30	0,6958	0,9091	0,9091	0,9558	0,8675	0,11653	13,43%
		30-60	0,9921	0,9959	0,9959	0,9984	0,9956	0,00260	0,26%
		60-120	0,9914	0,9955	0,9955	0,9981	0,9951	0,00277	0,28%
		120-180	0,9973	0,9986	0,9986	0,9985	0,9983	0,00064	0,06%
		180-240	0,9986	0,9994	0,9994	0,9998	0,9993	0,00050	0,05%
		Média	0,93504	0,9797	0,9797	0,99012	0,9711	0,02456	2,53%
		Desv. Pad.	0,13378	0,03950	0,03950	0,01920	-	-	-
	Variação	14,31%	4,03%	4,03%	1,94%	-	-	-	
	300	0-30	0,8098	0,9045	0,9045	0,9378	0,8892	0,05518	6,21%
		30-60	0,9922	0,995	0,995	0,9971	0,9948	0,00201	0,20%
		60-120	0,9914	0,9945	0,9945	0,9966	0,9943	0,00214	0,22%
		120-180	0,9973	0,9983	0,9983	0,999	0,9982	0,00070	0,07%
		180-240	0,9989	0,9993	0,9993	0,9996	0,9993	0,00029	0,03%
Média		0,95792	0,97832	0,97832	0,98602	0,9751	0,01204	1,24%	
Desv. Pad.		0,08286	0,04132	0,04132	0,02699	-	-	-	
Variação	8,65%	4,22%	4,22%	2,74%	-	-	-		

Tabela 30 – Resultados do coeficiente R² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E2-Lixiviado na concentração de SST de 17.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

SST (mg/L)	PTM (mbar)	Intervalo de Tempo	Mecanismos de Bloqueio				Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
			Completo	Padrão	Intermediário	Torta			
17.000	180	0-30	0,749	0,9266	0,9266	0,9742	0,8941	0,09930	11,11%
		30-60	0,9921	0,9964	0,9964	0,9989	0,9960	0,00282	0,28%
		60-120	0,9921	0,9964	0,9964	0,9989	0,9960	0,00282	0,28%
		120-180	0,9973	0,9987	0,9987	0,9996	0,9986	0,00095	0,10%
		180-240	0,9986	0,9994	0,9994	0,9998	0,9993	0,00050	0,05%
		Média	0,94582	0,9835	0,9835	0,99428	0,9768	0,02125	2,18%
		Desv. Pad.	0,11007	0,03184	0,03184	0,01123	-	-	-
		Variação	11,64%	3,24%	3,24%	1,13%	-	-	-
	240	0-30	0,8158	0,8965	0,8965	0,9271	0,8840	0,04768	5,39%
		30-60	0,9922	0,9946	0,9946	0,9965	0,9945	0,00176	0,18%
		60-120	0,9922	0,9946	0,9946	0,9965	0,9945	0,00176	0,18%
		120-180	0,9973	0,9981	0,9981	0,9988	0,9981	0,00061	0,06%
		180-240	0,9986	0,9991	0,9991	0,9994	0,9991	0,00033	0,03%
		Média	0,95922	0,97658	0,97658	0,98366	0,9740	0,01041	1,07%
		Desv. Pad.	0,08023	0,04481	0,04481	0,03165	-	-	-
		Variação	8,36%	4,59%	4,59%	3,22%	-	-	-
	300	0-30	0,7946	0,9279	0,9279	0,9689	0,9048	0,07598	8,40%
		30-60	0,9921	0,996	0,996	0,9986	0,9957	0,00268	0,27%
		60-120	0,9921	0,996	0,996	0,9985	0,9957	0,00264	0,27%
		120-180	0,9973	0,9986	0,9986	0,9995	0,9985	0,00091	0,09%
		180-240	0,999	0,9995	0,9995	0,9999	0,9995	0,00037	0,04%
		Média	0,95502	0,9836	0,9836	0,99308	0,9788	0,01649	1,68%
		Desv. Pad.	0,08973	0,03118	0,03118	0,01353	-	-	-
		Variação	9,40%	3,17%	3,17%	1,36%	-	-	-

Tabela 31 – Resultados do coeficiente R² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E2-Lixiviado na concentração de SST de 23.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

SST (mg/L)	PTM (mbar)	Intervalo de Tempo	Mecanismos de Bloqueio				Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
			Completo	Padrão	Intermediário	Torta			
23.000	180	0-30	0,8335	0,9292	0,9295	0,9686	0,9152	0,05752	6,29%
		30-60	0,9926	0,9956	0,9956	0,9978	0,9954	0,00214	0,21%
		60-120	0,9921	0,9957	0,9957	0,9982	0,9954	0,00251	0,25%
		120-180	0,9973	0,9985	0,9985	0,9994	0,9984	0,00086	0,09%
		180-240	0,9986	0,9992	0,9992	0,9997	0,9992	0,00045	0,05%
		Média	0,96282	0,98364	0,9837	0,99274	0,9807	0,01268	1,29%
		Desv. Pad.	0,07235	0,03048	0,03034	0,01352	-	-	-
		Variação	7,51%	3,10%	3,08%	1,36%	-	-	-
	240	0-30	0,8008	0,9226	0,9226	0,9635	0,9024	0,07041	7,80%
		30-60	0,9922	0,9958	0,9958	0,9983	0,9955	0,00251	0,25%
		60-120	0,9922	0,9958	0,9958	0,9983	0,9955	0,00251	0,25%
		120-180	0,9973	0,9985	0,9985	0,9994	0,9984	0,00086	0,09%
		180-240	0,999	0,9994	0,9994	0,9998	0,9994	0,00033	0,03%
		Média	0,9563	0,98242	0,98242	0,99186	0,9783	0,01530	1,56%
		Desv. Pad.	0,08698	0,03348	0,03348	0,01587	-	-	-
		Variação	9,10%	3,41%	3,41%	1,60%	-	-	-
	300	0-30	0,7986	0,9221	0,9221	0,9617	0,9011	0,07085	7,86%
		30-60	0,9921	0,9958	0,9958	0,9982	0,9955	0,00252	0,25%
		60-120	0,9921	0,9957	0,9957	0,9982	0,9954	0,00251	0,25%
		120-180	0,9973	0,9985	0,9985	0,9994	0,9984	0,00086	0,09%
		180-240	0,999	0,9994	0,9994	0,9998	0,9994	0,00033	0,03%
		Média	0,95582	0,9823	0,9823	0,99146	0,9780	0,01539	1,57%
		Desv. Pad.	0,08794	0,03369	0,03369	0,01665	-	-	-
		Variação	9,20%	3,43%	3,43%	1,68%	-	-	-

Figura 67 – Resultado gráfico e tabela com os R² correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E2-Lixiviado, na concentração de SST fixa em 8.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

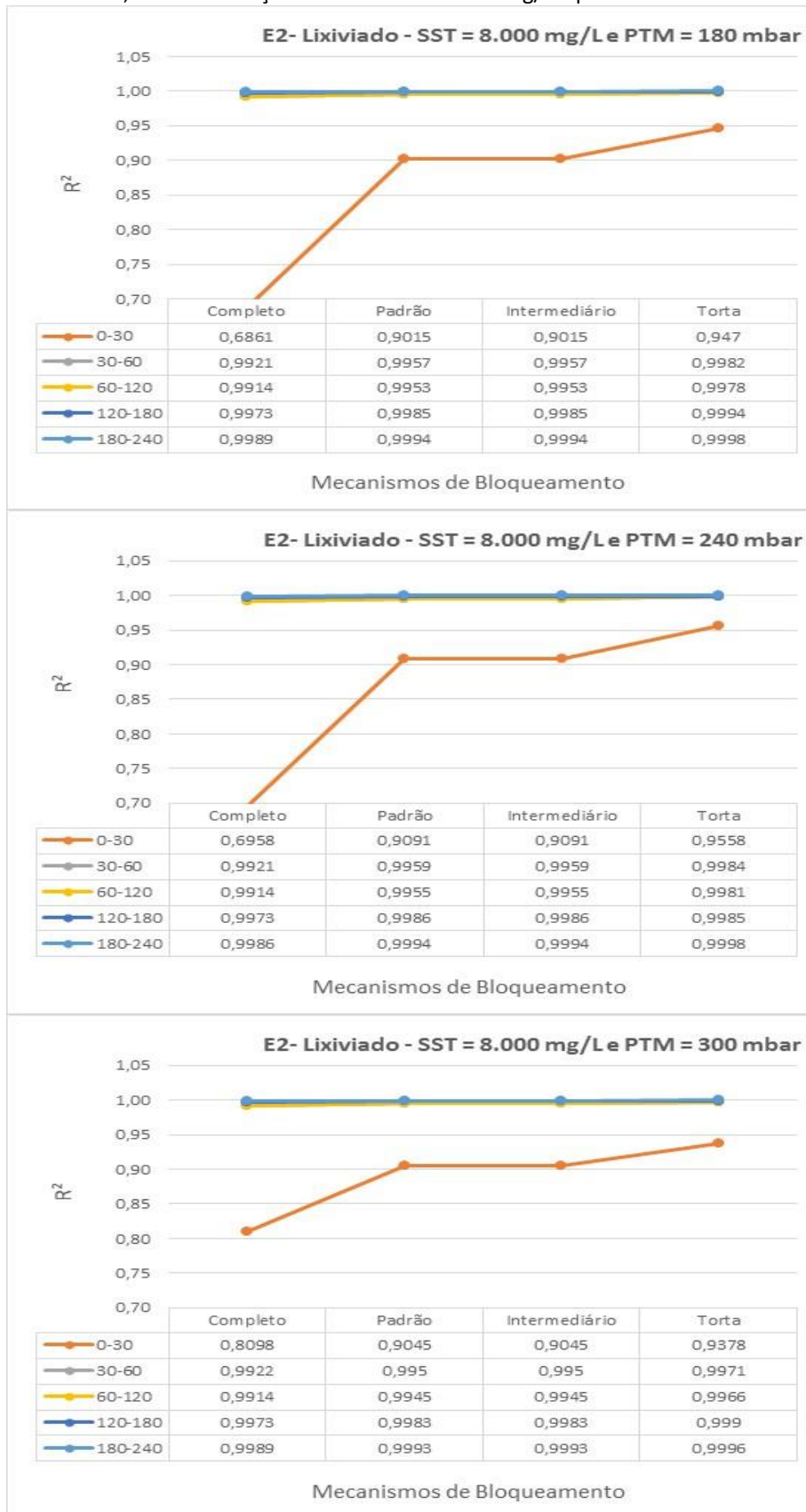


Figura 68 – Resultado gráfico e tabela com os R^2 correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E2-Lixiviado, na concentração de SST fixa em 17.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

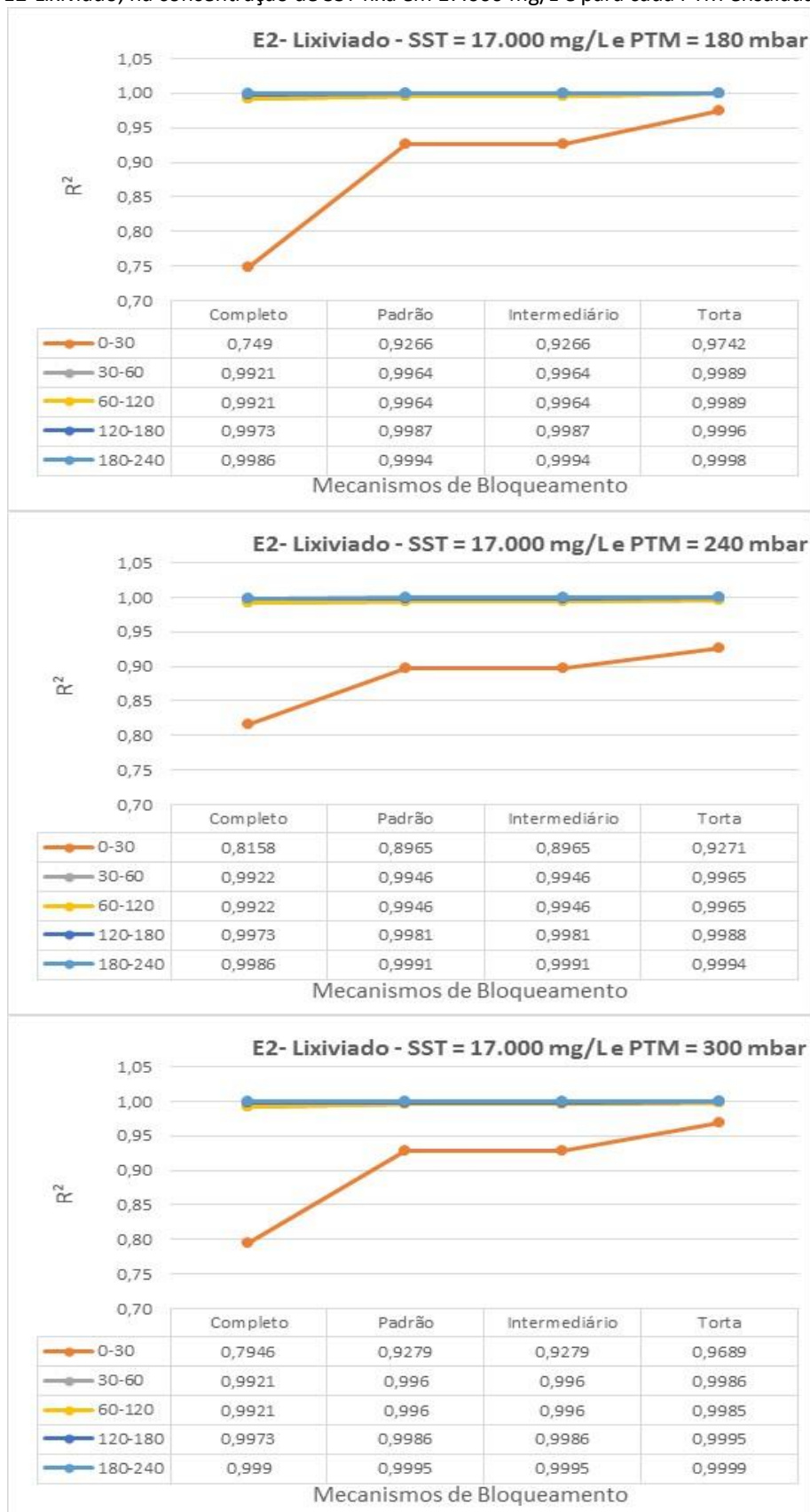
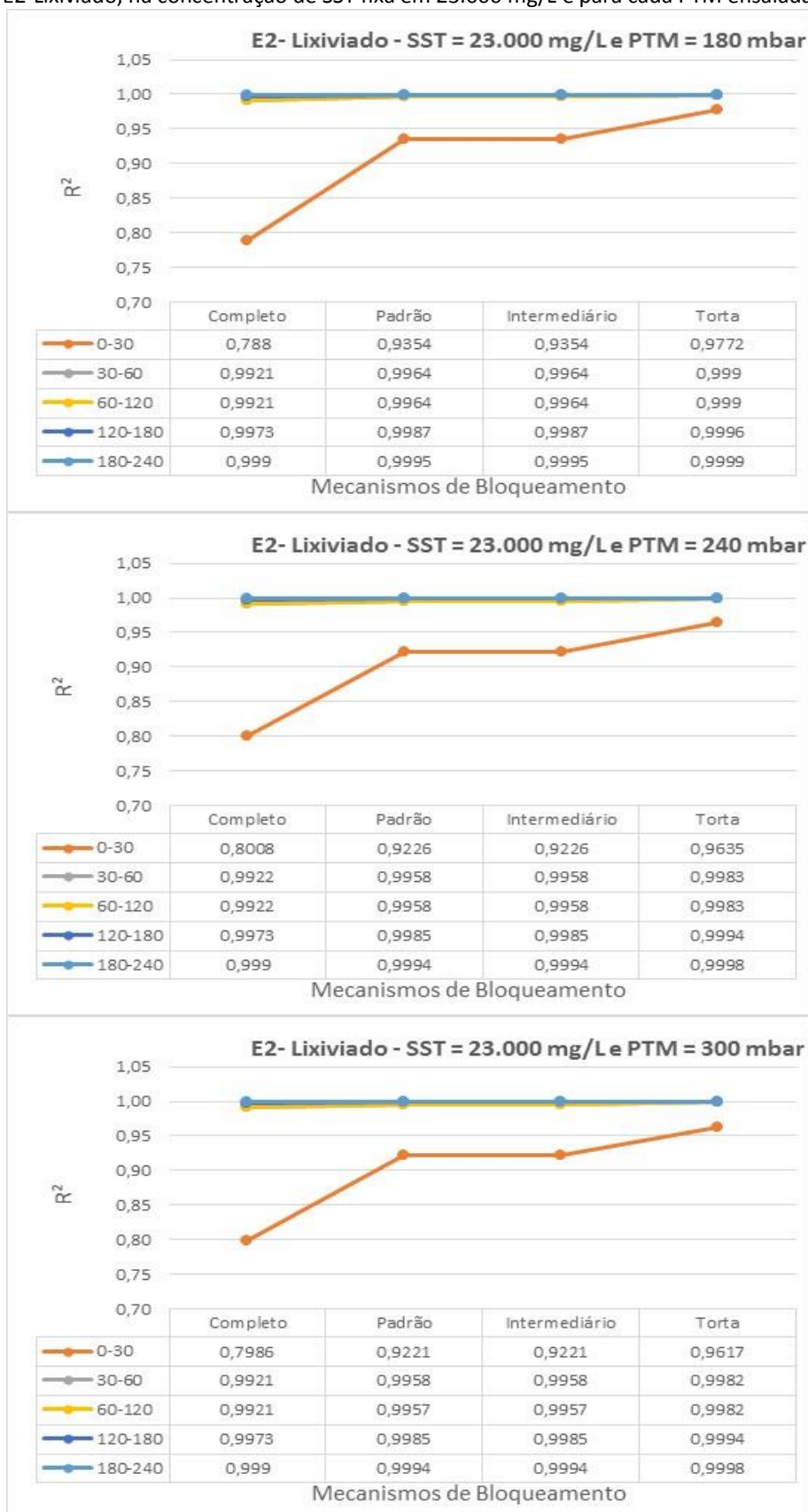


Figura 69 – Resultado gráfico e tabela com os R^2 correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E2-Lixiviado, na concentração de SST fixa em 23.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.



A partir dos gráficos apresentados para E2-Lixiviado, observa-se diretamente que o intervalo 0-30 se destaca por apresentar os menores valores de R^2 para os distintos mecanismos de bloqueio, assim como se observou também para E1-Petroquímico. Estes resultados indicam que neste intervalo os mecanismos de bloqueio ainda estavam se configurando, mas já com a preponderância pelo mecanismo de filtração por Torta, correspondente ao maior R^2 . Para os intervalos de tempo subsequentes, observa-se que os mecanismos de bloqueio ocorrem de forma mais concomitante, em sua maioria com valores de R^2 acima de 0,99, resultando em curvas bastante sobrepostas. Através dos resultados numéricos, é possível observar que o mecanismo por Torta é preponderante em quase todos os intervalos de tempo e para todas as PTM. Somente em alguns intervalos os mecanismos do tipo Intermediário e Padrão resultam com valores de R^2 maiores do que o mecanismo por Torta. Já o mecanismo do tipo Completo, em nenhum intervalo para nenhuma das concentrações de SST, se tornou preponderante.

Analisando os resultados das tabelas, verifica-se que, assim como já observado nos resultados para E1-Petroquímico, há uma tendência de que com o tempo de filtração, haja uma ação mais regular dos mecanismos de bloqueio, constatada pela tendência de queda do coeficiente de variação ao longo de todas as PTM e concentrações de SST ensaiadas. Entretanto, agora distintamente do observado para E1-Petroquímico, o mecanismo por Torta mesmo sendo preponderante, nem sempre apresenta uma tendência direta de aumento da sua ação com o aumento das PTM. Na mesma linha de análise também se verifica este resultado não diretamente proporcional ao aumento das PTM, para a atuação dos mecanismos de bloqueio para cada subconjunto de PTM, o que se pode constatar observando o valor da média total destacada em negrito nas tabelas. Somente nos resultados para a concentração de 8.000 mg/L esta relação diretamente proporcional é verificada. Para a concentração de 17.000 mg/L houve uma inversão de tendência entre as PTM de 240 e 300 mbar; e para a concentração de 23.000 mg/L houve uma tendência inversamente proporcional, ou seja, com o aumento das PTM a ação dos mecanismos de bloqueio foi reduzida.

Este tipo de resultado pode estar relacionado às condições hidrodinâmicas de ensaio, associadas às características de cada lodo. A promoção de turbulência no meio, tem por objetivo direto retardar a ação dos mecanismos de bloqueio junto às membranas e, neste

caso, para E2-Lixiviado comparado com E1-Petroquímico, a resposta desta ação aparentemente se demonstrou mais efetiva.

Apesar de não se evidenciar esta relação diretamente proporcional com o aumento das PTM, comparando-se os resultados absolutos dos R^2 entre cada uma das concentrações de SST apresentadas nas tabelas anteriores, é possível verificar que houve uma tendência diretamente proporcional do aumento da concentração de SST com relação à ação dos mecanismos de bloqueio. Para constatar este fato, foi calculada a média total resultante dos R^2 para cada uma das concentrações de SST e considerando todos os mecanismos de bloqueio, resultando em: 0,9719, 0,9765 e 0,9787, para as concentrações de 8.000 mg/L, 17.000 mg/L e 23.000 mg/L, respectivamente. Estes resultados refletem a influência da concentração no sentido de incrementar a ação dos mecanismos de bloqueio sobre as membranas durante a filtração dos lodos, aumentando a R_t e reduzindo o valor de J_{20} , assim como também foi observado para E1-Petroquímico

Comparando-se estes resultados da identificação dos mecanismos de bloqueio preponderantes com o comportamento do J_{20} e da R_t durante a filtração, confirma-se que a primeira meia hora de ensaio foi a mais significativa para a queda do J_{20} e para o aumento da R_t . Estas análises podem ser realizadas a partir das tabelas que apresentam os extratos de dados dos ensaios de E2-Lixiviado (Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17). Com estes dados é possível comparar este comportamento evolutivo da presença e preponderâncias dos mecanismos de bloqueio, com o incremento da R_t também ao longo do tempo.

Ao se comparar estes resultados com os apresentados na Tabela 15, referentes aos extratos dos dados em todas as PTM ensaiadas e para a concentração de SST fixa em 8.000 mg/L, é possível correlacionar o comportamento evolutivo dos incrementos de resistência a cada intervalo de tempo, com a presença e preponderância dos mecanismos de bloqueio, apresentadas nos gráficos de tabelas da Figura 67. Verifica-se que incrementos percentuais de formação da R_t são maiores na primeira meia hora de ensaio comparada com os demais tempos, sendo que resultaram em: 259,8, 273,5 e 463,8 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente. Constata-se que estes incrementos foram relativamente semelhantes para as PTM de 180 e 240 mbar, e com um aumento significativo para a PTM de 300 mbar. Analisando as curvas e valores absolutos dos R^2 , este resultado coincide com a média dos resultados neste primeiro intervalo, calculadas em: 0,8590, 0,8675 e 0,8892, respectivamente para cada PTM em

ordem crescente. Ou seja, há uma maior proximidade entre estes valores médios dos R^2 entre as PTM de 180 e 240 mbar, e um maior distanciamento para PTM de 300 mbar.

Percebe-se ainda que a partir desta primeira meia hora, os incrementos percentuais se reduzem entre um tempo e outro até os 240 min totais dos ensaios. Entretanto, se constata que estes incrementos percentuais após a primeira meia hora, não ocorrem de forma diretamente proporcional ao aumento das PTM, especialmente para a PTM de 300 mbar que resulta em valores de incremento percentual de R_t menores do que para a PTM de 240 e as vezes até menores do que para a PTM de 180 mbar. Este resultado coincide com o observado para a formação dos mecanismos de bloqueio, como relatado anteriormente.

Para a concentração de SST em 17.000 mg/L, estes resultados do incremento percentual das resistências entre cada intervalo de tempo são apresentados na Tabela 16, sobre os quais se pode comparar com os resultados do mecanismos de bloqueio para a mesma concentração, apresentado na Figura 68. Constata-se também que os incrementos percentuais de formação da R_t são maiores na primeira meia hora de ensaio comparada com os demais tempos, sendo que resultaram em: 278,5, 294,0 e 714,3 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente. Comparando-se com os resultados para a concentração de SST em 8.000 mg/L, percebe-se que todos demonstraram tendências de crescimento, tanto com o aumento das PTM quanto das concentrações de SST. Entretanto, verifica-se que foram relativamente semelhantes para as PTM de 180 e 240 mbar e mais distintos para a PTM de 300 mbar, assim como já observado para a concentração de 8.000 mg/L. Pela análise das médias dos R^2 deste primeiro intervalo de tempo, que resultam em: 0,8941, 0,8840 e 0,9048, novamente os resultados coincidem no sentido de que os resultados para as PTM de 180 e 240 mbar serem mais próximos e para a PTM de 300 mbar serem mais distantes. Percebe-se ainda que a partir desta primeira meia hora, os incrementos percentuais se reduzem entre um tempo e outro até os 240 min totais dos ensaios, assim como na concentração anteriormente analisada, mas que também não ocorrem de forma diretamente proporcional com o aumento da PTM.

A Tabela 17 apresenta os extratos de resultados dos ensaios para a concentração de SST em 23.000 mg/L, sobre os quais se faz uma análise comparativa com os resultados dos gráficos e tabelas da Figura 69. Como nas análises anteriores, a primeira meia hora de ensaio resulta nos maiores incrementos percentuais para a R_t , com os valores de: 234,3, 172,1 e 169,3 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente,

o que também corresponde diretamente aos valores observados para os R^2 : 0,9807, 0,9783 e 0,9780.

Ainda com relação à concentração de 23.000 mg/L, assim como nas anteriores se constata que a partir desta primeira meia hora, os incrementos percentuais se reduzem entre um tempo e outro até os 240 min totais dos ensaios, e não são diretamente proporcionais aos aumentos das PTM, distintamente dos resultados para E1-Petroquímico, como já analisado anteriormente. De certa forma, estes resultados distintos das outras tendências já observadas e esperadas, também se correlacionam ao que foi observado para a ação dos mecanismos de bloqueio nesta concentração de SST, onde com o aumento das PTM, correspondeu a uma redução da atuação dos mecanismos de bloqueio, ou seja, a uma redução dos valores dos R^2 , conforme já analisado.

5.4.3 Mecanismos de Bloqueio nos ensaios para E3-Hospitalar

As tabelas em sequência (Tabela 32, Tabela 33 e Tabela 34) apresentam os resultados dos R^2 obtidos para a filtração do E1-Petroquímico, permitindo a análise das médias, desvio padrão e coeficiente de variação. Cada uma das tabelas corresponde a uma das concentrações de SST, estratificadas por PTM e por intervalos de tempo.

Em sequência apresentam-se os gráficos agrupados por cada uma das concentrações de SST ensaiadas (Figura 70, Figura 71 e Figura 72), com os resultados dos R^2 correspondentes a cada um dos mecanismos de bloqueio. Cada uma das figuras corresponde a uma concentração de SST fixa. Cada figura, por sua vez, é composta por uma sequência de três gráficos, onde cada um correspondente a uma PTM distinta.

Tabela 32 – Resultados do coeficiente R² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E3-Hospitalar na concentração de SST de 8.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

SST (mg/L)	PTM (mbar)	Intervalo de Tempo	Mecanismos de Bloqueio				Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
			Completo	Padrão	Intermediário	Torta			
8.000	180	0-30	0,8353	0,9214	0,9214	0,9579	0,9090	0,05206	5,73%
		30-60	0,9926	0,9956	0,9956	0,9978	0,9954	0,00214	0,21%
		60-120	0,9921	0,9953	0,9953	0,9977	0,9951	0,00230	0,23%
		120-180	0,9973	0,9984	0,9984	0,9982	0,9981	0,00053	0,05%
		180-240	0,9986	0,9992	0,9992	0,9996	0,9992	0,00041	0,04%
		Média	0,96318	0,98198	0,98198	0,99024	0,9793	0,01146	1,17%
		Desv. Pad.	0,07154	0,03391	0,03391	0,01809		-	
		Variação	7,43%	3,45%	3,45%	1,83%		-	
	240	0-30	0,8336	0,9287	0,9287	0,9678	0,9147	0,05712	6,24%
		30-60	0,9922	0,9957	0,9957	0,9982	0,9955	0,00247	0,25%
		60-120	0,9921	0,9957	0,9957	0,9982	0,9954	0,00251	0,25%
		120-180	0,9973	0,9985	0,9985	0,9994	0,9984	0,00086	0,09%
		180-240	0,9986	0,9992	0,9992	0,9997	0,9992	0,00045	0,05%
		Média	0,96276	0,98356	0,98356	0,99266	0,9806	0,01267	1,29%
		Desv. Pad.	0,07226	0,03071	0,03071	0,01391		-	
		Variação	7,51%	3,12%	3,12%	1,40%		-	
	300	0-30	0,8345	0,9259	0,9259	0,9638	0,9125	0,05500	6,03%
		30-60	0,9922	0,9956	0,9956	0,998	0,9954	0,00239	0,24%
		60-120	0,9921	0,9956	0,9956	0,998	0,9953	0,00243	0,24%
		120-180	0,9973	0,9985	0,9985	0,993	0,9968	0,00261	0,26%
		180-240	0,9994	0,9997	0,9997	0,9998	0,9997	0,00017	0,02%
		Média	0,9631	0,98306	0,98306	0,99052	0,9799	0,01176	1,20%
		Desv. Pad.	0,07196	0,03200	0,03200	0,01515		-	
		Variação	7,47%	3,26%	3,26%	1,53%		-	

Tabela 33 – Resultados do coeficiente R² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E3-Hospitalar na concentração de SST de 17.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

SST (mg/L)	PTM (mbar)	Intervalo de Tempo	Mecanismos de Bloqueio				Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
			Completo	Padrão	Intermediário	Torta			
17.000	180	0-30	0,8327	0,9314	0,9314	0,9711	0,9167	0,05901	6,44%
		30-60	0,9922	0,9959	0,9959	0,9984	0,9956	0,00255	0,26%
		60-120	0,9921	0,9958	0,9958	0,9983	0,9955	0,00255	0,26%
		120-180	0,9973	0,9986	0,9986	0,9994	0,9985	0,00087	0,09%
		180-240	0,9986	0,9993	0,9993	0,9997	0,9992	0,00046	0,05%
		Média	0,96258	0,9842	0,9842	0,99338	0,9811	0,01308	1,33%
		Desv. Pad.	0,07266	0,02956	0,02956	0,01247		-	
		Variação	7,55%	3,00%	3,00%	1,26%		-	
	240	0-30	0,8318	0,9334	0,9334	0,9739	0,9181	0,06063	6,60%
		30-60	0,9922	0,996	0,996	0,9985	0,9957	0,00260	0,26%
		60-120	0,9921	0,996	0,996	0,9985	0,9957	0,00264	0,27%
		120-180	0,9973	0,9986	0,9986	0,9995	0,9985	0,00091	0,09%
		180-240	0,9986	0,9993	0,9993	0,9997	0,9992	0,00046	0,05%
		Média	0,9624	0,98466	0,98466	0,99402	0,9814	0,01344	1,37%
		Desv. Pad.	0,07307	0,02869	0,02869	0,01126		-	
		Variação	7,59%	2,91%	2,91%	1,13%		-	
	300	0-30	0,8341	0,9279	0,9279	0,9665	0,9141	0,05635	6,16%
		30-60	0,9922	0,9957	0,9957	0,9981	0,9954	0,00243	0,24%
		60-120	0,9921	0,9957	0,9957	0,9981	0,9954	0,00247	0,25%
		120-180	0,9973	0,9985	0,9985	0,9993	0,9984	0,00082	0,08%
		180-240	0,9994	0,9997	0,9997	0,9999	0,9997	0,00021	0,02%
		Média	0,96302	0,9835	0,9835	0,99238	0,9806	0,01245	1,27%
		Desv. Pad.	0,07214	0,03113	0,03113	0,01449		-	
		Variação	7,49%	3,17%	3,17%	1,46%		-	

Tabela 34 – Resultados do coeficiente R² para os mecanismos de bloqueio em intervalos de tempo específicos, do lodo E3-Hospitalar na concentração de SST de 23.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

SST (mg/L)	PTM (mbar)	Intervalo de Tempo	Mecanismos de Bloqueio				Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
			Completo	Padrão	Intermediário	Torta			
23.000	180	0-30	0,8335	0,9292	0,9295	0,9686	0,9152	0,05752	6,29%
		30-60	0,9926	0,9956	0,9956	0,9978	0,9954	0,00214	0,21%
		60-120	0,9921	0,9957	0,9957	0,9982	0,9954	0,00251	0,25%
		120-180	0,9973	0,9985	0,9985	0,9994	0,9984	0,00086	0,09%
		180-240	0,9986	0,9992	0,9992	0,9997	0,9992	0,00045	0,05%
		Média	0,96282	0,98364	0,9837	0,99274	0,9807	0,01268	1,29%
		Desv. Pad.	0,07235	0,03048	0,03034	0,01352		-	
		Variação	7,51%	3,10%	3,08%	1,36%		-	
	240	0-30	0,8318	0,9334	0,9334	0,9739	0,9181	0,06063	6,60%
		30-60	0,9922	0,996	0,996	0,9985	0,9957	0,00260	0,26%
		60-120	0,9921	0,996	0,996	0,9985	0,9957	0,00264	0,27%
		120-180	0,9973	0,9986	0,9986	0,9995	0,9985	0,00091	0,09%
		180-240	0,9986	0,9993	0,9993	0,9997	0,9992	0,00046	0,05%
		Média	0,9624	0,98466	0,98466	0,99402	0,9814	0,01344	1,37%
		Desv. Pad.	0,07307	0,02869	0,02869	0,01126		-	
		Variação	7,59%	2,91%	2,91%	1,13%		-	
	300	0-30	0,8335	0,9295	0,9295	0,9686	0,9153	0,05755	6,29%
		30-60	0,9922	0,9958	0,9958	0,9982	0,9955	0,00247	0,25%
		60-120	0,9921	0,9957	0,9957	0,9982	0,9954	0,00251	0,25%
		120-180	0,9973	0,9985	0,9985	0,9994	0,9984	0,00086	0,09%
		180-240	0,9994	0,9997	0,9997	0,9999	0,9997	0,00021	0,02%
		Média	0,9629	0,98384	0,98384	0,99286	0,9809	0,01271	1,30%
		Desv. Pad.	0,07241	0,03043	0,03043	0,01358		-	
		Variação	7,52%	3,09%	3,09%	1,37%		-	

Figura 70 – Resultado gráfico e tabela com os R² correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E3-Hospitalar, na concentração de SST fixa em 8.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

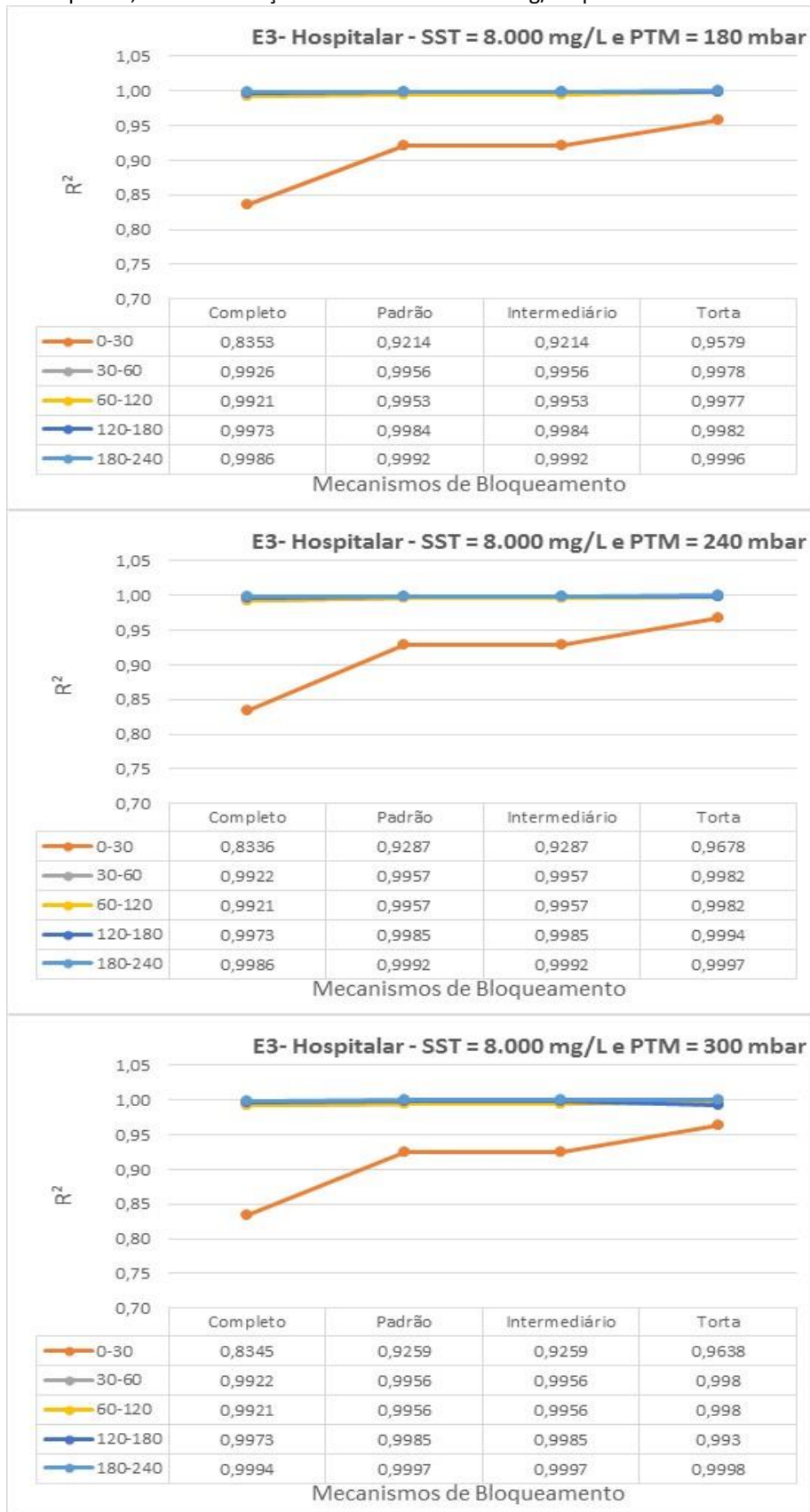


Figura 71 – Resultado gráfico e tabela com os R² correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E3-Hospitalar, na concentração de SST fixa em 17.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.

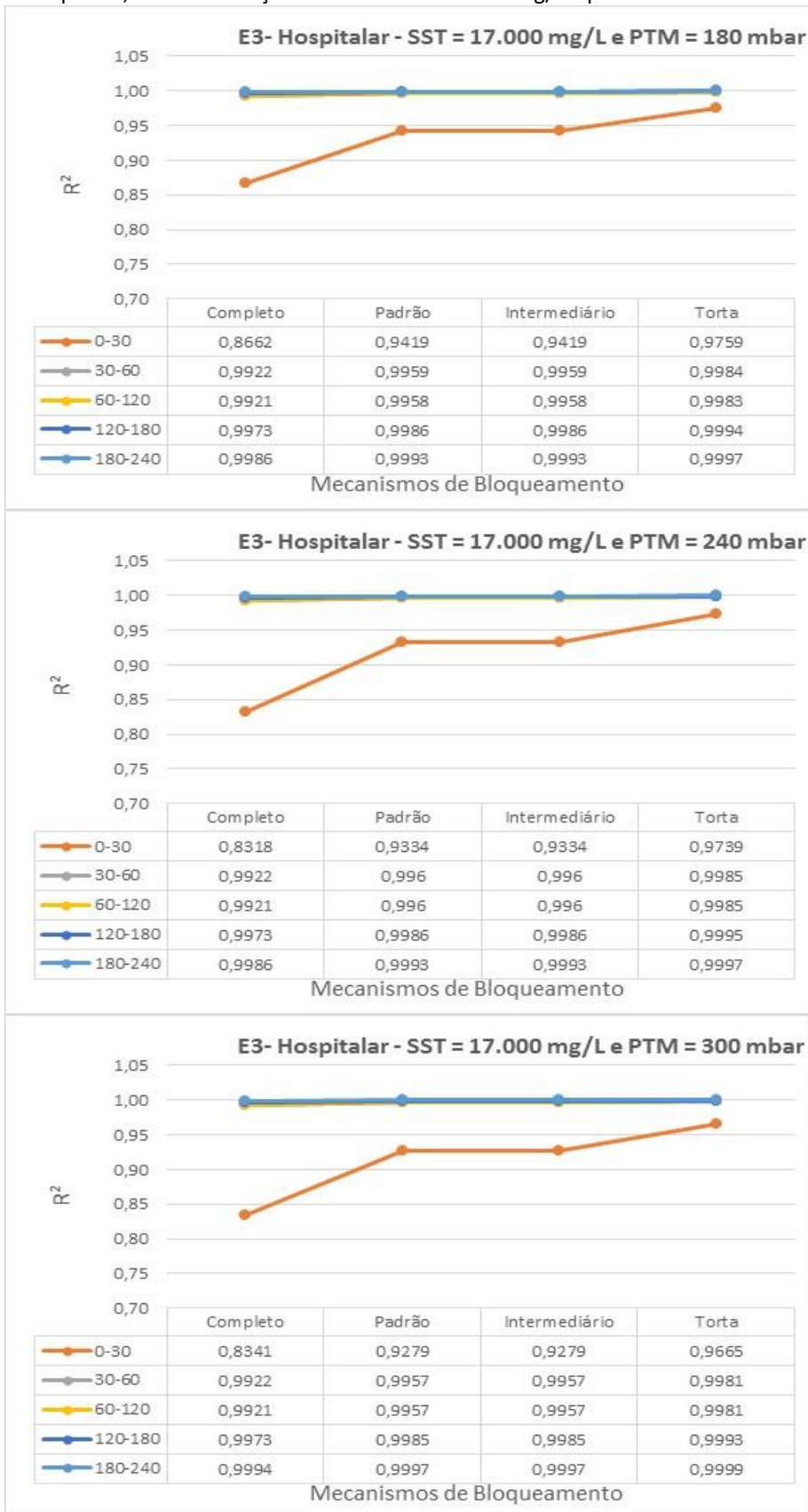
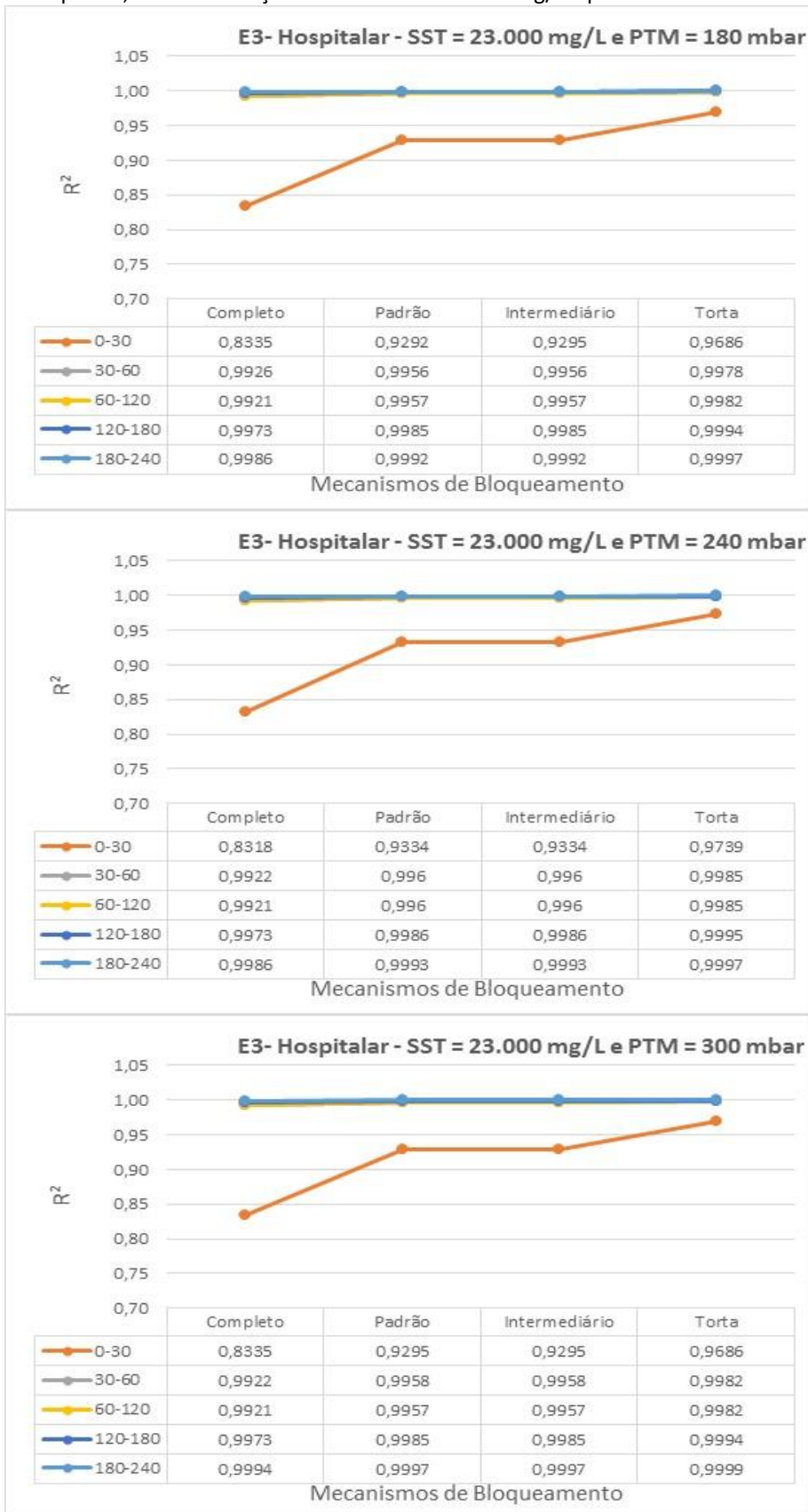


Figura 72 – Resultado gráfico e tabela com os R² correspondentes a cada mecanismo de bloqueio, para E3-Hospitalar, na concentração de SST fixa em 23.000 mg/L e para cada PTM ensaiada.



Dos gráficos para os resultados dos coeficientes R^2 para o E3-Hospitalar, observa-se assim como para os demais lodos ensaiados, que para todas as concentrações de SST e as PTM ensaiadas, o intervalo 0-30 se destaca por apresentar os menores valores de R^2 para os distintos mecanismos de bloqueio, mas com a preponderância dos mecanismos do tipo Torta. Para os tempos posteriores à primeira meia hora, os mecanismos de bloqueio ocorrem de forma mais concomitante, em sua maioria com valores de R^2 acima de 0,99, resultando em curvas bastante sobrepostas.

Analisando os resultados numéricos para R^2 através das tabelas apresentadas para E3-Hospitalar, é possível observar que o mecanismo por Torta é preponderante na maioria dos intervalos de tempo, sendo que somente em uma situação os mecanismos do tipo Intermediário ou Padrão resultaram com valor de R^2 maiores. Nos demais intervalos de tempo para todas as concentrações de SST e PTM, esses dois mecanismos, Intermediário e Padrão, resultaram com valores idênticos. Com relação ao mecanismo denominado Completo, o que se verifica é que em nenhum dos intervalos ele se tornou preponderante. Assim como observado para os lodos E1-Petroquímico e E2-Lixiviado, além da filtração por Torta que se demonstrou preponderante em todas as PTM e na maioria dos intervalos de tempo, tem-se que com o aumento da PTM, os mecanismos de bloqueio do tipo Intermediário, Padrão e Completo, começam a também se tornar mais significativos, o que se constata pela análise dos coeficientes de variação. Em todas as tabelas do E3-Hospitalar, observando-se os resultados destes coeficientes ao longo dos intervalos de tempo, verifica-se que houve a redução deste valor, ou seja, apresentando uma tendência de que se tornassem cada vez mais próximos um do outro. Há, assim, um indicativo de que os mecanismos de bloqueio tendem a atuar de forma mais equânime ao longo do tempo de ensaio.

Observando-se especialmente os valores dos R^2 no intervalo 180-240 para o mecanismo de bloqueio do tipo Torta, que foi o mais preponderante em todos os intervalos de tempo, constata-se a tendência de aumento com o aumento das PTM. Apesar de esta análise da relação diretamente proporcional com a PTM observada para o mecanismo de bloqueio por Torta no último intervalo de tempo de cada ensaio, o mesmo não se observa ao se analisar a média total de cada agrupamento de PTM, destacada em negrito nas tabelas, distintamente do que foi observado para E1-Petroquímico. Verifica-se que houve uma tendência de aumento dos R^2 entre as PTM de 180 e 240mbar, porém que se

reduziram os valores para a PTM de 300 mbar, para todas as concentrações de SST. Este tipo de comportamento pode se correlacionar também às condições hidrodinâmicas dos ensaios, onde provavelmente com esta PTM, independentemente da concentração de SST, para este lodo com suas características específicas, a ação dos promotores de turbulência para retardar a incidência dos mecanismos de bloqueio, não tenha sido suficiente.

Ao se comparar os resultados absolutos dos R^2 encontrados para todas as concentrações analisadas, percebe-se que os coeficientes apresentaram uma tênue tendência de aumento com a concentração. Para constatar este fato, a partir dos dados médios por PTM das três tabelas anteriores, foi calculada a média total resultante dos R^2 para cada uma das concentrações de SST, considerando todos os intervalos de tempo e todas as PTM, o que resultou em: 0,9800, 0,9810 e 0,9810, para as concentrações de 8.000 mg/L, 17.000 mg/L e 23.000 mg/L, respectivamente. De certa forma, estes resultados refletem a influência da concentração no sentido de incrementar a ação dos mecanismos de bloqueio sobre as membranas durante a filtração dos lodos, aumentando os valores da R_t , porém neste caso de forma bem mais tênue do que o observado para os lodos E1-Petroquímico e E2-Lixiviado.

Analisando ainda a R_t a partir das tabelas que apresentaram os extratos de dados dos ensaios (Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21), é possível comparar este comportamento evolutivo da presença e preponderâncias dos mecanismos de bloqueio, com o incremento percentual da R_t também ao longo do tempo, para cada uma das concentrações de SST.

Com os dados da Tabela 19 referentes aos resultados para a concentração de SST em 8.000 mg/L, observando-se os incrementos percentuais da R_t a cada intervalo de tempo, constata-se que na primeira meia hora de ensaio (intervalo 0-30), estes resultados são significativamente maiores quando comparados com os demais tempos, sendo que resultaram em: 379,1, 397,2 e 544,1 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente. A partir desta primeira meia hora, os incrementos percentuais se reduzem significativamente, entre um tempo e outro, até os 240 min totais dos ensaios. Constata-se também que estes incrementos percentuais ocorrem de forma diretamente proporcional ao aumento das PTM, porém, diferentemente do observado para os lodos E1-Petroquímico e E2-Lixiviado, estes resultados não coincidem com o observado para os mecanismos de bloqueio. Para este lodo E3-Hospitalar, verifica-se na Tabela 32, que na

primeira meia hora de ensaio, a média dos resultados dos R^2 aumentou entre as PTM de 180 e 240 mbar, mas diminuiu para a PTM de 300 mbar.

Para a concentração de SST em 17.000 mg/L, os resultados dos incrementos da R_t são apresentados na Tabela 20, permitindo também constatar que os valores resultantes para primeira meia hora de ensaio comparados com os demais tempos foram bem superiores, sendo que resultaram em: 393,1, 354,0 e 453,8 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente. Assim como analisado para a concentração de SST de 8.000 mg/L, há a tendência de aumento da incidência da R_t com o aumento da PTM e, novamente estes resultados não coincidem com os observados como tendência para a ação dos mecanismos de bloqueio desta concentração de 17.000 mg/L, apresentados na Tabela 33. Assim como na concentração de 8.000 mg/L observa-se que os valores de R^2 aumentam entre as PTM de 180 e 240 mbar, mas diminuem para a PTM de 300 mbar.

A Tabela 21 apresenta os resultados para a concentração de SST em 23.000 mg/L. Através desta, constata-se também que a primeira meia hora de ensaio resultou com os maiores incrementos percentuais para a R_t : 189,9, 399,5 e 369,7 %, respectivamente para cada uma das PTM ensaiadas em ordem crescente. Neste caso, distintamente das outras duas concentrações de SST, não houve uma tendência de crescimento diretamente proporcionar ao aumento das PTM entre 240 e 300 mbar. Por outro lado, comparando com os resultados da incidência dos mecanismos de bloqueio, através das médias dos R^2 apresentados na Tabela 34, este resultado coincide, pois para a PTM de 300 mbar também se constata a redução da incidência dos mecanismos de bloqueio.

6 ANÁLISE FINAL DOS RESULTADOS

Tomando-se por base a teoria das resistências para analisar o comportamento da filtração, consideram-se como satisfatórias as curvas obtidas para o aumento da resistência total (R_t) e para a redução do fluxo de permeado normalizado (J_{20}) ao longo das 4 h totais de ensaio.

Em síntese, com relação à filtração do lodo E1-Petroquímico, constatou-se uma relativa estabilidade nos valores do J_{20} ao final dos ensaios, com baixas variações em torno da média, mas correspondendo a incrementos de R_t em sua maioria diretamente proporcionais ao aumento das concentrações de SST. Com relação ao incremento da R_t final sobre a R_t inicial, os resultados para o E1-Petroquímico demonstraram que houve uma correlação com tendência diretamente proporcional com a variação das PTM e inversamente proporcional com a variação das concentrações de SST. Ou seja, para o lodo E1-Petroquímico, considerando uma concentração de SST fixa, aumentando-se a PTM há uma tendência de que aumente a ação dos mecanismos de bloqueio para a formação da R_t . Já para o aumento da concentração de SST, considerando uma PTM fixa, resultou que há uma tendência de retardo ou regressão na ação dos mecanismos de bloqueio. Justifica-se este tipo de resultado relacionando-se às condições hidrodinâmicas dos ensaios e às características do efluente. Apesar dos procedimentos terem sido conduzidos de forma a minimizar diferenças de comportamento hidrodinâmico dentre todos os ensaios, nestas condições de filtração de efluentes reais em módulos com feixes de membranas submersos, ainda se conta com fatores aleatórios, tais como o direcionamento absoluto das bolhas, que hora podem favorecer mais, ora menos, a redução dos efeitos de colmatação nas membranas. Na mesma linha, quando se analisam os lodos ensaiados, os resultados indicam que as diferenças das suas características físico-químicas e biológicas, também são fatores relacionáveis aos distintos comportamentos à filtração encontrados.

Com relação ao E2-Lixiviado, os valores de J_{20} se apresentaram com variações maiores entre si, quando comparados com os resultados de E1-Petroquímico, não sendo possível estabelecer seguramente uma tendência de proporcionalidade, tanto com as PTM quanto com as concentrações de SST. Com relação à R_t final, foi verificado um comportamento de maior dispersão, comparado com J_{20} , e um aumento dos valores médios proporcionais

tanto para ao aumento da concentração de SST considerando PTM fixas, quanto ao aumento da PTM considerando concentrações de SST fixas. Com relação ao incremento da R_t final sobre a inicial, os resultados demonstraram tendências de proporcionalidade direta com o aumento das PTM, para concentrações de SST fixas. Agora diferentemente do observado para E1-Petroquímico, considerando uma PTM fixa, o aumento da concentração de SST, resultou numa correlação diretamente proporcional forte, conforme correlação de Pearson.

Para E3-Hospitalar, os valores de J_{20} ao final dos ensaios foram da mesma ordem de grandeza dos observados para E1-Petroquímico, e tiveram uma baixa dispersão em torno da média. Já as R_t finais se comportaram de forma mais dispersa que os valores de J_{20} , assim como observado para os lodos E1-Petroquímico e E2-Lixiviado. Entretanto, apesar da maior similaridade dos valores de J_{20} com E1-Petroquímico, os valores absolutos das R_t foram maiores para E3-Hospitalar. Com o aumento das concentrações de SST, considerando a análise em PTM fixas, constata-se um aumento das R_t finais, porém menos dispersas em torno da média, comparativamente com os demais lodos. Também se verifica que o aumento das PTM, considerando as análises com concentrações de SST fixas, correspondeu a um aumento das R_t finais. Quanto ao incremento percentual da R_t final sobre a inicial, obteve-se uma forte correlação diretamente proporcional ao aumento das PTM, para cada uma das concentrações de SST fixas. Já para cada uma das PTM fixas e considerando o aumento das concentrações, as correlações encontradas não foram adequadas para garantir uma análise conclusiva com relação à proporcionalidade. Para as PTM de 180 mbar e 300 mbar resultaram correlações fortes e inversamente proporcionais, e para a PTM de 240 mbar resultou uma correlação fraca e diretamente proporcional.

Ainda nas análises dos comportamentos de J_{20} e R_t , com o intercruzamento dos resultados obtidos para todos os lodos, buscou-se avaliar tendências comuns de comportamento, além das já analisadas, associando-se a outras características medidas durante os ensaios. Verificou-se que os resultados de EPS isoladamente não responderam de forma efetiva às diferenças de comportamento observadas para os diferentes lodos. Quanto às correlações com as propriedades físicas das misturas, massa específica e viscosidades, além das características físicas dos biossólidos, diâmetros e distribuições granulométricas, foi possível estabelecer correlações de justificativas para os distintos comportamentos à filtração analisados para cada lodo.

Observa-se em todos os resultados para todos os lodos ensaiados que ao longo do tempo os valores de J_{20} se mantêm relativamente similares, mesmo com o aumento da PTM, enquanto que a R_t tende a variar e aumentar sob estas condições. Assim, sob o ponto de vista operacional, conclui-se que o aumento de PTM contribuiria diretamente para incrementar custos energéticos ao sistema, sem ganhos efetivos de capacidade de tratamento em termos de fluxo de permeado.

Em sequência às análises, foi realizada a determinação dos Índices Modificados de Fouling – IMF, para cada um dos lodos ensaiados, com objetivo de verificar a adequação do uso deste parâmetro como indicador da incidência dos mecanismos de bloqueio junto às membranas. Compararam-se estes resultados com as análises realizadas para o incremento percentual da R_t final sobre a inicial, verificando se elas se correspondiam, variando tanto com as concentrações de SST quanto com as PTM ensaiadas.

Para os valores de IMF encontrados para o lodo E1-Petroquímico, constatou-se uma correlação diretamente proporcional com as PTM e inversamente proporcional com as concentrações de SST. Estes resultados então coincidem com o observado para a variação incremental percentual da R_t final sobre a inicial. Para os valores de IMF determinado para o lodo E2-Lixiviado, os resultados já não foram tão estáveis quanto para E1-Petroquímico. Na análise de correlação com a variação da PTM, em média, houve uma tendência de proporcionalidade inversa, porém muito distinta para cada uma das concentrações de SST, variando de uma correlação fraca diretamente proporcional, para uma correlação forte e inversamente proporcional. Comparando-se com os resultados para a variação incremental da R_t final sobre a inicial, não se pode afirmar que houve uma correlação confiável, pois estes, por sua vez, variaram desde correlações fortes e diretamente proporcionais, até correlação fraca e inversamente proporcional. Analisando os resultados de IMF com a variação das concentrações de SST, constata-se uma correlação forte e diretamente proporcional, o que correspondeu também ao encontrado para a mesma correlação feita com a variação de R_t final sobre a inicial. Por fim, analisando os IMF para E3-Hospitalar, verifica-se que a correlação destes com a variação das PTM, para concentrações de SST fixas, resultou em correlações fortes e inversamente proporcionais, exatamente ao contrário das correlações encontradas para a variação da R_t final sobre a inicial, que resultaram fortes e diretamente proporcionais. Na mesma linha, analisando as correlações de IMF para a variação das concentrações de SST, considerando PTM fixas,

encontrou-se, em média, uma correlação forte e diretamente proporcional, também não correspondendo ao constatado para a variação incremental da R_t final sobre a inicial, que resultou com uma correlação, em média, forte e inversamente proporcional.

Por fim, foram analisados os mecanismos de bloqueio incidentes e preponderantes durante os ensaios de filtração. Observou-se em todos os resultados que a primeira meia hora de ensaio correspondia a momentos de menor incidência dos mecanismos de bloqueio, associadas diretamente aos momentos de formação da R_t . Esta primeira meia hora, já observado nos resultados das análises de comportamento da filtração, correspondem exatamente aos momentos com maiores incrementos da R_t e maiores quedas nos valores de J_{20} . Também foi possível observar para todos os, a tendência de que com o transcorrer do tempo, os distintos mecanismos de bloqueio passem a atuar de forma mais equânime junto às membranas. Evidencia-se que o mecanismos de filtração do tipo Completo em todas as análises foi o menos preponderante, especialmente nos intervalos correspondentes a primeira meia hora de ensaio (0-30); bem como também se observa que o mecanismo de bloqueio do tipo Torta na grande maioria dos intervalos de tempo analisados foi o mais preponderante, e em todos os subconjuntos de agrupamento das PTM no último intervalo de tempo (180-240) resultou sempre com o maior valor de R^2 .

Como forma de avaliar a adequação e coerência destas respostas dadas pelas análises dos mecanismos de bloqueio, comparou-se com os resultados encontrados para o incremento da R_t ao longo dos ensaios, sob o pressuposto de que a formação da R_t se dá exatamente pela correspondente ação dos mecanismos de bloqueio junto às membranas. Na maioria das análises comparativas assim realizadas, para cada um dos lodos e para as distintas correlações com as PTM e com as concentrações de SST ensaiadas, conclui-se que houve uma boa correspondência entre estes resultados. Somente em algumas situações, uma para o E2-Lixiviado e duas para o E3-Hospitalar, houve tendências que não corresponderam a esta proporcionalidade entre estes resultados. Estas situações podem estar associadas às condições de ensaios específicas, tanto pelas suas características hidrodinâmicas, quanto por alguma eventual instabilidade não percebida em outras análises.

7 CONCLUSÕES

Conforme proposto nos objetivos, através desta pesquisa foi possível executar em bancada experimentos para simulação de um MBR com um módulo submerso de membranas de fibras ocas filtrando três tipos distintos de lodos, sob três condições distintas de concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST) e submetido a três distintas pressões transmembranas (PTM). Desde a execução própria dos módulos de membranas, bem como com o auxílio de um aparato experimental parcialmente automatizado (UETAR), estabeleceram-se condições padronizadas entre os ensaios, visando reduzir as possibilidades de interferências nos resultados, principalmente tendo em vista o objetivo comparativo dentre eles. As curvas obtidas responderam coerentemente ao modelo das resistências, no que se refere ao aumento da R_t e à queda de J_{20} .

Foram ainda analisadas características específicas de cada lodo, tanto para monitorar condições adversas que prejudicassem a filtração, quanto para buscar correlações com os J_{20} e com as R_t , auxiliando nas justificativas para os comportamentos distintos de filtração entre os lodos. Com relação ao EPS, conclui-se que, isoladamente, não foi possível estabelecer uma correlação forte da sua significância com o incremento da resistência. Outros parâmetros analisados, como viscosidade do lodo, e características físicas dos biossólidos, responderam de forma mais consistente às interferências sobre os resultados da filtração. No que se refere ao IMF, como uma tentativa de indicador para ser associado à formação dos mecanismos de bloqueio junto às membranas, conclui-se que não foi possível estabelecer uma correlação direta. Realmente, este indicador foi proposto originalmente para condições bem distintas de filtração, não considerando situações de similaridade com um MBR como as utilizadas durante os ensaios aqui realizados. Quanto às avaliações sobre a incidência e preponderância dos mecanismos de bloqueio, os resultados obtidos foram satisfatórios, com uma resposta correlacionável aos resultados obtidos com o incremento de resistência ao longo do tempo total de ensaio.

Dessa forma, os resultados aqui obtidos contribuem para aprofundar a compreensão sobre a filtração de efluentes em MBR, inclusive com o delineamento de procedimentos operacionais destes sistemas, além de contribuir com procedimentos metodológicos para pesquisas futuras.

8 RECOMENDAÇÕES FINAIS

Como recomendação final indica-se a aplicação dos procedimentos metodológicos explorados nesta pesquisa para condições distintas de efluentes e com uma maior variação das concentrações de SST e das PTM. Não necessariamente estas variações sejam com valores maiores ou menores do que os que foram explorados nesta pesquisa, mas pelo menos com dois outros valores intermediários a estes, tanto para as concentração de SST quanto para as PTM. Outra possibilidade também seria fazer estas mesmas análises para tempos de filtração maiores do que os 240 min aqui utilizados. Destaca-se que estes 240 min foram estabelecidos tendo em vista os resultados de vazão que eram os mais imediatamente observados durante as medições, e que no transcorrer de mais de 240 minutos de ensaio já respondiam com certa estabilização nos valores. Mesmo assim, verifica-se agora com os dados tratados que para algumas situações, seria interessante que se tivesse pelo menos mais uma hora de análise, proporcionando ainda mais a atuação e formação dos mecanismos de bloqueio.

Outra situação que merece uma maior atenção em pesquisas futuras, refere-se à necessidade de estudos complementares e aprofundados para a análise hidrodinâmica do comportamento da filtração nestas condições similares aos MBR. Como já explanado anteriormente, mesmo que se tenham levantado algumas associações plausíveis sob este ponto de vista, há a necessidade de pesquisas que elucidem melhor estas possibilidades de correlações. Avaliar o comportamento da dispersão de bolhas entremeadas em um módulo de membranas do tipo fibras ocas, por si só já é um desafio científico, ainda mais quando se associa a esta condição a presença de biossólidos que podem contribuir tanto para o incremento da R_t quanto para a sua regressão ou retardo. Indica-se que os resultados de experimentos encaminhados sob este enfoque também avaliem a incidência e preponderância dos mecanismos de bloqueio pelos procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa.

9 REFERÊNCIAS

- AMARAL, Míriam Cristina Santos. **Tratamento de efluente de branqueamento de polpa celulósica empregando sistema de microfiltração conjugado com biorreator com membrana**. 2009. 357 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- APHA, AWWA, WPCF, **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater** 20th edition, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, Washington, D.C., 1998.
- BACCHIN, P.; AIMAR, P.; FIELD, R. W. Critical and sustainable fluxes: Theory, experiments and applications. **Journal of Membrane Science**, Londres, p. 42-69, 2006.
- BARKER, D. J.; STUCKEY, D. C. A Review of Soluble Microbial Products (SMP) in Wastewater Treatment Systems. **Water Research**, Londres, p. 3063-3082, 1999.
- BOERLAGE, S. F. E. et al. Monitoring particle fouling in membrane systems. **Desalination**, Amsterdam, p. 131-142. 1998.
- BOERLAGE, S. F. E. et al. The modified fouling index using ultrafiltration membranes (MFI-UF): characterization, filtration mechanisms and proposed reference membrane. **Journal of Membrane Science**, Londres, p. 1-21, 2002.
- BOERLAGE, S-F. E., Kennedy, M. D., Aniye, M. P., Abogrean, E., Tarawneh, Z.S., Schippers, J. C. The MFI-UF as a water quality test and monitor. **Journal of Membrane Science**, v. 211 (2), p. 271-289, 2003.
- 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, p. 315-322, 1998.
- BOWEN, W. R.; CALVO, J. I.; HERMINDEZ, A. Steps of membrane blocking in flux decline during protein microfiltration. **Journal of Membrane Science**, Londres, p. 153-165, 1995.
- BRINDLE, K., STEPHENSON, T. The Application of Membrane Biological Reactors for the Treatment of Wastewaters. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 49, p. 601-610, 1996.
- BROWN, M. J., LESTER, J. N. Metal removal in activated sludge: the role of bacterial extracellular polymers. **Water Research**, n. 13, p. 817-37, 1979.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1988.

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, p. 221-233, 1998.

CHERYAN, M., **Ultrafiltration and Microfiltration Handbook**, Technomic Publishing Company, Inc. USA. 1998.

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

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

DREWS, A.; LEE, C. H.; KRAUME, M. Membrane fouling - a review on the role of EPS. **Desalination**. n. 200, p. 186-8, 2006.

FLEMMING, H. C.; SCHAULE, G.; GRIEBE, T.; SCHMITT, J.; TAMACHKIAROWA, A. Biofouling - the Achilles hell of membrane processes. **Desalination**. n. 113, p. 215-25, 1997.

FROLUND, B. et al. Extraction of Extracellular Polymers from Activated Sludge using a Cation Exchange Resin. **Water Research**, Londres, p. 1749-1758, 1996.

FROLUND, B.; PALMGREN, R.; KEIDING, K.; NIELSEN, P. H. Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin. **Water Research**, v. 30, n. 8, p. 1749-58, 1996.

GEESEY, G. G. **Microbial exopolymers: Ecological and economic considerations**. ASM News 48: 9–14. 1982.

GOMIDE, Reynaldo. **Operações unitárias**. São Paulo: R. Gomide, 6 v. em tomos, 1980-1997.

GONSALVES, V. E. A critical investigation on the viscose filtration. **Rec. Trav. Chim. Des Pays-Bas**, v. 69, p. 873, 1950.

GRACE, H. P. Structure and performance of filter media. **AIChE Journal**, 2, 1956.

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

HARPER (Jr), W. F.; Bernhardt, M.; Newfield, C. **Membrane bioreactor biomass characteristics and microbial yield at very low mean cell residence time**. Water S.A. v. 32, n. 2, p. 193-198, 2006.

HERMANS, P. H.; BREDÉE, H. L. Zur Kenntnis der Filtrationsgesetze. **Rec. Trav. Chim. des Pays-Bas**, 54, 1935

HERMIA, J., Constant Pressure Blocking Filtration Laws-Application to Power-Law Non-Newtonian Fluids. **Trans. Institute of Chemical Engineering**. v. 60, p. 183–187, 1982.

HO, Jaeho; SUNG, Shiwu. Effects of Solid Concentrations and Cross-Flow Hydrodynamics on Microfiltration of Anaerobic Sludge. **Journal of Membrane Science**. n. 345, p. 142-47, 2009.

IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry. Terminology for membranes and membrane processes. **Journal of Membrane Science**. n. 120, p. 149-59, 1996.

JENKINS, D., RICHARD, M. G., DAIGGER, G. T., **Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming**, 3 ed., Chelsea, Lewis Publishers, Inc., Michigan, 2003.

JIN, B.; LANT, P. Flow regime, hydrodynamics, floc size distribution and sludge properties in activated sludge bubble column, air-lift and aerated stirred reactors. **Chemical Engineering Science**, p. 2379-2388, 2004.

JIN, Y. -L.; Lue, W. -N.; LEE, C. -H.; CHANG, I.-S.; Huang, X.; SWAMINATHAN, T. Effect of DO concentration on biofilm structure and membrane filtrability in submerged membrane bioreactor. **Water Research**, v.40, p. 2.829-2.836, 2006.

LASPIDOU, C. S.; RITTMANN, B. E. A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products and active and inert biomass. **Water Research**. n. 36, p. 2711-20, 2002.

LAERA, G.; Pollice, A.; SATURNO, D.; GIORDANO, C.; LOPEZ, A. Zero net growth in a membrane bioreactor with complete sludge retention. **Water Research**, v.39, p. 5.241 – 5.249, 2005.

LEE, Yonghun; Cho, JINWOO; Seo, YOUNGWOO; Lee, JAE WOO e Ahn, KYU-HONG. Modeling of submerged membrane bioreactor process for wastewater treatment. **Desalination** v. 146, p. 451-457, 2002.

LESJEAN, B.; ROSENBERGER, S.; LAABS, C.; JEKEL, M.; GNIRSS, R.; AMY, G. Correlation between membrane fouling and soluble/colloidal organic substances in membrane bioreactors for municipal wastewater treatment, **Water Science Technology**. 51 (6–7), p. 1–8, 2005.

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, p. 425-36, 2004.

LOVATEL, André Alberto. **Geração de EPS no Tratamento de Água Residuária de Refinaria de Petróleo em MBR e sua Influência em Micro e Ultrafiltração**. 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso do Programa de Pós-graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, Brasil, 2011.

METCALF AND EDDY; TCHOBANOGLOUS, George.; BURTON, Franklin L.; STENSEL, H. David. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4ª. ed. Boston: McGraw-Hill, 1819p, 2003.

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

NAGAOKA, H.; YAMANISHI, S.; MIYA, A. **Modeling of biofouling by extracellular polymers in a membrane separation activated sludge system**. *Wat. Sci. Technol.*, v. 38 (4-5), p. 497-504, 1998.

NG, H. Y., HERMANOWICZ, S. W., Membrane Bioreactor Operation at Short Solids Retention Times: Performance and Biomass Characteristics, **Water Research**, v. 39, p. 981-992, 2005.

NOBLE, R.D., STERN, S.A. **Membrane Separations Technology: Principles and Applications**. Elsevier Science, NY, USA, 1995.

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

OGNIER, S., WISNIEWSKI, C. and GRASMICK, A. Influence of macromolecule adsorption during filtration of a membrane bioreactor mixed liquor suspension. **Journal of Membrane Science**, v, 209 (1), p.27-37, 2002.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006. 367 p.

PUJOL, R. & CANLER, J.P. Biosorption and dynamics of bacterial population in activated sludge. **Water Research**, v. 26(2), p. 209-212, 1992.

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, p. 710-720, 2006.

RUTH, B. F., MONTILLON, G. H., MONTONNA, R. E. Studies in Filtration-I. Critical Analysis of Filtration Theory, **Industrial and Engineering Chemistry**, 25(1), 76-82.1933.

RUTH, B. F., MONTILLON, G. H., MONTONNA, R. E. Studies in Filtration-II. Fundamental Axiom of Constant-Pressure Filtration, **Industrial and Engineering Chemistry**, 25(2), 153-161.1933

RUTH, B. F. Studies in Filtration-III. Derivation of General Filtration Equation, **Industrial and Engineering Chemistry**, 27(6), 708-723.1935

SANTOS, A.; MA, W.; JUDD, S. J. Membrane bioreactors: two decades of research and implementation. **Desalination**. v. 273, n. 1, p. 148-54, 2011.

SCHIPPERS, J. C.; VERDOUW, J. The modified fouling index, a method of determining the fouling characteristics of water. **Desalination**, Londres, 32, p. 137-148, 1980.

SCHNEIDER, René Peter; TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água, esgoto e água de reúso.** xix, 234 p. ISBN 8590082334. São Paulo: ABES, 2001.

STEPHENSON, T., JUDD, S., BRINDLE, K., **Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment**, IWA Publishing, London, 2000.

SOMBATSOMPOP, Kwannate (Manoonpong). **Membrane Fouling Studies in Suspended and Attached Growth Membrane Bioreactor Systems.** Tese (Doutorado). Asian Institute of Technology. School of Environment, Resources and Development. Thailand, May 2007.

THOMAS, H, JUDD, S., MURRER, J., Fouling Characteristics of Membrane Filtration in Membrane Bioreactors, **Membrane Technology**, v. 122, p. 10-13, 2000.

VAN LOOSDRECHT; M.; HENZE, M. Maintenance, endogenous respiration, lysis, decay and predation. **Water Sci. Technol.**, v. 39 (1), p. 107–117, 1999.

VIERO, Aline Furlanetto. **Avaliação do desempenho de um biorreator com membranas submersas para tratamento de efluente.** 190 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

WINGENDER, J.; NEU, T. R.; FLEMMING, H. C. **Microbial extracellular polymeric substances: characterization, structure and function.** Berlin: Springer-Verlag, 1999.

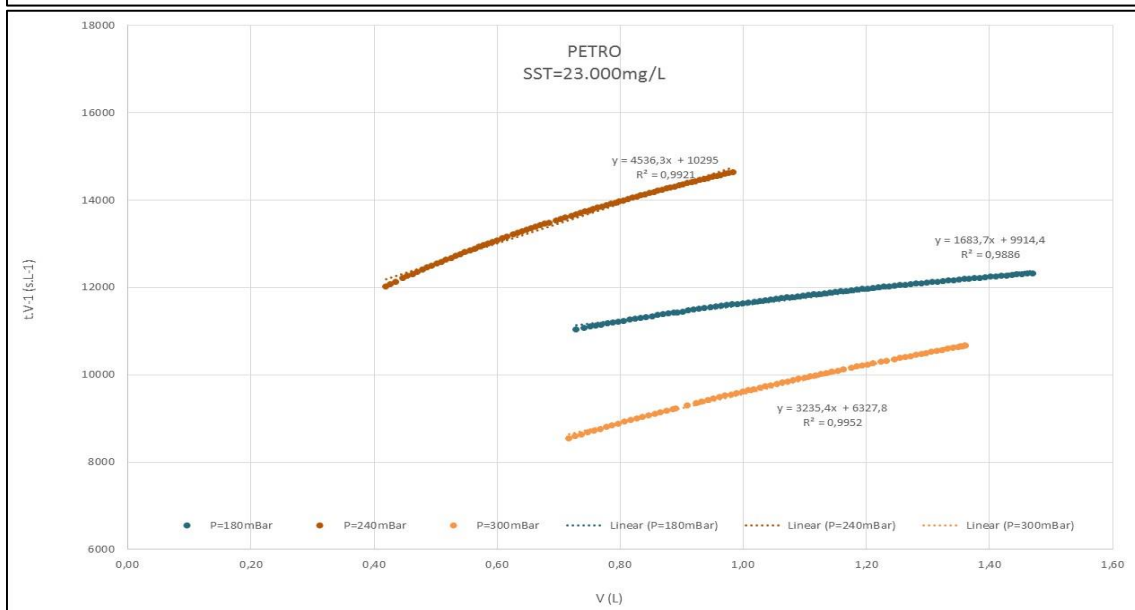
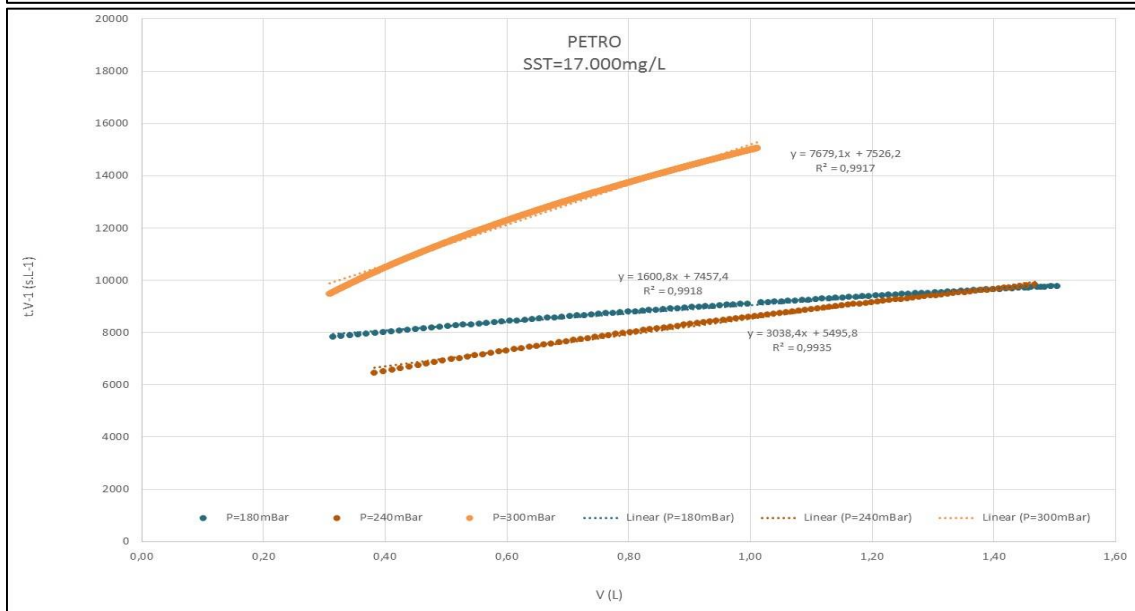
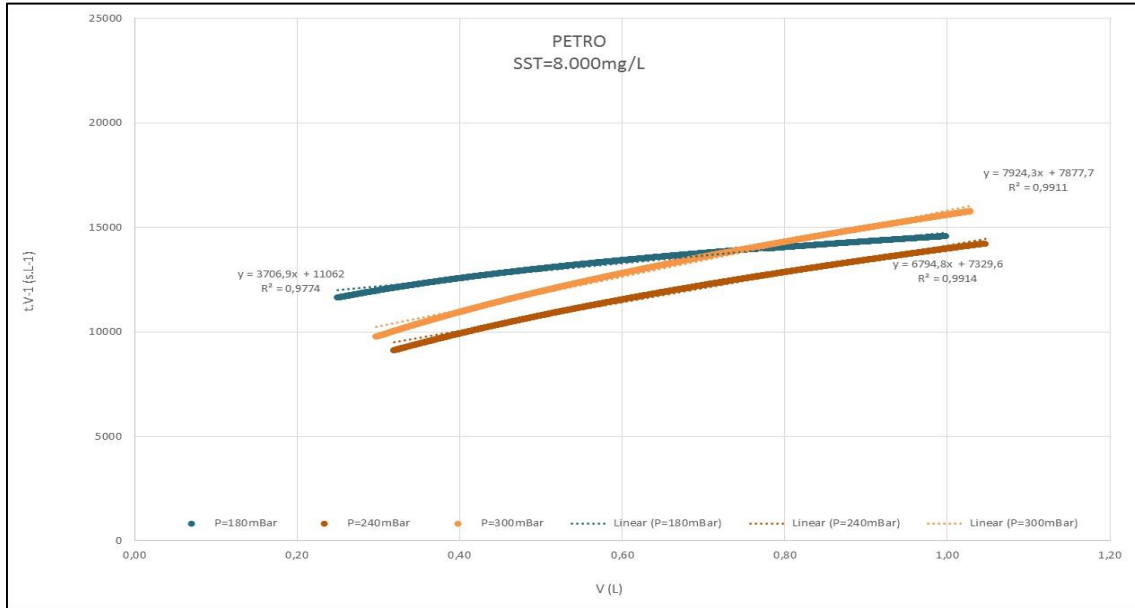
WINTGENS, T.; ROSEN, J.; MELIN, T.; BREPOLS, C.; DRENSLA, K.; ENGELHARDT, N. Modeling of a membrane bioreactor system for municipal wastewater treatment. **Journal of Membrane Science**, v. 216 (2003), p. 55-65, 2003.

YUN, M.-a et al. Characterization of biofilm structure and its effect on membrane permeability in MBR for dye wastewater treatment. **Water Research**, London, v. 40, p.45-52, 2006.

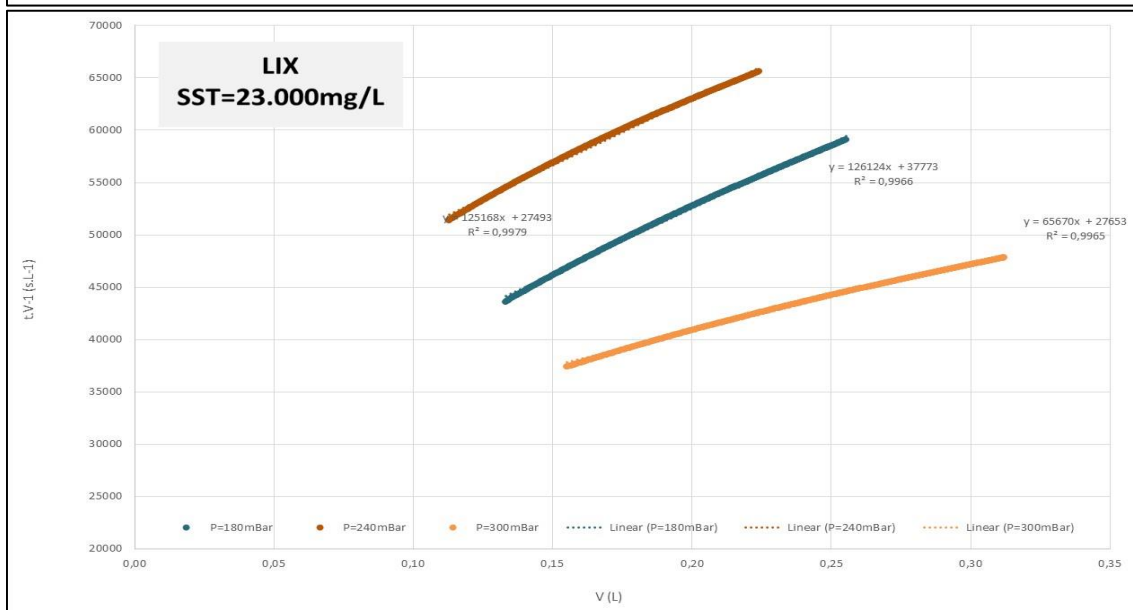
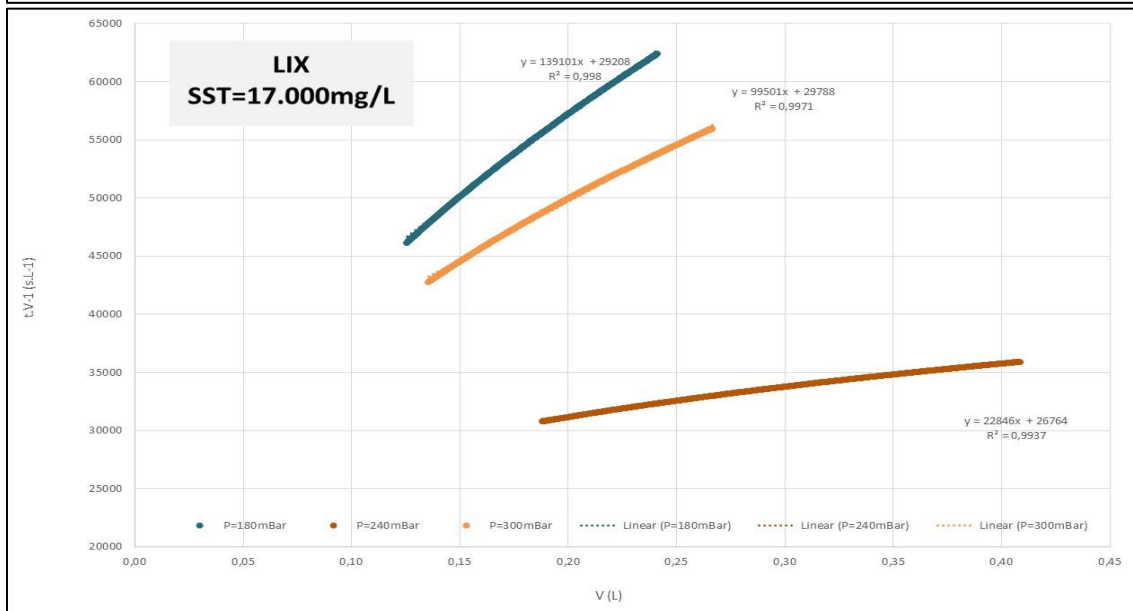
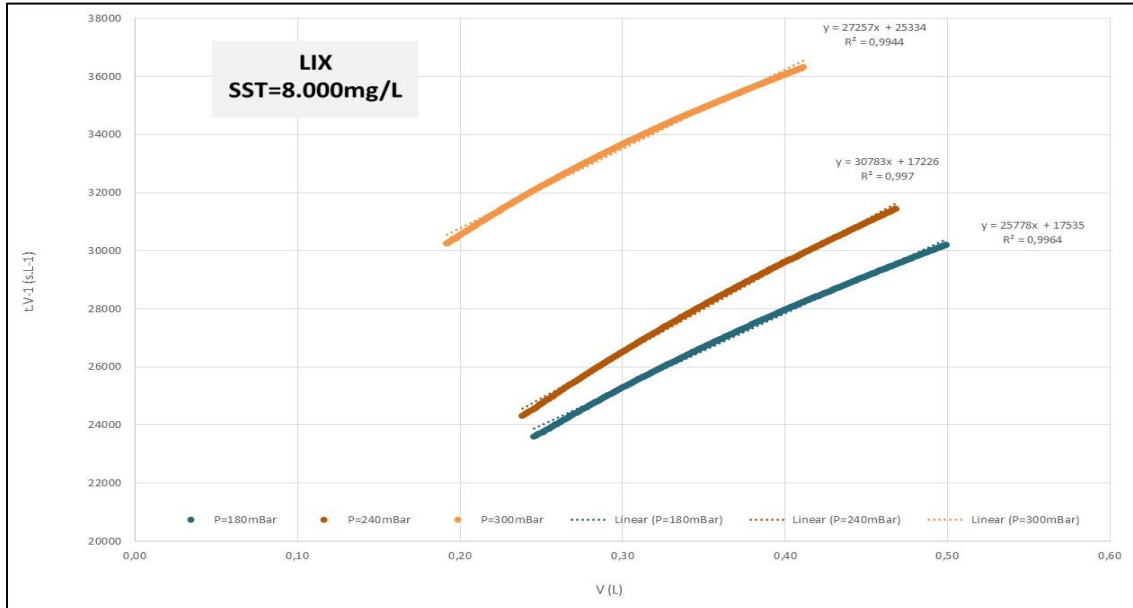
YÜKSELER, Hande. **Biological and chemical sludge filtration.** Tese. Middle East Technical University. Ankara. Turquia. 2007

**APÊNDICE A – GRÁFICOS DA RELAÇÃO $TV^{-1} \times V$, LINEARIZADOS
PARA A EXTRAÇÃO DO VALOR DO IMF**

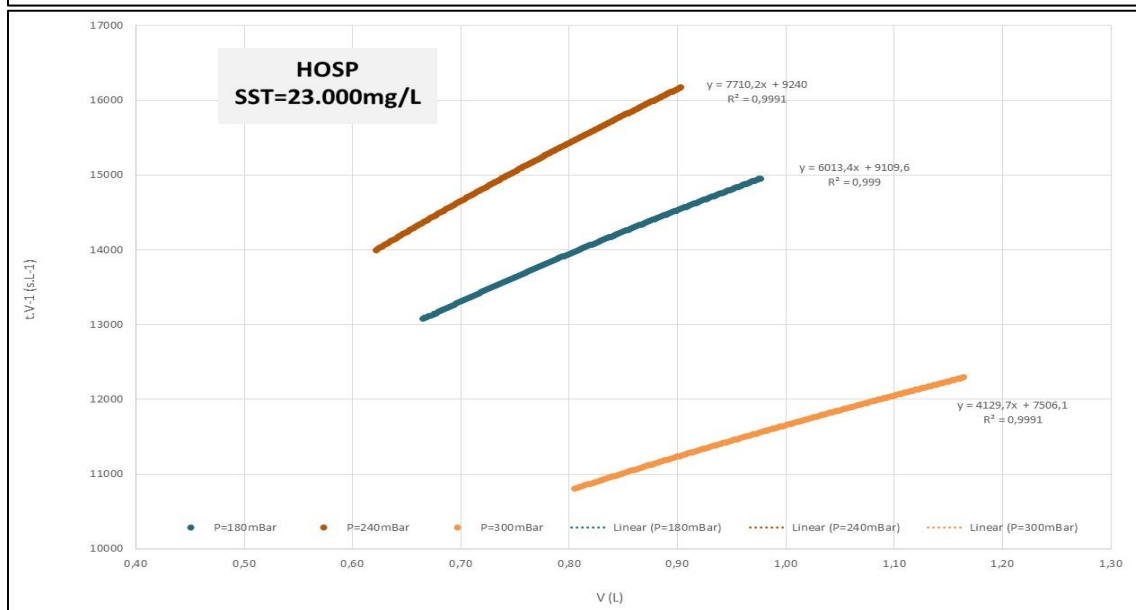
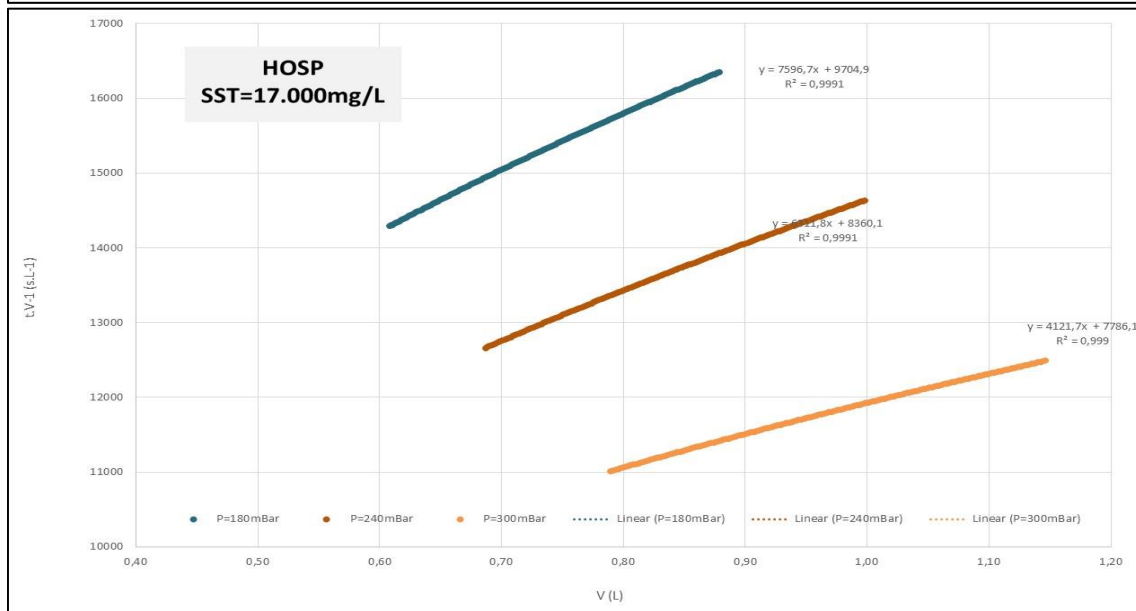
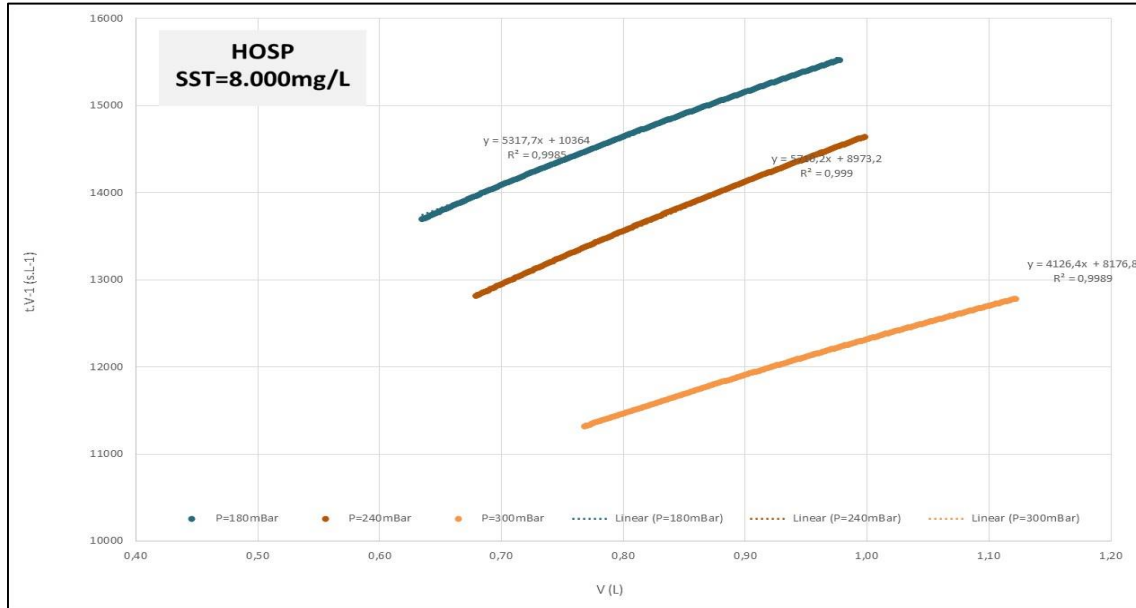
E1-Petroquímico



E2-Lixiviado

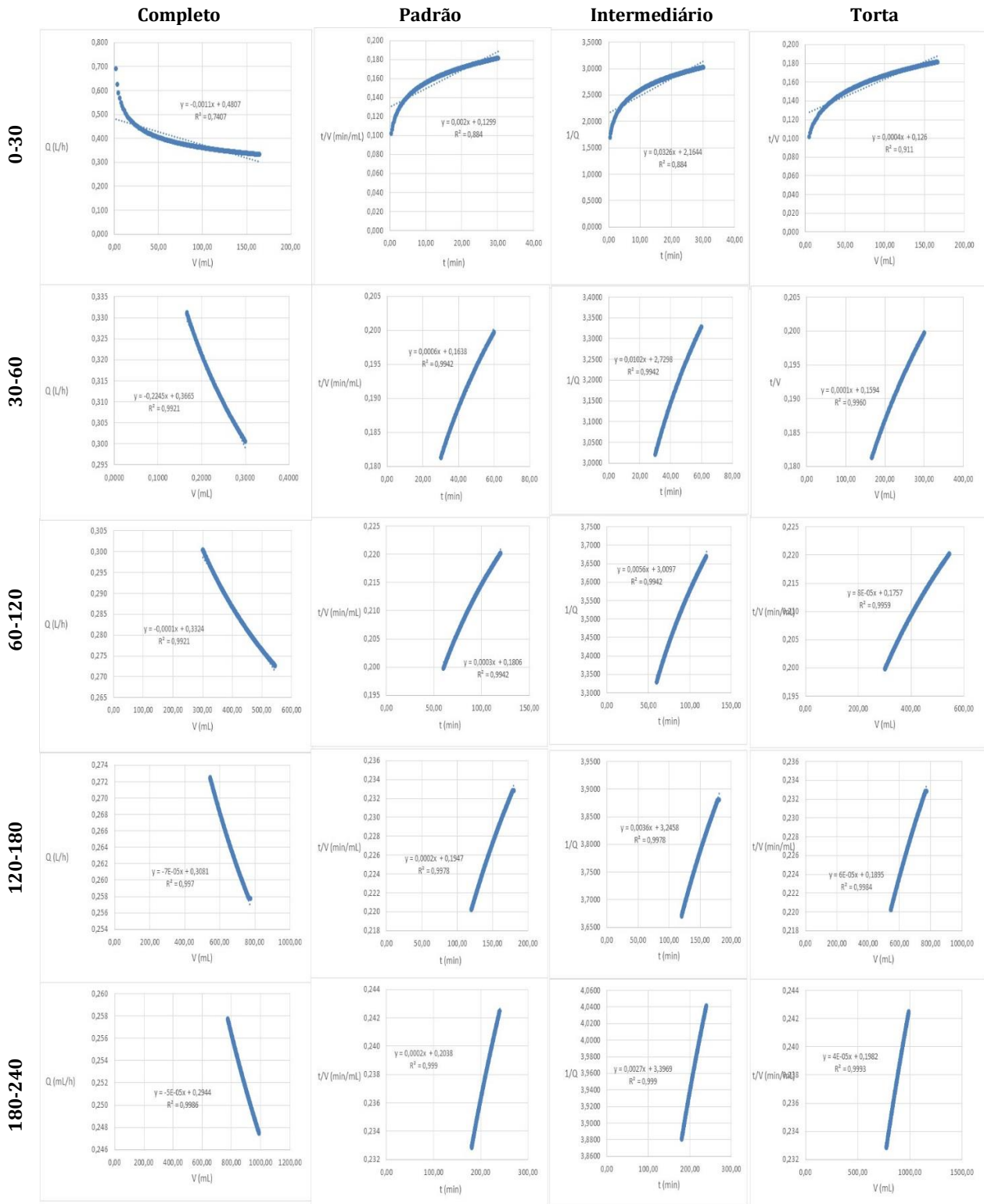


E3-Hospitalar

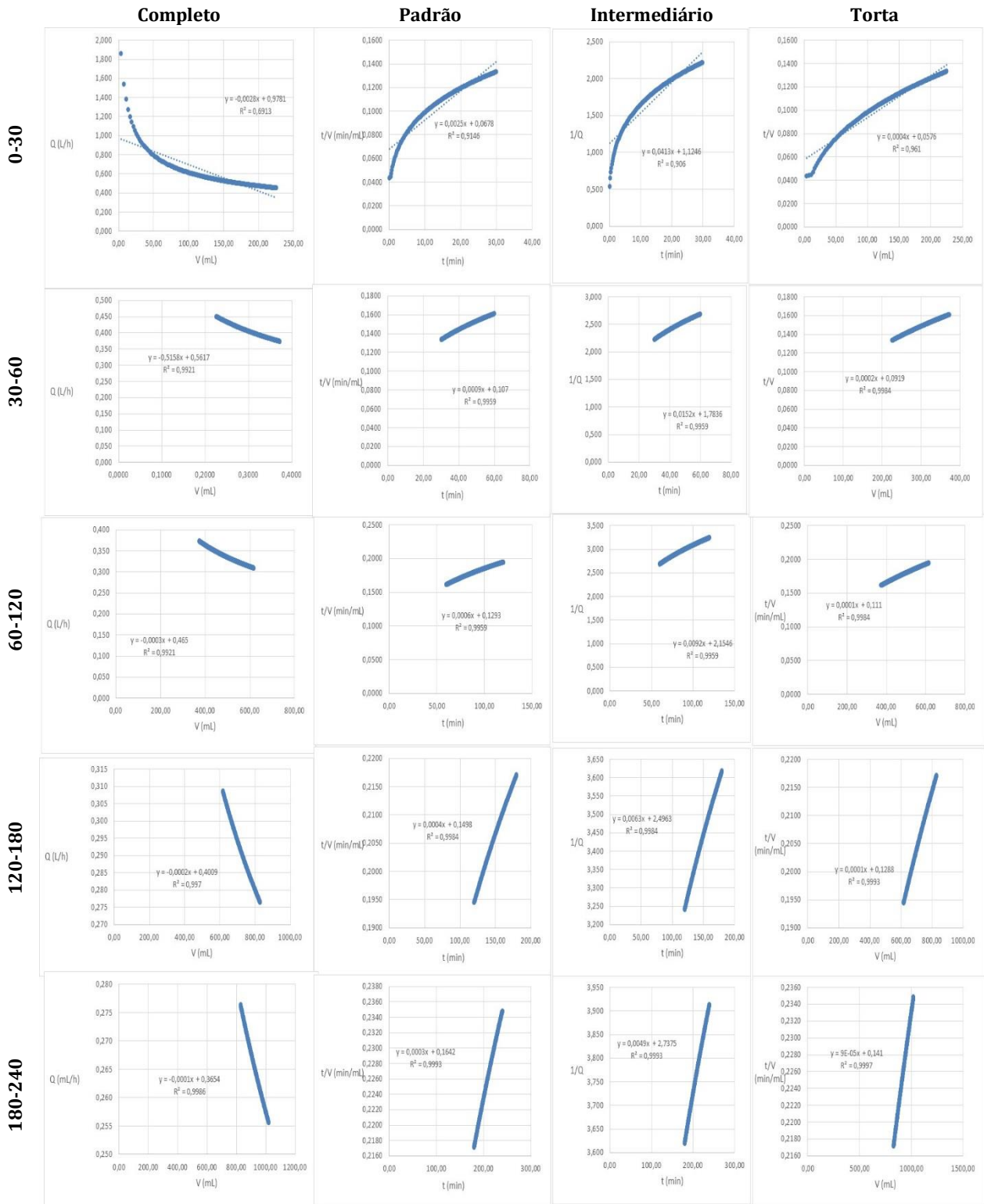


**APÊNDICE B – GRÁFICOS LINEARIZADOS PARA EXTRAÇÃO DOS
VALORES DE R^2 RELATIVOS À DETERMINAÇÃO DOS
MECANISMOS DE BLOQUEIO.**

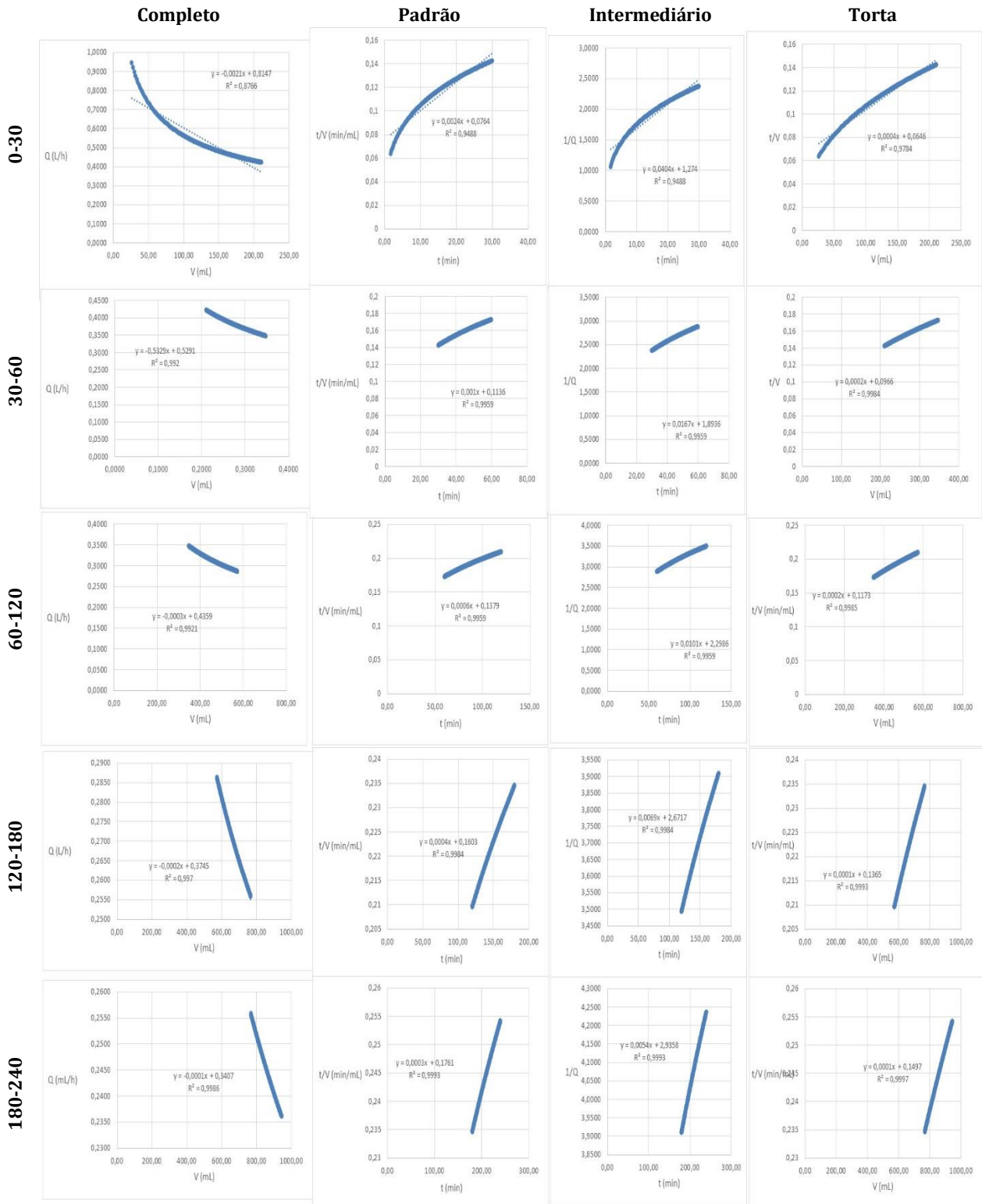
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E1-Petroquímico – SST: 8.000 mg/L – PTM: 180 mbar



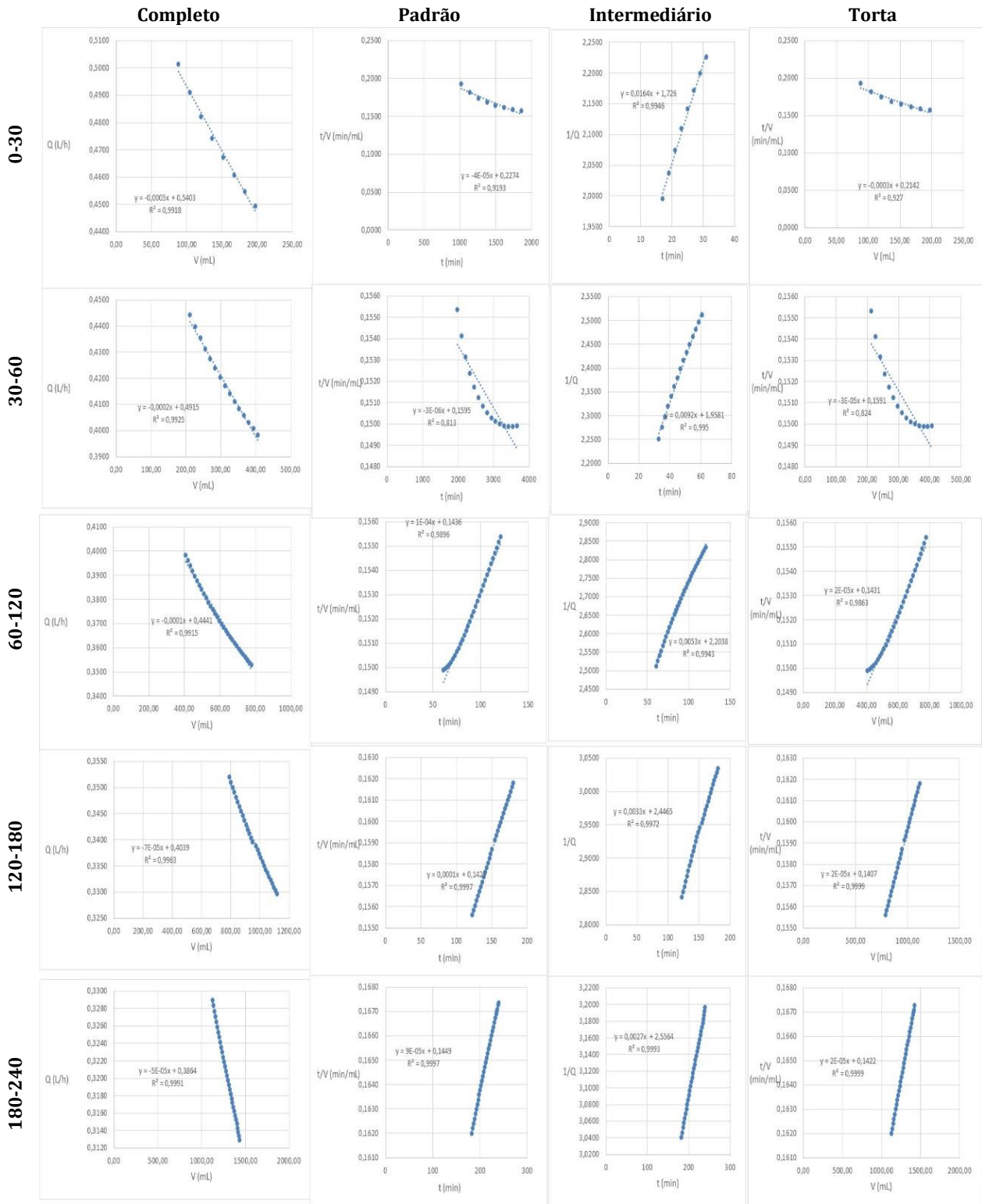
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E1-Petroquímico – SST: 8.000 mg/L – PTM: 240 mbar



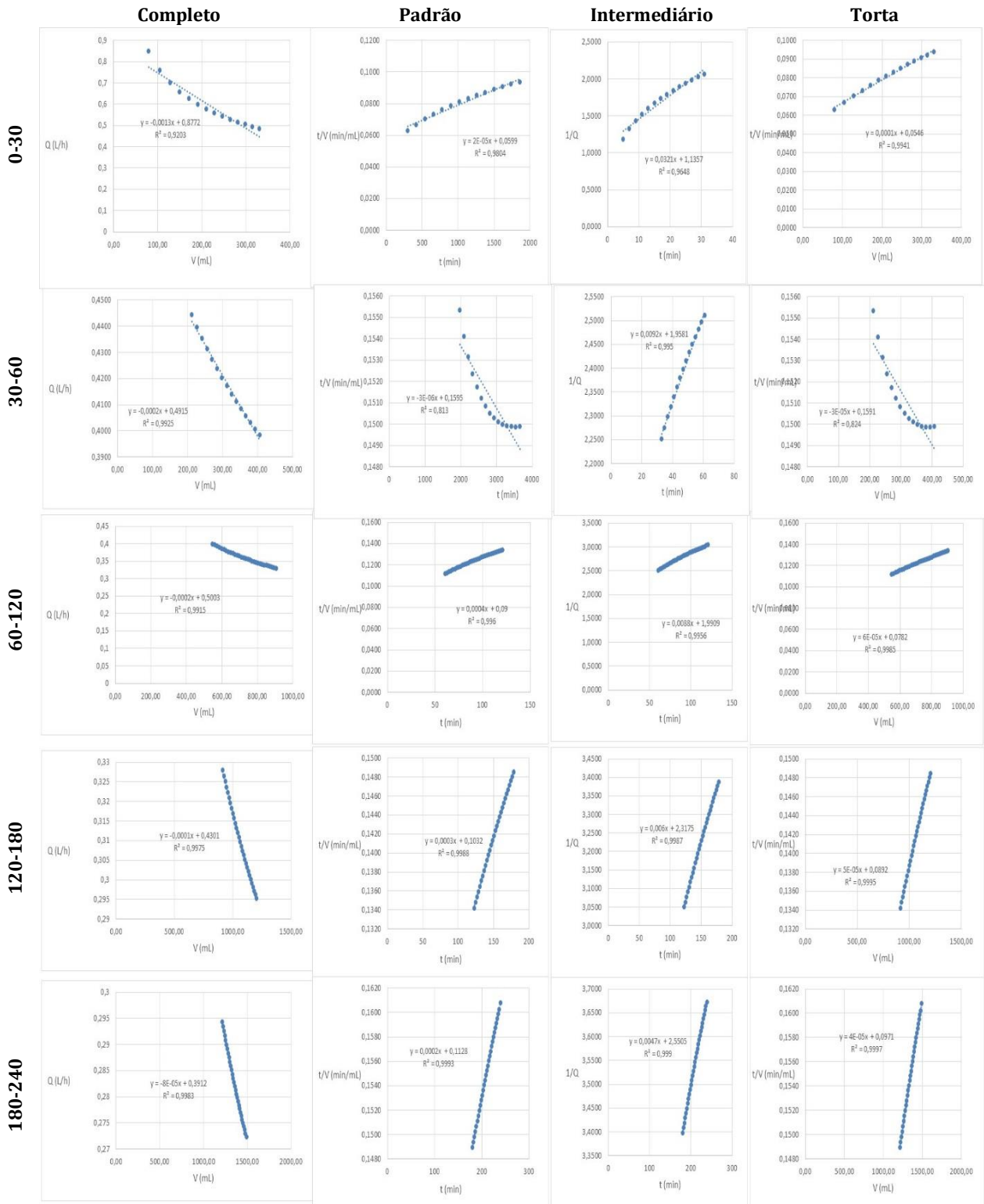
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E1-Petroquímico – SST: 8.000 mg/L – PTM: 300 mbar



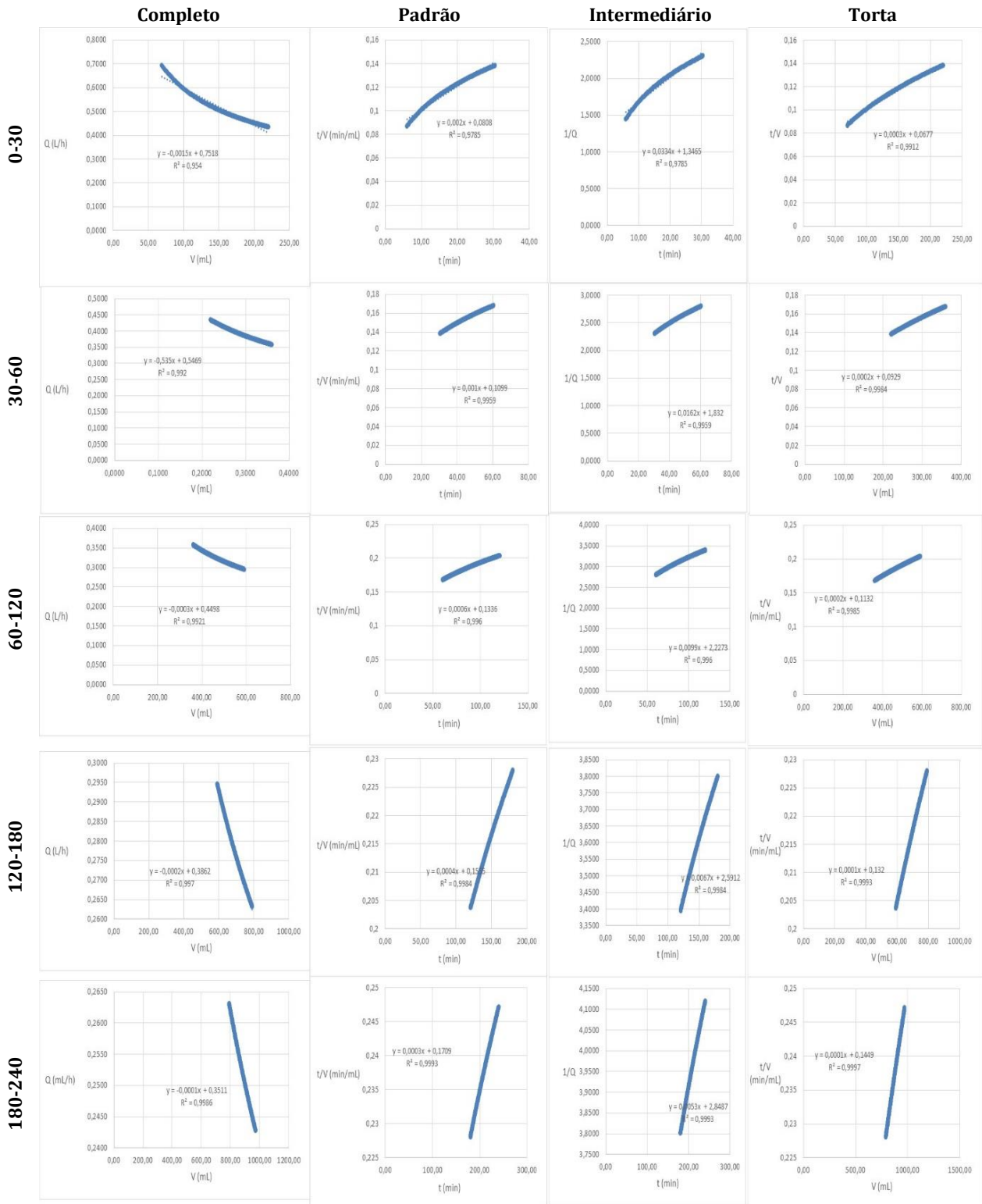
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E1-Petroquímico – SST: 17.000 mg/L – PTM: 180 mbar



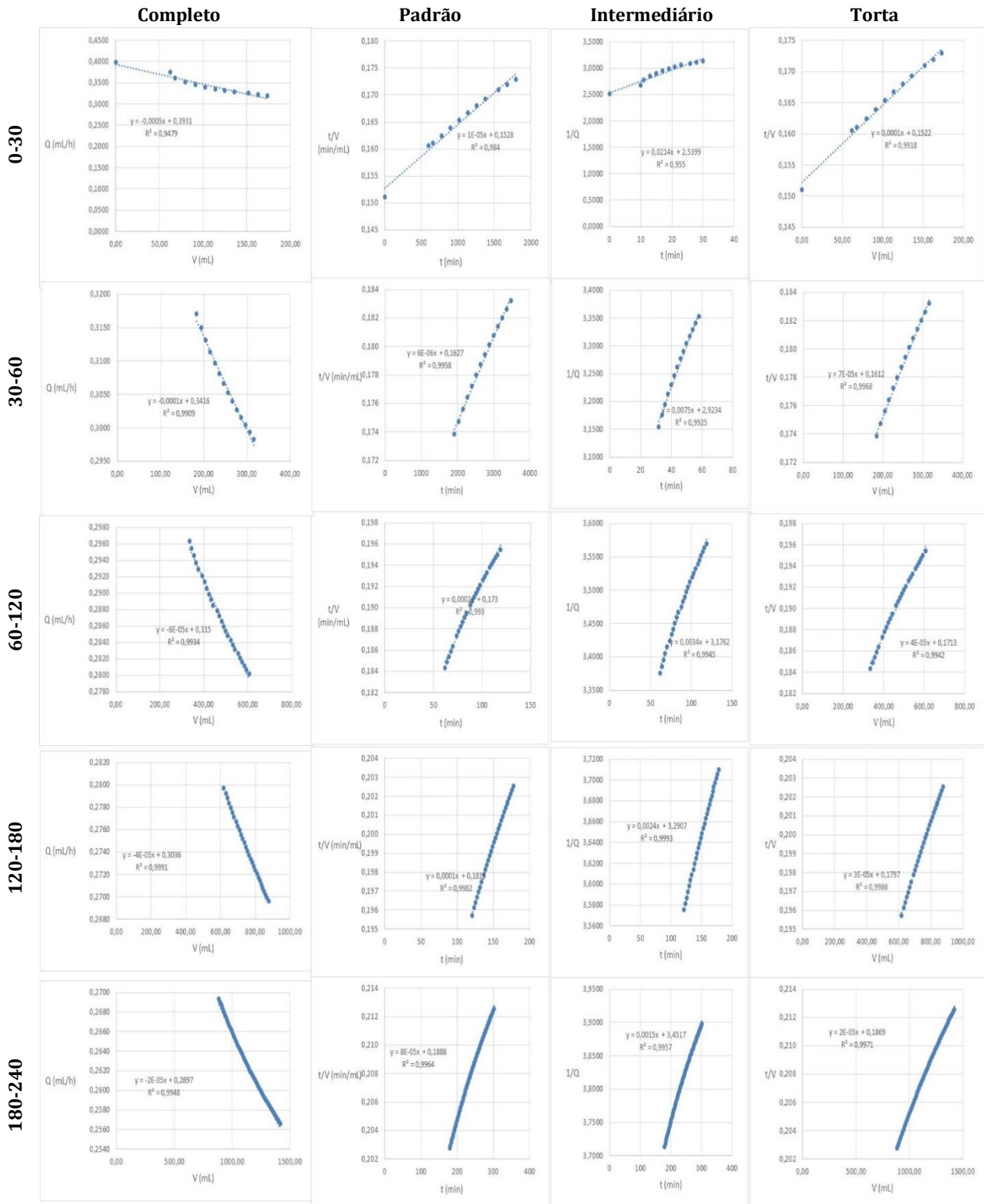
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E1-Petroquímico – SST: 17.000 mg/L – PTM: 240 mbar



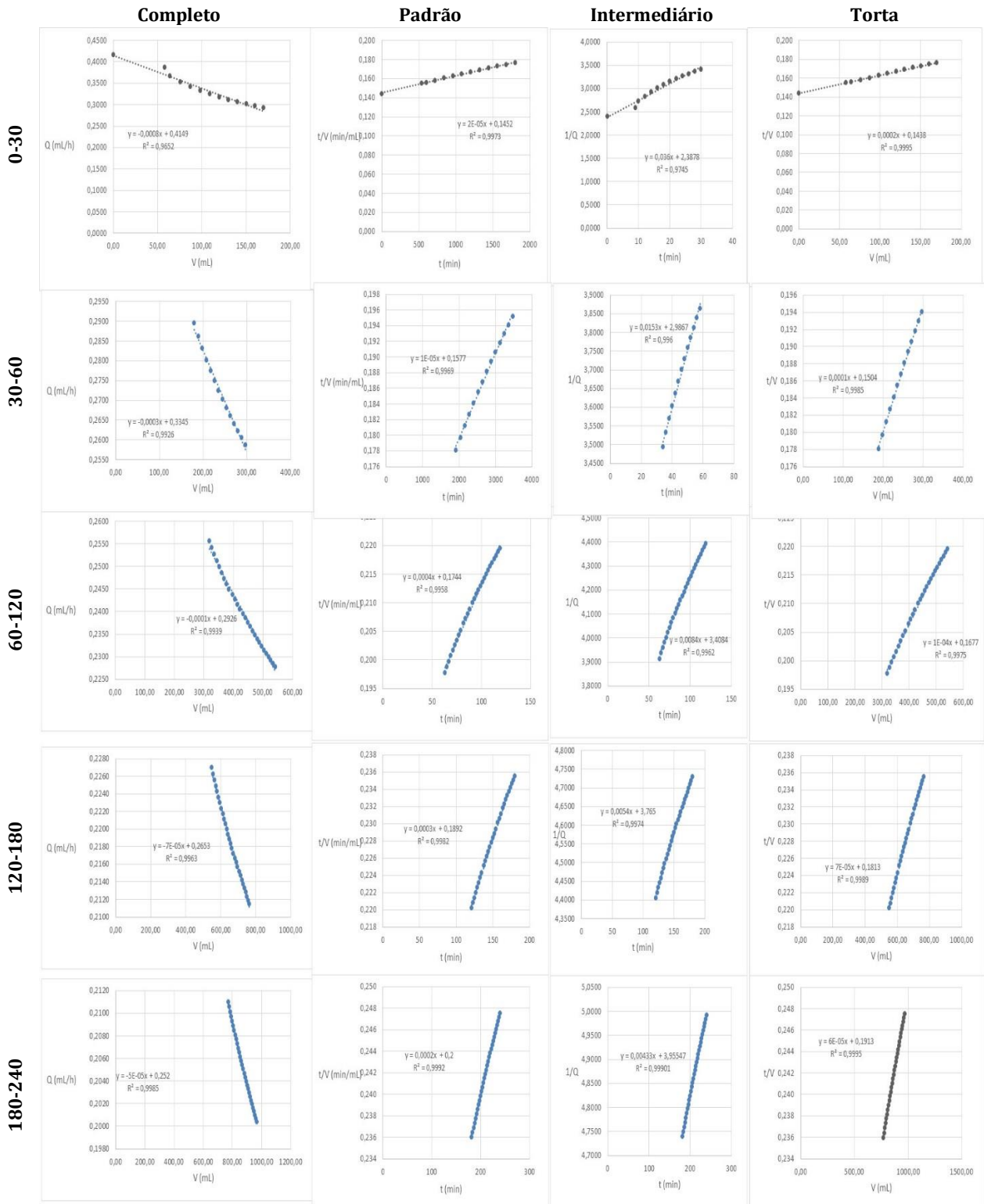
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E1-Petroquímico – SST: 17.000 mg/L – PTM: 300 mbar



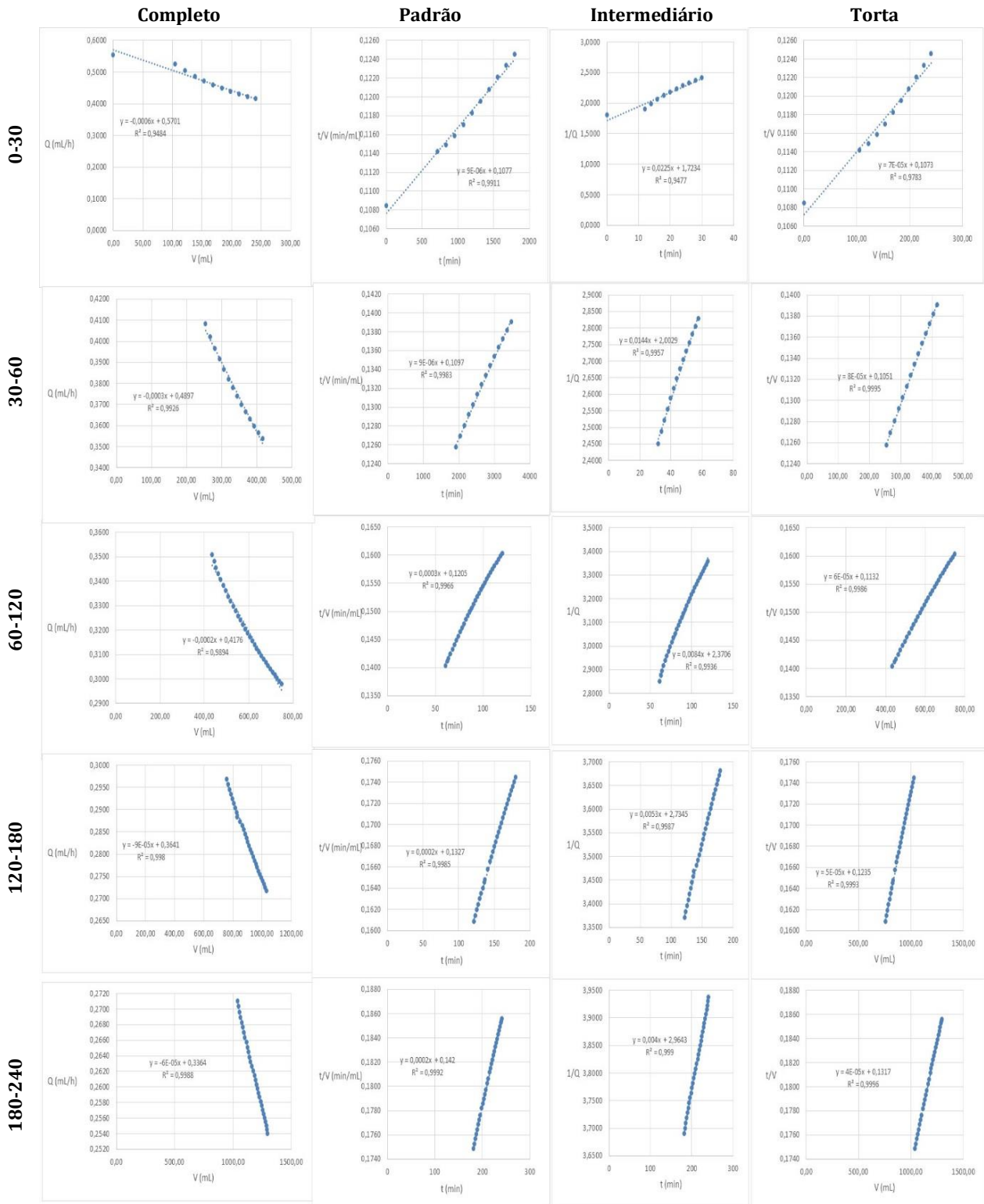
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E1-Petroquímico – SST: 23.000 mg/L – PTM: 180 mbar



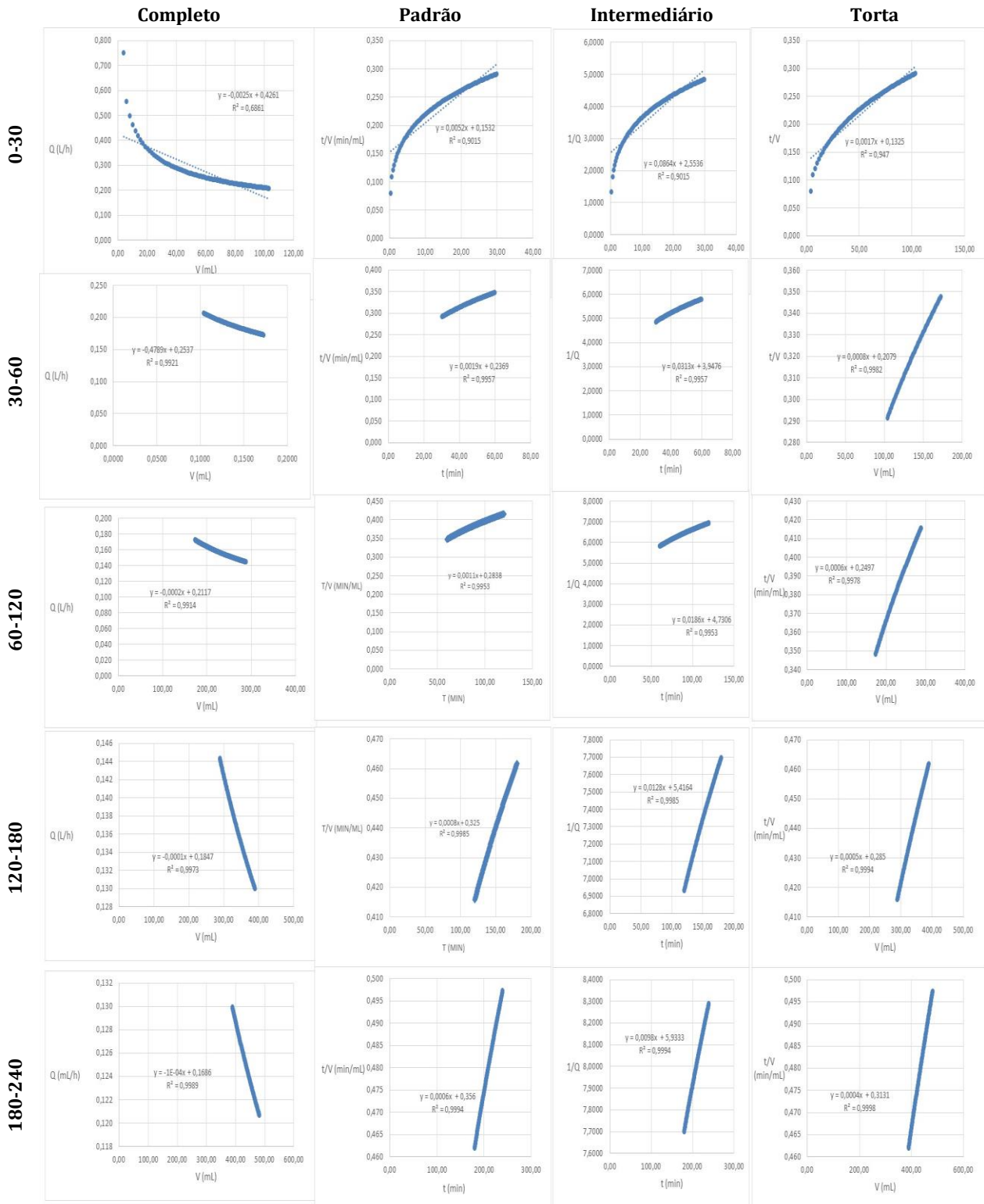
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E1-Petroquímico – SST: 23.000 mg/L – PTM: 240 mbar



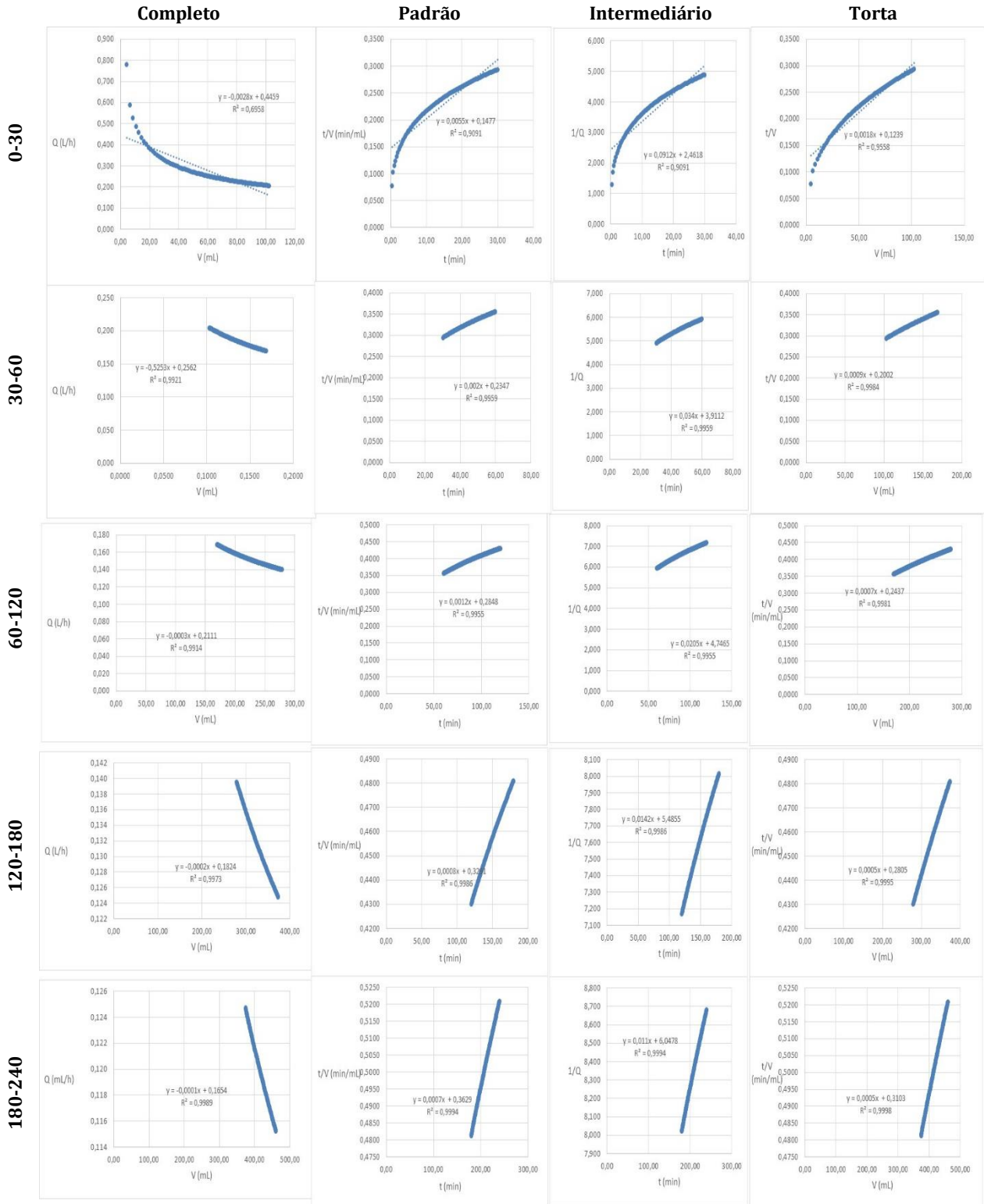
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E1-Petroquímico – SST: 23.000 mg/L – PTM: 300 mbar



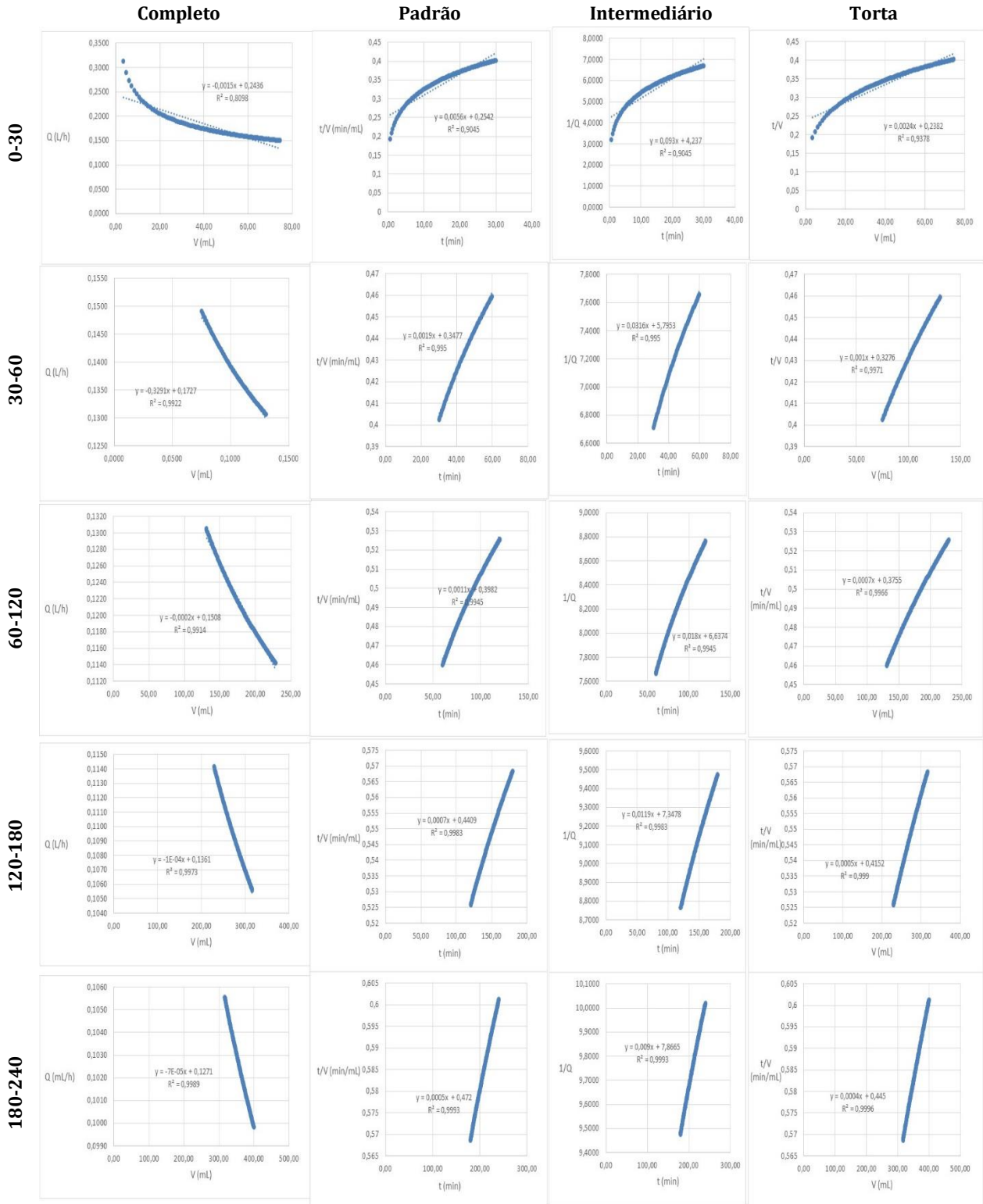
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E2-Lixiviado – SST: 8.000 mg/L – PTM: 180 mbar



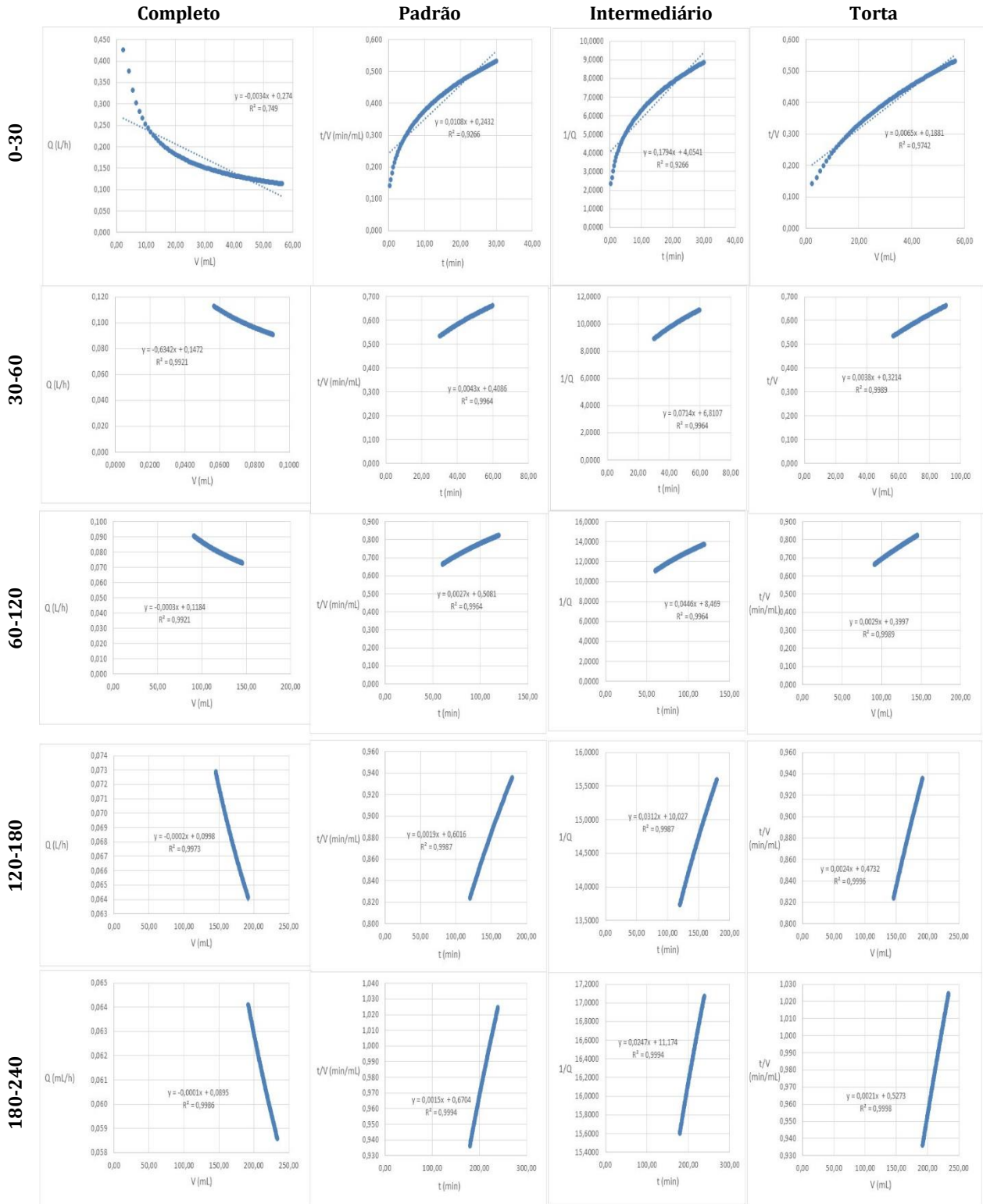
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E2-Lixiviado – SST: 8.000 mg/L – PTM: 240 mbar



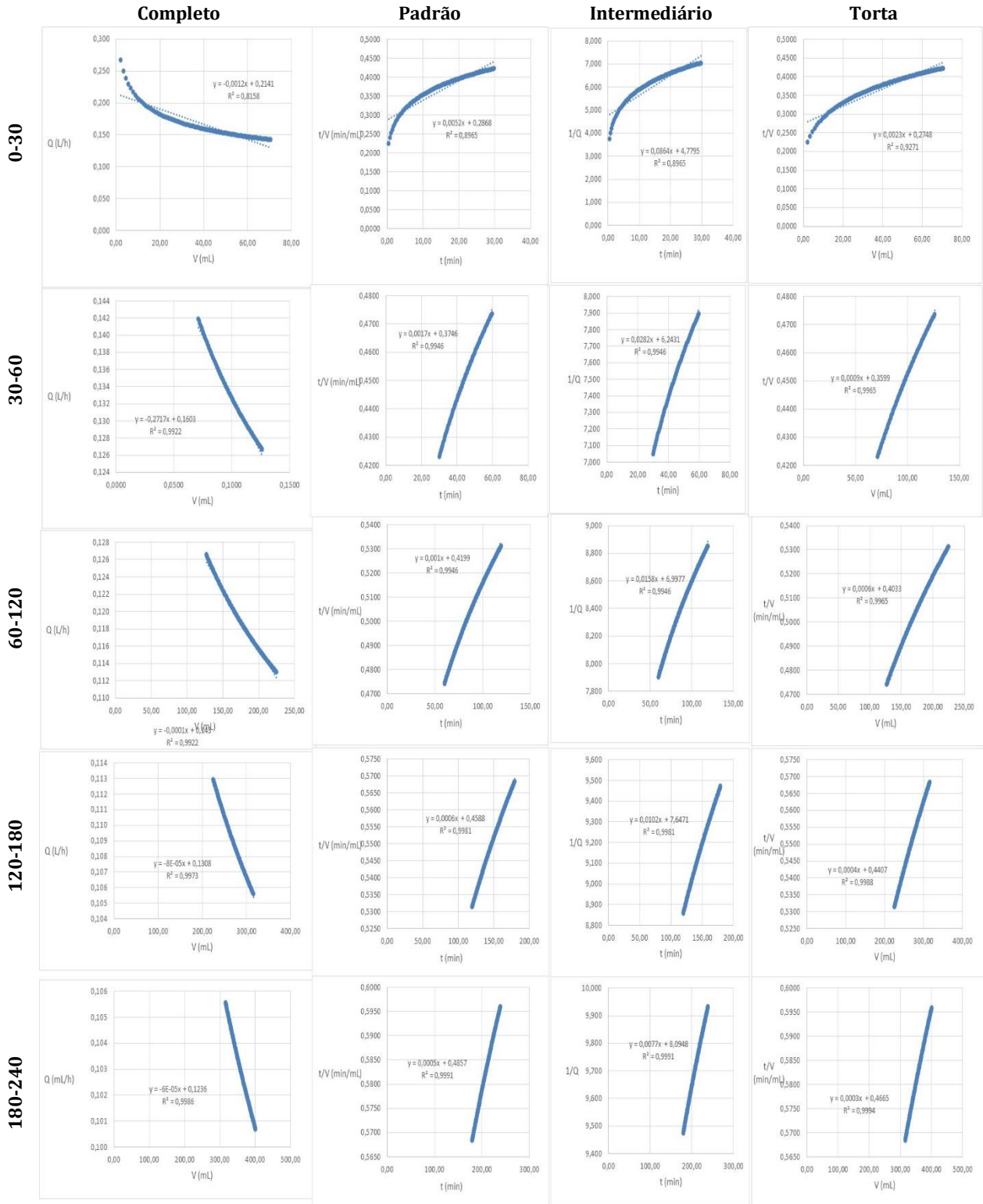
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E2-Lixiviado – SST: 8.000 mg/L – PTM: 300 mbar



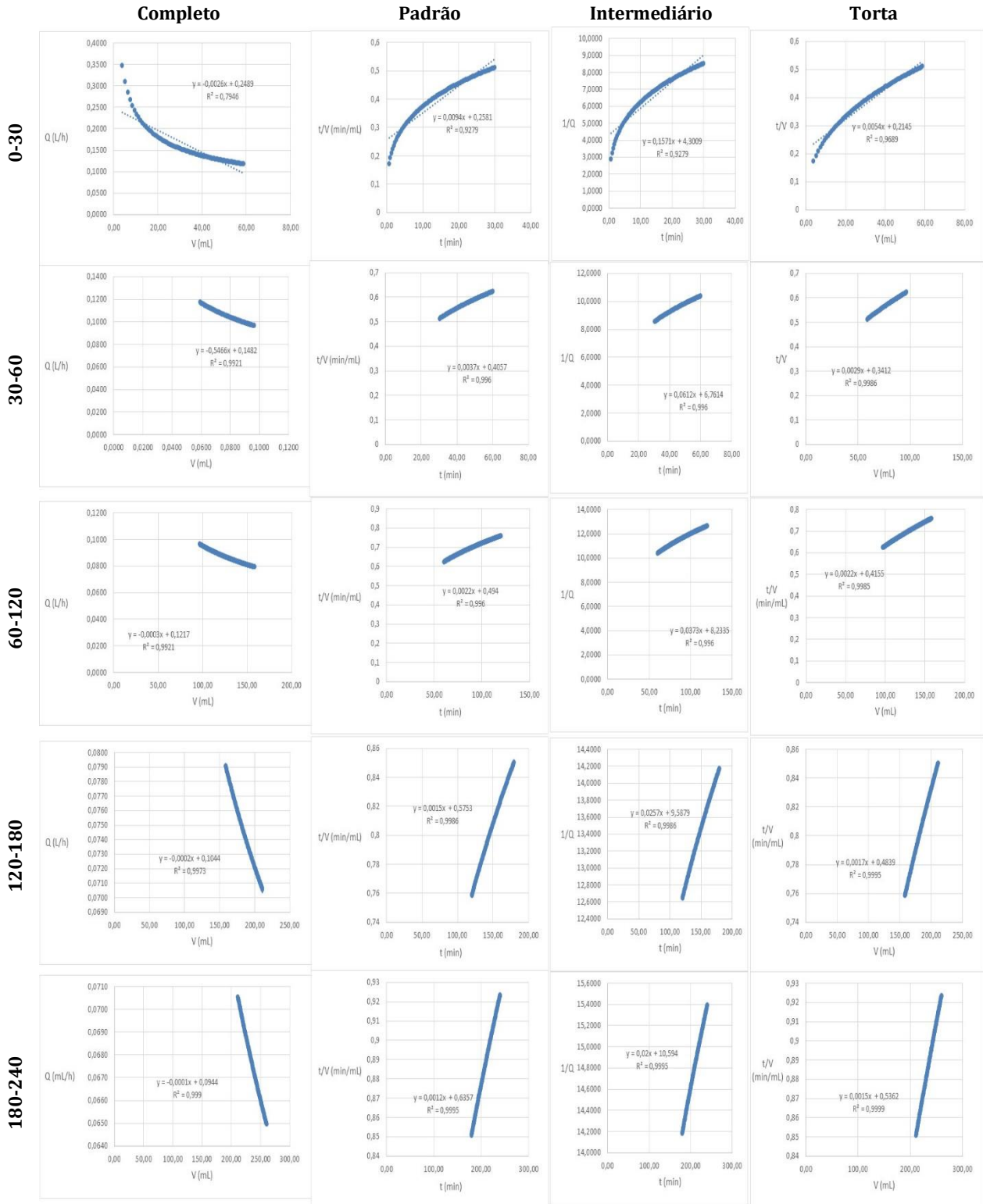
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E2-Lixiviado – SST: 17.000 mg/L – PTM: 180 mbar



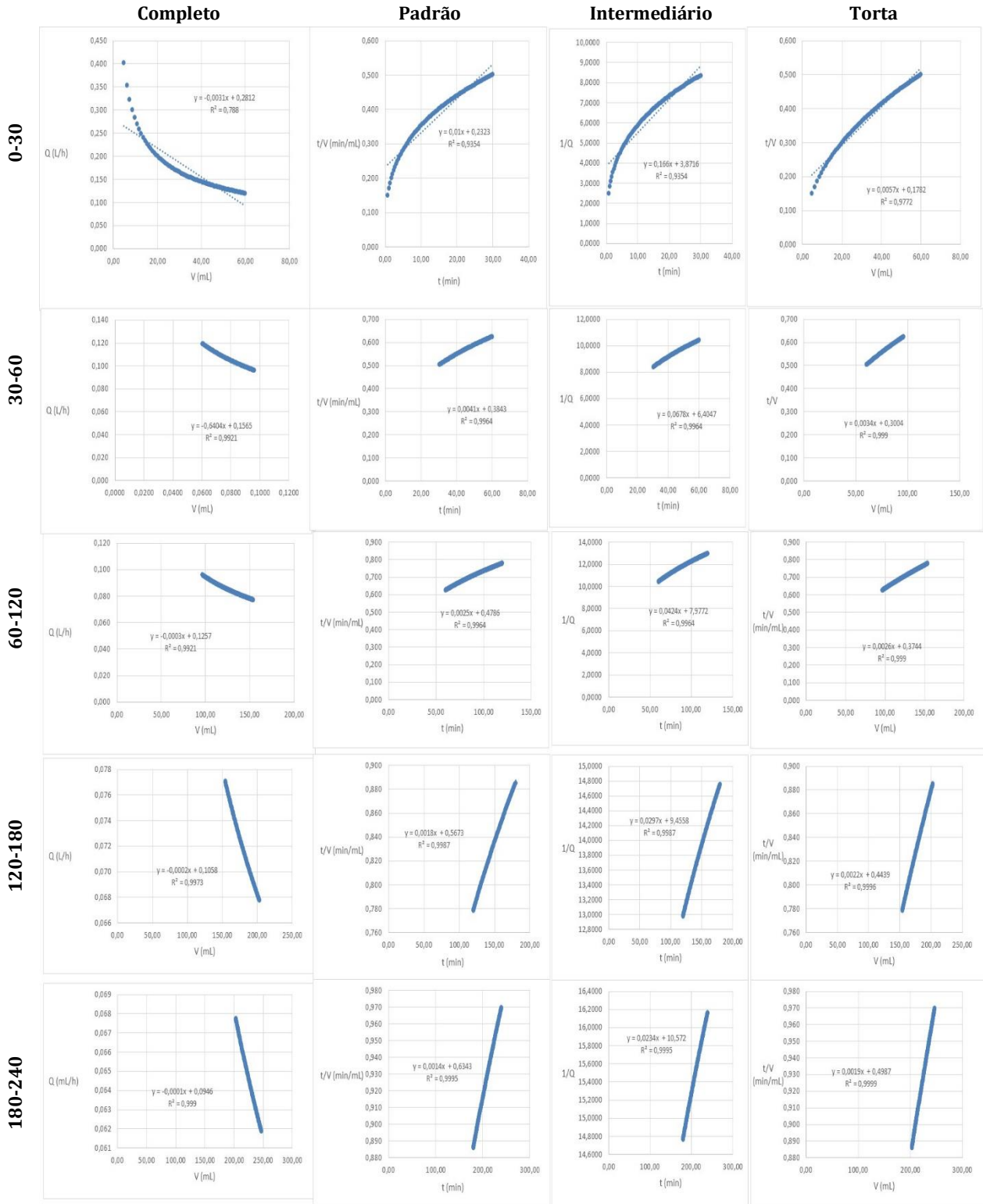
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E2-Lixiviado – SST: 17.000 mg/L – PTM: 240 mbar



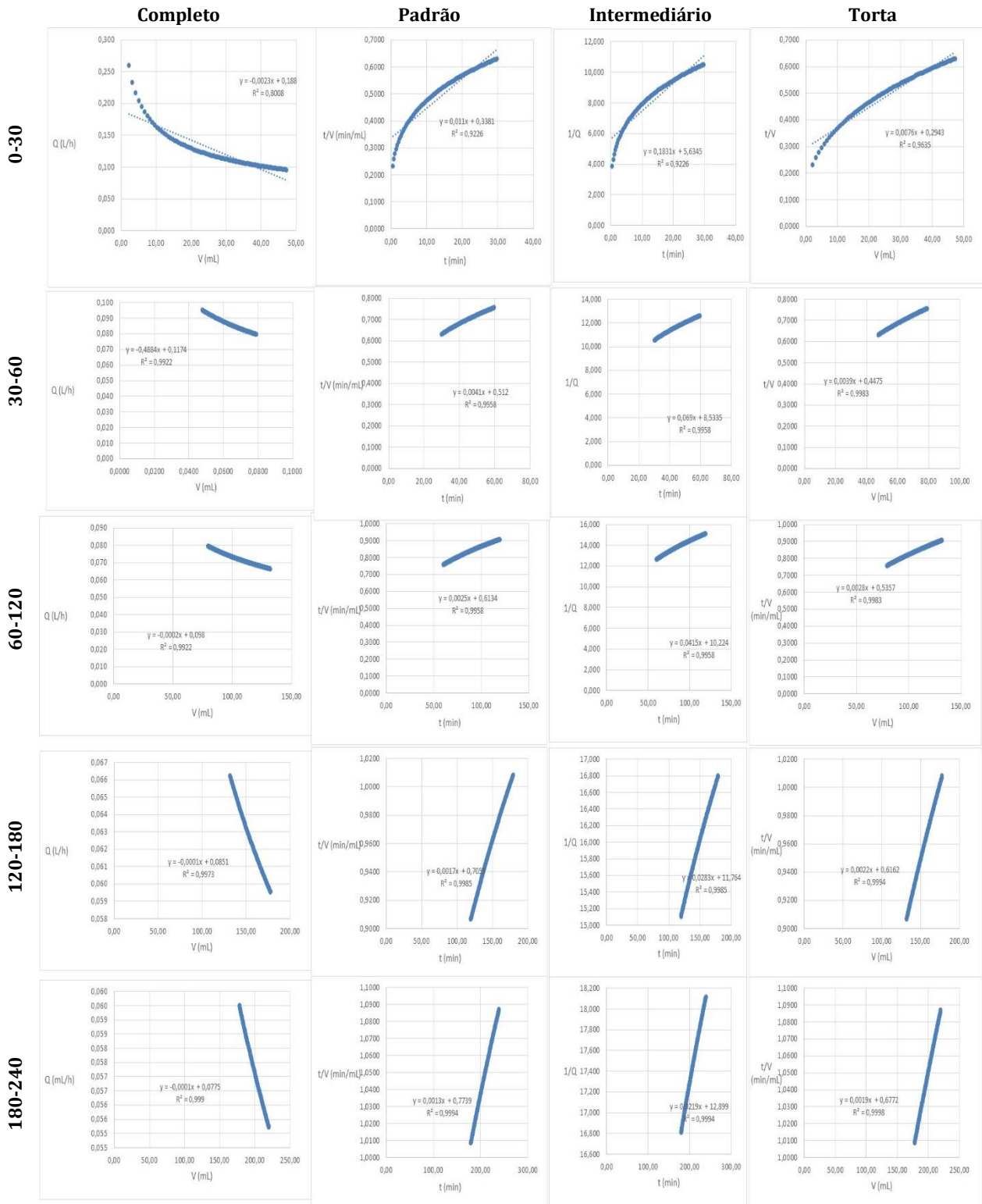
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E2-Lixiviado – SST: 17.000 mg/L – PTM: 300 mbar



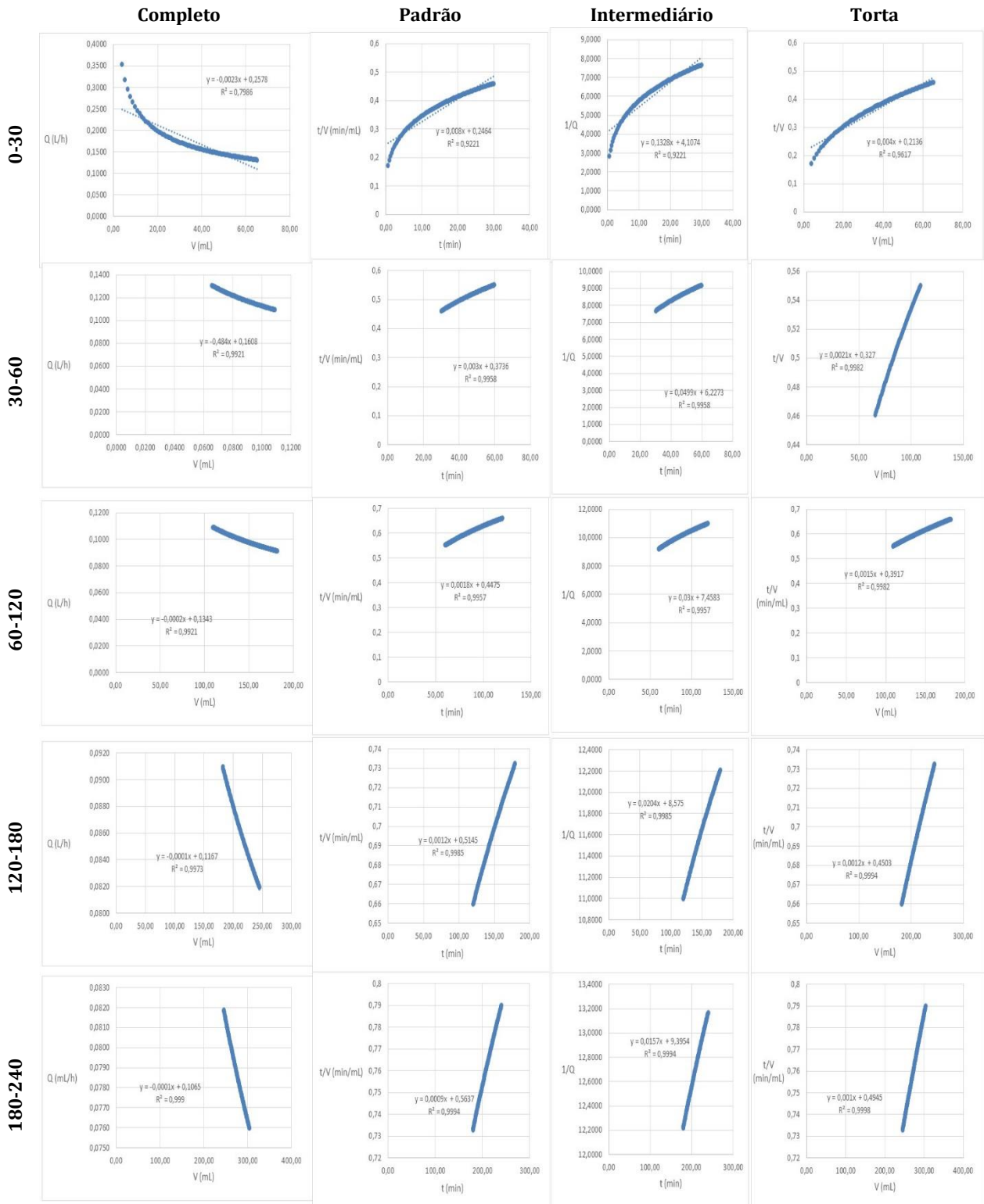
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E2-Lixiviado – SST: 23.000 mg/L – PTM: 180 mbar



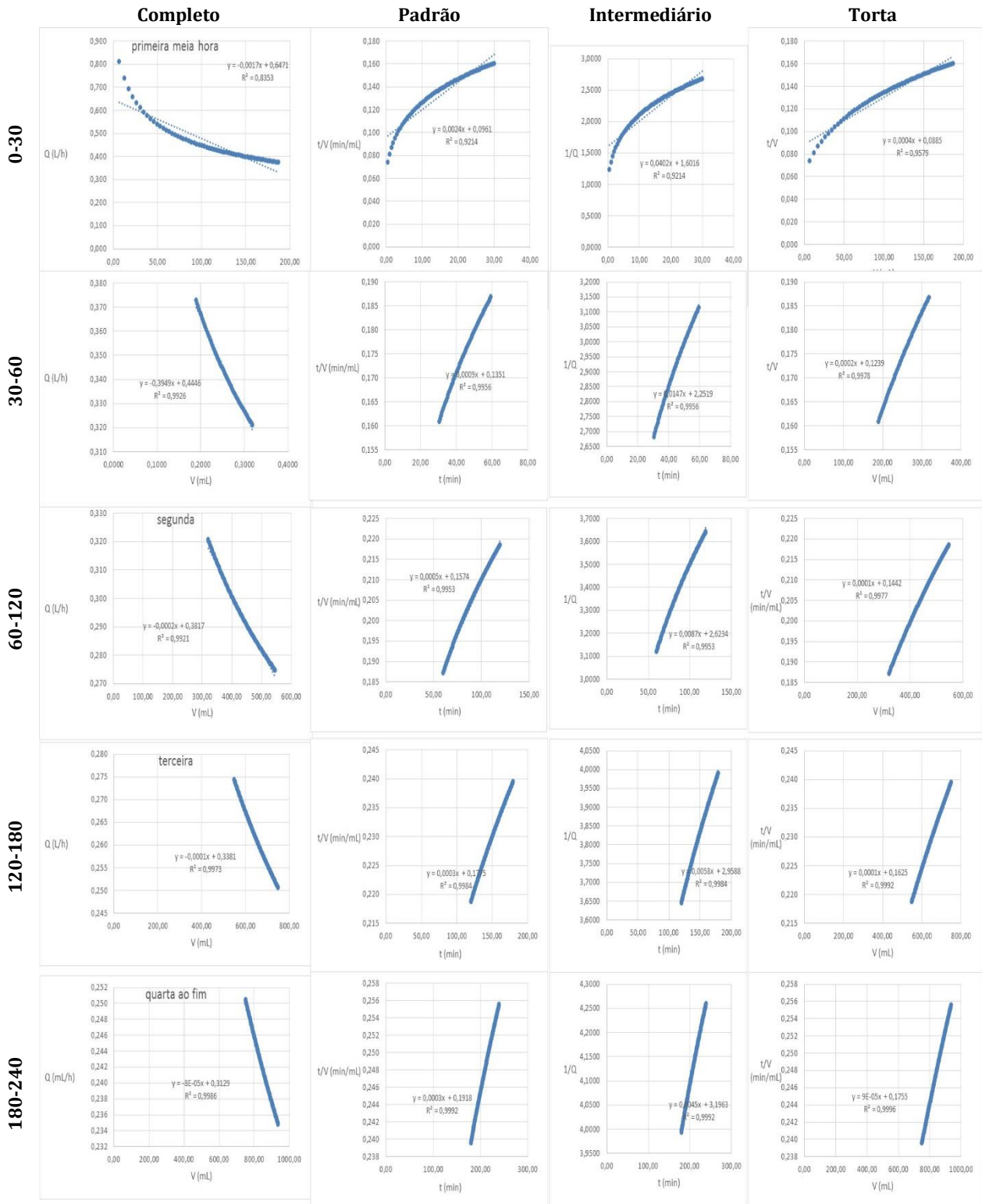
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E2-Lixiviado – SST: 23.000 mg/L – PTM: 240 mbar



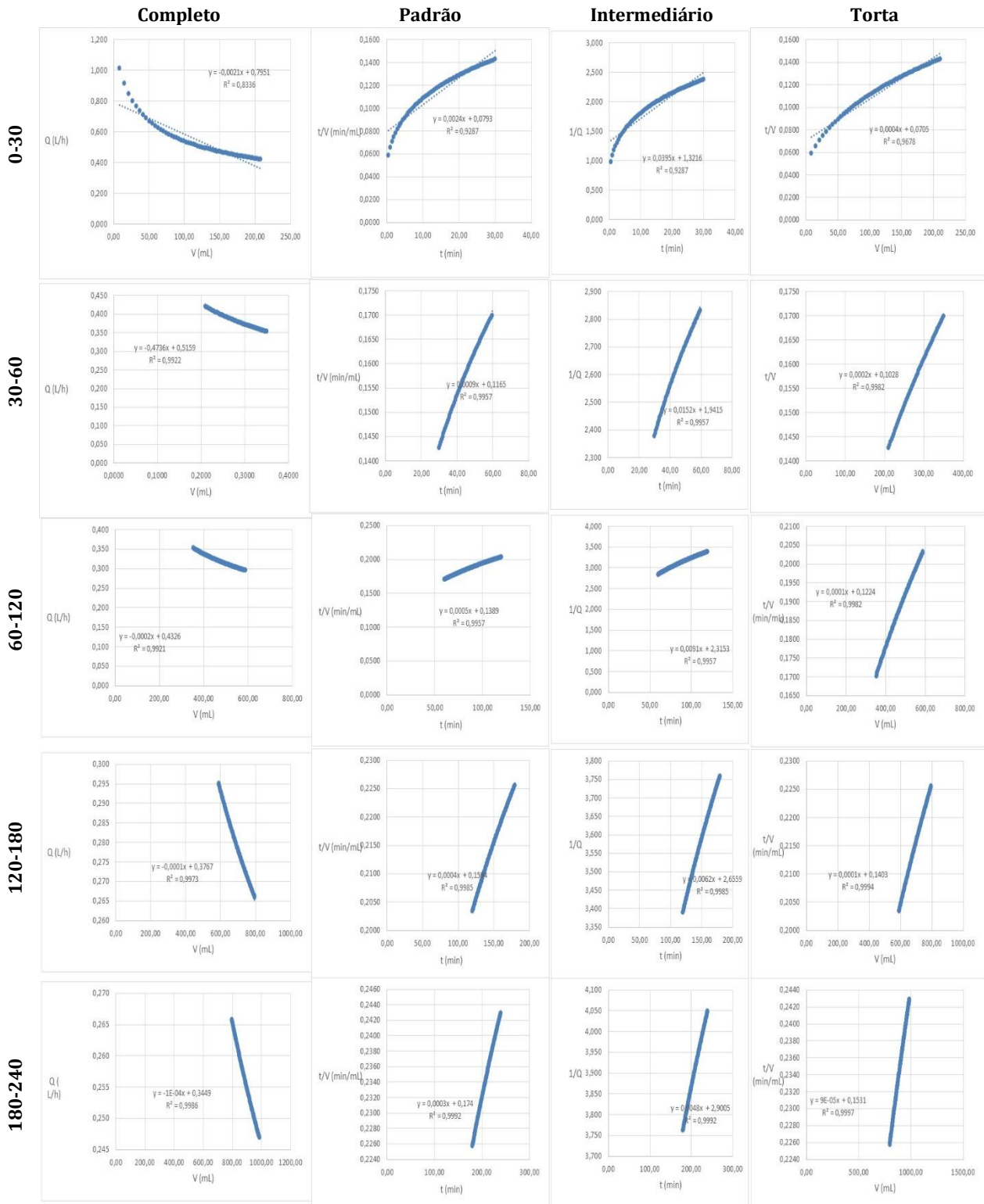
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E2-Lixiviado – SST: 23.000 mg/L – PTM: 300 mbar



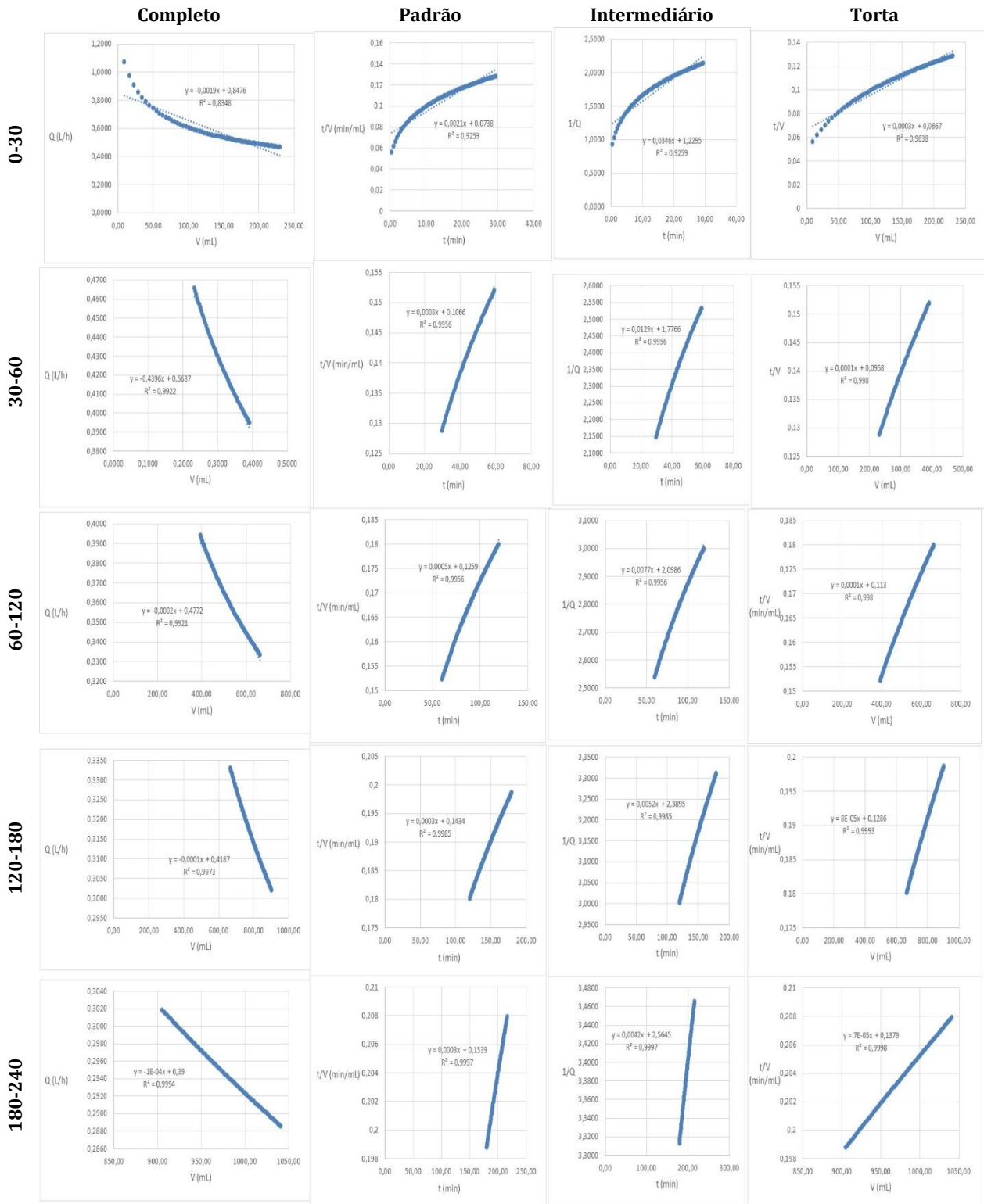
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E3-Hospitalar – SST: 8.000 mg/L – PTM: 180 mbar



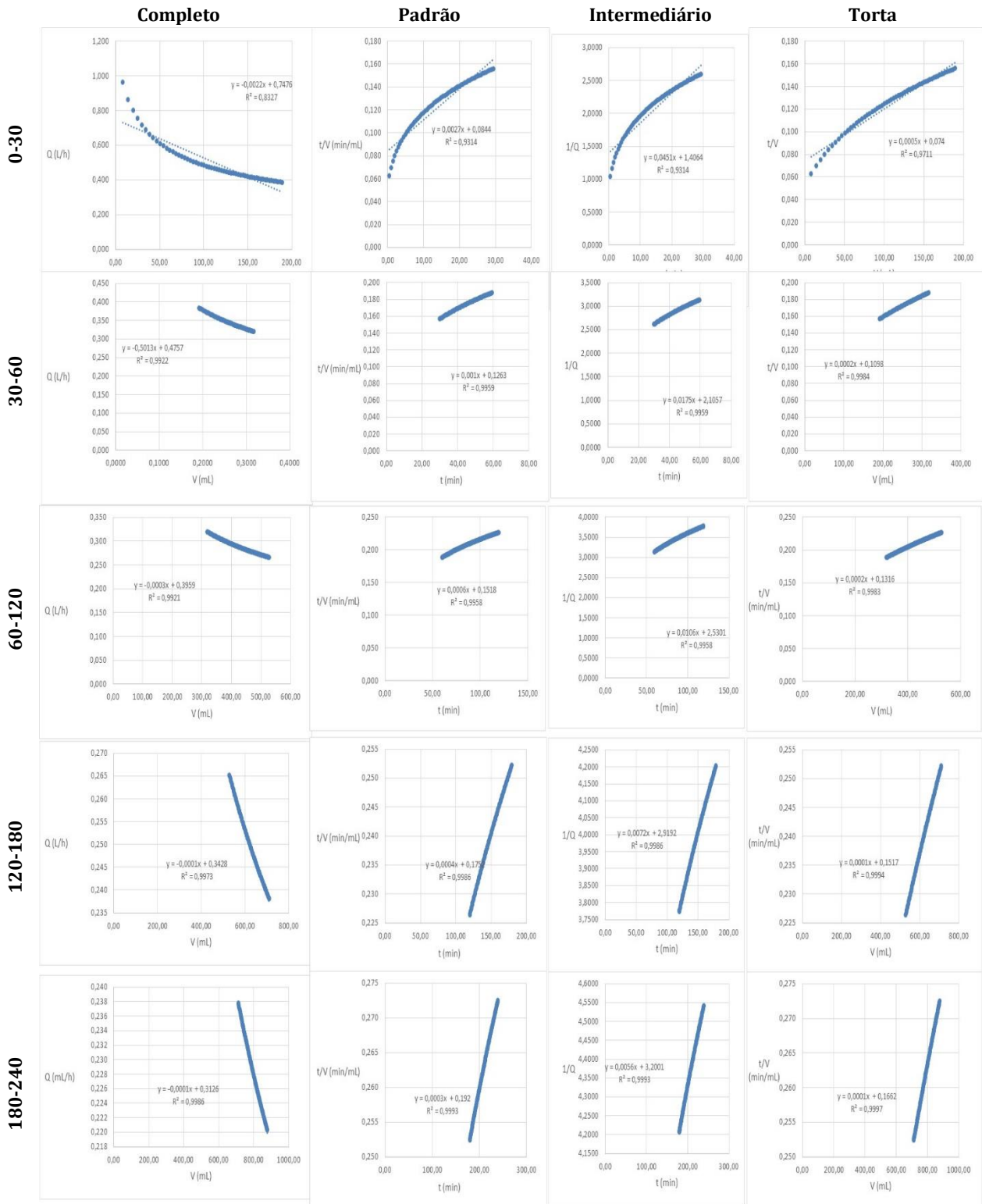
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E3-Hospitalar – SST: 8.000 mg/L – PTM: 240 mbar



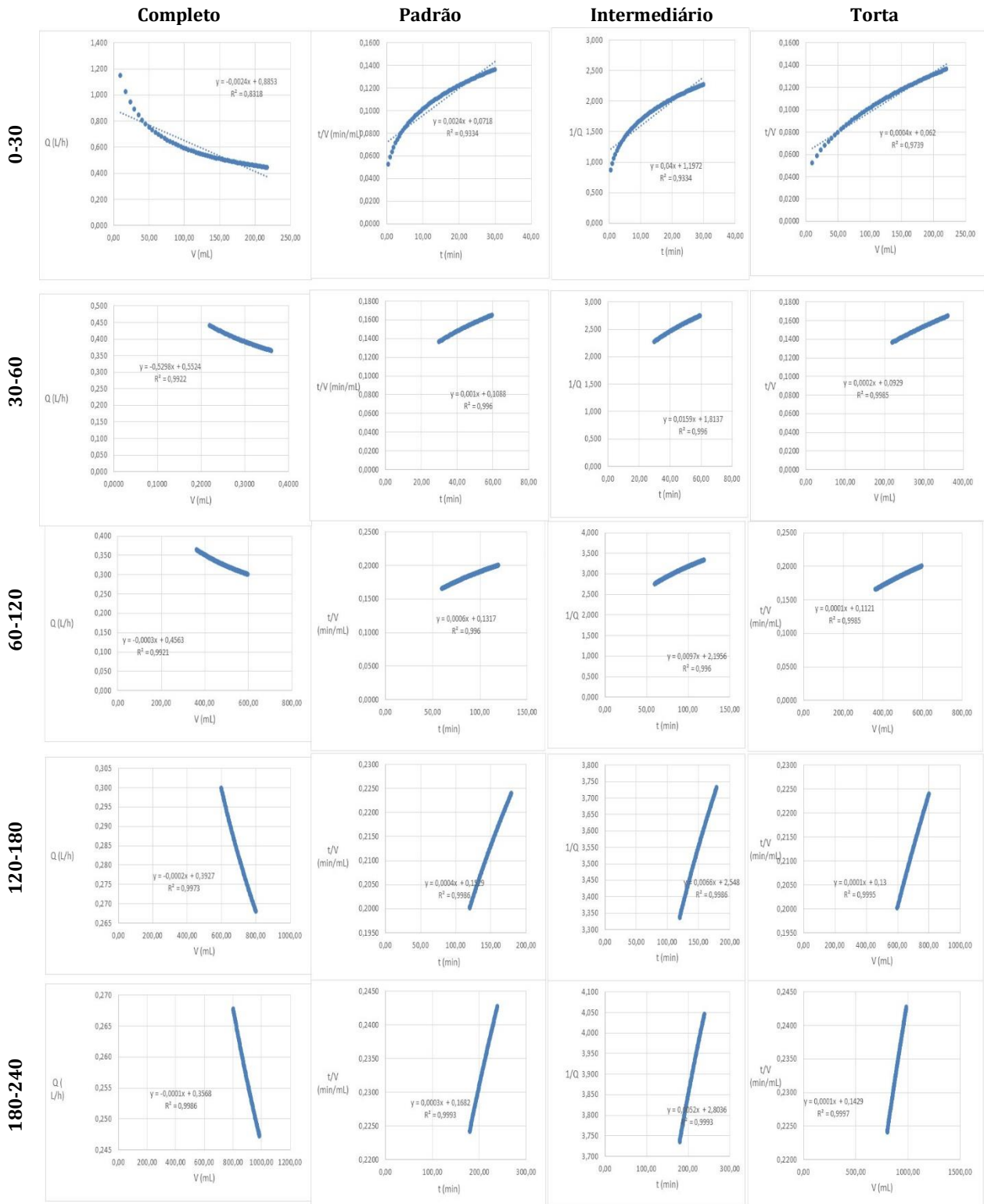
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E3-Hospitalar – SST: 8.000 mg/L – PTM: 300 mbar



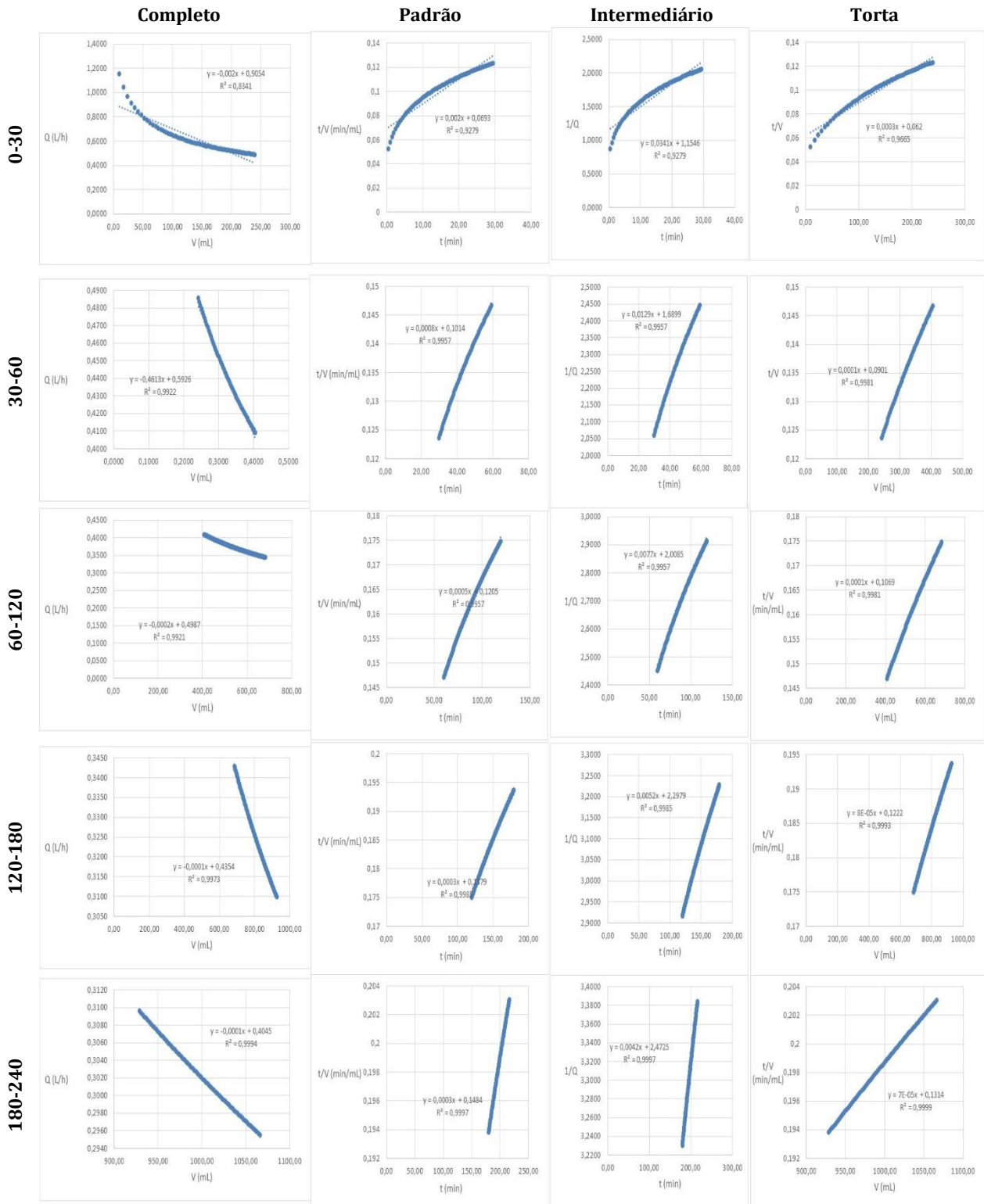
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E3-Hospitalar – SST: 17.000 mg/L – PTM: 180 mbar



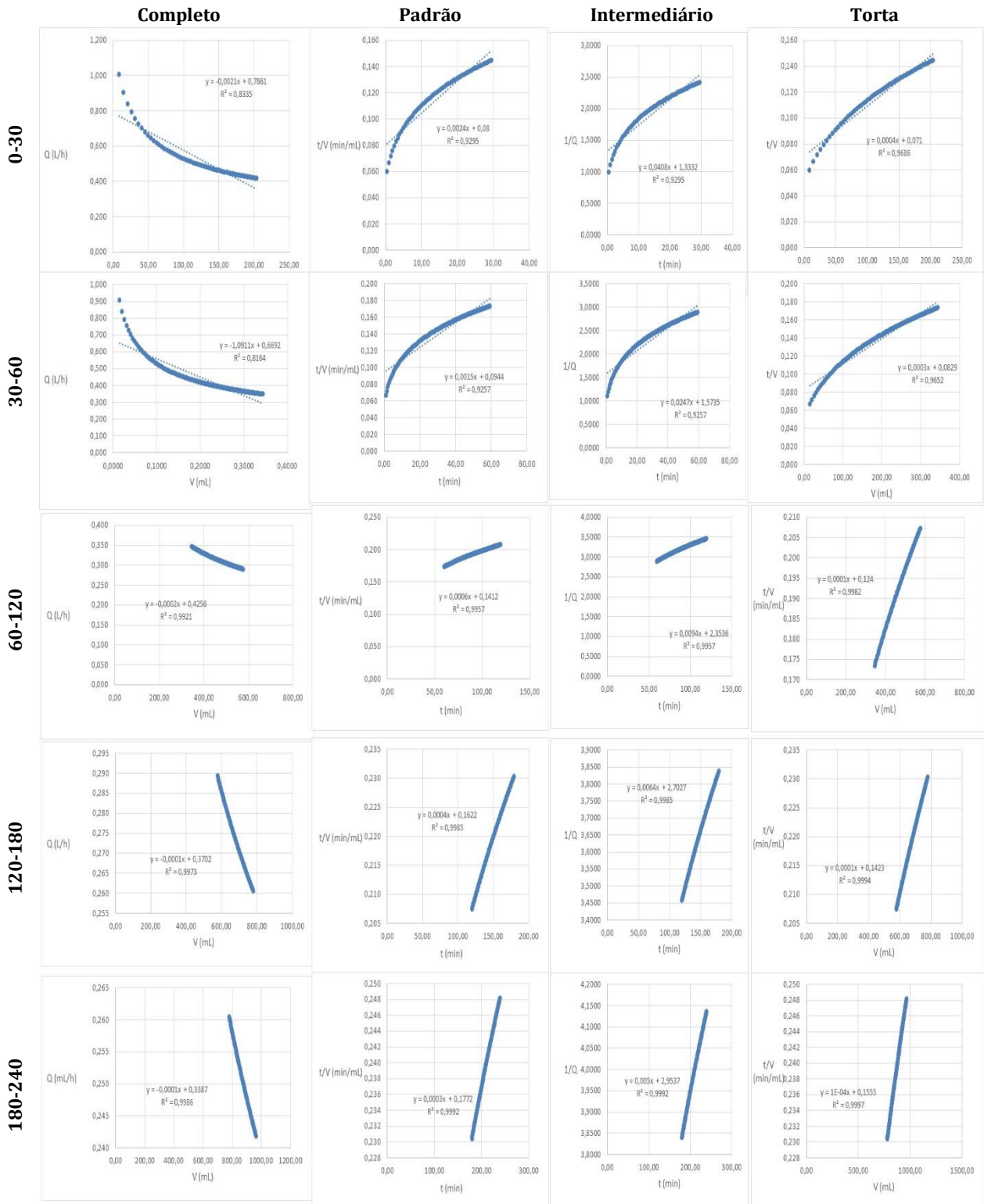
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E3-Hospitalar – SST: 17.000 mg/L – PTM: 240 mbar



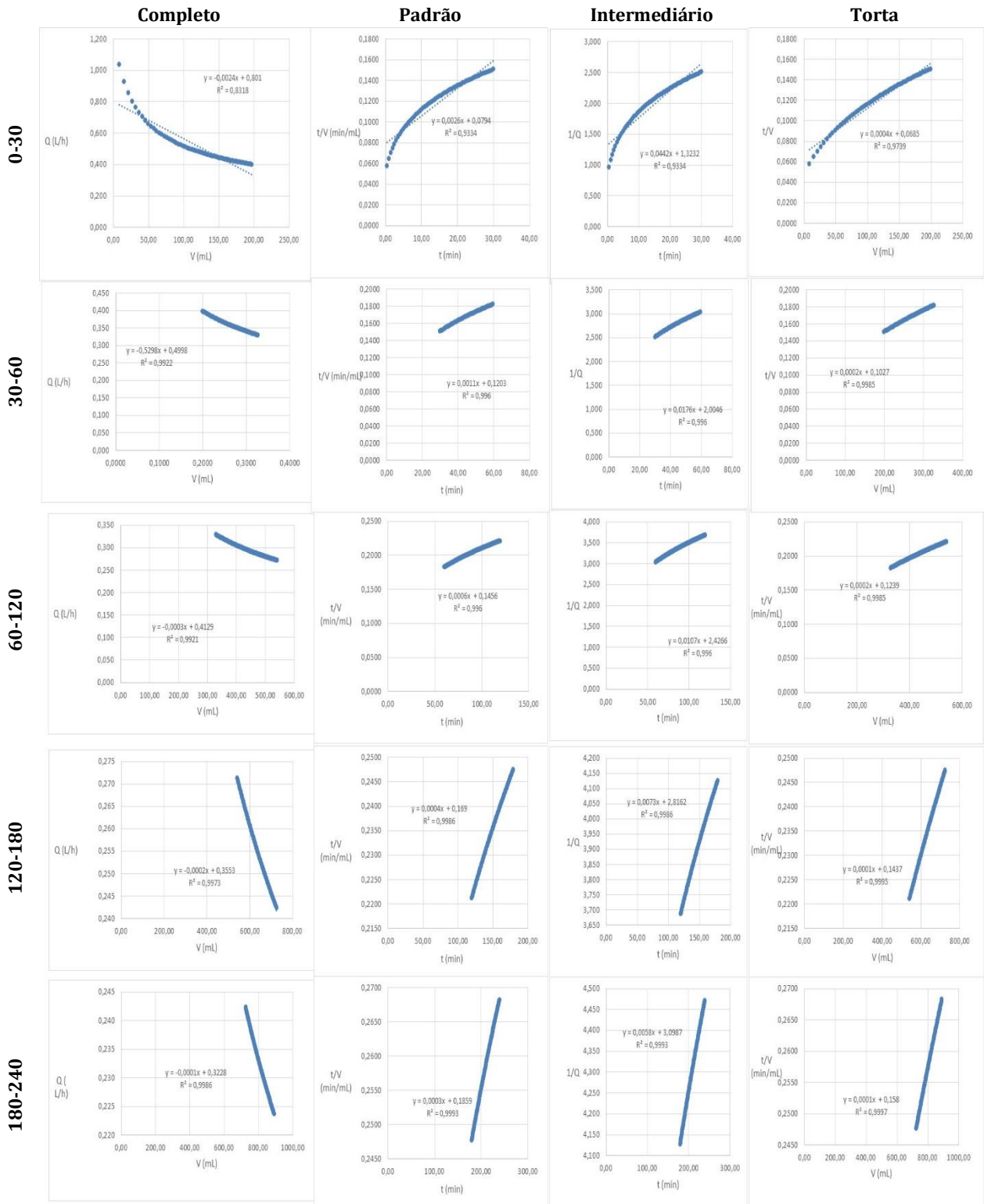
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E3-Hospitalar – SST: 17.000 mg/L – PTM: 300 mbar



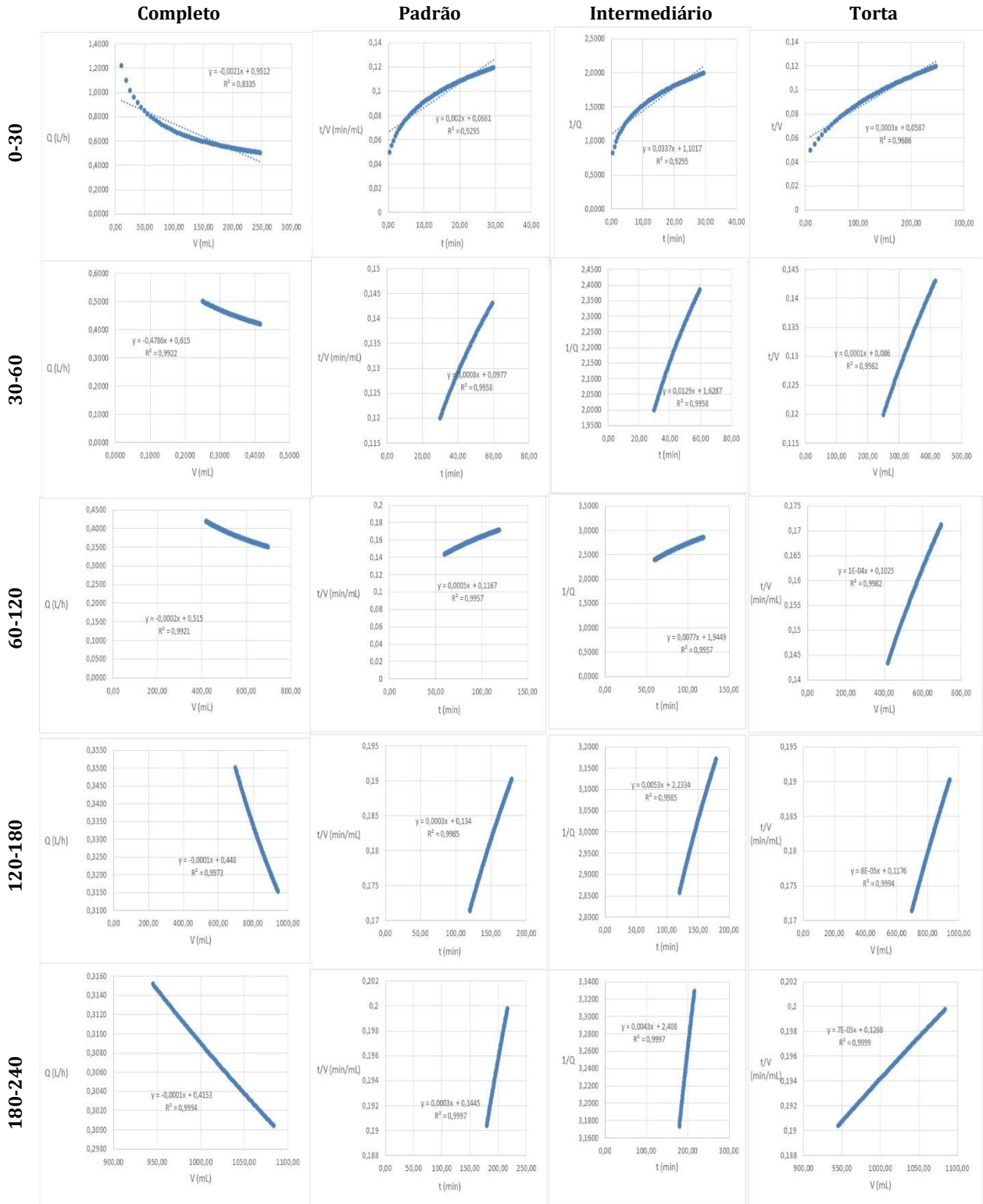
Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E3-Hospitalar – SST: 23.000 mg/L – PTM: 180 mbar



Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E3-Hospitalar – SST: 23.000 mg/L – PTM: 240 mbar



Intervalo de tempo X Mecanismos de Bloqueio
E3-Hospitalar – SST: 23.000 mg/L – PTM: 300 mbar



APÊNDICE C – PROCEDIMENTOS PARA MEDIÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

Para medição da massa específica, utilizando-se a técnica da picnometria, os seguintes passos foram observados:

1. Medição da massa seca dos picnômetros:
 - a. Cada picnômetro com sua respectiva tampa capilar, completamente vazio e seco, é conduzido à balança analítica para registro de sua massa seca;
2. Aferição do volume:
 - a. preenche-se o frasco do picnômetro com água destilada, de forma lenta e cuidadosa para que não se formem bolhas no líquido, especialmente no contato com o vidro;
 - b. coloca-se a tampa capilar, verificando se a mesma foi completamente preenchida pelo líquido, sem a presença de bolhas;
 - c. com o auxílio de um bastão de vidro, elimina-se a superfície de água que, por efeitos de tensão superficial, esteja se sobressaindo da tampa;
 - d. enxuga-se cuidadosamente todo o frasco, utilizando papel toalha ou algodão, não deixando que resíduos destes permaneçam fixados nos frascos e tampas;
 - e. mede-se a temperatura da água utilizada e novamente se leva cada picnômetro à balança analítica para anotação da sua massa;
 - f. sabendo-se a massa específica da água na temperatura medida, descontando-se a massa seca medida em 1.a da massa de água mais picnômetro agora medida, determina-se a massa de água e, conseqüentemente o volume de cada conjunto de frasco mais sua tampa;
3. Medição da massa específica do líquido de interesse:
 - a. esvazia-se completamente os picnômetros, deixando-os novamente completamente limpos e secos, podendo ser utilizado ar comprimido para esta secagem o que contribui para não alterar a temperatura dos frascos;
 - b. preenche-se os picnômetros com o líquido de interesse, colocando-se também as suas respectivas tampas, seguidos dos mesmos procedimentos apontados em 2.c e 2.d;
 - c. leva-se cada picnômetro para a balança analítica, anotando-se a massa do conjunto picnômetro mais líquido de interesse;
4. Obtenção da massa específica do líquido de interesse:
 - a. descontando-se a massa seca já medida em 1.a da massa medida em 3.c, se obtém a massa somente do líquido presente;
 - b. relacionando-se a massa do líquido presente, com o volume de cada picnômetros, determinado no passo 2, se obtém a massa específica do líquido de interesse.