

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA (PEQ-UFS)

INAURA CAROLINA CARNEIRO DA ROCHA

FILTRAÇÃO EM CAMPO ULTRASSÔNICO

São Cristóvão (SE)
(2009)

INAURA CAROLINA CARNEIRO DA ROCHA

FILTRAÇÃO EM CAMPO ULTRASSÔNICO

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Química,
como requisito parcial à obtenção do título
de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. José Jailton Marques

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Santos Silva

São Cristóvão (SE)
(2009)

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

R672f Rocha, Inaura Carolina Carneiro da
Filtração em campo ultrassônico / Inaura Carolina
Carneiro da Rocha. – São Cristóvão, 2009.
148 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) –
Departamento de Engenharia Química, Núcleo de Pós-
Graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências
Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, 2009.

Orientador: Prof. Dr. José Jailton Marques.

1. Engenharia química. 2. Filtração da água – Ultrassom. 3.
Tratamento da água – Carmópolis – Sergipe. I. Título.

CDU 66.066.1:628.1(813.7Carmópolis)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. José Jailton Marques, expresso minha real admiração pelo seu profissionalismo, competência, ensinamentos e confiança nesses oito anos de convivência.

À minha família, Papai, Mamãe e meus irmãos pela compreensão e apoio em mais uma etapa da minha vida.

A todos os amigos que me incentivaram nas horas desanimadoras, em especial a Carina Siqueira de Souza, Ingrid Cavalcanti Feitosa e Fernanda Barreto Mercês.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Química: Prof. Antônio Santos Silva pela valiosa colaboração neste trabalho, Prof. Gabriel Francisco da Silva pela disponibilização de equipamento, Silvanito Alves Barbosa pela presteza no dia-a-dia de trabalho, e demais professores que compõem o núcleo de Engenharia Química, pela atenção e estímulo nestes dois anos.

Aos caros colegas de turma, pelas horas de estudo e em especial a Adriano Nunes dos Santos e Andréa Gonçalves Bueno de Freitas, pelos momentos de pura diversão.

Aos estagiários: Paulo Eduardo Resende Filho, Licianne Pimentel Santa Rosa, Gabriel de Veiga Cabral Malgaresi, Carlos Alberto Santiago Mendonça, Milena da França Braga, Laila Ramos Lula e Denise Santos da Costa, pela seriedade com que desempenharam suas atividades.

À FINEP e a PETROBRAS, pelo financiamento do projeto que subsidiou o desenvolvimento do presente trabalho, via Convênio 01.07.0345-00/PROMOVE.

Aos funcionários da PETROBRAS que nos apoiaram na realização deste trabalho, especialmente a: Marcelo Hardman, Moacir Desudato, José Teófilo Miranda, Roberto Eugênio, Rita Lemos, Rita Fonseca, José Prado de Carvalho, Mateus Bodnar, José Marques Filho, Jozoaldo Marques, e a todo o pessoal que opera a Estação de Tratamento de Bonsucesso (Carmópolis – SE).

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.

A auto-satisfação é inimiga do estudo. Se quisermos realmente aprender alguma coisa, devemos começar por libertar-nos disso. Em relação a nós próprios devemos ser “insaciáveis na aprendizagem” e em relação aos outros, “insaciáveis no ensino”.

(Mao Tse-Tung)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
Objetivos	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1. FLUIDODINÂMICA DA PARTÍCULA SÓLIDA.....	20
2.1.1. Características da partícula	25
2.1.2. Métodos de Separação Sólido- Líquido.....	28
2.2. FILTRAÇÃO	30
2.2.1. Teoria da Filtração.....	31
2.2.2. Meios Filtrantes.....	35
2.2.2.1. Classificação dos meios filtrantes.....	36
2.2.2.1.2. Estrutura dos poros	38
2.2.2.2. Propriedades dos meios filtrantes	39
2.2.3. Tipos de Filtração	41
2.2.3.1. Filtração Superficial e Filtração em Leito Profundo	43
2.2.3.2. Filtração Tangencial e Filtração Direta.....	45
2.2.3.3. Filtração por membranas.....	46
2.2.3.3.1. Aplicações da Tecnologia das Membranas	47
2.2.4. Colmatação.....	48
2.2.4.1. Polarização por concentração	50
2.2.4.2. Camada de Gel.....	50
2.2.5. Regeneração dos meios filtrantes	51
2.2.5.1. Retrolavagem.....	51
2.2.5.2. Sonicação	53
2.3. FILTRAÇÃO NO TRATAMENTO DA ÁGUA PRODUZIDA	58
2.3.1. Generalidades sobre a produção de petróleo.....	58
2.3.2. Características da água produzida	60
2.3.2.1. Impactos Ambientais e Legislação	61
2.3.3. Tratamento da água produzida	64
2.3.4. Conclusões parciais	68
3. MATERIAIS E MÉTODOS	69
3.1. INTRODUÇÃO	69
3.2. DESCRIÇÃO DA APARELHAGEM	71
3.2.1. Filtração a vácuo com alimentação tangencial.....	71
3.2.2. Filtração a vácuo convencional	73
3.2.3. Filtração a vácuo sob influência do campo ultrassônico	74
3.3. ENSAIO PRELIMINAR	74
3.3.1. O modelo teórico para a filtração	75
3.4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	76
3.4.1. Matriz sintética.....	79
3.4.2. Matriz Real.....	79
3.5. MÉTODOS ANALÍTICOS	79
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
4.1. ENSAIOS COM SUSPENSÕES DE CARBONATO DE CÁLCIO.....	83
4.1.1. Avaliação da regeneração do meio filtrante.....	85
4.1.2. Validação do modelo matemático	86

4.2. ENSAIOS COM SUSPENSÕES FLOCULADAS OBTIDAS NO TRATAMENTO DA ÁGUA PRODUZIDA.....	87
4.2.1. Filtração a vácuo convencional.....	88
4.2.2. Filtração tangencial a vácuo.....	92
4.2.3. Filtração a vácuo sob ultrassom	96
4.2.4. Comparativo dos mecanismos quanto à remoção de TOG e turbidez.....	101
4.3. ENSAIOS COM AMOSTRAS REAIS.....	103
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	107
REFERÊNCIAS.....	111
APÊNDICE A – Resultados experimentais com suspensão de CaCO₃.....	120
APÊNDICE B – Resultados experimentais com água produzida sintética.....	123
APÊNDICE C – Resultados Experimentais com água produzida real	143

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da filtração plana com formação de torta.....	33
Figura 2: Poros fechado,cego e intermediário.....	38
Figura 3: Filtração à pressão constante.....	41
Figura 4: Filtração à vazão constante.....	42
Figura 5: Pressão e fluxos variáveis	43
Figura 6: Filtração Superficial.....	43
Figura 7: Filtração em leito profundo	44
Figura 8: Esquema ilustrativo das filtrações convencional e tangencial, respectivamente	45
Figura 9: Mecanismos envolvidos na colmatação.....	49
Figura 10: Representação do mecanismo de BP durante filtração tangencial	52
Figura 11: Ação das ondas ultrassônicas sobre o meio filtrante	54
Figura 12: Mecanismo de remoção de partículas pelo uso de ultrassom.....	55
Figura 13: Localização dos campos de Carmópolis, Siririzinho e Riachuelo.....	69
Figura 14: Ilustração da filtração tangencial a vácuo	71
Figura 15: Detalhes das secções hemi- cilíndricas	72
Figura 16: Detalhe da montagem do sistema filtrante	72
Figura 17: Detalhe da alimentação e retirada de filtrado	72
Figura 18: Imagem externa do filtro	72
Figura 19: Esquema da Retrolavagem do Filtro.....	73
Figura 20: Ilustração da filtração a vácuo convencional.....	74
Figura 21: Ensaio em <i>Jar Test</i>	82
Figura 22: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo para os 3 mecanismos na filtração de suspensões de CaCO_3 ; $\Delta P = 700 \text{ mmHg}$	84
Figura 23: Curva de filtração tipo Darcy para os 3 mecanismos na filtração de suspensões de CaCO_3 ; $\Delta P = 700 \text{ mmHg}$	84
Figura 24: Torta formada na filtração ultrassônica de suspensão de CaCO_3	85
Figura 25: Comparativo da regeneração do meio filtrante.....	85
Figura 26: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo para o mecanismo tangencial na filtração de suspensões de CaCO_3 ;	86
Figura 27: Correlação entre o modelo teórico e os dados experimentais obtidos pelo mecanismo tangencial	86
Figura 28: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo para o mecanismo convencional na filtração de suspensões de CaCO_3 ;	86
Figura 29: Correlação entre o modelo teórico e os dados experimentais obtidos pelo mecanismo convencional.....	86
Figura 30: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo para o mecanismo ultrassom na filtração de suspensões de CaCO_3 ;	87
Figura 31: Correlação entre o modelo teórico e os dados experimentais obtidos pelo mecanismo ultrassônico.....	87
Figura 32: Amostra floculada e sobrenadante após tratamento	88
Figura 33: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo na filtração a vácuo convencional para 3 níveis de TOG; SST=250 mg/L; $\Delta P=690 \text{ mmHg}$	89
Figura 34:: Curva de filtração tipo Darcy na filtração a vácuo convencional para 3 níveis de TOG; SST=250 mg/L; $\Delta P=690 \text{ mmHg}$	89
Figura 35: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo na filtração a vácuo convencional para 3 níveis de TOG; SST=500 mg/L; $\Delta P=690 \text{ mmHg}$	89
Figura 36:: Curva de filtração tipo Darcy na filtração a vácuo convencional para 3 níveis de TOG; SST=500 mg/L; $\Delta P=690 \text{ mmHg}$	89

Figura 37:: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo na filtração a vácuo convencional para 3 níveis de TOG; SST=1000 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	89
Figura 38: Curva de filtração tipo Darcy na filtração a vácuo convencional para 3 níveis de TOG; SST=1000 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	89
Figura 39: Efeito do TOG e SST no fluxo de filtrado pelo mecanismo convencional.....	90
Figura 40: Comparativo das retrolavagens pelo mecanismo convencional.....	91
Figura 41: Efeito do TOG e do SST na regeneração do mecanismo convencional	92
Figura 42: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo na filtração tangencial a vácuo para 3 níveis de TOG; SST=250mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	92
Figura 43: Curva de filtração tipo Darcy na filtração tangencial a vácuo para 3 níveis de TOG; SST=250mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	92
Figura 44: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo na filtração tangencial a vácuo para 3 níveis de TOG; SST=500mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	93
Figura 45: Curva de filtração tipo Darcy na filtração tangencial a vácuo para 3 níveis de TOG; SST=500mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	93
Figura 46: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo na filtração tangencial a vácuo para 3 níveis de TOG; SST=1000 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	93
Figura 47: Curva de filtração tipo Darcy na filtração tangencial a vácuo para 3 níveis de TOG; SST=1000 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	93
Figura 48: Efeito do TOG e SST no fluxo de filtrado pelo mecanismo tangencial	94
Figura 49: Comparativo das retrolavagens pelo mecanismo tangencial.....	95
Figura 50: Efeito do TOG e do SST na regeneração do mecanismo tangencial	96
Figura 51: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo na filtração a vácuo com ultrassom para 3 níveis de TOG; SST=250 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	96
Figura 52: Curva de filtração tipo Darcy na filtração a vácuo com ultrassom para 3 níveis de TOG; SST=250 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	96
Figura 53: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo na filtração a vácuo com ultrassom para 3 níveis de TOG; SST=500 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	97
Figura 54: Curva de filtração tipo Darcy na filtração a vácuo com ultrassom para 3 níveis de TOG; SST=500 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	97
Figura 55: Fluxo de filtrado <i>versus</i> tempo na filtração a vácuo com ultrassom para 3 níveis de TOG; SST=1000 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	97
Figura 56: Curva de filtração tipo Darcy na filtração a vácuo com ultrassom para 3 níveis de TOG; SST=1000 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg.....	97
Figura 57: Efeito do TOG e SST no fluxo de filtrado pelo mecanismo ultrassom	98
Figura 58: Amostras de filtrado produzidas pelo mecanismo ultrassom.....	99
Figura 59: Comparativo das retrolavagens pelo mecanismo ultrassom.....	99
Figura 60: Efeito do TOG e SST na regeneração pelo mecanismo ultrassom.....	100
Figura 61: Percentual de Remoção de TOG pelos 3 mecanismos.....	101
Figura 62: Turbidez residual dos três mecanismos.....	102
Figura 63: Demanda de Cloro da água de SZ e BS, respectivamente	104
Figura 64: Amostra <i>in natura</i> , sobrenadante e resíduo do tratamento da água de SZ, respectivamente.....	104
Figura 65: Comparativo dos mecanismos para a água de SZ.....	105
Figura 66: Comparativo dos mecanismos para a água de BS.	105
Figura 67: Amostras tratadas da água produzida de SZ.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Força resistiva fluido-partícula no movimento de translação da partícula no regime de Stokes.	23
Tabela 2: Características gerais dos processos por membranas	46
Tabela 3: Aplicações do ultrassom na engenharia ambiental.....	54
Tabela 4: Padrões de Reinjeção para o Campo de Carmópolis.....	70
Tabela 5: Matriz de experimentos	78
Tabela 6: Turbidez residual para filtrações de CaCO_3	83
Tabela 7: Turbidez residual pelo mecanismo convencional	90
Tabela 8: Turbidez residual pelo mecanismo tangencial	95
Tabela 9: Turbidez residual pelo mecanismo ultrassom	98
Tabela 10: Resultados produzidos pela ANOVA para remoção de TOG.....	102
Tabela 11: Características das amostras de Bonsucesso e Siririzinho.....	103
Tabela 12: Turbidez residual média das águas de Siririzinho e Bonsucesso	106

LISTA DE SÍMBOLOS

- $[\alpha]$ - resistividade média da torta (m.kg^{-1})
- β – constante de Kozeny-Carman
- β_0 - constante relacionada a compressibilidade da torta (adimensional)
- ΔP - queda de pressão através do meio filtrante (Pa)
- ε – porosidade (adimensional)
- ε_0 - porosidade inicial da mistura (adimensional)
- ε_m - porosidade da torta na interface com o meio filtrante (adimensional)
- θ - tempo de filtração (s)
- μ - viscosidade do fluido (Pa.s)
- μ_F - viscosidade do filtrado (Pa.s)
- ρ_s, ρ_2 – massa específica da partícula (kg.m^{-3})
- ρ_F, ρ_1 – massa específica do fluido (kg.m^{-3})
- σ_1 – tensor tensão relativo ao fluido (adimensional)
- σ_2 – tensor tensão relativo ao sólido (adimensional)
- Φ – esfericidade da partícula (adimensional)
- ω - velocidade angular da partícula (s^{-1})
- a - parâmetro característico do modelo de Silva e Marques (2007) (adimensional)
- A_F – área de filtração (m^2)
- A_s - área da seção transversal do meio filtrante (m^2)
- $(a_s)_c$ - aceleração da partícula em relação ao seu centro de massa (m/s^2)
- A_T – área da torta sobre o filtro (m^2)
- b - intensidade do campo exterior (adimensional)
- c – parâmetro adimensional
- C - relação entre a massa de sólido e a massa de líquido na suspensão (adimensional)
- D_P - diâmetro da partícula (μm)
- dV/dt - taxa de filtração ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
- g_1 – força de campo sobre o fluido (adimensional)
- g_2 – força de campo sobre o sólido (adimensional)
- J - fluxo de líquido ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
- J' - fluxo de permeado em estado permanente sem ultrassom ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
- J_{US} - fluxo de permeado em estado permanente com ultrassom ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
- $J_{US,0}$ - fluxo de permeado em membrana totalmente limpa com ultrassom ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
- k - permeabilidade (m^2)

k_0 - constante de permeabilidade (adimensional)
 (I) - força resistiva (ou de interação fluido-partícula) (adimensional)
 L - altura do leito poroso (cm)
 L_0 - função comprimento (cm)
 l_m - espessura do meio filtrante (cm)
 l_t - espessura da torta (cm)
 m - força resistiva decomposta (adimensional)
 m_F - massa específica do fluido (g.m^{-3})
 m_p - massa da partícula (g.m^{-3})
 m^* - força exercida pelo fluido sobre a matriz porosa (adimensional)
 N - número de partículas (adimensional)
 n e λ - constantes determinadas experimentalmente (adimensional)
 P - pressão total através do sistema (Pa)
 q_m - velocidade superficial do fluido (similar ao parâmetro J)
 r - resistência específica do filtro (m^{-1})
 r_{QC} - vetor posição da partícula em relação ao centro de massa (adimensional)
 R - eficiência ultrassônica (%)
 R_c - resistência oferecida pela formação da torta (m^{-1})
 R_m - resistência hidráulica do meio filtrante (m^{-1})
 R_P - resistência pela obstrução dos poros do meio filtrante (m^{-1})
 S - área de filtração (cm^2) (similar ao parâmetro A_f)
 S_E - Superfície específica ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$)
 S_p - superfície em contato com o fluido ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$)
 S_R - superfície da região R ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$)
 S_{PP} - superfície da partícula ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$)
 t - tempo (s)
 t_0 - tempo característico do modelo (s)
 T_F - tensor tensão do fluido (adimensional)
 u - velocidade intersticial do fluido (m.s^{-1})
 U - velocidade média na secção de leito poroso (m.s^{-1})
 v - volume de torta depositada por unidade de volume de filtrado ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)
 V - volume de filtrado (m^3)
 v_F - campo de velocidade do fluido
 V_1, V_2 - velocidade do fluido e do sólido, respectivamente (m.s^{-1})
 V_p - volume da partícula (m^3)

V_R - volume da região R (m^3)

v_s - velocidade de translação da partícula ($m.s^{-1}$)

V_s – volume de sólidos(m^3)

$(v_s)_c$ - velocidade da partícula em relação ao seu centro de massa ($m.s^{-1}$)

V_T – volume total (m^3)

W - peso da torta (kg)

y – comprimento (cm)

z – constante de proporcionalidade (adimensional)

LISTA DE SIGLAS

ANOVA – Análise de Variância

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária

BAT – *Best Available Techniques*

BTEX - Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno

BF - *Backflushing*

BP – *Backpulsing*

BW – *Backwashing*

CIP - *Clean in Place*

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

DEQ – Departamento de Engenharia Química

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EIA - *Energy Information Administration*

ETE's – Estação de Tratamento de Efluentes

HESSONIC – *High Energy Sound Supersonics*

LABITEC – Laboratório de Inovação Tecnológica

NBR – Norma Brasileira

NMP – Número Mais Provável

NTU – Unidades Nefelométricas de Turbidez

OGP – *The International Association of Oil & Gas Producers*

PVC - Poli Cloreto de Vinila

RSM- Método da Superfície de Resposta

REF - Resistência Específica à Filtração

SERQUÍMICA – Sergipe Química & Serviços Ltda

SMEWW-*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*

SST – Sólidos Suspensos Totais

SDT - Sólidos Dissolvidos Totais

TOG – Teor de Óleos e Graxas

UFS – Universidade Federal de Sergipe

UN SEAL/PETROBRAS - Unidade de Negócios de Exploração de Sergipe e Alagoas

RESUMO

A filtração em campo ultrassônico é uma técnica que vem conquistando importância no tratamento de efluentes. Este trabalho tem como objetivo geral o estudo das ondas ultrassônicas na filtração de sistemas sólido-líquido, a fim de aumentar o desempenho da operação e a capacidade regenerativa do meio filtrante. Utilizou-se um filtro de cerâmica poroso com área total de filtração de $0,016 \text{ m}^2$, o qual foi usado na filtração de água produzida pelos mecanismos convencional, tangencial e sob a influência de ondas ultrassônicas. Foram realizados experimentos com amostras de água produzida sintética e real dos campos produtores terrestres de Carmópolis e Siririzinho em Sergipe - Brasil. As variáveis analisadas foram sólidos suspensos totais (SST) e teor de óleos e graxas (TOG), para cada mecanismo de filtração. Também foi avaliada a regeneração do meio filtrante aplicando-se retrolavagem com água destilada. Os resultados mostraram que houve uma estabilização do fluxo de permeado no mecanismo de filtração assistida por ultrassom, que também conferiu maior capacidade regenerativa, mesmo em condições de SST e TOG máximos. A qualidade do permeado foi satisfatória, apresentando significativa redução nos teores de óleos e graxas e de sólidos suspensos das amostras.

Palavras - chaves: Filtração, Ultrassom, Água produzida.

ABSTRACT

Filtration under ultrasonic condition is a technique that is gaining importance in wastewater treatment field. The main objective of this research was the study ultrasonic waves influence on the filtration of solid-liquid systems, in order to increase the operation performance and the regenerative capacity of the filter medium. A porous ceramic filter, whose filtration area was about 0.016 m^2 , was applied to the filtration of produced water by three mechanisms: conventional, tangential and ultrasonic. Experiments were carried out with synthetic and real produced water from the fields of Carmópolis and Siririzinho in Sergipe - Brazil. The analyzed variables were oil and grease content (O&G) and total suspended solid (TSS) for each filtration mechanism. It was also analyzed the regeneration of the filter medium by applying backwashing with distilled water. The results showed a stabilization of permeate flow in the filtration assisted by ultrasound and higher regenerative capacity, even in conditions of TSS and O&G maxima. The permeate showed high quality in terms of O&G and suspended solids removal.

Keywords: Filtration, Ultrasound, Produced water.

1. INTRODUÇÃO

Diversas indústrias produzem efluentes oleosos. No entanto, a maior quantidade destes materiais provém da exploração de petróleo. Os reservatórios de óleo e gás podem conter uma camada natural de água que contribui para manter a pressão no poço. Sendo assim, costuma-se injetar água no reservatório para aumentar sua pressão, deslocar o óleo e incrementar sua elevação.

O termo “água produzida” é a denominação dada ao efluente aquoso da produção do petróleo. Sua composição é complexa e variada, a depender das características geológicas da formação, da água de injeção e das substâncias químicas usadas na etapa de produção (GABARDO, 2007). Além disto, o volume da água de produção aumenta com o tempo, podendo atingir em campos maduros cerca de 10 vezes o volume de óleo produzido (OGP, 2005).

Uma opção ambientalmente segura para disposição da água produzida é a reinjeção da mesma em poços petrolíferos. A literatura indica que, para cada barril de óleo, 0,7 barril de água produzida é re-injetada (OGP, 2006). Vale ressaltar que o tratamento desta água é imprescindível, uma vez que a água produzida “*in natura*” provocaria danos severos à formação ou até mesmo a perda de poços.

O reuso planejado de águas residuárias não é um conceito novo. Dentre as técnicas que viabilizam o reuso de água produzida estão as filtrações em leitos granulares, rígidos e por membranas. Independentemente da técnica empregada, a finalidade majoritária do tratamento, segundo Gabardo (2007), é reduzir os valores de TOG (teor de óleo e graxas), enquadrando-a para descarte ou reinjeção.

No entanto, durante o processo de filtração ocorre um fenômeno físico denominado colmatção, entendida por muitos pesquisadores como “*fouling*”, que provoca o decaimento do fluxo do permeado ao longo do tempo de filtração. Isto ocorre devido à formação de uma camada de sólidos na superfície do filtro, obstruindo os poros e reduzindo sua capacidade de

filtração (SONDHI e BHAVE, 2001). Na maioria dos casos, a regeneração dos meios filtrantes é realizada por reversão de fluxo, utilizando-se uma corrente de fluido limpo, sob pressão elevada o suficiente para desagregar o material retido nos interstícios do meio poroso, porém em maior tendência está a sonicação - limpeza do meio filtrante por ondas ultrassônicas (TRAN et al., 2007).

Contudo, a principal vantagem do ultrassom relativa a outros métodos regenerativos reside na dispensa do uso de produtos químicos e na redução das interrupções para limpeza (CHEN et al., 2006). Por outro lado, a literatura encontra-se muito carente de informações quanto ao uso da filtração no tratamento de água produzida. Neste contexto, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver uma técnica de filtração auto-regenerante, utilizando, entre outras estratégias, ondas ultrassônicas como meio de retardar a colmatação dos poros do meio filtrante.

Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a influência da aplicação de um campo ultrassônico sobre o desempenho de um sistema filtrante para remoção de sólidos suspensos da água produzida na exploração de petróleo, com o intuito mais amplo de aumentar a capacidade de filtração e desenvolver um filtro auto-regenerativo.

Os objetivos específicos do presente trabalho foram:

- Desenvolver um sistema de filtração aplicável ao tratamento da água produzida;
- Testar materiais que permitam a regeneração do meio filtrante (meios fixos ou particulados);
- Comparar as taxas de remoção de sólidos suspensos e óleos e graxas empregando diversos mecanismos de filtração de água produzida;
- Remover enxofre coloidal gerado pelo tratamento da água produzida por oxidação com hipoclorito de sódio;
- Investigar a influência da sonicação sobre a eficiência da filtração e sua capacidade regenerativa em relação aos sistemas convencionais;

- Apresentar um sistema de filtração viável para o tratamento da água produzida, enquadrando-a nos padrões de reinjeção.
- Validar o modelo de Silva e Marques (2007).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. FLUIDODINÂMICA DA PARTÍCULA SÓLIDA

De acordo com Coulson e Richardson (1991), os processos de separação de partículas dependem do comportamento das mesmas quando submetidas à ação de um fluido - ou seja, da dinâmica de interação sólido-fluido.

O ponto de partida para o estudo da fluidodinâmica é a partícula isolada. A análise limita-se à fluidodinâmica da partícula rígida, incluindo-se nesta categoria não só as partículas sólidas como também gotas e bolhas de dimensões diminutas. A partícula tem massa m_p , densidade uniforme ρ_s , volume V_p , aceleração de centro de massa $(a_s)_c$ e a superfície em contato com o fluido é S_p . Quanto ao fluido, ρ_F , v_F são respectivamente a densidade e o campo de velocidade. O conjunto de equações que descreve a fluidodinâmica, estabelecidas em relação a um referencial inercial, inclui: (MASSARANI, 2002):

a) a equação do movimento da partícula (Eq.1)

$$m_p (a_s)_c = \int_{S_p} T_F n dS + \rho_s V_p b \quad (1)$$

Resultante da aplicação da 2ª lei de Newton a uma partícula, onde a massa da partícula vezes a sua aceleração é igual à soma das forças que agem na mesma;

b) as equações de conservação de massa (equação da continuidade) e quantidade de movimento para o fluido

$$\frac{\partial \rho_F}{\partial t} + \text{div}(\rho_F v_F) = 0 \quad (2)$$

Na Eq. 2, conhecida como a primeira forma da equação da continuidade ou forma conservativa, o divergente do segundo termo (div) representa a diferença de fluxo líquido de massa que entra e sai do sistema.

$$\rho_F \left[\frac{\partial v_F}{\partial t} + (\text{grad} v_F)(v_F) \right] = \text{div} T_F + \rho_F b \quad (3)$$

Onde, T_F é o tensor tensão que atua sobre o fluido e o parâmetro b é a intensidade do campo exterior.

c) a condição de aderência na interface fluido-partícula (Eq. 4) e as equações constitutivas para o fluido e as condições limites pertinentes ao problema específico.

$$(v_F)_Q = (v_s)_C + \omega \times r_{QC} \quad (4)$$

Onde, $(v_s)_C$ é a velocidade de seu centro de massa da partícula, (ω) a velocidade angular e r_{QC} o vetor posição do ponto Q sobre a superfície da partícula em relação ao centro de massa.

A força de interação fluido-partícula pode ser decomposta na força resistiva (l) e no empuxo, sendo nula a força resistiva quando a velocidade relativa entre as fases for nula (Eq. 5).

$$\int_{S_p} T_F n dS = l - \rho_F V_p b \quad (5)$$

Massarani (2002) propôs soluções para as equações 1 a 5 (Tabela 1) que formam a base para a fluidodinâmica da partícula. Os resultados mostram que:

- A força resistiva exercida pelo fluido sobre a partícula depende das dimensões e forma da partícula;
- A força resistiva depende do campo de velocidade do fluido não perturbado pela presença da partícula;
- A força resistiva é influenciada pela presença de contornos rígidos e pela presença de outras partículas;

- No movimento acelerado da partícula a força resistiva depende da história de aceleração da partícula.

Tabela 1: Força resistiva fluido-partícula no movimento de translação da partícula no regime de Stokes.

Descrição	$\mathbf{v}_F$	$\mathbf{v}_s$	l
Esfera fixa com diâmetro D , escoamento permanente.	$(v_F)_X = V_\infty$ $(v_F)_Y = (v_F)_Z = 0$	$\mathbf{v}_s = 0$	$l_X = 3\Pi\mu D V_\infty$
Translação retilínea e uniforme de esfera com diâmetro D , fluido inicialmente em repouso.	$\mathbf{v}_F = 0$	$(v_s)_X = v$ $(v_s)_Y = (v_s)_Z = 0$	$l_X = -3\Pi\mu D v$
Esfera fixa com diâmetro D , escoamento permanente do fluido não perturbado pela presença da partícula resultante do campo de pressões piezométricas P .	$\mathbf{v}_F$	$\mathbf{v}_s = 0$	$l = 3\Pi\mu D (v_F)_C + \frac{\Pi D^3}{8} (grad P)_C$ onde, C denota a posição do centro de massa da partícula
Translação retilínea e uniforme da esfera com diâmetro D em presença de duas paredes planas paralelas. O fluido está inicialmente em repouso.	$\mathbf{v}_F = 0$	$(v_s)_X = v$ $(v_s)_Y = (v_s)_Z = 0$	$l_X = -3\Pi\mu D v \left[1 + \frac{9}{32} D \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right) \right]$
Translação retilínea e uniforme da esfera com diâmetro D ao longo do eixo do tubo com diâmetro D_t . O fluido está inicialmente em repouso.	$\mathbf{v}_F = 0$	$(v_s)_X = v$ $(v_s)_Y = (v_s)_Z = 0$	$l_X = -3\Pi\mu D v \left(1 + 2,1 \frac{D}{D_t} \right)$

Fonte: BERKER (1963) *apud* MASSARANI (2002)

Entretanto, as operações de filtração são caracterizadas pelo escoamento de líquido sobre um meio poroso, com conseqüente formação de sedimentos ao longo da sua estrutura. As partículas sólidas neste caso constituem uma matriz porosa indeformável onde, para um referencial fixo a esta matriz, as equações de continuidade e movimento para o fluido tomam a seguinte forma (Eq. 6):

$$\int_{V_R} \varepsilon \rho_F u dV = \int_{S_R} T_F n dS - \int_{V_R} m^* dV + \int_{V_R} \varepsilon \rho_F b dV \quad (6)$$

Dados S_R e V_R a superfície e o volume da região R que encerra matriz porosa e fluido respectivamente, ρ_F a densidade do fluido, ε a porosidade da matriz (fração volumétrica do fluido), u a velocidade intersticial do fluido, T_F o tensor tensão que atua na fase fluida, m^* a força exercida pelo fluido sobre a matriz porosa (por unidade de volume do sistema) e b a intensidade do campo exterior. A força de interação fluido-partícula m^* pode então ser decomposta na força resistiva (m) e no empuxo (Eq.7):

$$m^* = m - (1 - \varepsilon) \rho g \quad (7)$$

Para a força resistiva m ou Resistência Específica à Filtração (REF), clássico parâmetro utilizado na avaliação da desidratabilidade de suspensões e, em particular, dos lodos de ETE's, ainda foi possível, através de experimentos realizados por Darcy, a formulação da seguinte equação constitutiva de Forcheimer (Eq. 8), válida para escoamento viscoso em meio isotrópico¹ homogêneo ou heterogêneo:

$$m = \frac{\mu}{k} \left[1 + \frac{c \rho \sqrt{k} \|q\|}{\mu} \right] q \quad (8)$$

Onde μ é a viscosidade do fluido newtoniano, k e c são parâmetros que dependem apenas de fatores estruturais da matriz porosa quando não ocorrem interações físico-químicas entre matriz e fluido; k é a permeabilidade do meio poroso com dimensão L^2 e c (Eq. 9) um parâmetro adimensional - ambos constantes ou variáveis com a posição do sistema respectivamente (MASSARANI, 1969 *apud* MASSARANI,

¹ Quando apresenta propriedades físicas que independem da direção que são observadas.

2002). Thirriot et al. (1973) *apud* D'Ávila e Sampaio Filho (1980) propõem a seguinte correlação para c :

$$c = \frac{1}{\varepsilon^{3/2}} \left[10^{-1} (k_0 / k)^{0,72} + 6 \times 10^{-2} (k_0 / k)^{0,13} \right]^{2/3} \quad (9)$$

Onde $k_0 = 10^{-2} \text{ cm}^2$. Ainda de acordo com Massarani (2002), a forma quadrática expressa pela Eq. 8 recai na forma linear, amplamente conhecida como “lei” de Darcy (Eq. 10):

$$U = z \frac{-\Delta P}{L} \quad (10)$$

onde, z é uma constante de proporcionalidade que depende das propriedades físicas do leito e do fluido; e U a velocidade média na secção de leito poroso diretamente proporcional a queda de pressão ΔP do fluido e inversamente proporcional à sua altura L .

2.1.1. Características da partícula

Conhecer as características de um material particulado é fundamental para os processos de separação, seja na análise de alguma operação unitária ou no projeto de algum equipamento. Uma partícula, de acordo com McCabe et al. (2003), pode ser caracterizada a partir do seu tamanho, forma e densidade. Metcalf e Eddy (2003) classificam a partícula a partir de suas características físicas (tamanho e estado) e químicas.

Já Coulson e Richardson (1991) listam a composição, tamanho e forma como as três mais importantes. A composição, pois possibilita determinar propriedades físicas como densidade e condutividade; o tamanho, pois proporciona estimar a área superficial e a velocidade com que a partícula sedimenta no fluido; e a forma - por estar implícita no fator denominado de esfericidade.

Segundo Coulson e Richardson (1991), a forma mais simples da partícula é a esférica, pois, devido à sua simetria, questões relacionadas à orientação podem ser desconsideradas - uma vez que as partículas se comportam da mesma maneira no fluido. Além do mais, possuem equações matemáticas precisas, enquanto que as irregulares, não. Contudo, a forma externa da partícula é normalmente determinada através do grau de arredondamento e de sua esfericidade (grau de aproximação de uma partícula à forma perfeitamente esférica).

De acordo com McCabe et al. (2003), a forma de uma partícula isolada pode ser convenientemente expressa através da esfericidade Φ_s e independe do tamanho. Para uma partícula esférica de diâmetro D_p , $\Phi_s=1$; para uma irregular a esfericidade é definida pela relação (Eq. 11):

$$\Phi_s = \frac{6/D_p}{S_{pp}/v_p} \quad (11)$$

Onde, S_{pp} é a área superficial (Eq. 12) e v_p o volume de uma única partícula. Uma vez que o volume de uma partícula é dado por v_p , o número de partículas, N , (Eq. 13) de uma amostra de diâmetro uniforme é dado por:

$$S_{pp} = \frac{6m_p}{\Phi_s \rho_p D_p} \quad (12)$$

$$N = \frac{m_p}{\rho_p v_p} \quad (13)$$

De acordo com Allen (1981) *apud* Massarani (2002), dentre as múltiplas possibilidades na caracterização da partícula e para melhor usufruir dos dados disponíveis na literatura adotam-se o diâmetro volumétrico (Eq. 14) como dimensão característica e a esfericidade (Eq. 15), na caracterização da forma da partícula.

$$D_p = \left(\frac{6}{\pi} v_p \right)^{1/3} \quad (14)$$

$$\phi = \pi D_p^2 / S_p \quad (15)$$

A divisão por tamanho é, sobretudo, uma divisão prática. Por convenção diz-se que as partículas de menores dimensões, capazes de passar por poros de um tamanho especificado correspondem aos sólidos dissolvidos, enquanto que os de maiores dimensões, retidas pelo filtro são considerados sólidos em suspensão. Numa faixa intermediária encontram-se os sólidos coloidais – de grande importância no tratamento de águas (METCALF e EDDY, 2003).

McCabe et al. (2003) acrescentam ainda que as partículas podem ser classificadas a depender da faixa de tamanho envolvida. Partículas grosseiras são usualmente medidas em centímetros ou polegadas, enquanto que as muito finas em micrômetros ou nanômetros.

Existe uma variedade de técnicas capazes de determinar o tamanho de uma partícula. Dentre as mais conhecidas estão: peneiramento, análise microscópica, sedimentação e elutriação, permeabilidade e difração de laser. Todas aplicáveis a uma faixa específica e finita de tamanho (FOUST, 1982).

Além da esfericidade, outras propriedades como rugosidade, dureza, rigidez e porosidade podem importar na caracterização de particulados: a rugosidade, no que se refere à textura superficial do agregado; a dureza, no que se refere à resistência à abrasão superficial do material; a rigidez no que se refere à quebra do material por impacto; a porosidade (tamanho, quantidade e continuidade dos poros) no que interfere na absorção, massa específica, resistência mecânica e resistência à abrasão (COULSON e RICHARDSON, 1991).

Todavia, a maioria das correlações apresentadas na literatura refere-se às amostras com partículas “arredondadas”, representada por um diâmetro médio que possivelmente não caracteriza a fluidodinâmica da suspensão. Como consequência da caracterização incompleta do sistema particulado, as correlações da literatura podem diferir substancialmente entre si (MASSARANI, 2002).

2.1.2. Métodos de Separação Sólido- Líquido

De acordo com Gomide (1980), os métodos de separação sólido-líquido são classificados de acordo com dois critérios: 1) O movimento relativo das fases, distinguindo-se operações nas quais o sólido se move através do líquido em repouso (decantação) e operações em que o líquido se move através da fase sólida estacionária (filtração); 2) A força propulsora (neste caso, as operações serão gravitacionais, centrifugas, por diferença de pressão ou eletromagnéticas). Em resumo, as separações ocorrem por decantação, flotação, centrifugação e filtração:

a) Decantação: é um dos processos de separação sólido-líquido baseados na diferença entre as densidades dos constituintes de uma suspensão; a remoção das partículas sólidas presentes em uma corrente líquida se dá pela ação do campo gravitacional, o que ferece ao processo as características de baixo custo e simplicidade operacional (FRANÇA e MASSARANI, 2004).

Na literatura, costuma-se classificar os sedimentadores em dois tipos: os espessadores, que têm como produto de interesse o sólido e são caracterizados pela produção de espessados com alta concentração de sólidos e os clarificadores, que têm como produto de interesse o líquido e se caracterizam pela produção de espessados com baixas concentrações de sólidos (Op. Cit.).

b) Por flotação: esta operação ocorre de maneira inversa à decantação normal; o sólido neste caso “decanta” para cima, graças às microbolhas geradas no próprio sistema ou por algum processo externo ao sistema. Quando as bolhas geradas são originadas a partir de um sistema eletroquímico, o processo passa a ser denominado eletroflotação (SANTOS et al., 2007).

c) Centrifugação: a característica fundamental desta separação é a substituição da força da gravidade que atua sobre as partículas por uma força centrífuga de maior intensidade. Além de serem utilizadas na clarificação e espessamento, também são empregadas na separação de líquidos imiscíveis e de partículas sólidas ou gotículas em suspensão nos gases (GOMIDE, 1980).

d) Filtração – neste caso, removem-se as partículas sólidas do fluido com o auxílio de um leito poroso conforme descrito no Capítulo 2.

2.2. FILTRAÇÃO

A filtração é uma operação unitária para separação de misturas sólido-fluido extensivamente utilizada na indústria, que consiste na separação dos sólidos suspensos num fluido, por um meio filtrante contendo material poroso (COULSON e RICHARDSON, 1991).

De acordo com McCabe et al. (2003), quando se força a suspensão através do leito, o sólido da suspensão fica retido sobre o meio filtrante, formando a denominada torta. O líquido que se desloca permeando o leito é o filtrado.

As aplicações são bastante numerosas, podendo-se citar desde a separação de pequenas quantidades de materiais em laboratórios de química, usando filtração simples ou filtração a vácuo em funil de Büchner, até a separação de grandes quantidades de material como na mineração e no tratamento de água e efluentes. Neste caso, a remoção de poluentes baseia-se na eliminação mecânica de sólidos em suspensão, a partir do princípio de que um meio poroso pode reter impurezas de dimensões menores que as dos poros da camada filtrante (GOMIDE, 1980).

A filtração é também utilizada na separação de misturas sólido-gás, a exemplo do desempoeiramento de ar e de outras aplicações similares. A finalidade da operação pode ser a recuperação da fase sólida, da fase líquida ou de ambas. Os principais fatores que determinam a escolha do tipo de filtro e a definição das condições operacionais, além do custo, são:

- As propriedades do fluido, principalmente a viscosidade, a densidade e a corrosividade;
- As propriedades do sólido, destacando-se o tamanho, a forma e a granulometria das partículas;
- A concentração de sólidos na suspensão;
- A quantidade de suspensão a ser manipulada;
- Se o produto de interesse é o sólido ou o fluido, ou ambos;

- Se é necessário lavar os sólidos filtrados;
- Se o filtrado pode ou não ser aquecido;
- Se há alguma forma de pré-tratamento aplicável, a exemplo da coagulação-floculação (KYLLÖNEN et al., 2006):

2.2.1. Teoria da Filtração

A teoria da filtração foi desenvolvida nas escolas de Frank M. Tyller (Universidade de Houston, EUA) e Mompei Shirato (Universidade de Nagoya, Japão). Partindo dessa teoria, surgiu a “teoria simplificada”, base para o projeto e análise de desempenho de filtros” (MASSARANI, 2002).

A filtração, por qualquer que seja o equipamento, leva ao acúmulo de sólidos, causada pela percolação do fluido. Este material retido no meio filtrante, doravante denominado de torta, forma uma camada cuja espessura cresce com o passar do tempo, aumentando gradualmente a resistência hidráulica do filtro e afetando a taxa de filtração (SONDHI e BHAVE, 2001.).

Segundo Perry e Green (1999), o fluxo de líquido através dos canais do meio filtrante é sempre direcionado. Os autores acrescentam ainda que a teoria simplificada da filtração (seja a operação contínua ou em batelada) é baseada na equação de Hagen-Poiseuille, que permite expressar o transporte de solvente por um meio poroso, adaptada à seguinte forma (Eq. 16):

$$\frac{dV}{A_F \cdot d\theta} = \frac{P}{\mu [R_C(W / A_F) + r]} \quad (16)$$

Esta equação permite expressar o transporte de solvente por um meio poroso onde **V** é o volume de filtrado, **θ** o tempo de filtração, **A_F** área de filtração, **P** pressão total através do sistema, **W** peso da torta, **μ** viscosidade do filtrado, **R_c** a resistência específica da torta e **r** resistência específica do filtro.

Além da formação de tortas, a taxa de filtração depende de outros fatores importantes como:

- Queda de pressão no filtro;
- Área da superfície de filtração;
- Viscosidade do filtrado;
- Resistência hidráulica da torta;
- Resistência hidráulica do meio filtrante e da camada inicial de material que se deposita sobre a superfície do mesmo (PERRY e GREEN, 1999).

A modelagem matemática do processo de filtração tem como principal obstáculo a formação de torta. As tortas podem ser dos tipos: compressível – quando a resistência à percolação aumenta com a pressão, consequentemente reduzindo o fluxo de filtrado, e incompressível – quando a resistência não é significativamente afetada pela deposição de material (SVAROVSKY, 2000).

Segundo McCabe et al. (2003), os estágios de formação de torta são importantes, pois:

- Para qualquer pressão, a taxa de filtração é máxima no início do processo uma vez que a resistência é mínima;
- Altas taxas de filtração podem resultar no bloqueio dos poros do filtro, causando o aumento de resistência ao fluxo;
- A orientação das partículas nas camadas iniciais da torta pode influenciar significativamente toda a estrutura do filtro.

Para uma melhor compreensão dos modelos matemáticos da filtração, a Figura 1 apresenta uma ilustração da filtração de uma suspensão sólido-líquido através de um meio filtrante rígido, com formação de torta.

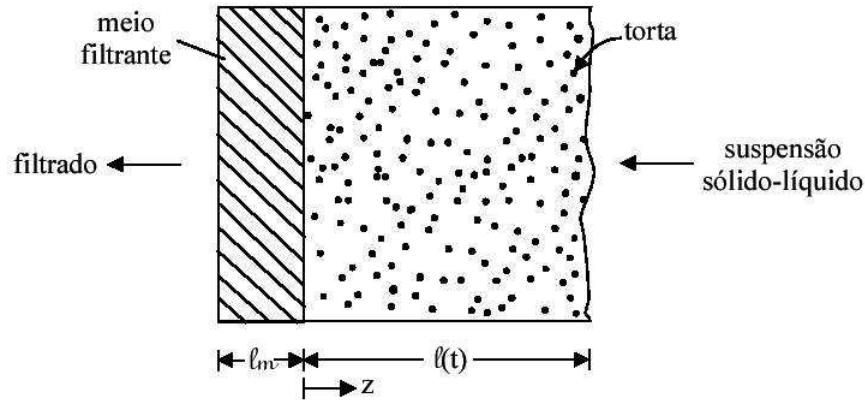


Figura 1: Ilustração da filtração plana com formação de torta

Fonte: MASSARANI (2002).

Os símbolos ℓ_m e ℓ_t representam as espessuras do meio filtrante (constante) e da torta (variável com o tempo), respectivamente. O esclarecimento da teoria admite que a velocidade da partícula na torta seja significativamente menor do que a do líquido. Há na literatura ainda outras teorias para o processo de filtração plana com formação de torta que consideram a velocidade do fluido na torta uniforme, desprezado a velocidade do sólido, ou apenas não consideram a velocidade do sólido (SILVA e MARQUES, 2007).

O fluxo de líquido permeado através do meio filtrante totalmente limpo (Eq. 17) é dado pela equação de Darcy (COULSON e RICHARDSON, 1991). As unidades estão expressas no Sistema Internacional.

$$J = -\frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu \cdot R_m} \quad (17)$$

sendo: $\mathbf{J}$ o fluxo de líquido; $\mathbf{A}$ área da seção transversal do meio filtrante, $\mathbf{dV/dt}$ a taxa de filtração, $\Delta \mathbf{P}$ a queda de pressão através do meio filtrante, μ a viscosidade absoluta do líquido e $\mathbf{R}_m$ resistência hidráulica do meio filtrante.

Durante a filtração sob pressão constante, o fluxo diminui devido ao aumento da resistência global do meio provocada pela deposição de sólidos e pela obstrução dos poros do meio filtrante, conforme mostra a equação seguinte (LIM e BAY, 2003):

$$J = -\frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu \cdot (R_m + R_c + R_p)} \quad (18)$$

onde R_c e R_p são, respectivamente, as resistências oferecidas pela torta formada e pela obstrução dos poros do meio filtrante. Os demais parâmetros são os mesmos já descritos na Eq. 17.

Para tortas compressíveis, Massarani (2002) apresenta o seguinte modelo (Eq 19):

$$J = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu \left(\frac{\langle \alpha \rangle \cdot V \cdot m_f \cdot C}{A} + R_m \right)} \quad (19)$$

sendo: $[\alpha]$ = resistividade média da torta, m_f a massa específica do fluido, C relação entre a massa de sólido e a massa de líquido na suspensão, (adimensional); V o volume de filtrado.

A resistividade média da torta (Eq. 20) depende da diferença de pressão. As correlações disponíveis na literatura assumem a forma (MASSARANI, 2002.):

$$\langle \alpha \rangle = \lambda \cdot \Delta P^n \quad (20)$$

sendo λ e n constantes determinadas experimentalmente.

Os modelos matemáticos apresentados anteriormente consideram que existe uma fronteira bem definida entre a torta e o meio filtrante. Entretanto, há um aspecto complicador associado ao estágio inicial da filtração, que reside na deposição de partículas finas na superfície do meio filtrante, causando uma obstrução que prejudica o desempenho do filtro, reduz o seu tempo de ciclo e a própria vida útil do meio filtrante

(SONDHI e BHAVE, 2001). Tal fenômeno está contemplado na Eq. 18, na forma de um componente da resistência global R_p . Não se conhece nenhuma correlação capaz de estimar a resistência devida à obstrução dos poros. Normalmente, tal parâmetro é incorporado à resistência da torta, R_c (COULSON e RICHARDSON, 1991).

Todavia em Silva e Marques (2007), estudos sobre o cálculo da função porosidade para a torta de filtração, possibilitaram determinar diretamente a queda de pressão no meio filtrante e calcular a espessura da torta para o processo de filtração plana à pressão constante. Tais resultados foram ratificados, utilizando-se dados experimentais contidos em D'Ávila e Sampaio Filho (1980).

2.2.2. Meios Filtrantes

Desde 1937, pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de modelar os meios filtrantes, em particular os leitos granulares. Na teoria, o meio filtrante é o elemento que atua como barreira, retendo particulados. Na prática a função do meio filtrante é servir como uma espécie de suporte para a torta, uma vez que as camadas iniciais da mesma é que atuam como verdadeiro filtro (STEVENSON, 1996).

Ao contrário do que a princípio se pensa, os poros do meio filtrante não necessitam ter, obrigatoriamente, diâmetros menores do que os das partículas suspensas. Os canais do meio filtrante geralmente não são retilíneos, retendo, já no início do processo, algumas partículas (BRAGA e GONÇALVES, 2003).

A seleção do meio filtrante é baseada na eficiência requerida na retenção das menores partículas da suspensão e na vida útil do meio filtrante nas condições de filtração. Um meio filtrante que apresente uma malha mais fechada fornece um filtrado mais clarificado, porém obstrui com maior facilidade, enquanto que uma malha mais aberta tem comportamento oposto. Perry e Green (1999) ainda ressaltam que a seleção do tipo de meio filtrante é absolutamente a decisão mais importante no sucesso da operação de filtração.

Segundo Coulson e Richardson (1991), o meio filtrante deve apresentar força mecânica, resistência a uma possível ação corrosiva do fluido e mínima resistência ao fluxo de filtrado. Assim, tecidos são comumente usados, embora leitos granulares e sólidos porosos sejam os mais indicados em caso de filtração de fluidos corrosivos.

2.2.2.1. Classificação dos meios filtrantes

Os meios filtrantes são empregados em diversas áreas industriais. Materiais como membranas, tecidos, telas metálicas e leitos granulares são extensivamente utilizados em processos químicos, biotecnológicos, farmacêuticos, alimentícios, energéticos etc. (JENA e GUPTA, 2002).

De acordo com Gomide (1980) e Perry e Green (1999) os meios filtrantes podem ser classificados em: granulares, rígidos, telas e placas metálicas, tecidos e membranas.

a) Leitos granulares: são os constituídos de sólidos, como areia, pedregulho, coque e carvão, e utilizados como meio filtrante para purificar água ou soluções químicas contendo pequenas quantidades de partículas em suspensão. Frequentemente esses leitos são constituídos com camadas de diferentes materiais e diferentes tamanhos de partículas entre as camadas (STEVENSON, 1996).

Os filtros de meio filtrante granulado são usados primordialmente quando se tratam grandes volumes de suspensão muito diluída, nas quais nem o sólido nem o líquido têm valor unitário elevado, e não há intenção de recuperar o produto sólido (MCCABE et al., 2003).

Para atender às exigências legais e as limitações impostas aos efluentes, é necessário ter uma elevada eficiência de remoção dos sólidos. A adição de agentes floculantes, ou a alteração do potencial zeta pela adição de eletrólitos à solução, deve ser especificamente apropriada aos sólidos e fluidos envolvidos numa filtração de partículas. De qualquer modo, à medida que há acúmulo de sólidos entre as partículas do meio, a porosidade e a vazão diminuem (PERRY e GREEN, 1999).

b) Leitos rígidos: geralmente no formato de folhas, pratos e tubos. Os materiais usados incluem aço sinterizado e outros metais, grafite, óxido de alumínio, sílica, porcelana, e alguns plásticos – uma vasta gama de materiais que permite o seu emprego em diversos processos químicos em diferentes condições operacionais. A maioria das aplicações desse meio filtrante é para clarificação de suspensões (GOMIDE, 1980).

De acordo com Svarovsky (2000), os meios cerâmicos são os que mais interessam, uma vez que possuem boa resistência química e térmica, além de possuírem significativa flexibilidade quanto à forma, tamanho e malha de poro. Geralmente são empregados na filtração de gases e separação de particulados de fluido gasoso.

c) Telas e placas metálicas: estão disponíveis em vários tipos de metais como o níquel, cobre, latão, bronze, alumínio, aço, aço inox, e outras ligas. Este tipo de tela tende a entupir rapidamente quando utilizadas para filtrar suspensões com partículas tênues ou amorfas. Assim, faz-se necessário o uso de aditivos na filtração (PERRY e GREEN, 1999).

Devido à sua boa resistência à corrosão e à temperatura alta, a opção pelas telas metálicas torna-se a seleção correta para aplicações em que se deseje uma vida útil maior do meio filtrante. Isto é bastante atraente em processos que lidam com materiais tóxicos em filtros fechados para os quais é desejável a exposição mínima do pessoal de manutenção (Op. Cit.).

d) Tecidos: ainda são os meios filtrantes mais comuns e podem ser confeccionadas de fibras naturais ou sintéticas. Há os de origem vegetal (algodão, juta, cânhamo e papel), animal (lã e crina), mineral (amianto, lã de rocha e lã de vidro) e plástico (polietileno, polipropileno, PVC, nylon, teflon). A alta precisão na fabricação dos tecidos permite o controle da aberturas da malha na ordem de micrômetros, entretanto, sua duração é limitada pelo desgaste, apodrecimento ou entupimento dos poros (GOMIDE, 1980).

e) Membranas: uma membrana pode ser definida como uma barreira que permite certas transferências de matéria entre dois meios que ela separa, podendo ser feita de

vários tipos de materiais, sendo os mais comuns o acetato de celulose e as poliamidas. A morfologia da membrana e a natureza do material que a constitui são algumas das características que vão definir o tipo de aplicação e a eficiência na separação. Em função da aplicação a que se destina a membrana, estas podem apresentar textura física (densas ou porosas) e de origem (natural ou artificial) (PELEGRIN, 2004).

2.2.2.1.2. Estrutura dos poros

O desempenho de qualquer meio filtrante está diretamente associado à estrutura dos poros, o que aprofunda a complexidade do assunto. Todavia, três tipos são normalmente encontrados: “fechados”, “cegos” e “intermediários“. Os poros intermediários se estendem de uma extremidade a outra permitindo o fluxo do fluido. Os cegos terminam ainda dentro do material, não permitindo a passagem do fluido, embora sua superfície possa absorver gases e capturar pequenas partículas. Já os poros fechados não são acessíveis (JENA e GUPTA, 2002). A Figura 2 exibe os mesmos.

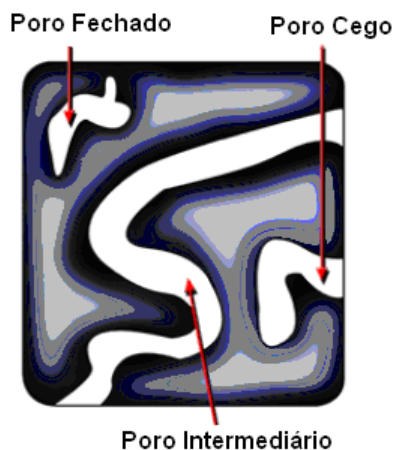


Figura 2: Poros fechado,cego e intermediário
Fonte: JENA e GUPTA, 2002.

As partículas que não conseguem cruzar o meio filtrante são consequentemente determinadas pelo tamanho do poro mais estreito. As características mais importantes da estrutura dos poros são: diâmetro do poro mais estreito, diâmetro do poro mais largo e diâmetro médio de poro; forma dos poros; distribuição; volume e volume da

distribuição dos poros; área superficial e permeabilidade do meio. Parâmetros operacionais como pressão e temperatura também influenciam (JENA e GUPTA, 2004).

2.2.2.2. Propriedades dos meios filtrantes

O desempenho da filtração depende da capacidade do leito filtrante em reter partículas sólidas e permitir o fluxo do líquido. Constituem as propriedades mais importantes dos meios filtrantes: porosidade, permeabilidade, espessura e seletividade.

a) Porosidade: D'Ávila e Sampaio Filho (1980) definem um meio poroso como um meio constituído de poros (esqueleto sólido) onde, a forma, tamanho, interconexões entre os poros são dificilmente conhecidos, e a porosidade como a razão entre o volume de vazios no elemento de volume e o volume deste elemento. Os autores ressaltam ainda que, ao estudar sistemas particulados, o campo da porosidade (Eq. 21) deve ser necessariamente introduzido na teoria, pois relaciona a fração volumétrica de fluido e partículas sólidas.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_s}{V_T} \quad (21)$$

onde ε é a porosidade, V_s representa o volume de sólidos e V_T o volume total. Ainda de acordo com os autores, esta propriedade varia com a forma e distribuição de tamanho das partículas sólidas.

De acordo com Massarani (2002), a porosidade pode ser determinada com auxílio da picnometria simples, sendo necessária a picnometria com vácuo nas medidas com meios consolidados que apresentam porosidade reduzida.

b) Permeabilidade: é sem dúvida a propriedade mais importante para descrever escoamento em meios porosos e mede a facilidade com que o fluido escoar através dos poros. Pode ser expressa analiticamente em função da porosidade do meio, sendo a fórmula mais difundida a de Kozeny-Karman (Eq. 22) (D'ÁVILA e SAMPAIO FILHO, 1980):

:

$$k = \frac{1}{\beta} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \frac{1}{S_E^2} \quad (22)$$

onde, β é a constante de Kozeny, cujo valor frequentemente atribuído é 5. S_E é a superfície específica, dada normalmente pela razão entre a área superficial da partícula e seu volume e ε a porosidade. Coulson e Richardson (1991) afirmam que esta aproximação dada a β é aplicável a diferentes tipos de leitos, mesmo havendo mudanças entre às tortuosidades dos canais. Cabe ressaltar que, quando o meio poroso é homogêneo, a permeabilidade não varia ponto a ponto, sendo, portanto, constante.

De acordo com Massarani (2002), a permeabilidade pode ser determinada experimentalmente por permeamtria através de um conjunto de medidas de vazão e queda de pressão, efetuadas com a amostra.

c) Espessura: quanto maior for a espessura do meio filtrante, maior será a sua resistência ao fluxo e, menor a taxa de permeação, uma vez que influencia a pressão diferencial do sistema (LAPOLLI et al., 1998). Opostamente, um meio filtrante de baixa espessura oferece menor resistência à filtração, conferindo-lhe maior permeabilidade (VIDAL, 2006).

d) Seletividade: esta propriedade é mais aplicada ao sistema de filtração em membranas e depende da distribuição dos diâmetros dos poros nas mesmas, embora não se encontrem membranas com diâmetros de poros únicos, e sim, com certa distribuição em torno de um diâmetro médio. Todavia, independentemente do tipo de membrana, esta é uma propriedade de transporte utilizada como parâmetro característico do processo podendo ser definida de diversas formas (HABERT et al., 2006). Vidal (2006) a define como a medida de taxas de permeabilidade relativa de diferentes componentes através da membrana.

2.2.3. Tipos de Filtração

Qualquer que seja a filtração existe uma relação intrínseca entre a espessura da torta e o volume do filtrado, uma vez que a resistência ao fluxo aumenta progressivamente durante o processo. Desta forma, dois tipos de operação são considerados: mantendo-se a diferença de pressão constante (a) e mantendo-se a taxa de filtração constante (b) (COULSON e RICHARDSON, 1991). Entretanto, D'Ávila e Sampaio Filho (1980) acrescentam ainda outro tipo de filtração: pressão e fluxo variando com o tempo (c).

a) Filtração sob diferença de pressão constante:

Se a pressão é mantida constante durante a filtração, o fluxo de filtrado diminuirá progressivamente. Isto ocorre porque, à medida que as partículas sólidas vão sendo depositadas (formando a torta), a resistência ao escoamento vai aumentando (Figura 3).

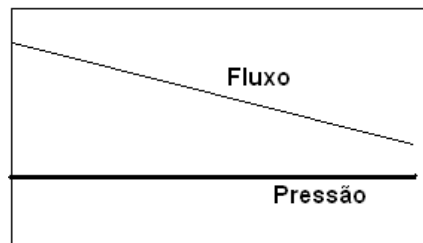


Figura 3: Filtração à pressão constante
Fonte: VIDAL, 2006.

Este tipo de operação onde a variação do fluxo diminui ao longo do tempo é indicado para tortas pouco compressíveis e pode ser representada através da Eq. 23.

$$\frac{t}{V} = \frac{r\mu v}{2A_T^2(-\Delta P)} V \quad (23)$$

onde, V é o volume filtrado no tempo t , A_T área total da torta sobre o filtro, μ a viscosidade do filtrado, ΔP a diferença de pressão, r a resistência específica do filtro e v o volume de torta depositada por unidade de volume de filtrado (Eq. 24) – lembrando

que l_t expressa a espessura da torta. Observa-se nitidamente nesta equação que o volume de filtrado é inversamente proporcional ao volume de torta depositada sobre o filtro, indicando relação intrínseca entre estas variáveis.

$$v = \frac{l_t A_T}{V} \quad (24)$$

b) Filtração a vazão constante:

Neste caso a aumenta-se a pressão logo que a espessura da torta se comporta de forma prejudicial ao fluxo. A Figura 4 representa o processo de filtração a fluxo constante, sendo mais adequado para precipitados compressíveis.

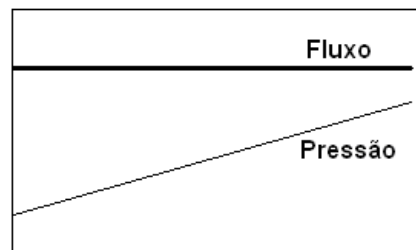


Figura 4: Filtração à vazão constante
Fonte: VIDAL, 2006.

D'Ávila e Sampaio Filho (1980) ressaltam que o grau de complexidade em filtrações operando a fluxos constantes é muito maior do que a pressão constante. A Eq. 25 representa este tipo de filtração, onde os parâmetros nela exibidos podem ser observados no subitem anterior.

$$\frac{t}{V} = \frac{r\mu v}{A_T^2 (-\Delta P)} V \quad (25)$$

c) Filtração em regime misto:

Pode-se dizer que uma operação ótima pode ser obtida com a combinação dos dois tipos de filtração. Nesta operação tanto a variação do fluxo como da pressão são permitidas (Figura 5). No entanto, o trabalho matemático é mais complexo, evidentemente devido ao processo de variação de pressão e vazão com o tempo.

Normalmente faz-se uso de bombas centrífugas para atingir esta condição (D'ÁVILA e SAMPAIO FILHO, 1980). Segundo Perry e Green (1999), observam-se com o uso da bomba centrífuga a redução do fluxo de filtrado à medida que a pressão do sistema aumenta.

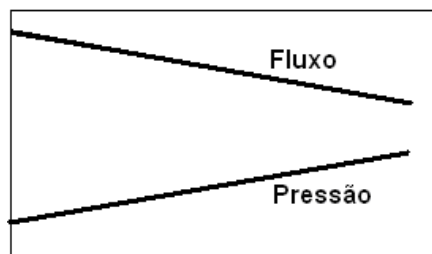


Figura 5: Pressão e fluxos variáveis
Fonte: VIDAL, 2006.

2.2.3.1. Filtração Superficial e Filtração em Leito Profundo

No caso da filtração superficial ou “*cake filtration*”, o meio filtrante é caracterizado por possuir uma superfície porosa, muito fina e com caminhos tortuosos. Neste caso, o mecanismo de separação das partículas é o bloqueio mecânico/físico e o efeito de retenção de partículas é devido ao diâmetro destas serem maiores que o dos poros do meio filtrante, sua principal característica. A retenção das impurezas ocorre somente na superfície (ou seja, nas primeiras camadas do meio filtrante), e a carreira de filtração é mínima. Desta forma, as partículas que não atravessam o meio filtrante ficam retidas sobre o filtro, aumentando sua resistência (Figura 6). Por essa razão costuma-se assumir esta camada formada como a verdadeira camada filtrante (REVISTA MEIO FILTRANTE, 2004).

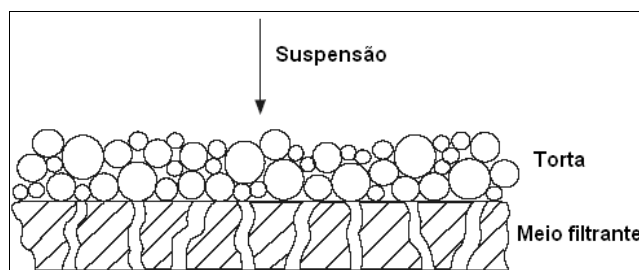


Figura 6: Filtração Superficial
Fonte: adaptada de Svarovsky (2000).

De acordo com Svarovsky (2000), os filtros superficiais são mais indicados para a filtração de suspensões com até 1% de sólidos, devido aos efeitos de bloqueio de poro. Contudo, uma solução indicada pelo autor, seria a prevenção da formação desses fenômenos através de mecanismos hidráulicos ou mecânicos. Há ainda os auxiliares filtrantes, um grupo de substâncias sólidas depositadas sobre os elementos filtrantes que formam um gradiente de permeabilidade, bloqueando a passagem de partículas muito finas ou viscosas. Para ajudarem na filtração, devem possuir baixa densidade, ser poroso e quimicamente inerte ao filtrado. Podem ser distribuídos no filtro ou misturados a suspensão, contudo, os principais tipos de auxiliares filtrantes podem ser encontrados na diatomita, perlita e celulose de madeira.

A filtração profunda de suspensões particuladas ocorre em muitos processos industriais e ambientais, como filtração de água e contaminação do solo. Também conhecida como “*deep bed filtration*”, tem a característica de reter as partículas pequenas, aprisionadas no interior dos poros, por mecanismos gravitacionais, de difusão e inércia e por forças moleculares e eletrostáticas. A formação destas camadas de auxiliar filtrante dá a este uma espessura considerável e fornece um longo e tortuoso caminho ao fluido (Figura 7). Consequentemente, a queda de pressão inicial neste tipo de filtro é muito maior do que no superficial, uma vez que os canais destinados a percolação do fluido são obstruídos por inteiro. A principal diferença entre os dois mecanismos de filtração está na uniformidade do meio filtrante (COULSON e RICHARDSON, 1991).

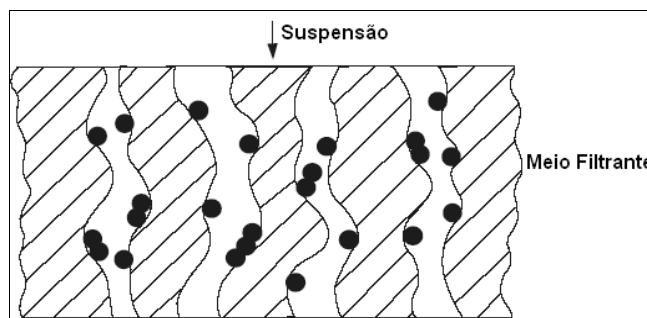


Figura 7: Filtração em leito profundo
Fonte: adaptada de Svarovsky (2000).

Dos dois tipos de filtração, a superficial tem aplicação mais diversificada, particularmente na indústria química (devido as altas concentrações empregadas). Geralmente, filtros de leito profundo são empregados para clarificar fluidos, na

separação de partículas finas de suspensões diluídas, com concentração em torno de 0,1 % (SVAROVSKY, 2000).

A grande vantagem dos auxiliares filtrantes é que conseguem reter material das duas formas acima descritas, atingindo o grau de limpidez desejado no líquido (REVISTA MEIO FILTRANTE, 2004).

2.2.3.2. Filtração Tangencial e Filtração Direta

No sistema de filtração convencional, também conhecido como “*dead-end-filtration*”, o fluxo do permeado opera no mesmo sentido do fluxo de circulação. É um processo “sem saída”, no qual todo o material a ser filtrado flui perpendicularmente em direção a um meio filtrante (ARNOT et al., 2000).

Por outro lado, na filtração tangencial, também chamada por “*crossflow filtration*”, o fluxo do permeado circula em sentido perpendicular enquanto o fluxo de circulação do sistema permanece em sentido paralelo ou tangencial conforme mostra a Figura 8. Este fenômeno é possível devido a um sistema de pressão que é aplicado ao processo, dividindo assim o fluxo entre permeado e concentrado (recirculado). Geralmente, a velocidade do fluxo neste tipo de filtração é maior do que na convencional (ARNOT et al., 2000).

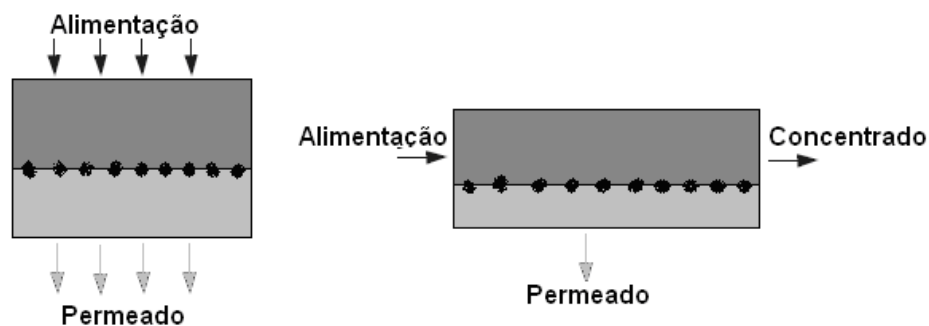


Figura 8: Esquema ilustrativo das filtrações convencional e tangencial, respectivamente
 Fonte: adaptada de (HABERT et al., 2006).

2.2.3.3. Filtração por membranas

A partir do início da década de 1970, em adição aos processos clássicos de separação como destilação, filtração, absorção, troca-iônica, centrifugação, extração por solvente, cristalização e outros, surge uma nova classe de processos que utilizam membranas sintéticas como barreira seletiva (HABERT et al., 2006).

A versatilidade da tecnologia e a eficiência de separação fazem da tecnologia de membranas uma técnica amplamente aceita para melhorar a qualidade dos diferentes tipos de água (LAMMINEM et al., 2006).

A utilização de membranas tem por objetivo principal realizar a separação de substâncias de diferentes propriedades (tamanho, forma, difusividade etc.). Os processos podem ser classificados dependendo do tamanho do poro da membrana utilizada, sendo os mais comuns: a microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa (Tabela 2). Esses processos podem ser classificados de diferentes formas (VIDAL, 2006):

- Quanto ao tipo de material utilizado na fabricação da membrana;
- Natureza da força motriz;
- Mecanismo de separação;
- Tamanho dos poros.

Tabela 2: Características gerais dos processos por membranas

PROCESSOS POR MEMBRANAS	FORÇA MOTRIZ	MECANISMO DE SEPARAÇÃO	FAIXA TÍPICA DE OPERAÇÃO (µm)
Microfiltração	Diferença de pressão hidrostática e vácuo	Peneiramento	0,08-2,0
Ultrafiltração	Diferença de pressão hidrostática	Peneiramento	0,05-0,2
Nanofiltração	Diferença de pressão hidrostática	Peneiramento + Difusão+ Exclusão	0,001-0,01
Osmose Reversa	Diferença de pressão hidrostática	Difusão+Exclusão	0,0001-0,001

Fonte: METCALF e EDDY, 2003.

As membranas podem ser constituídas de materiais orgânicos ou inorgânicos. Na categoria geral dos materiais cerâmicos, deve-se mencionar que vários tipos de vidros (sílica amorfa) e grafite também são usados para fabricar membranas cerâmicas microporosas. Há mais de quinze anos estas vêm sendo utilizadas industrialmente, obtendo-se resultados interessantes na filtração de águas superficiais, separação de emulsão água-óleo e filtração tangencial de outras suspensões (SONDHI e BHAVE, 2001).

As membranas cerâmicas podem ser usadas em temperaturas muito altas, acima de 500°C e apresentam propriedades essenciais para filtração, tais como inércia química, estabilidade biológica e resistência a altas temperaturas, além de ter uma longa vida útil e permitirem limpezas eficientes. Nos últimos anos sua maior evolução foi na diminuição do diâmetro dos poros, atingindo membranas para ultrafiltração, com diâmetro de poros da ordem de 5 nm e mais recentemente para nanofiltração, com poros menores que 2 nm (HSIEH, 1991 *apud* SOUTO et al., 2005).

2.2.3.3.1. Aplicações da Tecnologia das Membranas

Sistemas de membranas para tratamento de efluentes podem ser utilizados de forma independente ou associados a um processo biológico aeróbio ou anaeróbio (RIBEIRO et al., 1999 *apud* SOUTO et al., 2005).

Os processos de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa (OI) podem ser entendidos como uma extensão dos processos de filtração clássica que utilizam, nesta seqüência, meios filtrantes (membranas) cada vez mais fechados, ou seja, com poros cada vez menores (HABERT et al., 2006).

De acordo com Pelegrin (2004), os sistemas de ultrafiltração e microfiltração são utilizados para a remoção de material particulado e coloidal das águas brutas. As principais vantagens sobre sistemas os convencionais de tratamento:

- Não há necessidade de produtos químicos no tratamento de água bruta de boa qualidade (exceto produtos químicos utilizados na lavagem química de membranas, que são consumidos em quantidades muito pequenas comparadas ao consumo de produtos químicos nos sistemas convencionais de tratamento);
- O mecanismo de filtração é por exclusão física de partículas com o tamanho maior do que a porosidade das membranas, não ocorre passagem de partículas com tamanho maior do que os poros.
- Qualidade boa e constante de água tratada, independentemente de variações da qualidade da água de alimentação;
- Plantas compactas e automatizadas;

Contudo, Vidal (2006) afirma que a eficiência de uma membrana é determinada por dois fatores: fluxo e seletividade. Uma membrana ideal possui grande seletividade e permeabilidade.

2.2.4. Colmatação

Durante o processo de filtração ocorre um fenômeno físico denominado “colmatação”, apresentado como um decaimento de fluxo do permeado ao longo do tempo de filtrado. Isto ocorre devido à formação de uma camada de sólidos na superfície do filtro podendo obstruir os poros e reduzir sua capacidade de filtração (SONDHI e BHAVE, 2001).

As partículas se depositam segundo três mecanismos, principais: estreitamento dos poros, obstrução dos poros e formação de torta. No mecanismo de estreitamento de poros as partículas se acumulam na parede interna dos poros (adsorção). Quando as partículas se alojam ao longo de toda área do poro, o mecanismo é denominado de obstrução. Já a formação da torta é caracterizada pelo acúmulo de sólidos na superfície do filtro (VIDAL, 2006).

Segundo Coulson e Richardson (1991), uma das variáveis mais importantes que influencia o efeito da colmatação é a concentração de partículas. Quanto maior a

concentração, menor será a distância média entre as partículas e a probabilidade destas percorrerem as linhas de corrente em direção aos poros. Assim, as partículas presentes na suspensão tendem a se distribuir uma sobre as outras, pela superfície, formando aglomerados cada vez maiores. Como resultado, as suspensões mais concentradas formam tortas mais rapidamente do que as diluídas.

A colmatação, entendida por muitos pesquisadores como “*fouling*”, também ocorre na filtração tangencial, porém com menos intensidade do que na filtração convencional, a depender das propriedades do elemento a ser filtrado (tamanho da partícula, concentração de partículas, pH, força iônica), da membrana (hidrofobia, tamanho do poro, cargas) e propriedades hidrodinâmicas do processo (velocidade do fluxo e diferença de pressão) (KYLÖNEN et al., 2006).

O declínio de fluxo do filtrado é um problema comum da prática de filtração, embora sério do ponto de vista de eficiência e custos operacionais (KOBAYASHI et al., 2003). De acordo com Kim et al. (2007), uma variedade de constituintes do solvente pode provocar o fenômeno, reduzindo o desempenho e tempo de vida do filtro.

Segundo Pan et al. (2007), o “*fouling*” é iniciado após a ocupação parcial dos poros seguida da formação da camada de gel. Uma ilustração dos mecanismos envolvidos na colmatação é exibida na Figura 9.

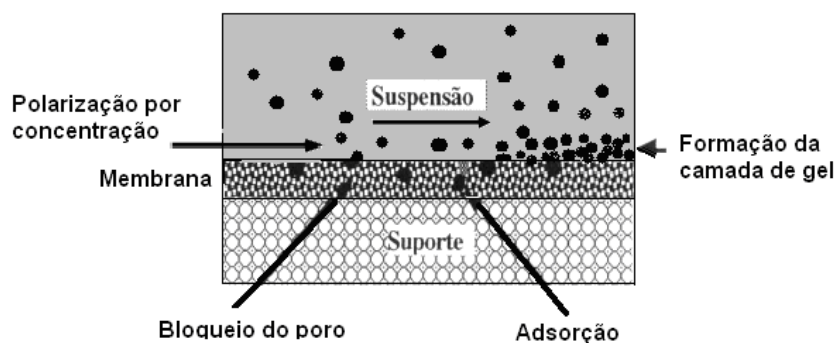


Figura 9: Mecanismos envolvidos na colmatação
 Fonte: WISNIEWSKI (1996) *apud* LAPOLLI (1998).

2.2.4.1. Polarização por concentração

Os processos de filtração têm como limitação o fenômeno de polarização por concentração, isto é, a formação de uma camada de gel nas paredes da membrana, na qual a concentração de soluto tende a aumentar ao longo da operação (VISVANATHAN, 1996 *apud* LAPOLLI, 1998).

Independentemente do tipo de filtração (convencional ou tangencial) sempre haverá aumento da concentração das espécies retidas próximo à superfície da membrana. No entanto, nas operações em escoamento tangencial, ela se estabelece rapidamente, em questões de minutos, e provoca uma resistência adicional à transferência de massa do solvente através da membrana, com conseqüente queda no fluxo permeado, relativa ao fluxo do solvente puro obtido na mesma pressão (HABERT et al., 2006).

De acordo com Habert et al. (1997), este fenômeno é fortemente afetado pelas condições de escoamento da corrente da alimentação, quantificadas pelo número de Reynolds. À medida que se aumenta a velocidade tangencial da alimentação, a espessura da região polarizada diminui e como conseqüência o fluxo de permeado aumenta. Contudo, a redução dos efeitos causados envolve aumento da velocidade de circulação (aumento de turbulência), diminuição da pressão trans-membrana e elevação da temperatura para reduzir a viscosidade (LAPOLLI, 1998 *apud* HABERT et al., 2006;).

2.2.4.2. Camada de Gel

A camada de gel, também chamada de torta de filtro, é formada pelo material oriundo da água de alimentação retido na superfície da membrana. Sua formação se inicia com a retenção de partículas com diâmetro maior do que o diâmetro dos poros. Após a formação da primeira camada, a torta passa a atuar como uma membrana adicional. Esta geralmente tem uma estrutura irregular e uma dinâmica de crescimento

própria devida não somente à incorporação de material particulado com diâmetro maior do que os poros da torta, mas também pela incorporação de colóides, partículas e moléculas de tamanho menor do que os poros da torta, que são retidos por uma variedade de processos (HABERT et al., 2006).

Segundo Vidal (2006) este fenômeno acrescenta ao sistema uma espécie de resistência suplementar resultante da formação da própria camada de gel. A formação dessa camada depende das características da suspensão em circulação e, também, das condições em que é operado o sistema. Entretanto, não há como evitar a formação da camada de gel. Todavia, assim como na zona de polarização, o controle da camada de gel pode ser feito através do aumento da turbulência ou da diminuição da pressão, ou, ainda, pela utilização de membranas fabricadas com outros materiais, para se reduzir a adsorção de solutos.

2.2.5. Regeneração dos meios filtrantes

Como a maioria dos filtros industriais opera sob pressão constante (MASSARANI, 2002), o aumento da perda de carga tem como consequência a redução na taxa de filtração, exigindo que sejam executadas medidas capazes de restaurar a capacidade de filtração dos equipamentos. Tal operação é conhecida como “regeneração”, que consiste numa limpeza do meio filtrante. A estratégia operacional de regeneração depende do tipo de filtro. Ressalta-se que alguns filtros não são regenerados; apenas substitui-se o meio filtrante.

2.2.5.1. Retrolavagem

Na maioria dos casos, a limpeza do meio filtrante é feita por reversão de fluxo, utilizando-se uma corrente de fluido limpo, sob pressão elevada o suficiente para desagregar o material retido nos interstícios do meio poroso. O método de “*backpulsing*” (BP) consiste em reduzir o fenômeno de colmatação, melhorando a taxa de filtração e estendendo o intervalo de limpeza. É um processo que ocorre contrário a

pressão do sistema, no qual o líquido permeado é forçado contra o meio filtrante, no sentido da alimentação, deslocando as partículas depositadas em sua superfície (Figura 10). Podem-se citar alguns parâmetros associados ao BP como: duração, amplitude do pulso e intervalo (SONDHI e BHAVE, 2001).

Assim como o BP, existem outras técnicas tais como o “*backflushing*” (BF) ou “*backwashing*” (BW). De acordo com Peng et al. (2005), ambos são processos eficazes, embora o BF atue a baixa frequência de fluxo reverso de permeado enquanto que o BP sob alta frequência de fluxo reverso. Para Sondhi e Bhavé (2001), a diferença fundamental entre o BP e BW é a velocidade e a força empregada para deslocar o material acumulado na superfície do filtro. Enquanto no BF, o fluxo reverso dura de 5-30s a cada 30 min, no BP o fenômeno repete-se em poucos minutos, com duração menor ou igual a 1s e amplitude de pulso maior que 10 bar. Em todo caso, a regeneração pode ser realizada utilizando-se o próprio filtrado ou solução líquida externa. A quantidade de fluido requerida, geralmente emprega-se em excesso, o que pode implicar na perda de grandes quantidades de produto ou geração de altos volumes de efluente – ambos dispendiosos.

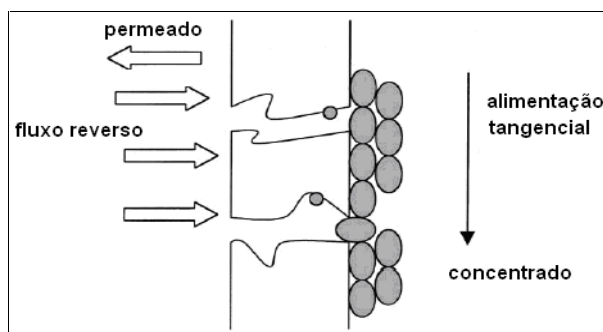


Figura 10: Representação do mecanismo de BP durante filtração tangencial
Fonte: adaptada de SONDHI e BHAVE, 2001.

WENTEM (1995) ressalta que bons resultados podem ser obtidos na filtração tangencial, combinando o uso de BF com membrana assimétrica reversa.

Os efeitos do BF foram estudados por Peng et al. (2005), utilizando membranas de carbono e membranas cerâmicas de Microfiltração. Resultados demonstraram que a técnica é mais eficaz usando membranas de carbono e em processos de microfiltração tangencial, melhorando o fluxo em até 8 vezes.

Sondhi e Bhawe (2001) constataram que no caso de filtração de água produzida, em escala industrial, auxiliada por BP, a estabilidade do fluxo e o intervalo de limpeza dependem, além dos parâmetros usuais, do diâmetro de poro da membrana também.

Todavia, Dittler et al. (2002) afirmam que uma regeneração mal sucedida, influencia significativamente a performance da operação, reduzindo o tempo entre os ciclos e aumentando a frequência de repetições.

Em contra partida, há ainda um mecanismo que permite a limpeza química periódica dos filtros “*in situ*”, por um processo denominado de CIP “*Clean in Place*”. Contudo, há outras tecnologias a exemplo do uso de ondas de choque induzidas por pulsos de ar, como nos filtros de manga para separação de misturas sólido-gás, e em maior tendência a limpeza por ondas ultrassônicas - impedindo a formação de tortas e minimizando a concentração de solutos na superfície do filtro (TRAN et al., 2007).

2.2.5.2. Sonicação

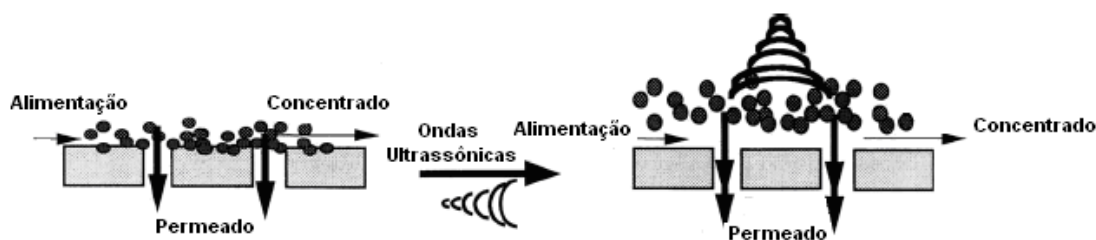
A limpeza ultrassônica é caracterizada pela transmissão de energia através de ondas mecânicas. A passagem das ondas ultrassônicas através do meio líquido e gasoso é efetuada por fenômenos primários como cavitação e corrente acústica (KYLLÖNEN et al., 2006).

Ondas cujas frequências estão acima do limite de audibilidade humana, variando entre 2 Hz e 20 kHz e frequências situadas acima de 18 kHz são usualmente consideradas ultrassônicas. Na indústria, a faixa de frequência usada para fins de limpeza varia de 20kHz a 50kHz (BLACKSTONE-NEY ULTRASONICS, 2005). Na Tabela 3 estão algumas aplicações atuais do ultrassom em águas, efluentes e sistemas de lodos (NEIS e BLUME, 2002).

Tabela 3: Aplicações do ultrassom na engenharia ambiental

APLICAÇÃO	OBJETIVO
Água potável	Inativar (desinfecção) bactérias; Acentuar a separação de sólidos; Regenerar o meio filtrante; Remover incrustações em bombas e reservatórios;
Degradação de poluentes de efluentes	Aumentar a degradação biológica;
Biomassa/ Lodo	Desintegrar bio-sólidos; Decompor flocos volumosos de lodo ativado;

A ação das ondas ultrassônicas como mecanismo de limpeza, baseia-se no fenômeno da cavitação—formação e subsequente colapso de bolhas produzidas por compressões e rarefações sucessivas, decorrentes da propagação das ondas na suspensão. O efeito se assemelha a micro-explosões que, quando se dão na superfície do sólido, removem a sujeira (Figura 11). A efetividade deste mecanismo depende principalmente da frequência, como também da amplitude e propriedades físicas do meio (TRAN et al., 2007).

**Figura 11: Ação das ondas ultrassônicas sobre o meio filtrante**

Fonte: adaptada de KOBAYASHI et al, 2003.

A intensidade da cavitação varia de modo inverso com a frequência. Conforme a frequência é elevada, a intensidade do fenômeno se reduz devido ao menor tamanho atingido pelas bolhas de vapor do líquido. Este efeito pode ser compensado pelo aumento da potência da fonte. Na prática, usa-se ultrassom de mais baixa frequência para as sujeiras grosseiras, enquanto que a sujeira de mais difícil acesso, como as partículas que obstruem os interstícios de um meio poroso, são removidas com ultrassom de frequências mais elevadas (LAMMINEM et al., 2004). Muthukumaran et al. (2007) constataram em seu trabalho que o uso contínuo de ultrassom à uma frequência de 50kHz demonstrou mais eficácia que o uso intermitente da técnica a 1 MHz.

No entanto, de acordo com HESSONIC (2005) – *High Energy Sound Supersonics*- considera-se usualmente 40 kHz como uma frequência genérica, aplicável a maioria dos processos de limpeza, uma vez que possui menor implosão de bolhas, reduzindo assim as chances de danificar o equipamento (numa frequência de 40 kHz existem 60% a mais de implosões por cavitação do que a 25 kHz enquanto que numa frequência de 68 kHz existem 70% a mais do que a 40 kHz).

Como mencionado, algumas propriedades do meio interferem no mecanismo de cavitação. Em um banho ultrassônico, para obter uma cavitação mais intensa, a viscosidade do líquido deve ser preferencialmente baixa (consome menos energia da fonte), a densidade alta (mas não tão alta, pois pode impedir o início do fenômeno) e pressão de vapor e tensão superficial moderadas. A intensidade da cavitação também varia com a temperatura do líquido, sendo maior em temperaturas mais baixas. Em um banho ultrassônico, a temperatura varia normalmente entre 27-82°C (considera-se uma temperatura de 60°C como aplicável à maioria dos processos de limpeza ultrassônicos) (Op. cit).

Segundo Muthukumaran et al. (2005), a técnica possui quatro efeitos específicos que podem contribuir para otimização dos processos de filtração: 1) aglomeração de partículas finas que provocam bloqueio do poro e deposição da torta; 2) manutenção das partículas em suspensão devido à vibração mecânica, promovendo mais canais livre para passagem do solvente; 3) limpeza da superfície e dos interstícios do filtro devido à passagem de bolhas originadas pela cavitação (Figura 12); 4) geração de turbulência que resulta em gradientes de velocidade próximo à camada de torta, promovendo novamente a limpeza da superfície do filtro.

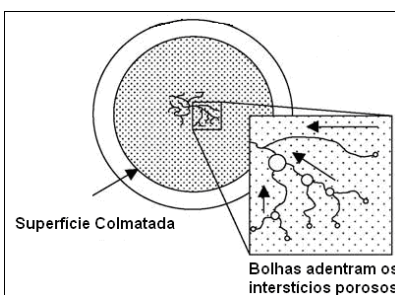


Figura 12: Mecanismo de remoção de partículas pelo uso de ultrassom

Fonte: adaptada de LAMMINEM et al., 2004

De acordo com Chen et al. (2006), a técnica ainda provoca, devido ao fenômeno da cavitação, aumento da temperatura e pressão em certas regiões do meio. Já foram registrados picos de 17.000 K no centro da bolha, quando a média está em torno de 4.200 K.

Kobayashi et al. (1999) *apud* Lamminen et al. (2004) concluíram que o ultrassom não danifica a superfície da membrana nem aumenta o tamanho dos poros, no caso de filtração tangencial usando membrana polimérica. Já utilizando membrana cerâmica, Kokugan (1995) *apud* Lamminen et al. (2004) verificaram que a técnica é capaz de aumentar o fluxo, mas não de remover partículas de dentro dos poros.

Em filtrações utilizando membranas, Chen et al. (2006) observaram que o fluxo de permeado atingia um regime estacionário e que, através da recuperação do permeado (R), era possível descrever o efeito ultrassônico sobre a operação. A Eq. 26 permite averiguar a eficiência do efeito ultrassônico.

$$R = \frac{J_{US} - J'}{J_{0,US} - J'} \times 100\% \quad (26)$$

onde, J_{US} é o fluxo de permeado em estado permanente com ultrassom, J' é o fluxo de permeado em estado permanente sem ultrassom, e $J_{US,0}$ é o fluxo de permeado em uma membrana totalmente limpa com ultrassom. Baseado nesta expressão, um valor de **R** igual a 0% indica que não houve melhora no fluxo de permeado utilizando ultrassom, enquanto que um valor próximo de 100% indica obviamente o oposto.

Shu et al. (2007), testou quatro processos de limpeza de membranas cerâmicas utilizando água e agentes químicos, com ou sem ultrassom. Verificaram, pois, que a taxa de filtração era proporcional ao aumento da potência do ultrassom, e que o uso de agentes químicos em conjunto com o ultrassom promoveu efeitos sinérgicos, que resultaram em alta eficiência e menor tempo de limpeza.

Enfim, diversos métodos químicos e físicos são empregados para regenerar os meios filtrantes. No entanto, Muthukumaran et al. (2005) ressaltam o grande consumo de reagentes e a possibilidade de dano e/ou redução de vida útil da membrana ao

empregar processos químicos, e as contínuas e sucessivas interrupções ocorrentes nos métodos de “*backflushing*” e “*backwashing*” como desvantagens destes processos. Contudo, a principal vantagem do ultrassom relativa a outros métodos regenerativos reside na dispensa do uso de produtos químicos e na redução das interrupções para limpeza. Por outro lado, a literatura revela que poucos fatores foram investigados, especialmente no que diz respeito à filtração de colóides (CHEN et al., 2006). Jenderka e Koch (2006) destacam como desafios a descrição do campo de ondas e sua interação com as nuvens de bolhas no banho ultrassônico, propondo estudos sobre a medição dos parâmetros responsáveis pela otimização da técnica. Ademais, adiantam as possíveis dificuldades operacionais nas medições de parâmetros na faixa de 20 kHz e 1 MHz como: sensores maiores que perturbariam o campo ultrassônico, e a probabilidade de destruir as bolhas formadas pela cavitação.

2.3. FILTRAÇÃO NO TRATAMENTO DA ÁGUA PRODUZIDA

2.3.1. Generalidades sobre a produção de petróleo

Segundo estimativas oficiais da EIA (*Energy Information Administration – Official Energy Statistics from the U.S. Government*. Report DOE/EIA-0484 -2008) a demanda de petróleo crescerá em 26% de 2005 para 2030. A demanda de 83,6 milhões de barris/dia (2005) vai aumentar para 95,7 milhões em 2015 e para 112,5 milhões de barris/dia em 2030. Só o Oriente Médio e a África detêm cerca de 70% das reservas de óleo comprovadas do mundo. O Brasil tem participação pequena neste cenário de reservas provadas², cerca de 1%, no entanto a auto-suficiência na produção do petróleo foi atingida pela Petrobras em 2006, quando a companhia completou 50 anos. Dos 11 bilhões de barris constantes das reservas brasileiras, 10,3 bilhões estão situados em mar (89%) e 0,9 bilhões em terra - grande parte se situa em mar na região sudeste, na costa dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo (GABARDO, 2007).

O sucesso da exploração do petróleo depende de alguns fatores simultâneos: (1) a existência de uma rocha geradora ativa (rica em matéria orgânica), (2) reservatório estruturado para acúmulo e produção de petróleo, (3) rocha capeadora ou selante (rocha retentora impermeável), e (4) caminhos de migração para os fluidos. A ausência de apenas um desses fatores inviabiliza a formação de uma jazida petrolífera (ARAÚJO FILHO, 2006).

A exploração de um reservatório de petróleo implica na produção de três fluidos simultaneamente: óleo, gás e água. Normalmente, o tratamento primário do petróleo produzido se constitui das seguintes etapas (FILGUEIRAS, 2005):

- separação do óleo, do gás e da água;
- tratamento ou condicionamento do óleo para que possa ser transferido para as refinarias onde é realizado o processamento propriamente dito;
- tratamento da água para reinjeção no poço ou descarte no mar.

² Reserva provada: com razoável certeza de produção sob condições de viabilidade econômica

A separação desta mistura líquida oriunda do reservatório, contendo óleo, gás e água, se faz necessária, pois o petróleo e o gás apresentam relevante interesse econômico para a indústria, e a água, um dos contaminantes mais indesejados no processo de produção do petróleo, apresenta uma composição complexa provocando uma série de problemas no sistema de bombeio e transferência e na operação dos processos nas refinarias, tais como (Op. Cit.):

- superdimensionamento das instalações de coleta, armazenamento e transferência, incluindo bombas, linhas, tanques, etc;
- maior consumo de energia;
- segurança operacional, devido aos problemas de corrosão e/ou incrustação, causando danos às tubulações, equipamentos e acessórios, que podem redundar em acidentes com humanos e/ou ambientais.

Não bastassem os inconvenientes quanto à composição, o volume de água produzida é crescente durante a exploração de petróleo. Isto porque, conforme o óleo é exaurido, ou seja, à medida que o campo de produção envelhece, o volume de água necessário a recuperação do óleo aumenta. Estima-se que durante a vida econômica de um poço de petróleo, o volume desta água pode chegar a exceder dez vezes o volume de produção de óleo (em campos novos: 5 a 15% do fluido trazido à superfície é água produzida, enquanto que, em campos maduros, esse percentual sobe para 90%) (EKINS et al. 2007). Dados internos da Petrobras indicam que, para cada m^3 de óleo produzido, produz-se $1,1 \text{ m}^3$ de água salobra (SCHUHLLI, 2007).

2.3.2. Características da água produzida

O termo “água produzida” é usado para descrever a mistura de água (da formação e injetada) e óleo que foi tratada, mas que ainda contém pequenas quantidades de óleo e metais. A água de formação, tendo estado em contato com a formação geológica por milhões de anos, contém em sua composição uma variedade de sais inorgânicos e componentes orgânicos. O material orgânico está presente nas águas produzidas tanto na forma dispersa como na dissolvida (VIEIRA et al., 2003).

De acordo com Stephenson (1992), examinando-se as especificações da água produzida, encontra-se um limite de até 95.000 mg/L de sólidos totais dissolvidos, ou seja, componentes inorgânicos. Também pode conter uma grande variedade de componentes orgânicos dissolvidos, uma vez que, água e óleo permaneceram em contato por longos períodos geológicos, propiciando a solubilidade de orgânicos. Acredita-se que os efeitos mais nocivos ao meio ambiente estão relacionados a esses compostos, os quais infelizmente são mais difíceis de serem removidos (CARVALHO et al., 2001).

Segundo Jonhsen et al. (2004) *apud* Gabardo (2007), a composição da água produzida pode apresentar variações dependendo da formação geológica e do tempo de produção do poço, porém em geral estão presentes em sua composição sais dissolvidos, incluindo sulfetos e sais de amônio, hidrocarbonetos dissolvidos e dispersos, compostos orgânicos (HPA³:- fenóis e ácidos carboxílicos; e em maioria BTEX - benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) metais pesados, aditivos químicos como surfactantes, floclulantes e inibidores de corrosão, sólidos em suspensão e traços de radionuclídeos (rádio-226 e rádio-228), além de algumas vezes apresentar salinidade superior à salinidade do mar. Contudo, uma composição típica da água produzida contém entre 50-100 ppm de óleo e graxas e 50-350 ppm de sólidos suspensos (MUELLER et al., 1997).

Como mencionado, a concentração e a composição dos sais presentes na água de formação variam de acordo com os campos de produção. Frequentemente são

³ HPA: Hidrocarboneto Policíclico Aromático.

encontrados sais de sódio, cálcio e magnésio, sobretudo sob forma de cloretos e em menor extensão, de sulfatos. Concentrações baixas desde 30.000 mg/L até 150.000 mg/L são usualmente encontradas. Normalmente costuma-se reportar a salinidade global com base em cloreto de sódio (COUTINHO, 2005; NICOLAISEN, 2002). Dentre os compostos inorgânicos mais abundantes (íons cloreto, sódio, cálcio e magnésio) estão a amônia e o sulfeto. Essas espécies podem, segundo TIBBET et al. (2002) *apud* Gabardo (2007), ser derivadas da atividade microbiana nas linhas de produção.

Dentre os metais a composição varia, podendo ser encontrados cádmio, cobre, níquel, chumbo, zinco e mais frequentemente bário e ferro. Alguns podem estar 1000 vezes acima das concentrações encontradas em água do mar de ambiente não contaminado (SWAN et al., 2004 *apud* GABARDO, 2007).

A água produzida apresenta toxicidade variável. Estudos de avaliação da toxicidade aguda e crônica têm evidenciado que os hidrocarbonetos aromáticos e os fenóis alquilados são os compostos que mais influenciam sua toxicidade (OGP 2005). Isso precisa ser considerado ao ser-lhe dado um destino, assim como ao avaliar possíveis impactos ao meio ambiente.

2.3.1.1. Impactos Ambientais e Legislação

O impacto ambiental provocado pelo descarte da água produzida é geralmente avaliado pela toxicidade dos constituintes e pela quantidade de compostos orgânicos e inorgânicos presentes. Na indústria de petróleo, várias atividades podem agredir o meio ambiente, entretanto, devido à composição e volume envolvidos, o poluente mais relevante é a água produzida (OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2000).

Os contaminantes presentes nas águas produzidas podem causar diferentes efeitos sobre o meio ambiente. Licon e Marques (2007) reúnem as principais causas potenciais de perigo atribuídas à água produzida:

- a) Alta salinidade: a salinidade pode causar impactos nos mananciais de água doce como aquíferos, lagos e rios, que se destinam à irrigação e ao abastecimento humano. De acordo com Sjöblöm (2003) apud Coutinho (2007) o sal está, normalmente, dissolvido na fase aquosa, chamada de água de formação, mas pode eventualmente apresentar-se também como pequenos cristais.
- b) Sólidos suspensos: A presença de grande quantidade de sólidos pode interferir na auto-purificação de rios e ocasionar depósitos de lama, danificar pontos de pesca e impactar os mananciais;
- c) Presença de metais pesados: o principal problema relacionado à presença de metais pesados se deve à capacidade de bioacumulação na cadeia alimentar. Diversos metais pesados podem ser encontrados na água produzida como: bário, manganês, mercúrio, zinco etc. Esses elementos podem ser extremamente tóxicos aos seres humanos.
- d) Presença de orgânicos insolúveis: a presença de óleos superficiais é tóxica para os peixes, reduzindo a aeração, causa sabor desagradável e uma aparência inaceitável à água;
- e) Presença de orgânicos solúveis: responsável por efeitos tóxicos agudos. Torna-se um grande problema para o tratamento e disposição da água produzida, por serem de difícil remoção;
- f) Presença de aditivos químicos: a água produzida pode conter variados produtos químicos. Deve-se evitar principalmente o descarte das que contenham bactericidas, pois podem ser tóxicos a muitos organismos. Os surfactantes só ocorrem por causa do manejo incorreto e se exceder as concentrações recomendadas. Produtos biodegradáveis também podem ser potencialmente perigosos quando em concentrações elevadas;
- g) Radioatividade: os riscos com o manuseio de águas produzidas que contenham elementos radioativos são considerados pequenos para a vida humana. Existe, no entanto, necessidade de estudos já que se encontram presentes elementos que tendem a bioacumular-se, como os metais pesados, em peixes e crustáceos.

A água produzida, depois de separada do petróleo e tratada, tem como destino principal o descarte em corpos receptores da natureza. Para Thomas (2001), a descarga

contínua de água produzida não causa danos sensíveis ao meio marinho, desde que o sistema de descarte seja projetado e construído para proporcionar uma grande diluição do efluente. As fontes naturais existentes no mar, como a diluição, evaporação, foto e auto-oxidação, degradam o petróleo e o gás carbônico, enquanto que os componentes solúveis do óleo são destruídos pelas bactérias presentes na água do mar

OGP (2005) indica que cerca de 7 milhões de m^3 de água produzida são descartados diariamente em área oceânica, o que resulta em um volume de 2,5 trilhões de m^3 por ano. No Brasil este volume vem aumentando, tendo sido registrados 66 milhões de m^3 no ano de 2005 e 73,3 milhões de m^3 em 2006. De qualquer maneira, o volume descartado no Brasil ainda é pequeno comparado ao descarte mundial. Além disto, as condições geográficas térmicas do mar, entre outros fatores, favorecem a dispersão deste efluente.

Apesar de o descarte de água produzida já existir a tempos, apenas recentemente foram elaboradas leis mais específicas e intensificados estudos sobre os impactos ambientais oriundos desta atividade. A forma, a combinação e a quantidade dos elementos envolvidos bem como as características do local de descarte devem ser consideradas (SCHUHLI, 2007; LICONA E MARQUES, 2007).

A legislação no Brasil através do CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente – determina limites quanto ao teor de óleo na água de descarte. Considerando que cerca de 80% do petróleo nacional são produzidos através de plataformas marítimas localizadas ao longo da costa brasileira; uma nova resolução foi redigida recentemente em consideração a CONAMA nº 357/2005 a CONAMA nº 397/2008 determinando limites e procedimentos para descarte em plataformas marítimas. Nesta, o descarte mensal de óleo na água produzida passa de 20 mg/L para uma média mensal de 29 mg/L com máxima diária de 42 mg/L de óleo, medido por gravimetria. A não satisfação da exigência ambiental é suficiente para interromper a produção de uma plataforma de petróleo.

Para Gabardo (2007) o descarte de água produzida em geral se divide em duas situações: reinjeção ou descarte oceânico. Shuhli (2007) afirma que a reinjeção em zonas produtoras de petróleo como método de recuperação secundária é uma solução ao

descarte, porém a tecnologia ainda não está totalmente desenvolvida. Na última década, entretanto, o reuso da água produzida junto com o petróleo tem sido estudado, a fim de eliminar o efluente e destinar água para fins mais nobres, como, por exemplo, geração de vapor. A utilização da água produzida na geração de vapor, por exemplo, tem como vantagens não só a eliminação do descarte de efluentes, mas também a “economia” da água atualmente utilizada para geração de vapor, água esta que pode ser proveniente de um aquífero ou de rede de água tratada e, portanto, de excelente qualidade (KOREN e NADAV, 1994 *apud* SHUHLI, 2007).

Outras opções para a água produzida em terra incluem reuso e reciclo da água, onde pode ser utilizada para irrigação de plantações, dessedentação de animais domésticos e silvestres, cultivo de peixes, cultivo hidropônico de animais, represamento de águas, entre outros. A viabilidade do reuso da água produzida, entretanto, depende da retirada dos seus contaminantes sendo os limites máximos de contaminantes na água para reuso estipulados por legislações, variando de acordo com a finalidade do reuso (VEIL et al., 2004 *apud* GABARDO, 2007)

Para Garcia (1985) *apud* Santos et al. (2007), uma opção eficaz para disposição da água produzida é a sua injeção, uma vez que aumentaria o fator de recuperação de óleo dos reservatórios e reduziria possíveis impactos ambientais a biota marinha e corpos receptores. Porém, se realizada sem tratamento, alguns inconvenientes podem ser observados como a contaminação e/ou incompatibilidade entre a água que está sendo injetada e a água do aquífero, provocando a formação de sais e comprometendo a injetividade. A utilização de outra água, adequada ao reservatório, poderia ser vantajosa economicamente, mas ainda persistiria o problema do descarte do efluente gerado.

2.3.3. Tratamento da água produzida

Segundo Gabardo (2007), o tratamento da água produzida tem por finalidade tratar a água de forma a reduzir os valores de TOG- teor de óleo e graxas, enquadrando-a para descarte ou reinjeção. Mesmo em casos de reutilização (reciclada) a água precisará ser tratada de modo a atingir os padrões necessários ao processo-usuário

(SILVA, 2000). Um procedimento básico de tratamento de água produzida inclui: remoção de óleo residual; remoção de gases; remoção de sólidos suspensos e dissolvidos; e eliminação de bactérias.

- Remoção de óleo residual

Os critérios adotados com relação ao teor de óleo, produtos químicos e a presença de metais pesados variam com o tipo de destino que será dado à água. Na água a ser injetada, a presença de óleo pode levar à queda de injetividade, especialmente se a injeção estiver se realizando em uma zona que não tenha contido óleo anteriormente (poço de descarte) (SILVA, 2000). O óleo recuperado é recirculado para o processo (GABARDO, 2007).

- Remoção de gases

Quanto aos gases, podem estar presentes: H_2S , CO_2 e O_2 , que são importantes nessa etapa em virtude do favorecimento aos processos corrosivos. A corrosão é um fator importante em um sistema de tratamento e injeção de água. O tratamento para eliminar gases pode ser dispendioso, e o uso de anti-corrosivos é comum. Pode ser mais econômico o investimento no uso de materiais resistentes à corrosão (LIMA, 1998 *apud* LICONA E MARQUES, 2007).

- Remoção de sólidos suspensos

Os sólidos suspensos, que não são retirados das águas a serem dispostas no mar, nas águas destinadas à injeção poderão ser a causa da queda de injetividade. Devem, pois, ser retirados. Os processos de filtração são vários. Partículas de até 1/3 do diâmetro mínimo de passagem na rocha em que a água está sendo injetada, devem ser removidas. Como os filtros são, em geral, afetados pela presença de óleo na água, o óleo deve ser retirado do efluente antes do processo de filtração (Op. Cit.).

- Eliminação de bactérias

Se houver presença de bactérias na água destinada a injeção, estas devem ser eliminadas com o uso de bactericidas. As bactérias causam basicamente problemas relacionados à corrosão do aço por geração de H_2S . Como efeito da corrosão, existe a

formação e deposição do sulfeto de ferro que, com o tempo, obstrui o local em que a água está sendo injetada (Op. Cit.).

De acordo com Chan et al. (2001), o procedimento mais comum de tratamento de água oleosa consiste de etapas físico-químicas para remoção de óleo e sólidos suspensos. Quanto aos componentes orgânicos solúveis, que conferem DBO e DQO ao efluente, podem ser devidamente removidos se submetidos a uma planta de tratamento biológico.

Em geral, os métodos de tratamento das águas produzidas dependem de muitos fatores, incluindo os volumes envolvidos, a constituição da água (salinidade e teor de óleo principalmente), a localização do campo e os limites da legislação ambiental vigente (OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2000).

Segundo Abdel-Rehim et al. (2006) existem atualmente diversas tecnologias que podem reduzir bastante o teor de óleo na água produzida. Muitas delas, de acordo com Gabardo (2007), são frequentemente classificadas como melhor tecnologia disponível (em inglês BAT- *Best Available Techniques*). Entre elas pode-se citar filtração e leito absorvente, adsorção em carvão ativo, bio-oxidação, entre outros porém estas tecnologias ainda não são viáveis tanto tecnicamente como economicamente no tratamento da água em plataformas, devido a limitações de espaço físico e peso destes equipamentos, dificuldades de execução de obras no ambiente marítimo e também o tempo de residência destas águas nas plataformas, que em geral não é superior a 15 min.

De acordo com Thomas (2001), os hidrociclones e a flotação são os processos de separação óleo-água atualmente mais utilizados pela indústria de petróleo. Dentre os processos convencionais de tratamento, citam-se os vasos gravitacionais, os sistemas de filtração em meio granular, a flotação por gás induzido ou dissolvido, a centrifugação e o emprego de hidrociclones. Na prática, estes métodos são utilizados de forma combinada, visando atingir maior eficiência na separação dos compostos dispersos nas águas produzidas. Dentre as que despertam interesse no tratamento de efluentes industriais, principalmente os oleosos, estão a eletroflotação e filtração por membranas (OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2000).

Hansen e Davies (1994) *apud* Vieira et al. (2003) estudaram algumas tecnologias para o tratamento de água de produção originada em reservatórios de óleo e gás: troca iônica para a remoção de metais pesados, adsorção em zeólitas sintéticas, filtração em membrana, arraste por gás ou vapor, adsorção com carvão ativado (com a posterior regeneração deste carvão por oxidação com ar úmido) e tratamento biológico para remover a matéria orgânica dissolvida. Quanto aos sólidos dissolvidos totais, a remoção pode ser realizada aplicando-se osmose reversa. No entanto, eles observaram que a maioria dos tratamentos estudados não foi suficientemente eficiente para remover todos os grupos de componentes “indesejáveis” presentes na água de produção.

Em acordo com os processos de filtração, Carvalho et al. (2001) estudaram a utilização de polímeros porosos no tratamento de água produzida como recheio de uma coluna filtrante, observando que a redução de óleo na água depende do tipo de material utilizado, bem como da metodologia de empacotamento. Desta forma preparam colunas com recheios de dois tipos de copolímeros, obtendo uma redução de 89,1% do TOG inicial. Quanto à capacidade de regeneração das colunas filtrantes, foram realizados testes preliminares, os quais mostraram eficiência por meio de uma simples lavagem com etanol/metanol.

Çakmakci et al. (2008) afirmam que os tratamentos bem sucedidos da água produzida geralmente requerem operações de pré-tratamentos, na qual diferentes contaminantes são removidos. Dentre as técnicas de separação mais investigadas para remoção de óleos, graxas e sólidos suspensos estão filtração em leito granular e em meio rígido e microfiltração tangencial em meio cerâmico. Contudo o desenvolvimento de novas tecnologias ou ainda o aperfeiçoamento das tecnologias existentes é de extrema importância para que a indústria do petróleo continue a se expandir, sem impactar o meio ambiente.

2.3.4. Conclusões parciais

Baseando-se nas informações disponíveis na literatura, pode-se inferir alguns aspectos sobre o tema proposto:

- Durante a vida de um campo produtor de óleo e/ou gás o volume de água necessário a recuperação do(s) fluido(s) é crescente, implicando em maior geração de água produzida.
- A composição da água produzida é muito complexa, variando de região para região, entretanto, a conduta mundial contra possíveis danos ambientais tem sido uniforme, visto que as legislações para descartes estão cada vez mais restritivas.
- No Brasil, devido à maior parte do óleo produzido ocorrer *offshore*, o teor de óleos e graxas permitido na água de produção pela resolução CONAMA nº 357/2005 foi alterado pela CONAMA nº 397/2008 – específica para descarte em plataformas marítimas – demonstrando maior preocupação por parte das autoridades com a qualidade das águas da costa brasileira.
- O descarte de água produzida é uma prática antiga, todavia já estão sendo estudadas novas possibilidades de disposição, entre as quais o reuso, através da reinjeção da água em poços, após tratamento adequado.
- A reinjeção da água produzida é uma opção a ser considerada, embora enquadrá-la nos padrões requeridos pela legislação exija tratamento oneroso. Diversas técnicas de remoção de contaminantes encontram-se disponíveis, no entanto a viabilidade destas ainda é um aspecto que carece de estudo adicionais.
- Por fim, tendo em vista o trabalho preliminar de Licon e Marques (2007), precursor de uma nova técnica de tratamento por via oxidativa que gera um resíduo contendo enxofre elementar, justifica-se o estudo da filtração com a finalidade de separá-lo e tornar a água produzida tratada passível de reinjeção.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. INTRODUÇÃO

As atividades experimentais deste trabalho foram realizadas no Laboratório de Inovação Tecnológica (LABITEC) do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), Campus de São Cristóvão.

O material objeto do estudo foi a água produzida, que foi utilizada em duas vertentes: na forma de água produzida sintética e na sua forma real, *in natura*, procedente de campos produtores terrestres de Sergipe, destacando-se o campo de Carmópolis.

A bacia de Sergipe e Alagoas está localizada na região Nordeste do Brasil, estando 2/3 submersa e o restante de seus 36000 km² sob terra firme. Fazem parte desta bacia os campos terrestres de Carmópolis, Siririzinho e Riachuelo. A Figura 13 indica a localização destes campos dentro do estado de Sergipe (MILANI e ARAÚJO, 2003).

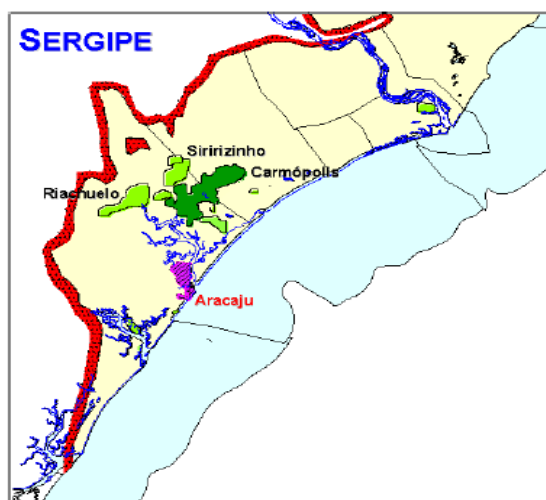


Figura 13: Localização dos campos de Carmópolis, Siririzinho e Riachuelo
Fonte: MILANI e ARAÚJO, 2003.

O campo de Carmópolis, cuja produção se iniciou em 1963, é o principal campo da bacia de Sergipe-Alagoas e representa a maior acumulação terrestre de óleo já descoberta no Brasil – cerca de 268 milhões de m³ de óleo originalmente “*in place*”. O campo é dividido em duas áreas distintas: Bloco Principal e Bloco do Embasamento. O Bloco Principal, com cerca de 40 km² responde por 92% da produção do campo de Carmópolis, atualmente em torno de 3000 m³/dia de óleo (MELO e GOMES, 2006).

Considerado a quarta maior reserva de óleo do país, o campo apresenta uma produção média diária de 27.000 m³/dia de água segundo Petrobras UN-SEAL (2005). A água produzida em Carmópolis, que antes era despejada nos rios Riachão e Japarutuba, proporcionando grandes preocupações ambientais, agora é reusada através da reinjeção em poços de petróleo e outra parte segue por dutos para a Companhia Vale, onde é usada para dissolver e transportar resíduos da mineração de cloreto de potássio para descarte no Oceano Atlântico. Contudo, a necessidade de injeção de água na formação tende a aumentar, à medida que o potencial petrolífero da formação decresce, o que acarreta uma maior geração de água produzida e na necessidade de mais capacidade de tratamento para a reinjeção (CAMPOS et al, 2005).

Sendo assim, já que não se pode mais descartar água produzida direto no ambiente, a mesma passou a ser tratada na estação de Bonsucesso – Carmópolis - Sergipe, com o objetivo de enquadrá-la para fins de reinjeção. Os padrões implementados pela empresa encontram-se listados na Tabela 4.

Tabela 4: Padrões de Reinjeção para o Campo de Carmópolis

PARÂMETRO	PADRÃO DE REINJEÇÃO
Teor de Sólidos Suspensos	< 5 mg/L
Teor de Óleos e Graxas	< 10 mg/L
Oxigênio Dissolvido	< 50 ppb
Bactérias Redutoras de Sulfato	< 20 NMP

Nesse contexto, este capítulo apresenta os aspectos metodológicos inerentes ao estudo da filtração envolvendo água produzida, contemplando equipamentos, materiais e métodos utilizados, conforme detalhado nos itens subsequentes.

3.2. DESCRIÇÃO DA APARELHAGEM

O objeto de estudo do presente trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de filtração para efluentes com significativo teor de sólidos suspensos. Os ensaios consistiram na avaliação da eficiência do sistema sob diferentes condições operacionais. O mecanismo de filtração, teor de sólidos suspensos, teor de óleos e graxas e influência do campo ultrassônico foram estudados como variáveis do sistema.

3.2.1. Filtração a vácuo com alimentação tangencial

Este sistema de filtração consistiu em um arranjo experimental composto por: um meio filtrante do tipo cerâmica porosa; uma bomba centrífuga marca Askoll, modelo 600092, com 40 W de potência, que proporcionava a alimentação tangencial e movimento helicoidal do fluido na carcaça do filtro; uma bomba de vácuo marca PRIMAR, modelo BCP15VC; além de acessórios instalados nas linhas de alimentação, reciclo e retirado do filtrado, conforme Figura 14.

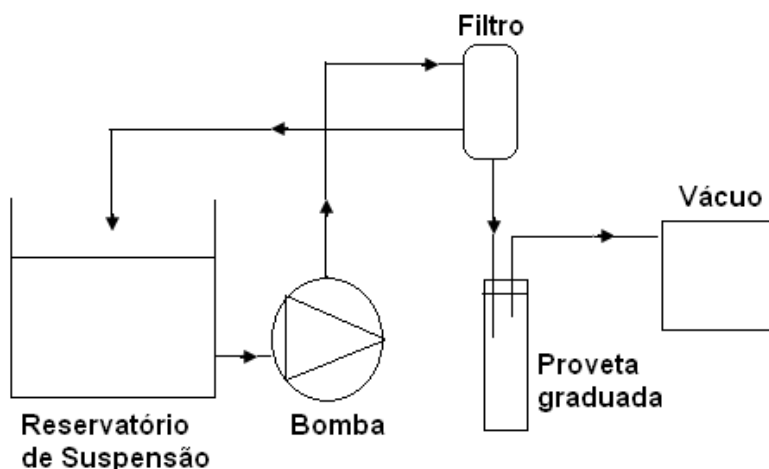


Figura 14: Ilustração da filtração tangencial a vácuo

A alimentação do sistema ocorreu da seguinte maneira: a bomba centrífuga conectada ao reservatório de efluente impulsionava a suspensão até o orifício superior, introduzindo-o tangencialmente no espaço anular do filtro. A suspensão escoava em movimento helicoidal até a saída lateral inferior. O filtrado era recolhido numa proveta para medição da taxa de filtração. Dessa forma, o efluente era dividido em duas

correntes: o filtrado (permeado) e o remanescente (retentato) – que podia retornar ao reservatório e recircular no sistema (operação em batelada) ou ser descartado (filtração contínua).

O meio filtrante possuía uma área de filtração de 160 cm^2 e está posicionado dentro de uma carcaça de PVC conforme Figuras 15 e 16. A carcaça possui três orifícios: dois na direção tangencial (superior: entrada da suspensão; inferior: saída da suspensão concentrada) e um na direção axial (para retirada do filtrado) como mostra a Figura 17. A montagem do sistema é feita através de flanges parafusados que une as seções hemi-cilíndricas vedadas por um anel de borracha tipo “o-ring”, conforme Figura 18.



Figura 15: Detalhes das seções hemi-cilíndricas



Figura 16: Detalhe da montagem do sistema filtrante

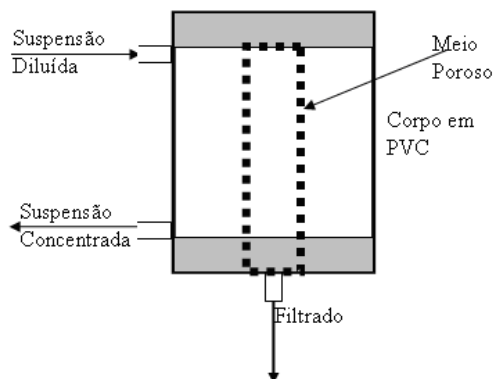


Figura 17: Detalhe da alimentação e retirada de filtrado



Figura 18: Imagem externa do filtro

A determinação da vazão de alimentação pôde ser feita pela técnica da proveta e cronômetro, medindo-se o volume escoado (ΔV) num certo tempo de operação (Δt).

Após cada operação, regenerava-se o meio filtrante através da retrolavagem com água destilada (Figura 19). Inicialmente o filtro era desmontado para uma limpeza superficial, removendo-se sedimentos da carcaça e do meio filtrante. Logo após, a água destilada, succionada por vácuo, fluía ascendentemente pelo filtro, realizando a limpeza do meio rígido. A água era recolhida na proveta, para então ser descartada.

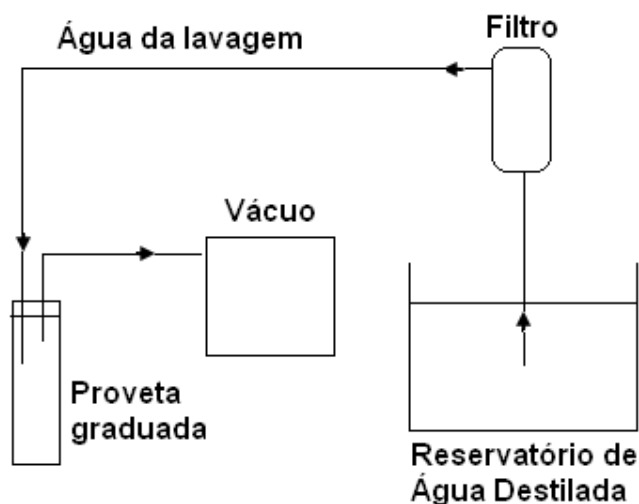


Figura 19: Esquema da Retrolavagem do Filtro

3.2.2. Filtração a vácuo convencional

Neste mecanismo de filtração o elemento filtrante estava imerso em um banho ultrassônico (marca UNIQUE, modelo Ultracleaner), que funcionava como reservatório de suspensão, porém sem influência das ondas ultrassônicas, uma vez que o sistema de sonicação estava desligado. O sistema possuía uma conexão com a proveta (recipiente de permeado) e com a bomba de vácuo. A alimentação do reservatório de suspensão era realizada pela parte superior, utilizando uma bomba peristáltica (Figura 20).

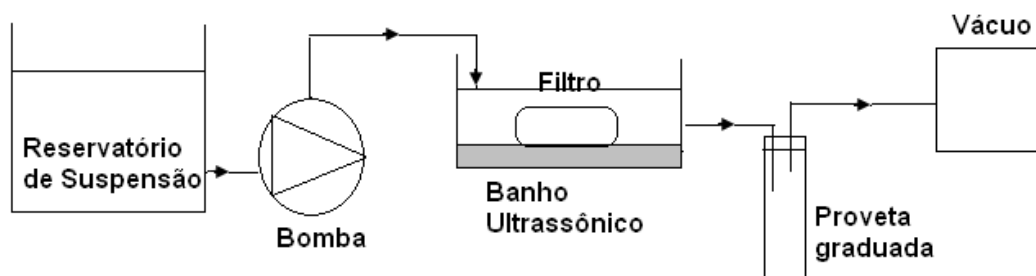


Figura 20: Ilustração da filtração a vácuo convencional

Ressalta-se que o banho ultrassônico não estava ativado e que o material do meio poroso era do mesmo tipo do esquema de filtração descrito no item 3.2.1.

3.2.3. Filtração a vácuo sob influência do campo ultrassônico

A fim de minimizar o efeito de colmatção, melhorando a taxa de filtração e prolongando o tempo de campanha do meio filtrante, um banho ultrassônico foi acoplado ao sistema conforme Figura 20.

Neste mecanismo de filtração - análogo ao arranjo experimental do item 4.2.2, o elemento filtrante estava imerso no banho ultrassônico, que funcionava tanto como reservatório de solução quanto como fonte de ondas ultrassônicas na frequência de 40 kHz.

A determinação da taxa de filtração foi feita da mesma forma descrita no item 3.2.1, pela técnica da proveta e cronômetro.

3.3. ENSAIO PRELIMINAR

Visando-se estudar a influência dos mecanismos de filtração sobre a formação de torta e a colmatção dos poros, foram realizados ensaios de filtração com suspensões de CaCO_3 em

diferentes concentrações de sólidos. Estes ensaios preliminares objetivaram caracterizar o meio poroso, estabelecendo referencial para posteriores experimentos com a água produzida.

Os mecanismos de filtração seguiram-se como descritos acima, com concentração de 1,5 % (m/v) de CaCO_3 .

3.3.1. O modelo teórico para a filtração

Silva e Marques (2007) apresentam uma formulação matemática para filtração plana com formação de torta, cujas soluções predizem o volume de filtrado, o fluxo de líquido, a porosidade do meio filtrante e a função porosidade, entre outros parâmetros de interesse para a filtração.

O presente trabalho mostra uma aplicação deste modelo para os ensaios de filtração de suspensões de CaCO_3 realizados por três mecanismos: tangencial, convencional e ultrassônico.

O modelo foi desenvolvido a partir dos balanços de massa (Eq. 27 e Eq. 28) e de quantidade de movimento linear (Eq. 29, Eq. 30, Eq. 31, Eq. 32) aplicados ao fluido e ao sólido, os quais, juntamente com as equações constitutivas, formam um sistema de equações diferenciais parciais.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}} (\varepsilon \cdot \mathbf{V}_1) = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}} [(1 - \varepsilon) \cdot \mathbf{V}_2] = 0 \quad (28)$$

$$\rho_1 \cdot \mathbf{a}_1 = -\varepsilon \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{y}} + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \mathbf{y}} + \mathbf{m} + \rho_1 \cdot \mathbf{g}_1 \quad (29)$$

$$\rho_1 \cdot \mathbf{a}_2 = -(1 - \varepsilon) \cdot \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{y}} + \frac{\partial \sigma_2}{\partial \mathbf{y}} - \mathbf{m} + \rho_2 \cdot \mathbf{g}_2 \quad (30)$$

$$\mathbf{a}_\alpha \equiv \frac{\partial \mathbf{V}_\alpha}{\partial \mathbf{t}} + \mathbf{V}_\alpha \cdot \frac{\partial \mathbf{V}_\alpha}{\partial \mathbf{y}} \quad \alpha = 1, 2 \quad (31)$$

$$\rho_1 = \varepsilon \cdot \rho_f \quad \rho_2 = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \quad (32)$$

Os resultados obtidos pela resolução deste modelo apresentam soluções explícitas, com destaques para as equações Eq. 33, Eq. 34 e Eq. 35, como mostram as relações seguintes:

$$\varepsilon_m(\mathbf{t}) = 1 - (1 - \varepsilon_o) \sqrt{1 + \frac{\mathbf{t}}{\mathbf{t}_o}} \quad (33)$$

$$\mathbf{q}_m(\mathbf{t}) = - \frac{\beta_o}{\mathbf{L}_o \cdot \sqrt{1 + \frac{\mathbf{t}}{\mathbf{t}_o}}} \quad (34)$$

$$\mathbf{V}(\mathbf{t}) = \frac{\mathbf{S} \cdot \mathbf{L}_o}{2\mathbf{a}} \left(\sqrt{1 + \frac{\mathbf{t}}{\mathbf{t}_o}} - 1 \right) \quad (35)$$

sendo, ε_o a porosidade inicial da mistura, ε_m a porosidade da torta na interface com o meio filtrante, $\mathbf{t}$ o tempo arbitrário, $\mathbf{t}_o$ o tempo característico do modelo, $\mathbf{q}_m$ a velocidade superficial do fluido, β_o constante, $\mathbf{L}_o$ comprimento constante, $\mathbf{V}$ o volume de filtrado, $\mathbf{S}$ a área de filtração e $\mathbf{a}$ parâmetro característico do modelo.

No Capítulo 4, serão confrontados dados experimentais do presente trabalho com o modelo de Silva e Marques (2007), a fim de determinar os seus parâmetros e verificar se o mesmo é válido para representar o processo de filtração estudado.

3.4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

As situações experimentais estudadas foram planejadas utilizando planejamento fatorial do tipo 3^n , permitindo a otimização do processo mediante o uso das ferramentas

estatísticas juntamente com a análise de variância (ANOVA) e método da superfície de resposta (RSM), segundo Barros Neto et al. (1996) e Montgomery (2005).

A seguir, estão listados os fatores cujas influências sobre a eficiência da filtração foram observadas:

Mecanismo de filtração:

- Filtração a vácuo com alimentação tangencial;
- Filtração a vácuo convencional;
- Filtração a vácuo em campo ultrassônico.

Teor de sólidos suspensos na alimentação:

Foi determinado pela concentração de sulfeto na água produzida, pois a reação com hipoclorito gera o enxofre coloidal numa concentração proporcional à quantidade de sulfeto presente. Foram estudados os seguintes níveis de concentração de sulfeto:

- Nível alto (SST = 1000 mg/L);
- Nível médio (SST = 500 mg/L);
- Nível mínimo (SST = 250 mg/L).

Teor de óleos e graxas na alimentação:

Foram estudados também 3 níveis de concentração.

- Nível alto (TOG = 180 mg/L);
- Nível médio (TOG = 100 mg/L);
- Nível mínimo (TOG = 20 mg/L).

As eficiências de separação foram medidas em termos dos seguintes parâmetros:

- Turbidez;
- Teor de sólidos suspensos;
- Teor de óleos e graxas.

Os resultados experimentais foram analisados com base no método da superfície de resposta (RSM), segundo Barros Neto et al. (1996). Seriam necessários, no mínimo, 27 experimentos.

A matriz de experimentos executados encontra-se esquematizada na Tabela 5.

Tabela 5: Matriz de experimentos

SST	TOG	MECANISMO
MIN	MIN	TANGENCIAL
MIN	MED	TANGENCIAL
MIN	MAX	TANGENCIAL
MED	MIN	TANGENCIAL
MED	MED	TANGENCIAL
MED	MAX	TANGENCIAL
MAX	MIN	TANGENCIAL
MAX	MED	TANGENCIAL
MAX	MAX	TANGENCIAL
MIN	MIN	CONVENCIONAL
MIN	MED	CONVENCIONAL
MIN	MAX	CONVENCIONAL
MED	MIN	CONVENCIONAL
MED	MED	CONVENCIONAL
MED	MAX	CONVENCIONAL
MAX	MIN	CONVENCIONAL
MAX	MED	CONVENCIONAL
MAX	MAX	CONVENCIONAL
MIN	MIN	ULTRASSOM
MIN	MED	ULTRASSOM
MIN	MAX	ULTRASSOM
MED	MIN	ULTRASSOM
MED	MED	ULTRASSOM
MED	MAX	ULTRASSOM
MAX	MIN	ULTRASSOM
MAX	MED	ULTRASSOM
MAX	MAX	ULTRASSOM

O problema em questão visou à maximização da remoção do teor de sólidos suspensos e óleos e graxas, ou seja, determinar em qual combinação das variáveis, a remoção de sólidos suspensos e óleos e graxas foi máxima. Nesse contexto, o método da superfície de resposta foi capaz de identificar em qual arranjo experimental a filtração foi mais eficiente e se a redução dos teores de sólidos suspensos e óleos e graxas foram satisfatórios ao descarte ou reinjeção da água.

3.4.1. Matriz sintética

As amostras de água produzida sintética usadas nos ensaios foram elaboradas segundo Licona e Marques (2007), misturando-se água destilada, cloreto de sódio, sulfeto de sódio e petróleo, em quantidades planejadas, conforme apresentado no item 4.4.

A incorporação do petróleo ao meio exigia a produção de emulsão óleo- água, a qual foi proporcionada por um agitador de hélice marca Black & Decker, modelo SB40. O material particulado era gerado no meio através de uma reação de oxidação do sulfeto com hipoclorito de sódio, seguida de uma coagulação – floculação com sulfato de alumínio, corrigindo-se o pH do meio com ácido sulfúrico.

3.4.2. Matriz Real

As amostras de água produzida foram obtidas de campos produtores terrestres de Sergipe, junto à UN SEAL/PETROBRAS. Após coletada, a amostra era imediatamente transportada ao laboratório para realização dos experimentos. Primeiro, determinava-se a demanda de cloro necessária à oxidação da amostra. Por fim, quantificavam-se os volumes de agente coagulante e alcalinizante em “jar test”. Também foram medidas as salinidades de cada amostra. Esclarece-se que todos os mecanismos de filtração foram submetidos em cada amostra de água real, totalizando três curvas experimentais por amostra.

3.5. MÉTODOS ANALÍTICOS

Para caracterização da água produzida “in natura”, foram realizados os métodos de determinação de sulfeto, teor de cloro livre e teor de sólidos totais dissolvidos para avaliação da salinidade da água. Em todos os ensaios foram coletadas amostras antes e após o processo de filtração, para avaliar a qualidade do filtrado. Os parâmetros analisados foram: turbidez, sólidos suspensos totais (SST) e teor de óleos e graxas (TOG).

a) Determinação de turbidez

A turbidez representa o grau de interferência com a passagem da luz através da água, produzindo uma aparência nebulosa à mesma. A medida da turbidez depende de variáveis como o tamanho, forma e propriedades de refração das partículas não dissolvidas (Metcalf & Eddy, 2003).

O método aplicado foi o nefelométrico, seção 2130 B, do SMEWW-*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (CLESCERI et al., 1998). Seu princípio é baseado na comparação da intensidade de luz espalhada pela amostra em condições definidas, com a intensidade de luz espalhada por uma suspensão de referência padrão. Quanto maior a intensidade de luz espalhada, maior será a turbidez da amostra. Neste estudo, o equipamento utilizado para leitura do parâmetro, foi o turbidímetro modelo TB1000, marca TECNOPON, capaz de realizar medições entre 0-1000 Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU).

b) Determinação de Sólidos Suspensos Totais (SST)

As partículas de maior dimensão, retidas num papel de filtro de tamanho especificado, correspondem aos resíduos não filtráveis, também usualmente denominados Sólidos Suspensos Totais (SST). De acordo com a metodologia disposta no SMEWW, seção 2540 D, foi realizada lavagem da membrana tipo Acetato Celulose de 0,45 μ , seguida de secagem em estufa marca BRASDONTA modelo 3 a 103-105 °C. Após a secagem em estufa, até atingir peso constante, as membranas eram pesadas em balança analítica marca SHIMADZU, modelo MO54-E123J (CLESCERI et al, 1998).

c) Determinação de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

O teor de sólidos numa água ou efluente refere-se à quantidade de matéria suspensa ou dissolvida presente na água. Os sólidos dissolvidos totais (SDT) são os sólidos filtráveis que atravessam a membrana filtrante. Para determinação do teor de SDT em uma amostra é necessário, de acordo com o método 2540 C do SMEWW, a secagem do filtrado à 180°C por 2h, após filtração da amostra em papel de filtro.

d) Determinação do Teor de Óleos e Graxas (TOG)

Na determinação do teor de óleos e graxas, não há medição quantitativa absoluta de uma substância específica e sim de um grupo de substâncias com características físicas similares determinadas quantitativamente com base em sua solubilidade comum em um solvente de extração orgânico. O termo “óleos e graxas” é definido como qualquer material recuperado como substância solúvel em um solvente (CLESCERI et al., 1998).

O método empregado consta da seção 5520 B do SMEWW. A técnica gravimétrica compreende a extração por solventes da fase orgânica da fase aquosa utilizando como solventes éter de petróleo, n-hexano e triclorotrifluoretano.

Neste estudo, as amostras foram enviadas à SERQUÍMICA – Sergipe Química & Serviços Ltda., sendo o limite de detecção do método, informado pela empresa, de 0,5 mg/L. Ressalta-se que a escolha do laboratório foi fortemente influenciada pelo fato do mesmo estar em fase de implantação do sistema de qualidade baseado na norma NBR ISO/IEC 17025.

e) Determinação da Concentração de Sulfeto

Determinava-se a concentração de sulfeto empregando-se o método Iodométrico - seção 4500S F do SMEWW, que consiste em uma titulação utilizando tiosulfato de sódio 0,025N. À amostra foram adicionados solução de iodo 0,025N e ácido clorídrico, seguida de titulação com tiosulfato de sódio até o ponto de equivalência, quando se adicionava a suspensão de amido.

f) Determinação do Teor de Cloro Livre

Este método teve por fim dosar a quantidade de cloro à amostra, uma vez que a adição em excesso pode produzir efeitos negativos ao tratamento físico-químico. O objetivo do método é determinar o volume de cloro necessário a oxidação dos constituintes da amostra oxidáveis pelo hipoclorito. Para isto foi realizada uma batelada de análises, a fim de construir a curva de cloração ao “breakpoint”, na qual a demanda de cloro livre e residual para determinada amostra passa a ser conhecida.

g) Ensaio em Teste de Jarro (“jar test”)

Transferiu-se 500 mL para cada recipiente do “*jar test*” marca Policontrol modelo FlocContro II, conforme a Figura 21, adicionando em cada jarro o volume de hipoclorito de sódio previamente determinado. Sob agitação a 130 rpm, adicionou-se sulfato de alumínio a 2% (m/V) em volumes distintos, fixando-se a quantidade de alcalinizante (NaOH 6N) em cada jarro. Por fim, realizou-se o mesmo procedimento, no entanto, fixando-se o volume ótimo de coagulante e variando-se o de alcalinizante.



Figura 21: Ensaio em *Jar Test*

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados diversos ensaios de filtração segundo os mecanismos descritos no capítulo anterior, parte deles utilizando suspensões aquosas de carbonato de cálcio e parte com suspensões floculadas obtidas no tratamento da água produzida na exploração de petróleo. Todos os ensaios foram executados sob vácuo de aproximadamente 700 mmHg.

4.1. ENSAIOS COM SUSPENSÕES DE CARBONATO DE CÁLCIO

A partir dos resultados obtidos nestes ensaios, constatou-se que as tortas formadas com tais suspensões são pouco compressíveis e que o melhor mecanismo de filtração, dentre os estudados, foi o da filtração tangencial, tendo em vista as maiores taxas de filtração proporcionadas, conforme mostram os gráficos das Figuras 22 e 23, e a melhor qualidade do filtrado em termos do teor de sólidos em suspensão, avaliado a partir da turbidez residual. A Tabela 6 exibe a turbidez residual média para cada mecanismo de filtração, com destaque para a turbidez de 0,6 NTU obtida pelo mecanismo tangencial.

Tabela 6: Turbidez residual para filtrações de CaCO_3

<i>Mecanismo</i>	<i>Turbidez residual média (NTU)</i>
Tangencial	0,6
Convencional	15,0
Ultrassom	334,2

A pouca compressibilidade é deduzida a partir do comportamento aproximadamente linear das curvas de filtração tipo Darcy (t/V versus V), enquanto que o desempenho da técnica de filtração é medido a partir da inclinação das tangentes às respectivas curvas. Quanto maior a inclinação, maiores os tempos para se obter um determinado volume de filtrado.

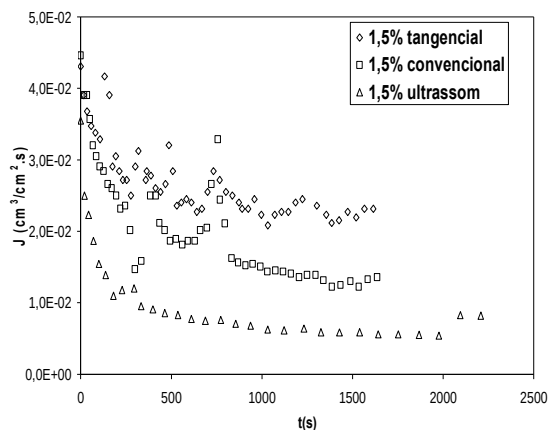


Figura 22: Fluxo de filtrado *versus* tempo para os 3 mecanismos na filtração de suspensões de CaCO_3 ; $\Delta P = 700 \text{ mmHg}$

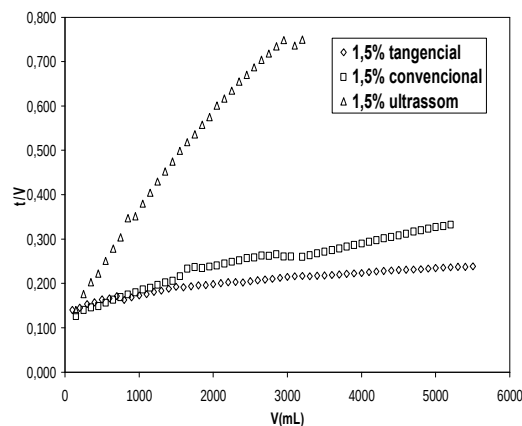


Figura 23: Curva de filtração tipo Darcy para os 3 mecanismos na filtração de suspensões de CaCO_3 ; $\Delta P = 700 \text{ mmHg}$

As resistências globais estimadas para os respectivos mecanismos de filtração, calculadas conforme metodologia de LIM e BAY (2003), foram as seguintes:

-Filtração com alimentação tangencial a vácuo: $R_{\text{total}} = 2,59 \times 10^{10} \text{ cm}^{-1}$

-Filtração convencional a vácuo: $R_{\text{total}} = 2,64 \times 10^{10} \text{ cm}^{-1}$

-Filtração em campo ultrassônico: $R_{\text{total}} = 3,75 \times 10^{13} \text{ cm}^{-1}$

-Meio filtrante limpo: $R_{\text{total}} \cong 1,3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-1}$. Sendo a resistência específica média estimada para o meio filtrante limpo da ordem de 50% das resistências médias dos mecanismos convencional e tangencial.

Este aumento da resistência específica demonstra o efeito negativo do ultrassom sobre a filtração, neste caso contradizendo os estudos de Tuori (1996), que, ao filtrar uma suspensão aquosa à base de pirita, com aplicação de ultrassom, em regime intermitente, constatou que o desempenho do sistema foi superior ao obtido na filtração convencional. Segundo o autor, a eficácia da técnica depende das características do sistema sólido-fluido e das condições operacionais.

Todavia, de acordo com Sandoval et al (2006), a sonicação diminui o tamanho das partículas, ocasionando assim o alojamento das mesmas nos interstícios do meio filtrante de forma compactada, o que explica neste caso a queda do fluxo de filtrado. A Figura 24 exhibe uma camada compactada de CaCO_3 sobre o meio filtrante, resultante da filtração sob ultrassom.



Figura 24: Torta formada na filtração ultrassônica de suspensão de CaCO_3

4.1.1. Avaliação da regeneração do meio filtrante

A Figura 25 representa as curvas experimentais de volume de filtrado *versus* tempo, sob pressão constante, para avaliar o grau de regeneração do meio filtrante por retrolavagem. Para tal finalidade, foi aplicado ao filtro limpo o mecanismo de filtração tangencial a vácuo, com água limpa, a pressão constante.

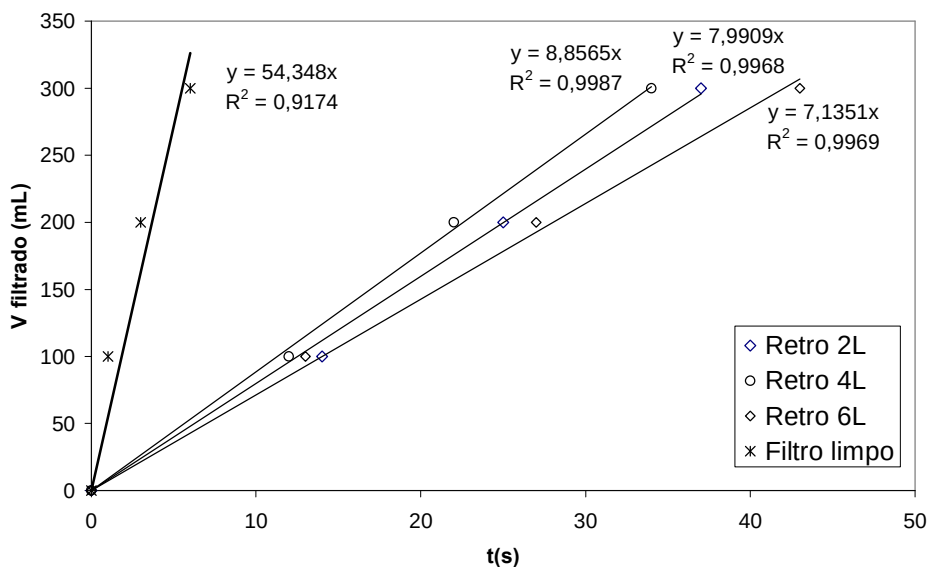


Figura 25: Comparativo da regeneração do meio filtrante

De acordo com a Figura 25, pode-se constatar que a regeneração do meio filtrante não produziu bons resultados quando comparado ao filtro limpo. Isto indica que, com o uso contínuo do meio filtrante, há uma tendência de irreversibilidade no acúmulo de partículas no espaço intersticial, o que implica na necessidade de substituição do filtro após certo tempo de operação.

4.1.2. Validação do modelo matemático

O grau de concordância entre os dados experimentais das filtrações de suspensões de CaCO_3 e o modelo teórico de Silva e Marques (2007) pode ser constatado a partir dos gráficos das Figuras 26 a 31.

As Figuras 26, 28 e 30 apresentam uma comparação do fluxo de filtrado em função do tempo, entre os resultados experimentais e os preditos pelo modelo matemático. Percebe-se que ambos os fluxos decrescem devido ao aumento da queda de pressão na torta.

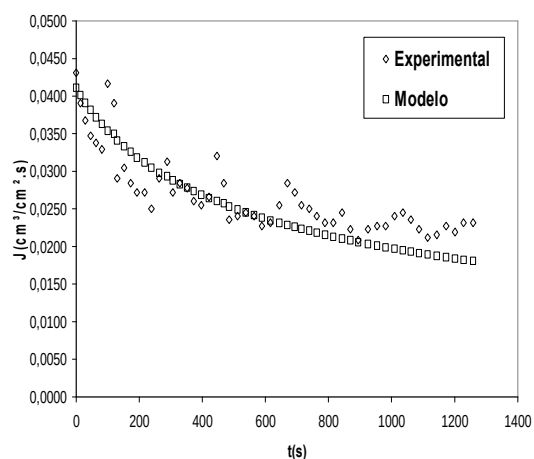


Figura 26: Fluxo de filtrado *versus* tempo para o mecanismo tangencial na filtração de suspensões de CaCO_3 ;

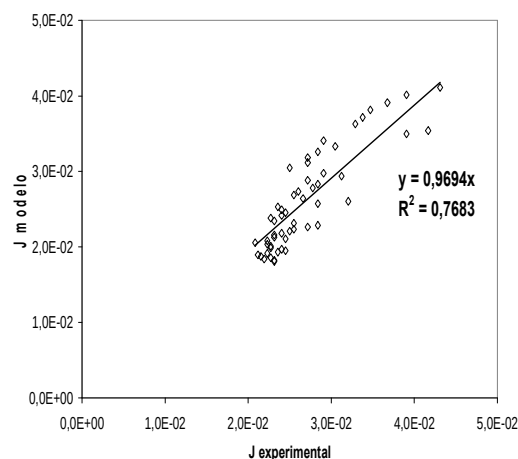


Figura 27: Correlação entre o modelo teórico e os dados experimentais obtidos pelo mecanismo tangencial

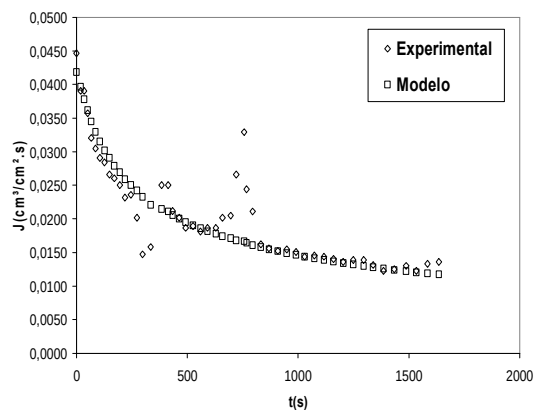


Figura 28: Fluxo de filtrado *versus* tempo para o mecanismo convencional na filtração de suspensões de CaCO_3 ;

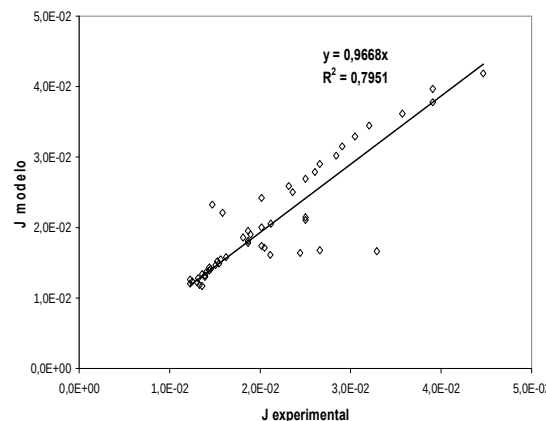


Figura 29: Correlação entre o modelo teórico e os dados experimentais obtidos pelo mecanismo convencional

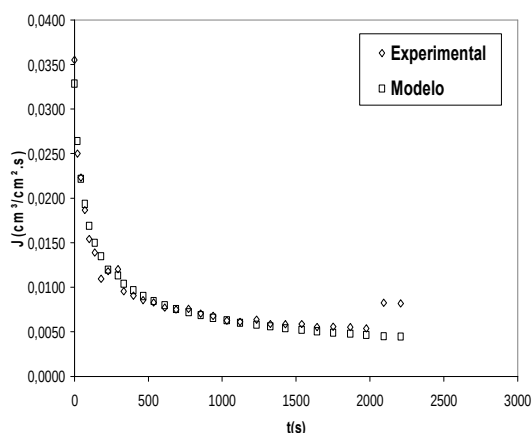


Figura 30: Fluxo de filtrado *versus* tempo para o mecanismo ultrassom na filtração de suspensões de CaCO_3 ;

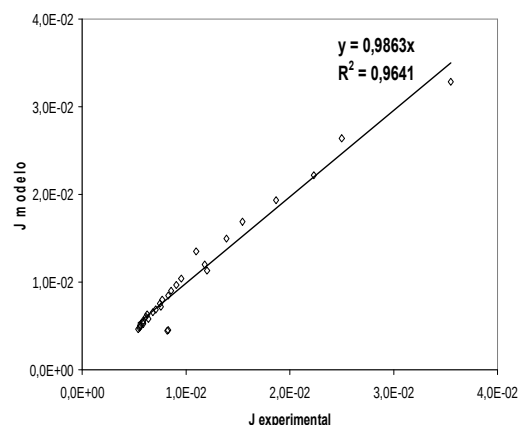


Figura 31: Correlação entre o modelo teórico e os dados experimentais obtidos pelo mecanismo ultrassônico

As Figuras 27, 29 e 31 apresentam as correlações entre o modelo e os dados experimentais dos três mecanismos. De acordo com o coeficiente de correlação de Pearson, as filtrações ocorridas pelo mecanismo ultrassônico produziram os resultados mais coerentes com a teoria, obtendo-se um fator $R^2 = 0,9641$.

Para os resultados originados pelo mecanismo convencional, apesar de ter ocorrido um espalhamento central dos pontos, os dados iniciais e finais da filtração apresentaram boa concordância com o modelo. Para tal mecanismo, recomenda-se um ajuste do modelo.

No caso do mecanismo tangencial, apesar da dispersão dos pontos ter sido elevada, nota-se uma manutenção das tendências, a qual poderá ser minimizada otimizando-se os parâmetros do modelo. Porém, isto está além do escopo do presente trabalho.

4.2. ENSAIOS COM SUSPENSÕES FLOCULADAS OBTIDAS NO TRATAMENTO DA ÁGUA PRODUZIDA

As suspensões floculadas foram submetidas aos 3 mecanismos já descritos no capítulo anterior, com a ressalva que, neste caso, o que se filtrava era o sobrenadante, resultante do emprego do tratamento oxidativo seguido do tratamento físico-químico da água produzida, como mostra a Figura 32.

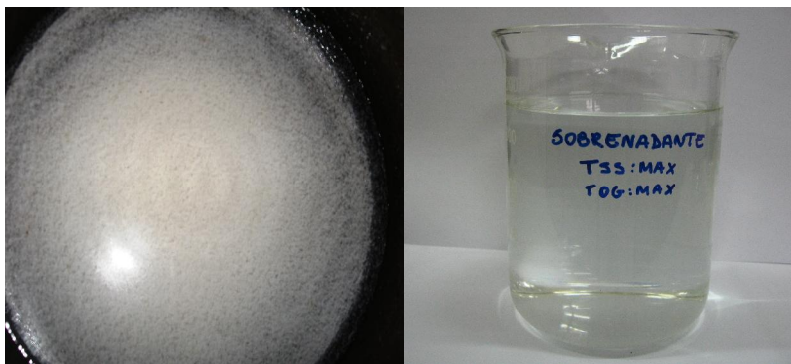


Figura 32: Amostra floculada e sobrenadante após tratamento

Os principais resultados obtidos estão delineados a seguir:

4.2.1. Filtração a vácuo convencional

A filtração da suspensão floculada obtida no tratamento da água produzida sintética pelo mecanismo convencional a vácuo produziu os resultados mostrados nas Figuras 33 a 38.

Observa-se que o aumento do teor de sólidos aproxima as curvas que representam a variação do fluxo de filtrado com o tempo, convergindo para um fluxo em torno de $6 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{cm}^2.\text{s}$. Em todas as situações estudadas, o fluxo diminui com o tempo, devido ao crescimento da resistência à filtração, conforme mostram os respectivos gráficos à direita em cada par. Nestes, as inclinações das tangentes às curvas estão diretamente relacionadas à resistência – que aumenta com o bloqueio dos poros do meio filtrante ou com o aumento da espessura da camada de torta.

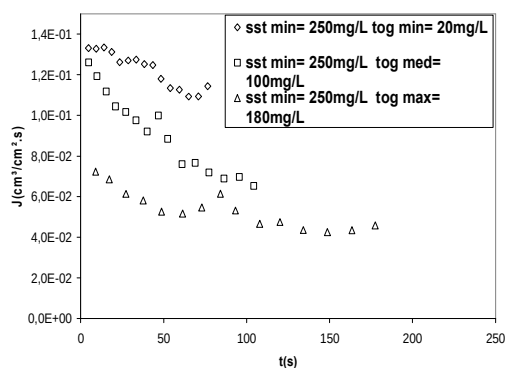


Figura 33: Fluxo de filtrado *versus* tempo na filtração a vácuo convencional para 3 níveis de TOG; SST=250 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

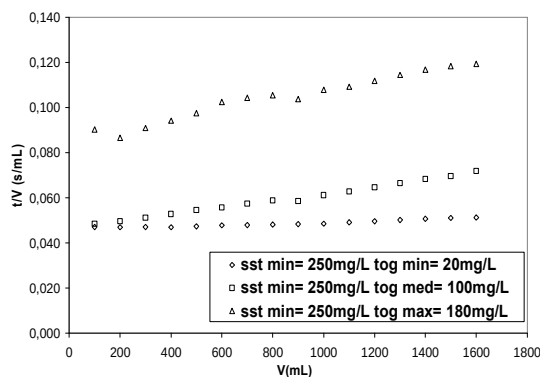


Figura 34: Curva de filtração tipo Darcy na filtração a vácuo convencional para 3 níveis de TOG; SST=250 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

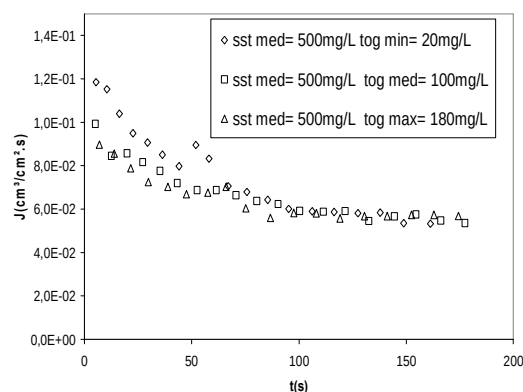


Figura 35: Fluxo de filtrado *versus* tempo na filtração a vácuo convencional para 3 níveis de TOG; SST=500 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

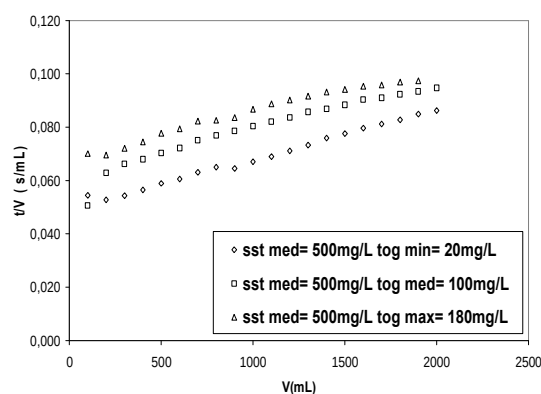


Figura 36: Curva de filtração tipo Darcy na filtração a vácuo convencional para 3 níveis de TOG; SST=500 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

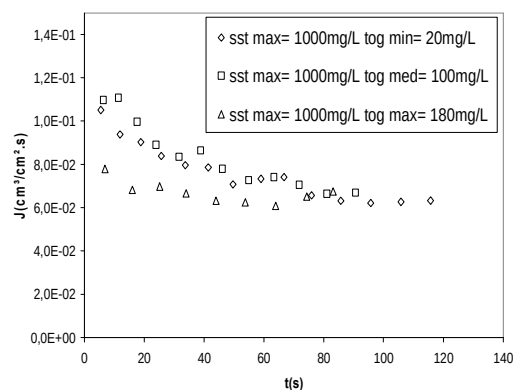


Figura 37: Fluxo de filtrado *versus* tempo na filtração a vácuo convencional para 3 níveis de TOG; SST=1000 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

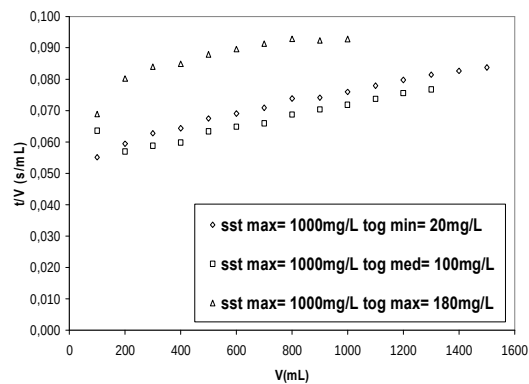


Figura 38: Curva de filtração tipo Darcy na filtração a vácuo convencional para 3 níveis de TOG; SST=1000 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

Neste mecanismo experimental o comportamento da curva de filtração é fortemente afetado pelo teor de óleo do efluente (TOG). Observando a Figura 39, percebe-se nitidamente que o fluxo de filtrado é baixo para todos os níveis de TOG. Uma possível explicação para a

queda de fluxo: o tratamento físico-químico aplicado à água produzida sintética possui baixa eficiência na remoção de TOG.

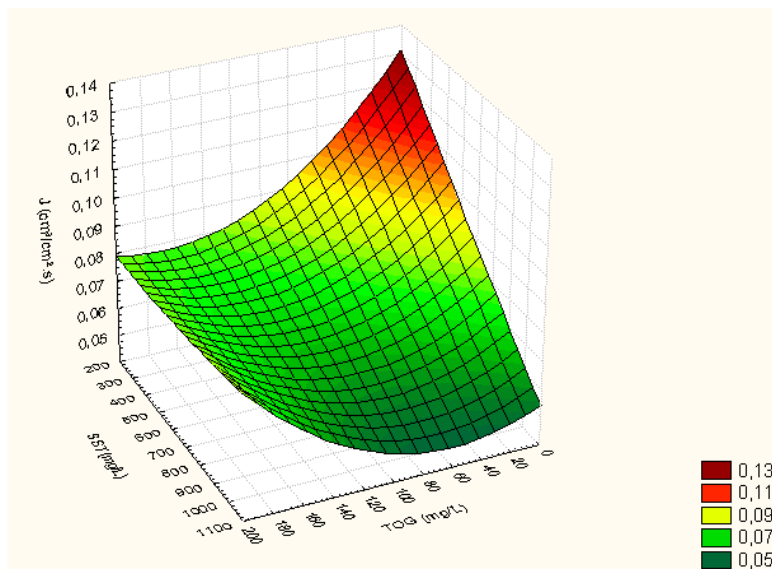


Figura 39: Efeito do TOG e SST no fluxo de filtrado pelo mecanismo convencional

A Tabela 7 exhibe a turbidez residual média para cada condição experimental executada. Destaque para os resultados de SST min que, para fins de mera comparação, atenderiam ao valor máximo permitido pela Portaria 518/04 (ANVISA, 2004), que pode chegar a 5 NTU, para amostras isoladas.

Tabela 7: Turbidez residual pelo mecanismo convencional

SST (mg/L)	TOG (mg/L)	Turbidez residual média (NTU)
250	20	0,51
250	100	0,57
250	180	0,60
500	20	2,4
500	100	65,2
500	180	52,2
1000	20	52,9
1000	100	83,9
1000	180	76,2

- **Avaliação da regeneração do meio filtrante pelo mecanismo convencional**

A Figura 40 representa as curvas experimentais de volume de filtrado versus tempo, sob pressão constante, para avaliar o grau de regeneração do meio filtrante por retrolavagem. Em todos os experimentos, o volume utilizado para efetuar o processo foi 2 litros.

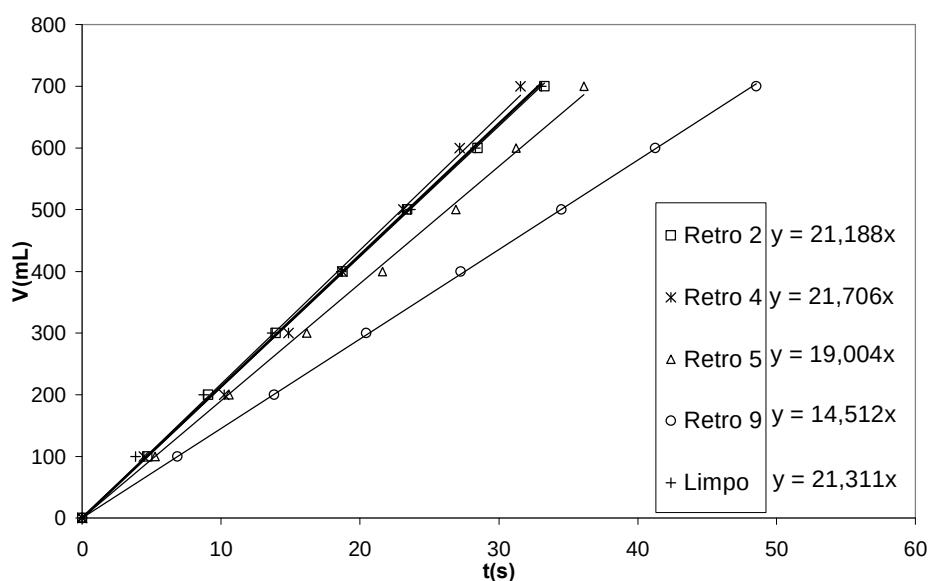


Figura 40: Comparativo das retrolavagens pelo mecanismo convencional

Observa-se a partir da Figura 40 que as retrolavagens possuíram efeito regenerativo até a “Retro 4”. A partir da “Retro 5”, a vazão de filtrado cai consideravelmente, reduzindo para 14,51 mL/s (Retro 9), enquanto que a vazão inicial para o meio filtrante limpo era 21,31 mL/s. Como complemento, a Figura 41 demonstra o alto efeito do TOG na regeneração do meio filtrante, enquanto que o teor de SST apresentou interferência menor.

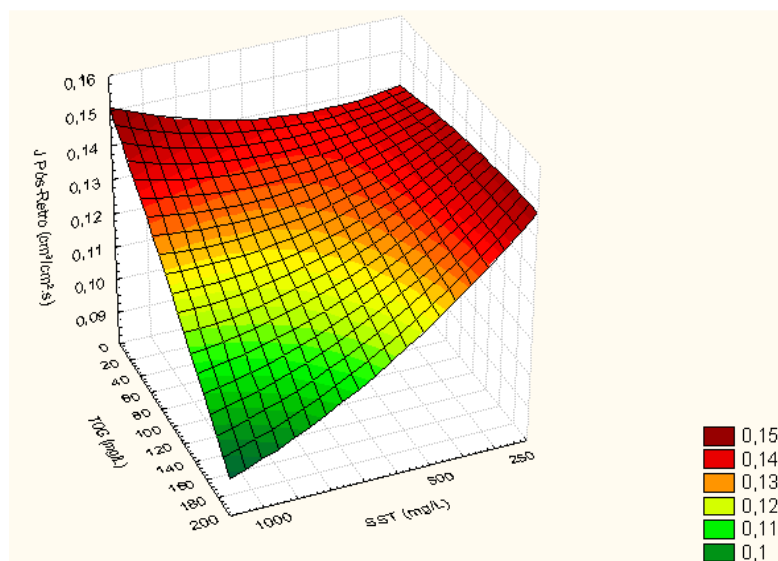


Figura 41: Efeito do TOG e do SST na regeneração do mecanismo convencional

4.2.2. Filtração tangencial a vácuo

Os ensaios de filtração tangencial sob vácuo, das suspensões geradas no tratamento da água produzida estão representados nos gráficos das Figuras 42 a 47

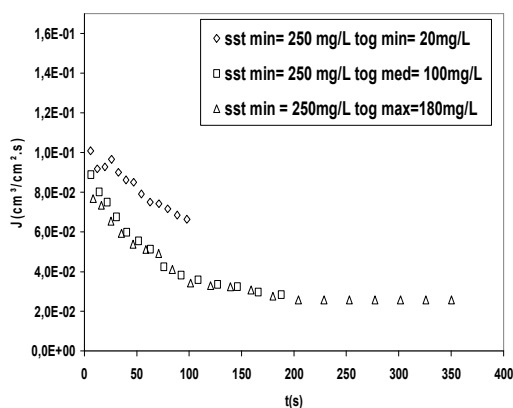


Figura 42: Fluxo de filtrado *versus* tempo na filtração tangencial a vácuo para 3 níveis de TOG; SST=250mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

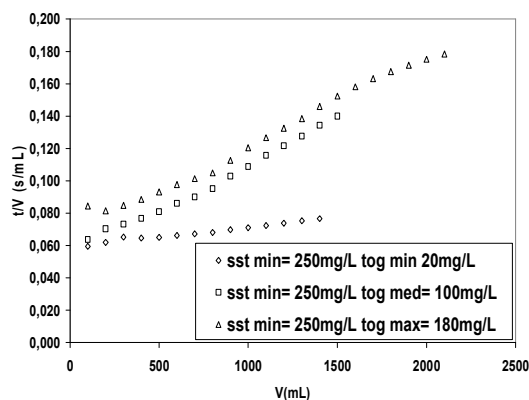


Figura 43: Curva de filtração tipo Darcy na filtração tangencial a vácuo para 3 níveis de TOG; SST=250mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

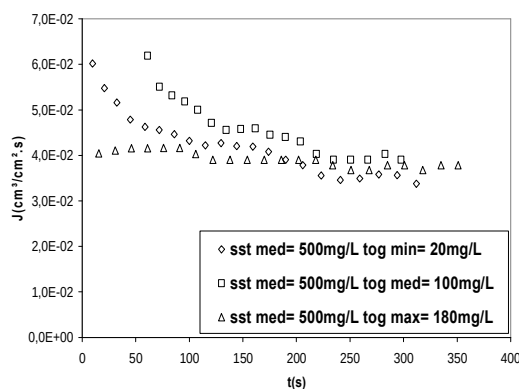


Figura 44: Fluxo de filtrado *versus* tempo na filtração tangencial a vácuo para 3 níveis de TOG; SST=500mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

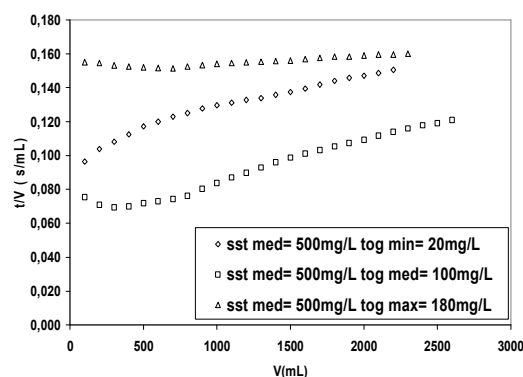


Figura 45: Curva de filtração tipo Darcy na filtração tangencial a vácuo para 3 níveis de TOG; SST=500mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

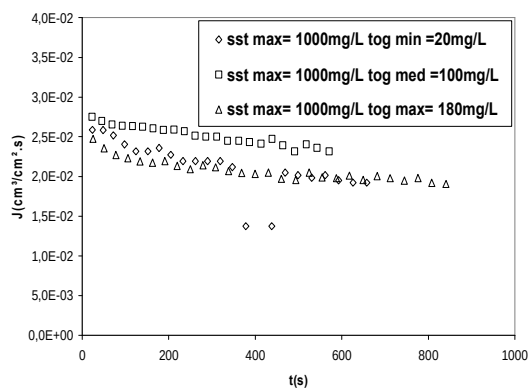


Figura 46: Fluxo de filtrado *versus* tempo na filtração tangencial a vácuo para 3 níveis de TOG; SST=1000 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

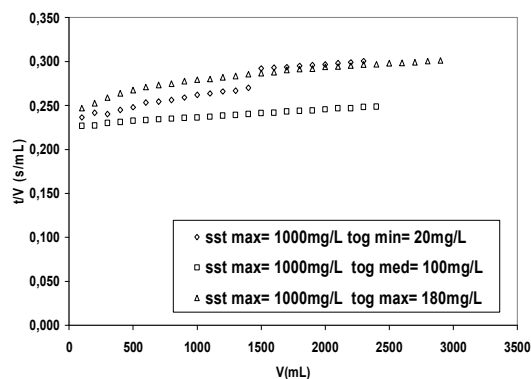


Figura 47: Curva de filtração tipo Darcy na filtração tangencial a vácuo para 3 níveis de TOG; SST=1000 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

Os aspectos que mais chamam a atenção nestes resultados são a forte influência do teor de óleos e graxas (TOG) e a interação sinérgica entre o TOG e o teor de sólidos suspensos (SST), também visto na Figura 48.

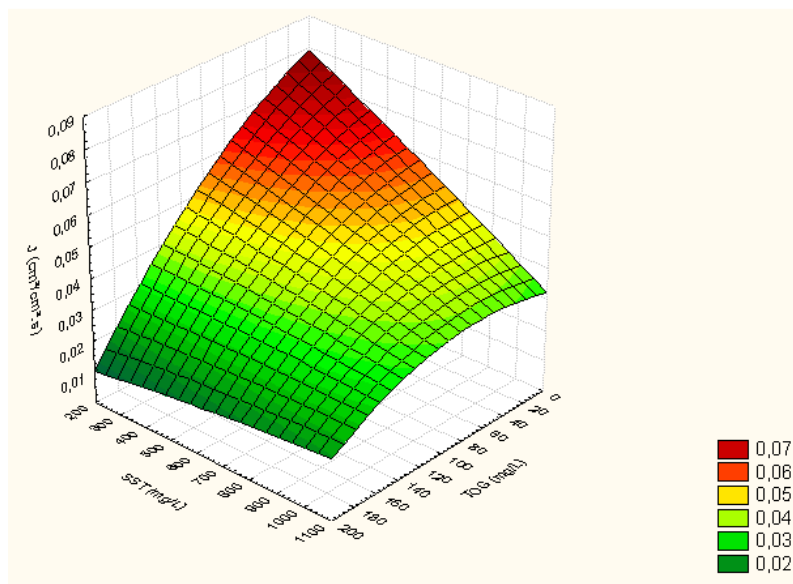


Figura 48: Efeito do TOG e SST no fluxo de filtrado pelo mecanismo tangencial

Nota-se que, para o nível mais alto de SST, os fluxos de filtrados são baixos para todos os níveis de TOG. Este efeito está melhor representado graficamente na Figura 48, uma vez que as linhas de contorno apontam claramente o decaimento do fluxo. Provavelmente, o movimento helicoidal contribua para intensificar a cobertura mais efetiva da superfície do meio filtrante, prejudicando a passagem da água.

A turbulência na carcaça do filtro pode favorecer a formação de uma mistura pastosa óleo-partículas sólidas como ocorrido em Yang (2007). Este concluiu em seus estudos de desemulsificação de água oleosa sintética utilizando coagulação eletroquímica, que partículas de óleo dispersas podem colidir com particulados suspensos, resultando em agregados oleosos de maior dimensão, comprometendo o parâmetro turbidez.

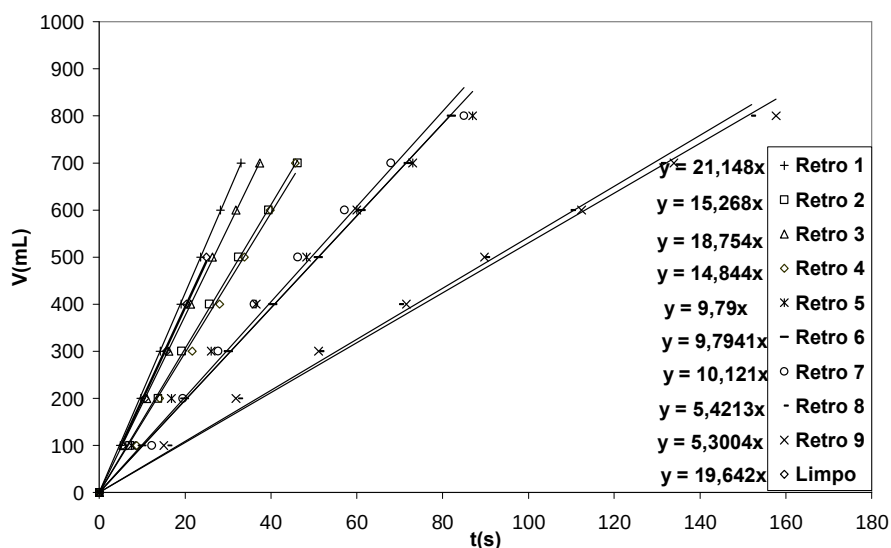
A Tabela 8 apresenta os resultados de turbidez residual média para as condições experimentais seguintes:

Tabela 8: Turbidez residual pelo mecanismo tangencial

SST (mg/L)	TOG (mg/L)	Turbidez residual média (NTU)
250	20	92
250	100	0,4
250	180	2,3
500	20	3,1
500	100	1,4
500	180	2,6
1000	20	0,96
1000	100	0,85
1000	180	0,9

• **Avaliação da regeneração do meio filtrante pelo mecanismo tangencial**

A Figura 49 representa as curvas experimentais de volume de filtrado versus tempo, sob pressão constante, para avaliar o grau de regeneração do meio filtrante por retrolavagem, após ensaios de filtração pelo mecanismo tangencial.

**Figura 49: Comparativo das retrolavagens pelo mecanismo tangencial**

A Figura 49 indica que as retrolavagens neste tipo de mecanismo não apresentaram efeito regenerativo satisfatório. Nota-se pelo espalhamento das curvas que a queda de vazão foi considerável, resultando em 5,3 mL/s após a “Retro 9”, enquanto que para o meio filtrante limpo a vazão obtida foi 19,62 mL/s. Além disto, a Figura 50 vem demonstrar que a possível razão para este declínio está relacionada a experimentos onde o TOG está incorporado a altas

concentrações de sólidos. Somado ao intenso campo de mistura presente neste mecanismo, a Figura 50 entra em concordância com a hipótese descrita por Yang (2007).

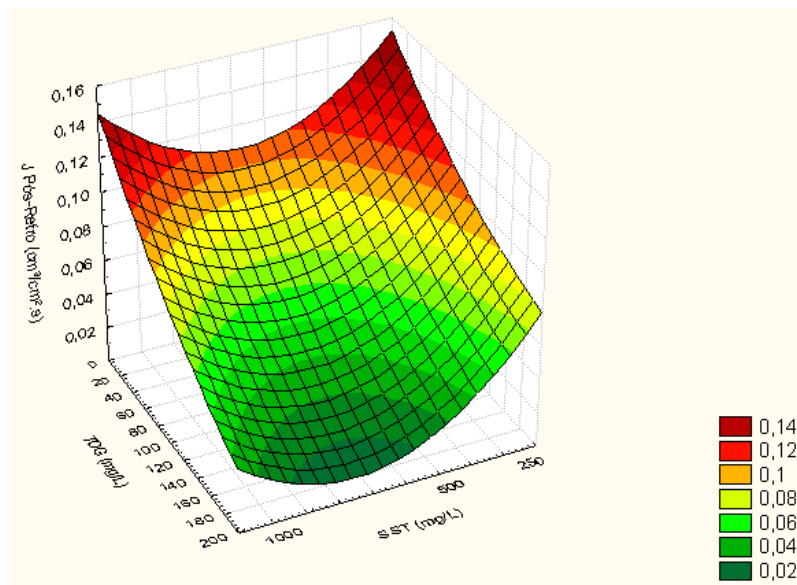


Figura 50: Efeito do TOG e do SST na regeneração do mecanismo tangencial

4.2.3. Filtração a vácuo sob ultrassom

Experimentos semelhantes foram desenvolvidos utilizando-se a filtração a vácuo sob ultrassom, cujos resultados são mostrados nas Figuras 51 a 56.

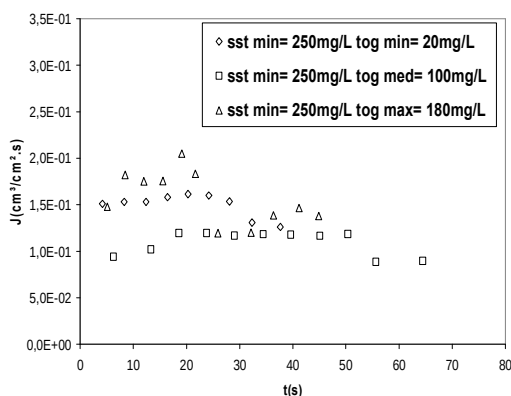


Figura 51: Fluxo de filtrado *versus* tempo na filtração a vácuo com ultrassom para 3 níveis de TOG; SST=250 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

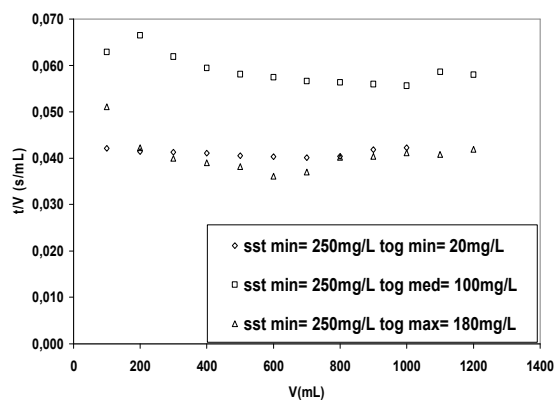


Figura 52: Curva de filtração tipo Darcy na filtração a vácuo com ultrassom para 3 níveis de TOG; SST=250 mg/L; $\Delta P=690$ mmHg

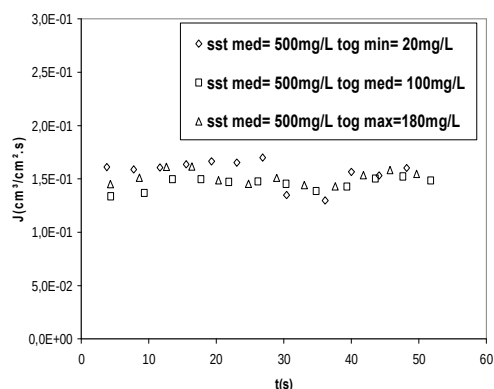


Figura 53: Fluxo de filtrado *versus* tempo na filtração a vácuo com ultrassom para 3 níveis de TOG; SST=500 mg/L; ΔP =690 mmHg

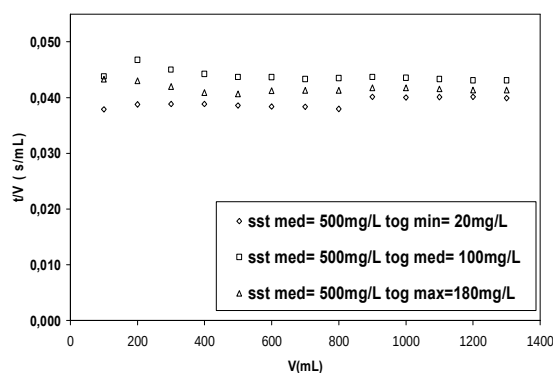


Figura 54: Curva de filtração tipo Darcy na filtração a vácuo com ultrassom para 3 níveis de TOG; SST=500 mg/L; ΔP =690 mmHg

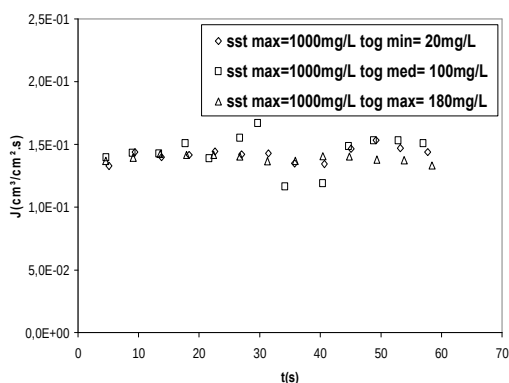


Figura 55: Fluxo de filtrado *versus* tempo na filtração a vácuo com ultrassom para 3 níveis de TOG; SST=1000 mg/L; ΔP =690 mmHg

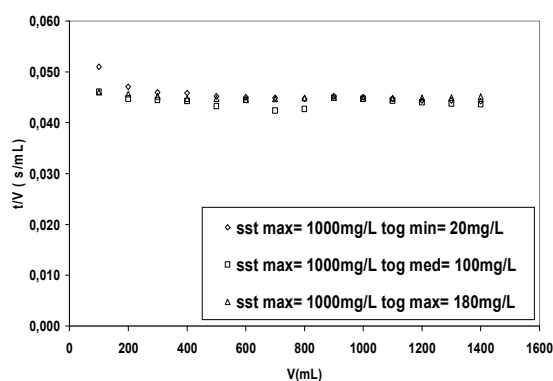


Figura 56: Curva de filtração tipo Darcy na filtração a vácuo com ultrassom para 3 níveis de TOG; SST=1000 mg/L; ΔP =690 mmHg

A sonicação do meio provoca um efeito claramente identificável mediante observação das Figuras 51 a 56. Um fato relevante é o maior fluxo de filtrado em relação aos demais mecanismos de filtração estudados, porém o que mais se destaca é a manutenção do fluxo de filtrado ao longo do período de operação do filtro. De acordo com Lim & Bai (2003), a energia oriunda da cavitação ajuda a desprender a torta do meio filtrante e deixa os canais mais livres para a permeação do solvente.

As curvas de filtração tipo Darcy revelam que as resistências à filtração (relacionadas às inclinações das tangentes às curvas dos respectivos gráficos à direita em cada par) se mantêm praticamente constantes ou sofrem leve queda.

A filtração de suspensões floculadas geradas a partir do tratamento físico-químico de água produzida sintética mostrou-se coerente com os resultados obtidos por Lim e Bai (2003) e Tuori (1996), apresentando-se o mecanismo por ondas ultrassônicas superior aos demais.

Observa-se na Figura 57, que este mecanismo apresentou uma superfície em formato de sela, exibindo duas regiões de máximo. A priori, não há uma explicação com fundamentação teórica sobre o fato. Provavelmente, essa curvatura não tenha significado de mínimo, levando-se em conta a incerteza implícita nos resultados experimentais.

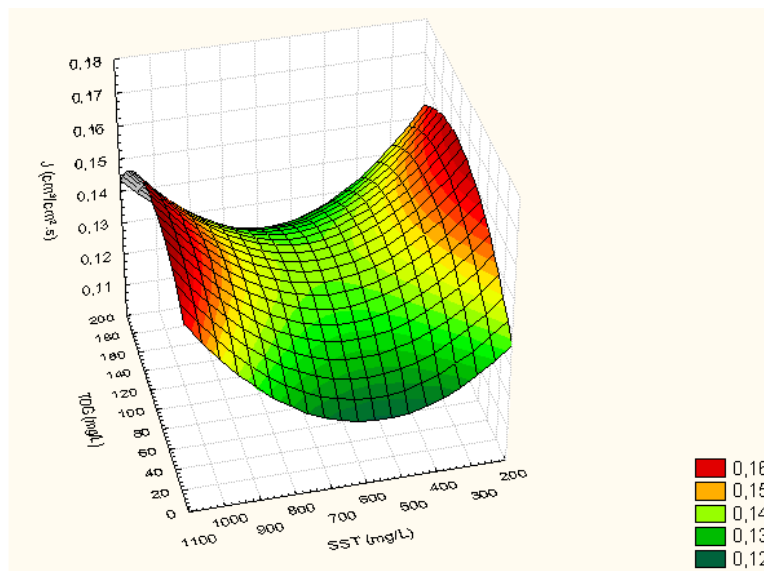


Figura 57: Efeito do TOG e SST no fluxo de filtrado pelo mecanismo ultrassom

A Tabela 9 apresenta os resultados de turbidez residual média para os experimentos executados neste mecanismo. Destaque para a turbidez de 1,64 NTU obtida em condições máximas de SST e TOG. A Figura 58 exibe o aspecto desta amostra.

Tabela 9: Turbidez residual pelo mecanismo ultrassom

SST (mg/L)	TOG (mg/L)	Turbidez residual média (NTU)
250	20	87,5
250	100	94,6
250	180	4,24
500	20	2,5
500	100	2,6
500	180	2,2
1000	20	76,1
1000	100	2,08
1000	180	1,64



Figura 58: Amostras de filtrado produzidas pelo mecanismo ultrassom

Este resultado é sem dúvidas o mais importante, pois vem validar o objetivo do estudo que contempla o aumento do desempenho do sistema filtrante quando o mesmo é submetido a um campo ultrassônico, neste caso com a frequência de 40 kHz.

- **Avaliação da regeneração do meio filtrante pelo mecanismo ultrassom**

As retrolavagens do meio filtrante por este mecanismo apresentaram bons resultados visto que (Figura 59) a vazão se manteve praticamente constante, apresentando suave queda ao final.

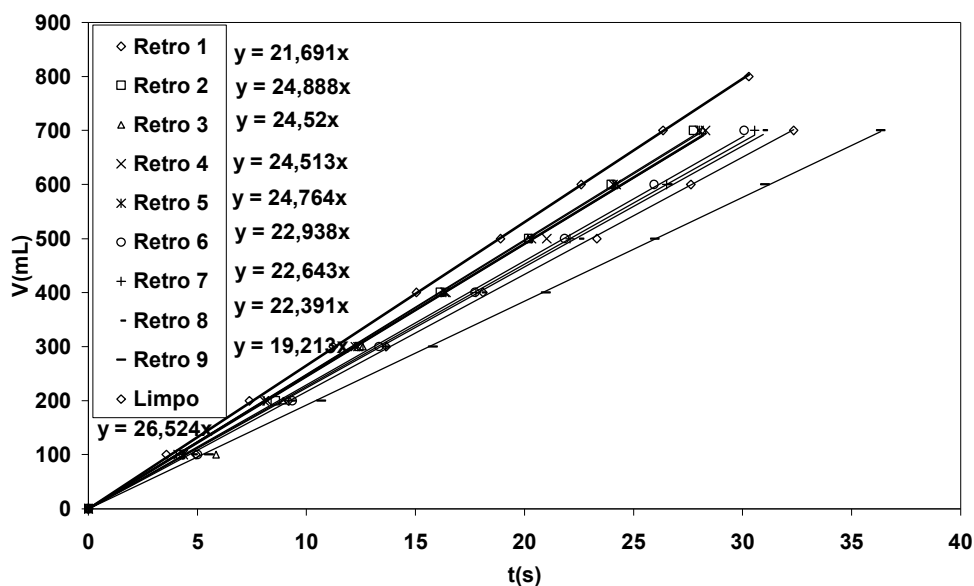


Figura 59: Comparativo das retrolavagens pelo mecanismo ultrassom

Além disto, como explicado anteriormente, a Figura 59 comprova a regeneração da vazão de filtrado na maior parte dos experimentos e a utilidade do ultrassom na regeneração do meio filtrante após a filtração de suspensões com alto teor de TOG e SST.

De acordo com Muthukumaran et al. (2004), que realizaram estudos de filtração de efluentes de laticínios assistida por ultrassom, a regeneração bem sucedida neste tipo de mecanismo ocorre devido ao efeito de desalojamento de partículas da superfície filtrante. Ele explica que a cavitação pode provocar a ruptura da torta, o que facilita o fluxo de água após a retrolavagem sonicada. Kobayashi et al. (2003) também cita em seu trabalho que a sonicação em meio aquoso aumenta a permeabilidade do meio filtrante.

Shu et al. (2007) em estudos de desmulsificação de efluentes em meios filtrantes cerâmicos, testou quatro métodos de regeneração (entre eles: retrolavagem com e sem ultrassom). Comprovou, pois, que a regeneração assistida por ultrassom é mais eficiente uma vez que promove a remoção de partículas da superfície. No entanto, acrescenta que ainda melhor que esta técnica é a regeneração ultrassônica com agente químico, devido à desobstrução dos poros internos do filtro.

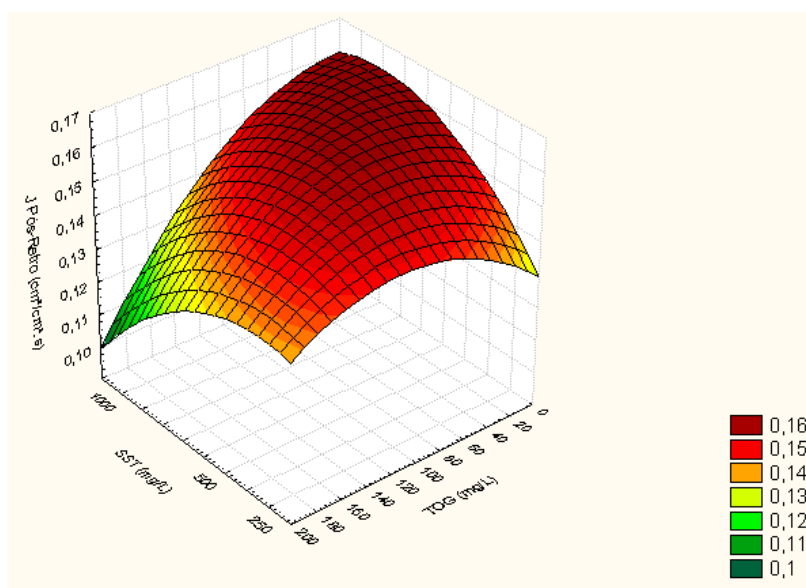


Figura 60: Efeito do TOG e SST na regeneração pelo mecanismo ultrassom

Confirma-se, portanto a partir da extensa faixa escura da Figura 60 que a vazão se manteve constante em boa parte dos experimentos, indicando elevada capacidade regenerativa pelo ultrassom, como descrito por Shu et al. (2007).

4.2.4. Comparativo dos mecanismos quanto à remoção de TOG e turbidez

Percebe-se, a partir da Figura 61, que os mecanismos convencional e ultrassônico produziram os melhores resultados quanto à remoção de TOG da água produzida sintética.

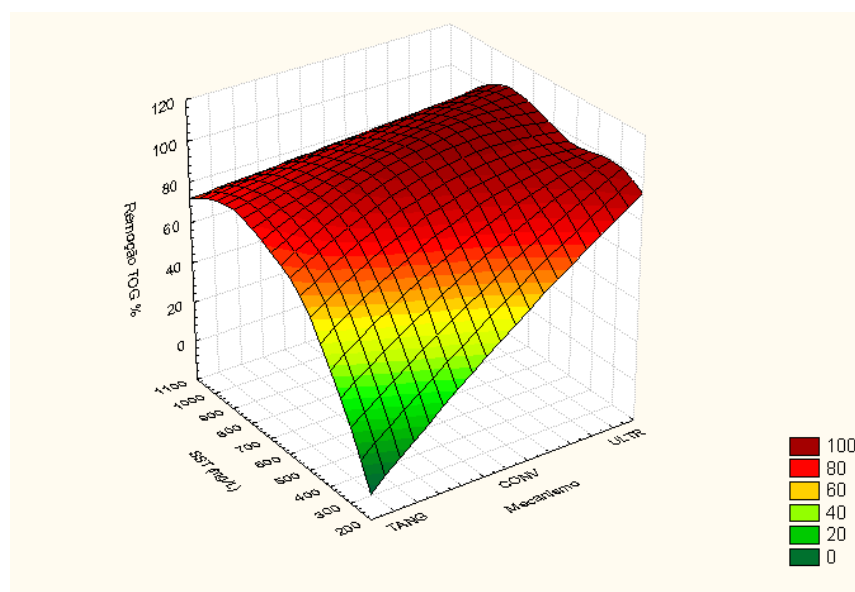


Figura 61: Percentual de Remoção de TOG pelos 3 mecanismos

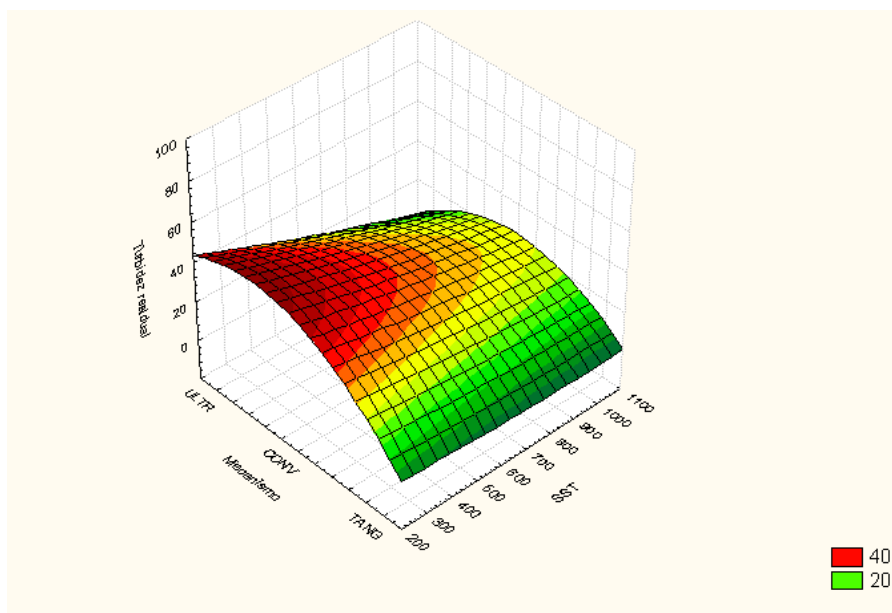
Para investigar mais a fundo os métodos de tratamento (mecanismos) quanto à remoção do TOG, foi utilizado o recurso de análise de variância (ANOVA), a fim de concluir se os mecanismos empregados são ou não significativamente diferentes entre si. Para tal estudo, foi realizado no programa *Statistics* uma análise do tipo fatorial e em seguida o teste Fisher. Os resultados produzidos pela análise encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados produzidos pela ANOVA para remoção de TOG

Grupo Fisher	Mecanismo	SST (mg/L)	Média de Remoção de TOG %
a	ULTR	500	96,50
a	CONV	500	92,17
a	ULTR	1000	91,40
a	ULTR	250	90,83
b	CONV	1000	86,33
b	TANG	1000	80,03
b	TANG	500	67,20
b	CONV	250	55,83
c	TANG	250	15,50

Completando a análise, o teste Fisher comparou e produziu os resultados de todas as combinações de experimentos executadas pelos 3 mecanismos propostos. Na Tabela 10, observa-se que as 4 médias, correspondentes ao grupo Fisher “a”, por exemplo, não diferem significativamente entre si e por isto foram classificadas pela ANOVA como um mesmo grupo.

Além disto, nota-se que o mecanismo de ultrassom se apresentou superior aos demais em todas as condições experimentais, com médias de remoção acima de 90%. Por conseguinte, classifica-se o grupo “b” como a segunda melhor combinação experimental para remoção de TOG e o “c” como a terceira. Tomando como base esta análise, fica claro o baixo desempenho do mecanismo tangencial na remoção desse parâmetro.

**Figura 62: Turbidez residual dos três mecanismos**

A Figura 62 ratifica que os mecanismos convencional e ultrassônico produziram filtrados com turbidez mais elevada. Isto é perfeitamente compreendido se for levado em conta a natureza do movimento relativo partícula-meio filtrante e o efeito do campo ultrassônico.

Na filtração convencional a partícula colide perpendicularmente com a superfície do meio filtrante. Com relação ao efeito ultrassônico, de acordo com Vadootker (2009), a vibração causada pelo campo ondulatório pode acomodar melhor as partículas finas nos poros, permitindo que as mesmas atravessem o meio filtrante com maior intensidade que no convencional. Já no caso do mecanismo tangencial a partícula se aproxima obliquamente aos poros, dificultando a sua passagem através dos mesmos.

4.3. ENSAIOS COM AMOSTRAS REAIS

Após estudar amostras de água produzida sintetizadas em laboratório, foram analisados dois tipos de água real, coletadas na Estação de Bonsucesso e em Siririzinho, ambas em Sergipe. As características das águas produzidas utilizadas se encontram na Tabela 11.

Como o método iodométrico não gerou bons resultados na determinação de sulfeto na forma S^{2-} , provavelmente devido à interferência química prevista no SMEWW, a metodologia de cloração ao “*breakpoint*” foi empregada a fim de definir uma quantidade de sulfeto equivalente, conforme dados de Licona e Marques (2007) e Ribeiro e Marques (2008). Sendo assim, a demanda de cloro necessária à oxidação da amostra pôde ser estabelecida a partir do ponto de inflexão em destaque na Figura 63.

Tabela 11: Características das amostras de Bonsucesso e Siririzinho

Estação	TOG (mg/L)	Sulfeto equivalente (mg/L)	Salinidade (mg/L)	pH
Siririzinho (SZ)	615	33,69	236.69	6,7
Bonsucesso (BS)	30	28,06	64.49	6,2

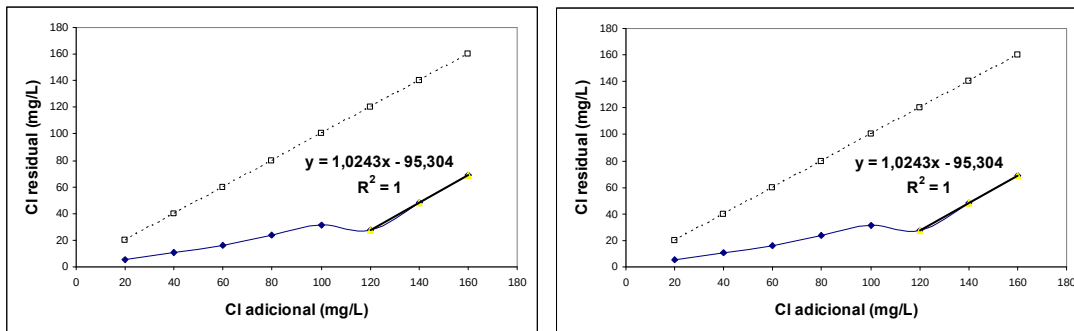


Figura 63: Demanda de Cloro da água de SZ e BS, respectivamente

A partir destes dados, as amostras puderam ser submetidas aos ensaios em teste de jarro e, posteriormente, ao tratamento físico-químico. A Figura 64 exhibe a amostra de Siririzinho *in natura*, o sobrenadante obtido do processo químico e o lodo gerado pela tratamento da água.

É sabido que o presente trabalho é parte integrante de um projeto mais amplo que visa o desenvolvimento de um processo completo de tratamento da água produzida. Nesse contexto, o tratamento e reuso ou destinação final do lodo citado no parágrafo anterior será objeto de estudos futuros.

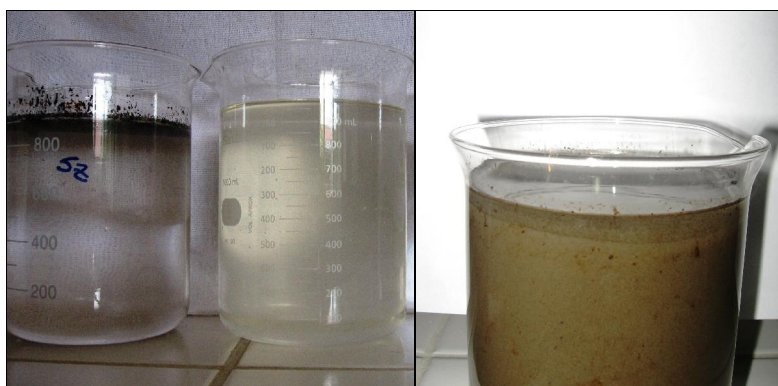


Figura 64: Amostra *in natura*, sobrenadante e resíduo do tratamento da água de SZ, respectivamente.

Os resultados produzidos pelos mecanismos de filtração estão representados nas Figuras 65 e 66, num gráfico J (fluxo de filtrado) *versus* t (tempo de filtração). Este tipo de gráfico, segundo Muthukumaran et al. (2004), permite avaliar o efeito do mecanismo de filtração frente ao estágio de utilização. Neste caso, durante o fluxo inicial de água limpa, fluxo de filtrado da água produzida e fluxo de água limpa pós -retrolavagem.

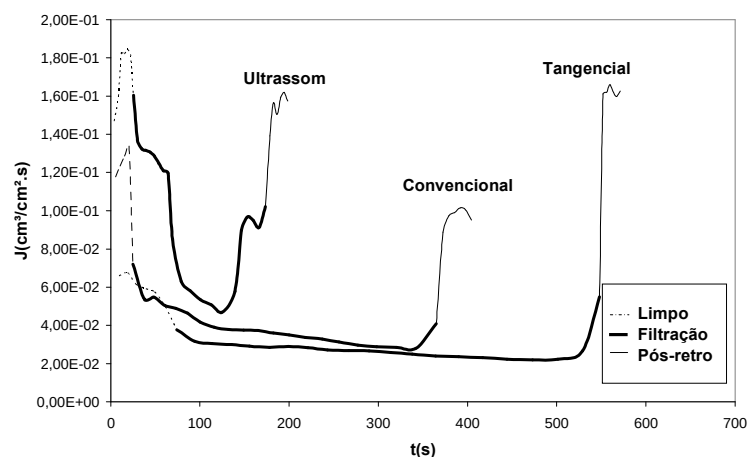


Figura 65: Comparativo dos mecanismos para a água de SZ.

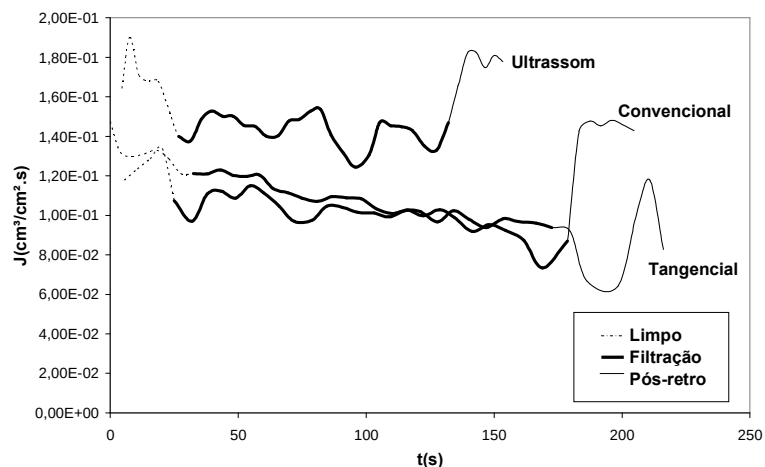


Figura 66: Comparativo dos mecanismos para a água de BS.

Percebe-se, em ambos os experimentos, que ocorre uma queda no fluxo durante a filtração e, em seguida, uma recuperação de fluxo em virtude da retrolavagem. De acordo com o mesmo autor e com a teoria de filtração, neste período ocorre a colmatação do meio filtrante devido à deposição de particulados sobre o filtro.

Os dados referentes à turbidez residual média de cada filtrado estão disponíveis na Tabela 12. Diferentemente da água produzida sintética, o mecanismo ultrassônico apresentou excelente desempenho na remoção de turbidez. A Figura 67 apresenta amostras procedentes dos tratamentos aplicados à água produzida de Siririzinho pelo mecanismo tangencial, convencional e ultrassom.

Tabela 12: Turbidez residual média das águas de Siririzinho e Bonsucesso

Estação	Mecanismo	Turbidez residual média (NTU)
Siririzinho	Tangencial	2,60
	Convencional	1,47
	Ultrassom	1,26
Bonsucesso	Tangencial	0,90
	Convencional	1,11
	Ultrassom	0,70

**Figura 67: Amostras tratadas da água produzida de SZ.**

Os valores do pH dos efluentes resultantes do tratamento físico químico das águas produzidas de SZ e BS foram 7,3 e 7,4 respectivamente. A análise de TOG também foi realizada, no entanto os resultados indicaram valores inferiores ao limite de detecção do método, o que sugere alta eficiência na remoção de óleo pelos tratamentos empregados.

Por fim, ressalta-se que as determinações de sólidos suspensos totais no filtrado foram realizadas em todos os experimentos envolvendo água produzida, tanto em matriz sintética quanto real. No entanto, as massas obtidas foram muito próximas ao limite de sensibilidade da balança. Desse modo, optou-se por medir o parâmetro turbidez com alternativa para qualificar as amostras de filtrado, atendendo perfeitamente aos propósitos da pesquisa.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a realização deste trabalho foram desenvolvidas várias atividades experimentais visando atingir aos objetivos propostos. Estas atividades se iniciaram em Agosto de 2008 e foram finalizadas em Janeiro de 2009.

Os resultados dos ensaios que mais se destacaram foram aqueles envolvendo o filtro cerâmico imerso num meio sob a influência de um campo ultrassônico com frequência de 40 kHz. O comportamento observado em relação aos mais altos fluxos de filtrado e à sua manutenção ao longo do tempo motiva a continuação da pesquisa no intuito de desenvolver um sistema de filtração adequado para aplicação em escala industrial, resultando em uma tecnologia inovadora neste ramo.

Por outro lado, experimentos realizados com suspensões aquosas de carbonato de cálcio mostraram que o campo ultrassônico influencia negativamente no fluxo de filtrado, em decorrência do aumento da resistência à filtração. Provavelmente, isto se deve à penetração de partículas nos interstícios do meio poroso. Tal mecanismo mostrou-se menos eficaz que a filtração a vácuo convencional e a filtração a vácuo com alimentação tangencial.

Isto quer dizer que o tipo de partícula tem grande influência sobre o desempenho da filtração ultrassônica, fato este que precisa ser melhor investigado, inclusive variando-se a frequência do campo.

O problema da colmatação no meio filtrante ainda é um dos aspectos limitantes em operações deste tipo. Neste trabalho foi avaliado seu efeito no fluxo do permeado, verificando-se que o mesmo diminui consideravelmente na fase inicial da filtração. Também foi possível constatar que o fluxo de permeado depende diretamente de vários fatores como: mecanismo de filtração empregado, presença de ondas ultrassônicas e das condições do efluente a ser filtrado.

Seguindo-se a indicação de alguns autores, os quais afirmaram que as ondas ultrassônicas minimizariam a colmatação, melhorando a taxa de filtração e prolongando o tempo de campanha do meio filtrante, um banho ultrassônico foi acoplado ao sistema filtrante, porém os resultados com a filtração de suspensão de CaCO_3 contrariaram essa expectativa, justificando a necessidade de estudos futuros com o intuito de melhor explicar esse fenômeno. Por outro lado, o modelo de Silva e Marques (2007) apresentou boa concordância com os resultados experimentais das suspensões de CaCO_3 , revelando-se uma ótima ferramenta na predição do comportamento do fluxo de filtrado, principalmente em relação ao mecanismo ultrassônico.

Já a filtração de suspensões floculadas obtidas no tratamento da água produzida sintética contendo óleos e graxas, foi favorecida pelo campo ultrassônico. Os fluxos de filtrado se mantiveram aproximadamente constantes, ao contrário do que ocorreu nos demais mecanismos. Provavelmente, a sonicação diminui a compressibilidade da torta e/ou facilita a permeação do líquido.

Na maioria dos casos estudados, o teor de óleos e graxas prejudicou a filtração. A provável causa disto é a formação de lamas compostas por óleos e partículas suspensas, as quais colmatam mais facilmente a superfície do meio filtrante. No entanto, o tratamento físico-químico aplicado à água produzida sintética e real produziram permeados de boa qualidade, apresentando em sua maioria níveis de remoção de TOG e de sólidos suspensos muito elevados.

Através da análise de variância (ANOVA), foi possível comprovar que o mecanismo ultrassônico apresentou-se superior aos demais, com taxas de remoção de TOG acima de 90%. Somado a isto destaca-se a elevada capacidade de regeneração do meio filtrante, mesmo após a filtração de suspensões com altos TOG e SST.

Diferentemente da água produzida sintética o mecanismo ultrassônico apresentou excelente desempenho na filtração das águas produzidas de BS e SZ, gerando filtrados com turbidez de apenas 0,70 e 1,26 NTU, respectivamente. Neste caso, o tratamento da amostra real produziu resultados bem melhores que os gerados com a utilização de amostras sintéticas.

O uso do ultrassom na filtração revelou-se bastante estimulante, visto que os resultados obtidos, de maneira geral, conferem ao mesmo grande potencial para aplicação no tratamento da água produzida e na regeneração de filtros, prolongando o tempo de campanha dos mesmos e aumentando suas taxas de filtração. Contudo, este processo de tratamento ainda carece de estudos adicionais, a fim de desenvolver uma técnica completa e competitiva frente aos demais processos existentes no mercado.

A seguir são apresentados alguns tópicos para continuidade desta pesquisa, que, sem dúvida, irão contribuir para melhorar o conhecimento acerca desta técnica e permitir o *scale-up* do processo.

Quanto ao meio filtrante:

- Testar outros tipos de materiais filtrantes incluindo granulares, a fim de desenvolver um sistema com maiores fluxos de filtrado e melhor efeito regenerativo.
- Efetuar ensaios com outros tipos de suspensões e/ou sistemas coloidais, visando avaliar a capacidade de filtração quanto à qualidade do filtrado.

Quanto ao sistema de retrolavagem:

- Testar outras variações de volume e/ou agentes de limpeza química visando atingir o máximo da capacidade regenerativa do meio filtrante.
- Fazer uma análise de benefício-custo, de modo a verificar a viabilidade do processo ultrassônico.

Quanto aos mecanismos de filtração:

- Testar outras frequências de ultrassom dentro da faixa de limpeza indicada pela literatura.
- Executar ensaios de maior tempo de duração com coletas de filtrado em tempos diferentes, a fim de verificar se a qualidade do permeado permanece constante e até quando a capacidade de filtração do meio filtrante permanece suficientemente alta.
- Validar o modelo de Silva e Marques (2007) para as filtrações de água produzida, indicando a necessidade de ajustes, caso necessário.

REFERÊNCIAS

ABDEL-REHIM, L.; ABDEL-REHIM, H.; MONI, R. C. Correlação entre Metodologias de determinação de óleos e graxas em água produzida em unidade offshore. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2006.

ANVISA. Portaria n.º 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Disponível em: <www.anvisa.gov.br/legis/portarias/518_04.htm>. Acesso em: 03 jan. 2009.

ARAÚJO FILHO, A. L. Método de avaliação de formações: importância dos estudos litológicos aplicados a campos marginais. In: I Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. Rio Grande do Norte, 2006.

ARNOT, T.C.; FIELD, R.W.; KOLTUNIEWICZ, A.B. Cross-flow and dead-end microfiltration of oily-water emulsions: part II. Mechanisms and modeling of flux decline. *Journal of Membrane Science*. v.169, p. 1-15, 2000.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E.; *Planejamento e Otimização de Experimentos*. 2ª ed. São Paulo: Editora Unicamp, 1996.

BLACKSTONE-NEY ULTRASONIC. *Ultrasonic cleaning: fundamental theory and application*, [s. d.]. Disponível on line em: http://www.blackstone-ney.com/04.tech_papers.php. Consulta em 15 de março de 2008.

BRAGA, W. M.; GONÇALVES, R. F. Relação entre a reologia dos filtrados e a resistência específica à filtração de lodos de ETE's condicionados com polímeros. In: IV Seminário Estadual de Saneamento e Meio Ambiente; Espírito Santo, 2003.

CAMPOS, A. L. O.; RABELO, T.S. et al. Produção mais limpa na indústria de petróleo: o caso da água produzida no campo de Carmópolis/SE. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

CARVALHO, M. S.; CLARISSE, M. D.; CARDOSO, A. M.; BARBOSA, C. C. R.; BARBOSA, L. C. F.; LUCAS, E. F. Aplicação de copolímeros esféricos e porosos no tratamento de água produzida. In: 1º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Rio Grande do Norte, 2001.

CHANG, I.; CHUNG, C.; HAN, S. Treatment of oily wastewater by ultrafiltration and ozone. *Desalination*. v. 133, p. 225-232, 2001.

CHEN, D.; WEAVERS, L. K.; WALKER, H.W. Ultrasonic control of ceramic fouling by particles: effect of ultrasonic factors. *Ultrasonics Sonochemistry*. v. 13, p. 379-387, 2006.

CLESCERI et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington: APHA/AWWA/WEF, 1988.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE- CONAMA. Resolução Nº 357, de 17 de Março De 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE- CONAMA. Resolução Nº 393, de 08 de Agosto De 2007.

COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. et al. *Chemical engineering: Particle technology and separation processes*. 4ed. v.2. Pergamon Press, 1991.

COUTINHO, R. C. C. Estudo da estabilidade de emulsões de água em petróleos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Rio de Janeiro, 2005.

ÇAKMAKCI, M.; KAYAALP, N.; KOYUNCU, I. Desalination of produced water from oil production fields by membrane process. *Desalination*. v. 222, p. 176-186, 2008.

D'ÁVILA, J. S.; SAMPAIO FILHO, R. *Sistemas particulados*. Aracaju: UFS, 1980.

DITTLER, A. et al., Patchy cleaning of rigid gas filters—transient regeneration phenomena comparison of modelling to experiment. *Powder Technology*. v. 124, p. 55-66, 2002.

EIA- Energy Information Administration – Official Energy Statistics from the U.S. Government. Report DOE/EIA-0484. Disponível on line em: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/oil.html>. Consulta em 5 de julho de 2008.

EKINS, P.; VANNER, R.; FIREBRACE, J. Zero emissions of oil in water from offshore oil and gas installations: economic and environmental implications. *Journal of Cleaner Production*. v. 15, p. 1302-1315, 2007.

FILGUEIRAS, N. G. T. Modelagem, análise e controle de um processo de separação óleo/água. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Rio de Janeiro, 2005.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W. et. al. Princípios das operações unitárias. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. Comunicação Técnica elaborada para a 4a Edição do Livro de Tratamento de Minérios. 38p., 2004.

GABARDO, I. T., Caracterização química e toxicológica da água produzida descartada em plataformas de óleo e gás na costa brasileira e seu comportamento dispersivo no mar. Tese de Doutorado em Química – 261p. Rio Grande do Norte, 2007.

GOMIDE, R. *Operações unitárias: separações mecânicas*. 3v. São Paulo: [s. n.], 1980.

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

HESSONIC- High Energy Sound Supersonics. Fundamentals of Ultrasonic Cleaning. 2005. Disponível on line em: <http://www.hessonics.com/guide/index.html>. Consulta em 15 de junho de 2008.

JENDERKA, K. V.; KOCH, C. Investigation of spatial distribution of sound field parameters in ultrasound cleaning baths under the influence of cavitation. *Ultrasonics*. v. 44, p. 401-406, 2006.

JENA, A.; GUPTA, K. Characterization of pore structure of filter media. *Fluid Particle Separation Journal*. v. 4, p. 227-241, 2004.

JENA, A.; GUPTA, K. Advanced technology for evaluation of pore structure characteristics of filtration media to optimize their design and performance. *Filtration*, 2002.

KIM, H.; CHOE, J.; TAKIZAKA, S. Comparison of initial filtration resistance by pretreatment processes in the nanofiltration for drinking water treatment. *Separation and Purification Technology*. v. 56, p. 354-362, 2007.

KYLLÖNEN, H.; PIKONEN, P. et al. Experimental aspects of ultrasonically enhanced cross-flow membrane filtration of industrial wastewater. *Ultrasonics Sonochemistry*. v. 13, p.295-302, 2006.

KOBAYASHI, T.; KOBAYASHI T.; HOSAKA, Y.; FUJII, N. Ultrasound-enhanced membrane-cleaning processes applied water treatments: influence of sonic frequency on filtration treatments. *Ultrasonics*. v. 41, p. 185-190, 2003.

LAPOLLI, F. R.; LEON, A.C; TAVARES, C. R. G; CAMPOS, J. R. Tratamento de águas residuárias através de membranas. In: XXI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 1998

LICONA, K. P. M; MARQUES, J. J. Remoção de sulfetos da água produzida na exploração de petróleo por via oxidativa. Monografia de Graduação em Engenharia Química. Sergipe, 2007.

LIM, A. L.; BAI, R. Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater. *Journal of Membrane Science*. v. 216, p. 279–290, 2003.

LAMMINEM, M. O.; HAROLD, W. W.; WEAVERS, L. K. Cleaning of particle-fouled membranes during cross-flow filtration using an embedded ultrasonic. *Journal of Membrane Science*. v. 283, p. 225-232, 2006.

MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. Rio de Janeiro: E-Papers, 2002. [Primeira edição eletrônica].

MCCABE, W. L.; SMITH, J. L.; HARRIOTT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 7.ed. New York: McGraw Hill, 2003.

MELO, R. C. L.; GOMES, L. A. Q. M. Making rigless completions possible and economical in a very mature field in the northeast of Brazil. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2006.

METCALF & EDDY, INC. *Wastewater engineering*. 3 ed. Mc Graw-Hill, 2003.

MILANE, E. J.; ARAÚJO, L. M. *Recursos minerais energéticos: petróleo*. Cap X. p. 1-12. 2003.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MUELLER, J.; CEN, Y.; DAVIS, R. H. Crossflow microfiltration of oily water. *Journal of Membrane Science*. v. 129, p. 221-235, 1997.

MUTHUKUMARAN, S.; KENTISH, S. E.; ASHOKKUMAR, M.; STEVENS, G. W. Mechanisms for the ultrasonic enhancement of dairy whey ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*. v. 258, p. 106-114, 2005.

MUTHUKUMARAN, S.; KENTISH, S. E.; ASHOKKUMAR, M.; STEVENS, G. W.; MAWSON, R. The application of ultrasound to dairy ultrafiltration: The influence of operating conditions. *Journal of Food Engineering*. v. 81, p. 364-373, 2007.

MUTHUKUMARAN, S; YANG, K. et al. The use of ultrasonic cleaning for ultrafiltration membranes in the dairy industry. *Separation and Purification Technology*. v. 39, p. 99-107, 2004.

NEIS, U.; BLUME, T. The effect of ultrasound on particulate matter, especially micro-organisms in complex water and waste water media. In: *Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century*. v. 2, p. 1126-1134, 2002. Disponível on line em: <http://ultrawaves.de/downloads/Ultrawaves-Effect-of-Ultrasound-on-Particulate-Matter.pdf>. Consulta em 10 de Janeiro de 2009.

NICOLAISEN, B. Develops in membrane technology for water treatment. *Desalination*. v.153, p. 355-360, 2002.

OGP, 2005. The International Association of Oil & Gas Producers. Fate and effects of naturally occurring substances in produced water on marine environment. Report 364. February, 2005, 36p.

OGP, 2006. OGP Publishes new environmental report. November, 2006. Disponível on line em: <http://www.ogp.org.uk/>. Consulta em 15 de Julho de 2008.

OLIVEIRA, R. C. G.; OLIVEIRA, M. C. K.; Remoção de contaminantes tóxicos dos efluentes líquidos oriundos da atividade de produção de petróleo no mar. Bol. Tec. PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 43 (2): 129-136, abr/jun. 2000.

PAN, Y.; WANG, W.; WANG, T.; YAO, P. Fabrication of carbon membrane and microfiltration of oil-in-water emulsion: an investigation on fouling mechanisms. *Separation and Purification Technology*. v. 57, p. 388-393, 2007.

PELEGRI, D.C. Microfiltração tangencial de efluente doméstico após tratamento biológico. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental. 131p. Santa Catarina, 2004.

PENG, H., TREMBLAY, A. Y., VEINOT, D. E. The use of backflushed coalescing microfiltration as a pretreatment for the ultrafiltration of bilge water. *Desalination*. v. 181, p. 109-120, 2005.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. *Perry's chemical engineers' handbook*. New York: McGraw-Hill, 1999.

REVISTA MEIO FILTRANTE. Introdução à filtração de cervejas: os auxiliares filtrantes. Ano III, número 10, jul / set de 2004. Disponível on line em: <http://www.meiofiltrante.com.br/materias.asp?action=detalhe&id=17>. Consulta em 06 de Julho de 2008.

RIBEIRO, F.M.; MARQUES, J.J. Tratamento do resíduo do processo de remoção de sulfeto da água produzida na exploração de petróleo. Monografia de Graduação em Engenharia Química. Sergipe, 2008.

SANDOVAL, L. F. et al. Efeito da sonicação nas propriedades de argilas em suspensão aquosa. In: 29º Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 2006.

SANTOS, A.C.; CRUZ, S. M.; SOLETTI, J. I. et al., Tratamento de efluentes sintéticos da indústria de petróleo utilizando o método da eletroflotação. In: 4º PDPETRO, 2007.

SHU, L.; XING, W.; XU, N. Effect of Ultrasound on the Treatment of Emulsification Wastewater by Ceramic Membranes. *Chin. J. Chemical Engineering*. v. 15, p. 855-860, 2007.

SCHUHLLI, J. B. Previsão de equilíbrio líquido vapor de misturas contendo água-hidrocarboneto-sal. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, C. R. R., Curso de especialização em gerenciamento e tecnologias ambientais na indústria: Água produzida na extração do petróleo, Salvador- BA, 2000.

SILVA, A. S.; MARQUES, J. J. Estudo sobre a função porosidade no processo de filtração. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Sergipe, 2007.

SONDHI, R.; BHAVE, R. Role of backpulsing in fouling minimization in crossflow filtration with ceramic membranes. *Journal of Membrane Science*. v.186, p. 41-52, 2001.

SOUTO, K. M.; VILAR, M. A.; LIRA, H. L.; COSTA, A. C. F. M.; GAMA, L. Estudo sobre o tempo de deposição de membranas de TiO_2 para tratamento de efluentes de petróleo. In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 2004.

STEVENSON, D.G. Flow and filtration through granular media: The effect of grain and particle size dispersion. *Wat. Res.* v.31, n.2, p.310-322,1997.

STEPHENSON, M. T. Component of Produced Water ; A Compilation of industry Studies . SPE paper N° 23313. 1992.

SVAROVSKY, L. *Solid-Liquid-Separation*. 4.ed. Butterworth Heinemann, 2000.

THOMAS, J. E. et al. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2001.

TRAN, T.; GRAY, S.; BOLTO, B. et al. Ultrasound enhancement of microfiltration performace for natural organic matter removal. *Organic Geochemistry*. v. 38, p. 1091-1096, 2007.

TUORI, T. Filtration technique enhanced by electro-acoustic methods. *The Journal of the Acoustical Society of America*. v. 100, n. 4, p. 2775, 1996.

VADDOOTKER, A.R. *Ultrasound assisted filtration system*. US Patent N° 6221255. 2001. Disponível on line em: <http://www.patentstorm.us/patents/6221255/description.html>. Consulta em 03 de Janeiro de 2009.

VIDAL, C.M.S. Avaliação da microfiltração tangencial como alternativa de tratamento avançado de efluente gerado em sistema de tratamento de esgoto sanitário constituído de reator UASB (upflow anaerobic sludge blanket) seguido de tanque de aeração. Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento. São Paulo, 2006.

VIEIRA, D.S.; CAMMAROTA, M.C.; CAMPORESE, E.F.S. Redução de contaminantes presentes na água de produção de petróleo. In: 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 2003.

WENTEN, I.G. Mechanisms and control of fouling in crossflow microfiltration. *Filtration and Separation*. Março, 1995.

YANG, C.L. Eletrochemical coagulation for oil water demulsification. *Separation and Purification Technology*. v. 54, p. 388-395, 2007.

APÊNDICE A – Resultados experimentais com suspensão de CaCO_3

Mecanismo tangencial ΔP 700 mmHg Filtro Limpo		
t(s)	V (mL)	t/v
0	0	0,0000
1	100	0,0100
3	200	0,0150
6	300	0,0200
9	400	0,0225
11	500	0,0220
14	600	0,0233
17	700	0,0243
19	800	0,0238
22	900	0,0244
24	1000	0,0240

C_{caco3} (m/v)	1,50%	
ΔP	700mmHg	
Mecanismo Tangencial		
t(s)	V (mL)	t/v
0	0	0,000
14	100	0,140
29	200	0,145

t(s)	V (mL)	t/v
46	300	0,153
63	400	0,158
82	500	0,164
100	600	0,167
120	700	0,171
130	800	0,163
152	900	0,169
173	1000	0,173
193	1100	0,175
217	1200	0,181
239	1300	0,184
263	1400	0,188
289	1500	0,193
306	1600	0,191
329	1700	0,194
352	1800	0,196
373	1900	0,196
397	2000	0,199
421	2100	0,200
446	2200	0,203
468	2300	0,203
485	2400	0,202
512	2500	0,205
538	2600	0,207
564	2700	0,209
589	2800	0,210
616	2900	0,212

t(s)	V (mL)	t/v
644	3000	0,215
670	3100	0,216
693	3200	0,217
714	3300	0,216
739	3400	0,217
763	3500	0,218
789	3600	0,219
815	3700	0,220
843	3800	0,222
869	3900	0,223
894	4000	0,224
925	4100	0,226
954	4200	0,227
981	4300	0,228
1009	4400	0,229
1036	4500	0,230
1061	4600	0,231
1087	4700	0,231
1114	4800	0,232
1143	4900	0,233
1173	5000	0,235
1201	5100	0,235
1228	5200	0,236
1258	5300	0,237
1282	5400	0,237
1312	5500	0,239

Mecanismo convencional s/ ultrassom ΔP 700mmHg Filtro: Limpo		
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
3,85	100	0,0385
8,76	200	0,0438
13,69	300	0,0456
18,66	400	0,0467
23,63	500	0,0473
28,32	600	0,0472
33,07	700	0,0472

C _{caco3} (m/v)	1,50%	
ΔP	700mmHg	
Mecanismo convencional s/ ultrassom		
t(s)	V (mL)	t/v
0	0	0
19	150	0,1267
35	250	0,1400
51	350	0,1457
67	450	0,1489
86	550	0,1564
106	650	0,1631
127	750	0,1693

149	850	0,1753
t(s)	V (mL)	t/v
171	950	0,1800
196	1050	0,1867
219	1150	0,1904
246	1250	0,1968
273	1350	0,2022
299	1450	0,2062
335	1550	0,2161
384	1650	0,2327
414	1750	0,2366
434	1850	0,2346
464	1950	0,2379
493	2050	0,2405
526	2150	0,2447
560	2250	0,2489
592	2350	0,2519
629	2450	0,2567
659	2550	0,2584
696	2650	0,2626
721	2750	0,2622
757	2850	0,2656
768	2950	0,2603
795	3050	0,2607
832	3200	0,2600
869	3300	0,2633
909	3400	0,2674
949	3500	0,2711
991	3600	0,2753
1030	3700	0,2784
1074	3800	0,2826

1117	3900	0,2864
t(s)	V (mL)	t/v
1160	4000	0,2900
1204	4100	0,2937
1249	4200	0,2974
1296	4300	0,3014
1339	4400	0,3043
1386	4500	0,3080
1434	4600	0,3117
1488	4700	0,3166
1534	4800	0,3196
1584	4900	0,3233
1636	5000	0,3272
1678	5100	0,3290
1728	5200	0,3323

Mecanismo convencional com ultrassom		
ΔP	700mmHg	
Filtro: Limpo		
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
3,57	100	0,0357
7,38	200	0,0369
11,23	300	0,0374
15,04	400	0,0376
18,91	500	0,0378
22,6	600	0,0377
26,35	700	0,0376
30,29	800	0,0379

C _{CaCO3} (m/v)	1,50%	
ΔP	700mmHg	
Mecanismo convencional c/ ultrassom		

t(s)	V (mL)	t/v
0	0	0
21	150	0,1400
44	250	0,1760

t(s)	V (mL)	t/v
71	350	0,2029
100	450	0,2222
138	550	0,2509
181	650	0,2785
228	750	0,3040
295	850	0,3471
334	950	0,3516
399	1050	0,3800
465	1150	0,4043
537	1250	0,4296
611	1350	0,4526
688	1450	0,4745
773	1550	0,4987
855	1650	0,5182
938	1750	0,5360
1032	1850	0,5578
1122	1950	0,5754
1232	2050	0,6010
1326	2150	0,6167
1428	2250	0,6347
1539	2350	0,6549
1642	2450	0,6702
1752	2550	0,6871
1867	2650	0,7045
1976	2750	0,7185
2094	2850	0,7347
2208	2950	0,7485
2283	3100	0,7365
2399	3200	0,7497

Pós-Retrolavagem V=2L	
t(s)	V filtrado(mL)
0	0
14	100
25	200
37	300

Pós-Retrolavagem V=4L	
t(s)	V filtrado(mL)
0	0
12	100
22	200
34	300

Pós-Retrolavagem V=6L	
t(s)	V filtrado(mL)
0	0
13	100
27	200
43	300

APÊNDICE B – Resultados experimentais com água produzida sintética

Mecanismo tangencial
 ΔP 670mmHg
 Filtro: Limpo

t(s)	V(mL)	t/V
5,51	100	0,0551
10,61	200	0,0531
15,64	300	0,0521
20,33	400	0,0508
24,98	500	0,0500
29,8	600	0,0497
34,51	700	0,0493

Mecanismo tangencial
 Filtro: Cerâmico
 ΔP 670mmHg
 S/ Reciclo

SST	MIN
TOG:	MIN

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
5,95	100	0,0595
12,39	200	0,0620

t(s)	V(mL)	t/V
19,57	300	0,0652
25,86	400	0,0647
32,51	500	0,0650
39,74	600	0,0662
47,01	700	0,0672
54,43	800	0,0680
62,8	900	0,0698
71,08	1000	0,0711
79,64	1100	0,0724
88,52	1200	0,0738
97,88	1300	0,0753
107,34	1400	0,0767

**PÓS -
 RETROLAVAGEM**
 V=2L

t(s)	V(mL)
0	0
4,9	100
9,73	200
14,2	300
19,02	400
23,64	500
28,23	600

t(s)	V(mL)
33,05	700

Mecanismo tangencial**Filtro: Cerâmico****ΔP 670mmHg****S/ Reciclo****SST MIN****TOG: MED**

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
6,36	100	0,0636
14,08	200	0,0704
21,95	300	0,0732
30,73	400	0,0768
40,45	500	0,0809
51,64	600	0,0861
63	700	0,0900
76	800	0,0950
92,48	900	0,1028
108,73	1000	0,1087
127,36	1100	0,1158
146	1200	0,1217
166	1300	0,1277
188	1400	0,1343
210	1500	0,1400

**PÓS
RETROLAVAGEM
V=2L**

t(s)	V(mL)
0	0
7,1	100
13,7	200
19,2	300
25,64	400
32,39	500
39,45	600
46,2	700

Mecanismo tangencial**Filtro: Cerâmico****ΔP 670mmHg****S/ Reciclo****SST MIN****TOG: MAX**

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
8,45	100	0,0845
16,29	200	0,0815
25,48	300	0,0849
35,38	400	0,0885
46,57	500	0,0931
58,6	600	0,0977
71	700	0,1014
84	800	0,1050
101,43	900	0,1127
120,45	1000	0,1205
139,36	1100	0,1267
159	1200	0,1325

t(s)	V(mL)	t/V
180	1300	0,1385
204,32	1400	0,1459
228,64	1500	0,1524
252,96	1600	0,1581
277,28	1700	0,1631
301,6	1800	0,1676
325,92	1900	0,1715
350,24	2000	0,1751
374,56	2100	0,1784
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
5,57	100	
11,14	200	
16,24	300	
21,33	400	
26,35	500	
31,83	600	
37,4	700	

Mecanismo tangencial

Filtro: Cerâmico

ΔP 670mmHg

S/ Reciclo

SST	MED
TOG:	MIN

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
9,64	100	0,0964
20,76	200	0,1038
32,45	300	0,1082
44,98	400	0,1125
58,57	500	0,1171
72	600	0,1200
86	700	0,1229
100	800	0,1250
114,92	900	0,1277
129,6	1000	0,1296
144,2	1100	0,1311
159,35	1200	0,1328
174	1300	0,1338
190	1400	0,1357
206	1500	0,1373
223	1600	0,1394
241,11	1700	0,1418
259,11	1800	0,1440
276,92	1900	0,1457
294	2000	0,1470
312	2100	0,1486
331	2200	0,1505

**PÓS -
RETROLAVAGEM**
V=2L

t(s)	V(mL)
0	0
8,69	100
14,04	200
21,66	300
28,07	400
33,82	500
39,82	600
45,66	700

Mecanismo tangencial**Filtro: Cerâmico****ΔP 670mmHg****S/ Reciclo****SST MED****TOG: MED**

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
7,54	100	0,0754
14,17	200	0,0709
20,8	300	0,0693
28,01	400	0,0700
35,89	500	0,0718
43,73	600	0,0729
52	700	0,0743
61	800	0,0763
72,2	900	0,0802
83,7	1000	0,0837
95,7	1100	0,0870
107,8	1200	0,0898

t(s)	V(mL)	t/V
120,67	1300	0,0928
134,31	1400	0,0959
148,09	1500	0,0987
161,62	1600	0,1010
175,28	1700	0,1031
189,67	1800	0,1054
203,67	1900	0,1072
218,67	2000	0,1093
234,67	2100	0,1117
250,67	2200	0,1139
266,67	2300	0,1159
282,67	2400	0,1178
297,67	2500	0,1191
314,67	2600	0,1210

**PÓS -
RETROLAVAGEM
V=2L**

t(s)	V(mL)
0	0
7,55	100
16,83	200
26,11	300
36,55	400
48,27	500
60	600
73	700
87	800

Mecanismo tangencial Filtro: Cerâmico ΔP 670mmHg S/ Reciclo SST MED TOG: MAX		
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
15,51	100	0,1551
30,92	200	0,1546
45,94	300	0,1531
61	400	0,1525
76	500	0,1520
91	600	0,1517
106	700	0,1514
122	800	0,1525
138	900	0,1533
154	1000	0,1540
170	1100	0,1545
186	1200	0,1550
202	1300	0,1554
218	1400	0,1557
234	1500	0,1560
251	1600	0,1569
268	1700	0,1576
285	1800	0,1583

t(s)	V(mL)	t/V
301	1900	0,1584
318	2000	0,1590
335	2100	0,1595
351	2200	0,1595
368	2300	0,1600
PÓS-RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
10,01	100	
19,91	200	
30,07	300	
40,38	400	
51,04	500	
61	600	
72	700	
82	800	

Mecanismo tangencial Filtro: Cerâmico ΔP 670mmHg S/ Reciclo SST MAX TOG: MIN		
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000

t(s)	V(mL)	t/V
23,64	100	0,2364
48,32	200	0,2416
72	300	0,2400
98	400	0,2450
124	500	0,2480
152	600	0,2533
178	700	0,2543
205	800	0,2563
233	900	0,2589
262	1000	0,2620
290	1100	0,2636
319	1200	0,2658
347	1300	0,2669
378	1400	0,2700
438	1500	0,2920
469	1600	0,2931
499	1700	0,2935
531	1800	0,2950
562	1900	0,2958
593	2000	0,2965
626	2100	0,2981
658	2200	0,2991
691	2300	0,3004
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	

t(s)	V(mL)
12,23	100
19,44	200
27,67	300
36,04	400
46,26	500
57,11	600
68	700
85	800

Mecanismo tangencial Filtro: Cerâmico ΔP 670mmHg S/ Reciclo		
SST	MAX	
TOG:	MED	
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
22,68	100	0,2268
45,4	200	0,2270
69	300	0,2300
92,5	400	0,2313
116,4	500	0,2328
140	600	0,2333
164	700	0,2343
188	800	0,2350
212,39	900	0,2360
236,26	1000	0,2363

t(s)	V(mL)	t/V
261	1100	0,2373
286	1200	0,2383
311	1300	0,2392
336	1400	0,2400
362	1500	0,2413
387	1600	0,2419
413,42	1700	0,2432
438,79	1800	0,2438
464	1900	0,2442
491	2000	0,2455
518	2100	0,2467
543	2200	0,2468
571	2300	0,2483
597	2400	0,2488
PÓS- RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
16,01	100	
32,48	200	
51,48	300	
70	400	
90	500	
110	600	
131	700	
152	800	

Mecanismo tangencial Filtro: Cerâmico ΔP 690mmHg S/ Reciclo		
SST	MAX	
TOG:	MAX	
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
24,7	100	0,2470
50,52	200	0,2526
77,73	300	0,2591
105,58	400	0,2640
133,8	500	0,2676
162,64	600	0,2711
191,27	700	0,2732
219,67	800	0,2746
249,84	900	0,2776
279,46	1000	0,2795
308,21	1100	0,2802
338,53	1200	0,2821
368,71	1300	0,2836
399,67	1400	0,2855
430,21	1500	0,2868
460,67	1600	0,2879
493,67	1700	0,2904
524,56	1800	0,2914
554,67	1900	0,2919
587,43	2000	0,2937
617,84	2100	0,2942
649,62	2200	0,2953

t(s)	V(mL)	t/V
681,75	2300	0,2964
711,97	2400	0,2967
744,9	2500	0,2980
776,07	2600	0,2985
807,95	2700	0,2992
841,17	2800	0,3004
873,48	2900	0,3012

**PÓS -
RETROLAVAGEM**
V=2L

t(s)	V(mL)
0	0
15,01	100
31,82	200
51,13	300
71,52	400
89,76	500
112,38	600
133,88	700
157,7	800

Mecanismo convencional s/ ultrassom

ΔP 670mmHg

Filtro: Limpo

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
3,85	100	0,0385

t(s)	V(mL)	t/V
8,76	200	0,0438
13,69	300	0,0456
18,66	400	0,0467
23,63	500	0,0473
28,32	600	0,0472
33,07	700	0,0472

Mecanismo convencional s/ ultrassom

Filtro: Cerâmico

ΔP 690mmHg

S/ Reciclo

SST	MIN
TOG:	MIN

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
4,7	100	0,0470
9,39	200	0,0470
14,11	300	0,0470
18,76	400	0,0469
23,64	500	0,0473
28,67	600	0,0478
33,48	700	0,0478
38,48	800	0,0481
43,46	900	0,0483
48,5	1000	0,0485
54,05	1100	0,0491
59,52	1200	0,0496
65,15	1300	0,0501

70,96	1400	0,0507
76,58	1500	0,0511
81,88	1600	0,0512
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
4,7	100	
9,34	200	
13,9	300	
16,82	400	
20,73	500	
24,64	600	
31,95	700	

Mecanismo convencional s/ ultrassom		
Filtro: Cerâmico		
ΔP 690mmHg		
S/ Reciclo		
SST	MIN	
TOG:	MED	
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
4,85	100	0,0485
9,92	200	0,0496
15,33	300	0,0511
21,11	400	0,0528

t(s)	V(mL)	t/V
27,3	500	0,0546
33,42	600	0,0557
40,11	700	0,0573
47,01	800	0,0588
52,62	900	0,0585
61,15	1000	0,0612
69,09	1100	0,0628
77,46	1200	0,0646
86,49	1300	0,0665
95,62	1400	0,0683
104,43	1500	0,0696
114,78	1600	0,0717
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
4,71	100	
9,07	200	
13,94	300	
18,76	400	
23,41	500	
28,48	600	
33,29	700	

Mecanismo convencional s/ ultrassom		
Filtro: Cerâmico		
ΔP 690mmHg		
S/ Reciclo		
SST	MIN	
TOG:	MAX	
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
9,02	100	0,0902
17,3	200	0,0865
27,27	300	0,0909
37,67	400	0,0942
48,77	500	0,0975
61,45	600	0,1024
72,98	700	0,1043
84,32	800	0,1054
93,33	900	0,1037
107,83	1000	0,1078
120,1	1100	0,1092
134,17	1200	0,1118
148,8	1300	0,1145
163,55	1400	0,1168
177,55	1500	0,1184
190,83	1600	0,1193
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		

t(s)	V(mL)
0	0
4,7	100
8,8	200
13,08	300
17,54	400
21,73	500
27	600
31,85	700

Mecanismo convencional s/ ultrassom		
Filtro: Cerâmico		
ΔP 690mmHg		
S/ Reciclo		
SST	MED	
TOG:	MIN	
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
5,45	100	0,0545
10,55	200	0,0528
16,29	300	0,0543
22,57	400	0,0564
29,45	500	0,0589
36,35	600	0,0606
44,13	700	0,0630
52,01	800	0,0650
58,08	900	0,0645
67,02	1000	0,0670
75,8	1100	0,0689
85.42	1200	0,0712

t(s)	V(mL)	t/V
95,24	1300	0,0733
106,21	1400	0,0759
116,42	1500	0,0776
127,49	1600	0,0797
137,91	1700	0,0811
148,88	1800	0,0827
161,28	1900	0,0849
172,33	2000	0,0862
PÓS- RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
4,45	100	
10,23	200	
14,86	300	
18,73	400	
23,14	500	
27,2	600	
31,58	700	

Mecanismo convencional s/ ultrassom

Filtro: Cerâmico

ΔP 690mmHg

S/ Reciclo

SST	MED
TOG:	MED

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
5,06	100	0,0506
12,58	200	0,0629
19,86	300	0,0662
27,17	400	0,0679
35,17	500	0,0703
43,29	600	0,0722
52,54	700	0,0751
61,48	800	0,0769
70,71	900	0,0786
80,31	1000	0,0803
90,31	1100	0,0821
100,34	1200	0,0836
111,43	1300	0,0857
121,58	1400	0,0868
132,58	1500	0,0884
144,48	1600	0,0903
154,62	1700	0,0910
166,17	1800	0,0923
177,46	1900	0,0934
189,47	2000	0,0947
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
5,26	100	
10,57	200	

t(s)	V(mL)
16,17	300
21,61	400
26,92	500
31,26	600
36,13	700

Mecanismo convencional s/ ultrassom
Filtro: Cerâmico
ΔP 690mmHg
S/ Reciclo

SST	MED
TOG:	MAX

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
7,01	100	0,0701
13,92	200	0,0696
21,61	300	0,0720
29,79	400	0,0745
38,86	500	0,0777
47,58	600	0,0793
57,54	700	0,0822
66,06	800	0,0826
75,29	900	0,0837
86,73	1000	0,0867
97,63	1100	0,0888
108,16	1200	0,0901
119,13	1300	0,0916
130,56	1400	0,0933
141,16	1500	0,0941

t(s)	V(mL)	t/V
152,56	1600	0,0954
162,95	1700	0,0959
174,36	1800	0,0969
184,92	1900	0,0973

**PÓS-
RETROLAVAGEM
V=2L**

t(s)	V(mL)
0	0
4,8	100
9,35	200
14,16	300
18,7	400
23,1	500
27,95	600
31,99	700

Mecanismo convencional s/ ultrassom
Filtro: Cerâmico
ΔP 690mmHg
S/ Reciclo

SST	MAX
TOG:	MIN

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
5,51	100	0,0551
11,89	200	0,0595

t(s)	V(mL)	t/V
18,83	300	0,0628
25,73	400	0,0643
33,73	500	0,0675
41,42	600	0,0690
49,64	700	0,0709
59,08	800	0,0739
66,69	900	0,0741
75,94	1000	0,0759
85,72	1100	0,0779
95,74	1200	0,0798
105,84	1300	0,0814
115,69	1400	0,0826
125,59	1500	0,0837

**PÓS -
RETROLAVAGEM
V=2L**

t(s)	V(mL)
0	0
4,95	100
9,79	200
14,32	300
19,76	400
22,23	500
27,89	600
32,26	700

Mecanismo convencional s/ ultrassom

Filtro: Cerâmico

ΔP 690mmHg

S/ Reciclo

SST MAX

TOG: MED

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
6,35	100	0,0635
11,39	200	0,0570
17,63	300	0,0588
23,92	400	0,0598
31,67	500	0,0633
38,9	600	0,0648
46,13	700	0,0659
54,95	800	0,0687
63,33	900	0,0704
71,8	1000	0,0718
81,05	1100	0,0737
90,62	1200	0,0755
99,74	1300	0,0767

**PÓS-
RETROLAVAGEM
V=2L**

t(s)	V(mL)
0	0
4,85	100
9,65	200

t(s)	V(mL)
13,87	300
18,88	400
22,95	500
26,81	600
31,76	700

Mecanismo convencional s/ ultrassom
Filtro: Cerâmico
 ΔP 690mmHg
S/ Reciclo

SST	MAX
TOG:	MAX

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
6,89	100	0,0689
16,04	200	0,0802
25,2	300	0,0840
33,96	400	0,0849
43,95	500	0,0879
53,76	600	0,0896
63,95	700	0,0914
74,32	800	0,0929
83,14	900	0,0924
92,83	1000	0,0928
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	

t(s)	V(mL)
0	0
6,86	100
13,82	200
20,45	300
27,26	400
34,5	500
41,26	600
48,53	700

Mecanismo convencional com ultrassom
 ΔP 690mmHg
Filtro: Cerâmico

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
3,57	100	0,0357
7,38	200	0,0369
11,23	300	0,0374
15,04	400	0,0376
18,91	500	0,0378
22,6	600	0,0377
26,35	700	0,0376
30,29	800	0,0379

Mecanismo convencional com ultrassom
Filtro: Cerâmico
 ΔP 690mmHg
S/ Reciclo

SST	MIN
------------	------------

TOG: MIN		
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
4,21	100	0,0421
8,28	200	0,0414
12,38	300	0,0413
16,44	400	0,0411
20,29	500	0,0406
24,19	600	0,0403
28,1	700	0,0401
32,33	800	0,0404
37,66	900	0,0418
42,25	1000	0,0423
PÓS- RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
4,92	100	
9,17	200	
13,66	300	
18,09	400	
23,32	500	
27,63	600	
32,34	700	

Mecanismo convencional com ultrassom		
Filtro: Cerâmico		
ΔP 690mmHg		
S/ Reciclo		
SST	MIN	
TOG:	MED	
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
6,29	100	0,0629
13,29	200	0,0665
18,57	300	0,0619
23,76	400	0,0594
29,04	500	0,0581
34,45	600	0,0574
39,61	700	0,0566
45,07	800	0,0563
50,34	900	0,0559
55,62	1000	0,0556
64,46	1100	0,0586
69,58	1200	0,0580
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
4,23	100	
8,57	200	
12,41	300	

t(s)	V(mL)
16,14	400
20,2	500
23,98	600
27,76	700

Mecanismo convencional com ultrassom
Filtro: Cerâmico
ΔP 690mmHg
S/ Reciclo

SST	MIN
TOG:	MAX

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
5,11	100	0,0511
8,45	200	0,0423
11,98	300	0,0399
15,59	400	0,0390
19,1	500	0,0382
21,69	600	0,0362
25,92	700	0,0370
32,16	800	0,0402
36,35	900	0,0404
41,18	1000	0,0412
44,89	1100	0,0408
50,25	1200	0,0419

**PÓS-
RETROLAVAGEM
V=2L**

t(s)	V(mL)
0	0
5,86	100
8,93	200
12,58	300
16,26	400
20,17	500
24,21	600
28,19	700

Mecanismo convencional com ultrassom
Filtro: Cerâmico
ΔP 690mmHg
S/ Reciclo

SST	MED
TOG:	MIN

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
3,79	100	0,0379
7,76	200	0,0388
11,66	300	0,0389
15,54	400	0,0389
19,29	500	0,0386
23,04	600	0,0384
26,85	700	0,0384
30,39	800	0,0380
36,12	900	0,0401
40,02	1000	0,0400
44,1	1100	0,0401

t(s)	V(mL)	t/V
48,18	1200	0,0402
51,9	1300	0,0399
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
4,11	100	
8,2	200	
12,23	300	
16,35	400	
21,02	500	
24,2	600	
28,3	700	

Mecanismo convencional com ultrassom		
Filtro: Cerâmico		
ΔP 690mmHg		
S/ Reciclo		
SST	MED	
TOG:	MED	
t(s)	V(mL)	t/V

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
4,38	100	0,0438
9,35	200	0,0468
13,51	300	0,0450
17,7	400	0,0443
21,85	500	0,0437
26,19	600	0,0437
30,32	700	0,0433
34,79	800	0,0435
39,33	900	0,0437
43,55	1000	0,0436
47,64	1100	0,0433
51,76	1200	0,0431
56,05	1300	0,0431
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
4,35	100	
8,07	200	
12,35	300	
16,39	400	
20,32	500	
24,07	600	
28,02	700	

Mecanismo convencional com ultrassom Filtro: Cerâmico ΔP 690mmHg S/ Reciclo SST MED TOG: MAX		
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
4,33	100	0,0433
8,61	200	0,0431
12,6	300	0,0420
16,36	400	0,0409
20,33	500	0,0407
24,76	600	0,0413
28,92	700	0,0413
33,04	800	0,0413
37,59	900	0,0418
41,77	1000	0,0418
45,73	1100	0,0416
49,67	1200	0,0414
53,8	1300	0,0414
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
5,01	100	

t(s)	V(mL)
9,35	200
13,33	300
17,73	400
21,85	500
25,95	600
30,07	700

Mecanismo convencional com ultrassom Filtro: Cerâmico ΔP 690mmHg S/ Reciclo SST MAX TOG: MIN		
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
5,1	100	0,0510
9,41	200	0,0471
13,79	300	0,0460
18,35	400	0,0459
22,61	500	0,0452
27,01	600	0,0450
31,41	700	0,0449
35,76	800	0,0447
40,68	900	0,0452
45,06	1000	0,0451
49,21	1100	0,0447
53,21	1200	0,0443
57,71	1300	0,0444
61,9	1400	0,0442

PÓS-RETROLAVAGEM V=2L	
t(s)	V(mL)
0	0
4,33	100
9,2	200
13,64	300
17,78	400
22,09	500
26,52	600
30,55	700

Mecanismo convencional com ultrassom Filtro: Cerâmico ΔP 690mmHg S/ Reciclo		
SST	MAX	
TOG:	MED	
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
4,61	100	0,0461
8,95	200	0,0448
13,33	300	0,0444
17,7	400	0,0443
21,61	500	0,0432
26,69	600	0,0445
29,66	700	0,0424

t(s)	V(mL)	t/V
34,17	800	0,0427
40,4	900	0,0449
44,68	1000	0,0447
48,8	1100	0,0444
52,83	1200	0,0440
56,96	1300	0,0438
61,11	1400	0,0437
PÓS RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
4,79	100	
9,29	200	
13,59	300	
18,07	400	
22,53	500	
26,57	600	
30,95	700	

Mecanismo convencional com ultrassom		
Filtro: Cerâmico		
ΔP 690mmHg		
S/ Reciclo		
SST	MAX	
TOG:	MAX	
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
4,6	100	0,0460
9,13	200	0,0457
13,56	300	0,0452
17,91	400	0,0448
22,38	500	0,0448
26,73	600	0,0446
31,29	700	0,0447
35,88	800	0,0449
40,42	900	0,0449
44,77	1000	0,0448
49,33	1100	0,0448
53,83	1200	0,0449
58,42	1300	0,0449

t(s)	V(mL)	t/V
63,21	1400	0,0452
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
5,52	100	
10,67	200	
15,8	300	
20,98	400	
25,98	500	
31,04	600	
36,33	700	

APÊNDICE C – Resultados Experimentais com água produzida real

C.1 – Siririzinho

Mecanismo tangencial ΔP 690mmHg S/ Reciclo TOG: 615		
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
12,7	100	0,1270
23,3	200	0,1165
35,51	300	0,1184
48,08	400	0,1202
61,1	500	0,1222
75,08	600	0,1251
91	700	0,1300
107,1	800	0,1339
124,01	900	0,1378
140,36	1000	0,1404
157,48	1100	0,1432
175,1	1200	0,1459
193,1	1300	0,1485
212,1	1400	0,1515
231,1	1500	0,1541
252,1	1600	0,1576

t(s)	V(mL)	t/V
273,24	1700	0,1607
295,49	1800	0,1642
317,1	1900	0,1669
340,1	2000	0,1701
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
7,57	100	
14,08	200	
20,42	300	
26,7	400	
32,73	500	
39,14	600	
45,86	700	
Mecanismo convencional ΔP 690mmHg TOG: 615		

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
20,04	100	0,2004
39,42	200	0,1971
61,1	300	0,2037
81,2	400	0,2030
104	500	0,2080
125	600	0,2083
147,1	700	0,2101
169	800	0,2113
193,13	900	0,2146
215,73	1000	0,2157
240	1100	0,2182
264,1	1200	0,2201
290	1300	0,2231
316	1400	0,2257
343	1500	0,2287
370,1	1600	0,2313
399,02	1700	0,2347
427,21	1800	0,2373
455,1	1900	0,2395
474,1	2000	0,2371
PÓS- RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
3,76	100	
7,76	200	

t(s)	V(mL)
11,48	300
15,29	400
19,2	500
23,11	600
26,89	700

Mecanismo convencional com ultrassom ΔP 690mmHg		
TOG:	615	
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
4,35	100	0,0435
9,13	200	0,0457
13,79	300	0,0460
18,63	400	0,0466
23,36	500	0,0467
28,35	600	0,0473
33,38	700	0,0477
38,69	800	0,0484
43,83	900	0,0487
53,39	1000	0,0534
63,67	1100	0,0579
74,92	1200	0,0624
87,04	1300	0,0670
99,49	1400	0,0711
113,69	1500	0,0758
121,1	1600	0,0757
127,6	1700	0,0751

t(s)	V(mL)	t/V
134,04	1800	0,0745
140,76	1900	0,0741
147,73	2000	0,0739
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
5,26	100	
8,98	200	
13,26	300	
17,29	400	
21,1	500	
25,01	600	
29,04	700	

C.2 Bonsucesso

Mecanismo tangencial		
ΔP 690mmHg		
TOG:	30 ppm	
t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
6,98	100	0,0698
12,88	200	0,0644

t(s)	V(mL)	t/V
18,26	300	0,0609
24,01	400	0,0600
29,76	500	0,0595
34,88	600	0,0581
40,98	700	0,0585
46,82	800	0,0585
53,86	900	0,0598
59,63	1000	0,0596
65,8	1100	0,0598
71,65	1200	0,0597
78,11	1300	0,0601
84	1400	0,0600
90,71	1500	0,0605
96,2	1600	0,0601
102,99	1700	0,0606
109,12	1800	0,0606
115,21	1900	0,0606
121,87	2000	0,0609
128,53	2100	0,0612
134,58	2200	0,0612
141,43	2300	0,0615
147,59	2400	0,0615
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	
7,17	100	

t(s)	V(mL)
13,58	200
25,83	300
33,04	400
38,26	500
45,64	600
53,36	700

Mecanismo convencional sem ultrassom
ΔP 690mmHg

TOG: 30 ppm

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
5,26	100	0,0526
10,34	200	0,0517
15,42	300	0,0514
20,73	400	0,0518
25,86	500	0,0517
31,11	600	0,0519
36,86	700	0,0527
42,33	800	0,0529
48,35	900	0,0537
54	1000	0,0540
59,78	1100	0,0543
65,48	1200	0,0546
71,31	1300	0,0549
77,57	1400	0,0554
83,69	1500	0,0558
89,75	1600	0,0561

t(s)	V(mL)	t/V
96,23	1700	0,0566
101,9	1800	0,0566
108,86	1900	0,0573
115,5	2000	0,0578
121,98	2100	0,0581
129,05	2200	0,0587
136,3	2300	0,0593
146,11	2400	0,0609

**PÓS -
RETROLAVAGEM**
V=2L

t(s)	V(mL)
0	0
4,58	100
8,76	200
13,04	300
17,36	400
21,48	500
25,93	600
30,23	700

Mecanismo convencional com ultrassom
ΔP 690mmHg

TOG: 30 ppm

t(s)	V(mL)	t/V
0	0	0,0000
4,67	100	0,0467

t(s)	V(mL)	t/V
9,08	200	0,0454
13,07	300	0,0436
17,26	400	0,0432
21,39	500	0,0428
25,58	600	0,0426
29,98	700	0,0428
34,2	800	0,0428
38,9	900	0,0432
43,11	1000	0,0431
47,36	1100	0,0431
51,52	1200	0,0429
55,55	1300	0,0427
59,65	1400	0,0426
64,43	1500	0,0430
69,15	1600	0,0432
74,47	1700	0,0438
78,72	1800	0,0437
82,97	1900	0,0437
87,32	2000	0,0437
91,6	2100	0,0436
96,07	2200	0,0437
100,85	2300	0,0438
105,47	2400	0,0439
PÓS - RETROLAVAGEM V=2L		
t(s)	V(mL)	
0	0	

t(s)	V(mL)
3,89	100
7,55	200
10,75	300
14,39	400
17,9	500
21,3	600
24,93	700